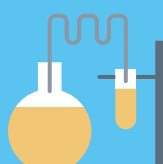
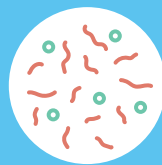
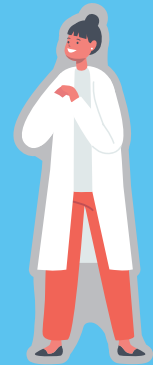


2024 - 2025 基礎科学 特別研究員 年報

Special Postdoctoral Researcher Program
2024 - 2025 Annual Report



2024-25

基礎科学研究員年報

Special Postdoctoral Researcher Program

2024-25 Annual Report

国立研究開発法人理化学研究所

[凡例]

各研究報告の末尾に揚げた誌上発表 (Publications) の原著論文等のうち、*印を付したものは査読精度がある論文誌であることを示します。

[Note]

In the list of Publications (original papers) at the end of each report, those marked with an asterisk (*) indicate peer review journals.

はじめに

本年報は、理化学研究所に在籍する基礎科学特別研究員の令和6年度（2024年度）における研究報告です。制度の概要については、以下のとおりです。

設立の経緯

今後の科学技術を飛躍的に発展させ、わが国が豊かな社会を築き国際社会に貢献していくためには、創造性豊かな科学技術の発展が不可欠となっています。このような状況を踏まえ平成元年度の新たな施策として、科学技術庁（現 文部科学省）と理化学研究所が連携して独創的・基礎的研究を強力に推進する基礎科学特別研究員制度を創設しました。その後の定員の拡充等制度の充実に伴い、本制度の運用は平成7年度より理研に全面移管されています。平成19年度に創設された基礎科学特別研究員制度の外国人版である国際特別研究員と、平成28年度より統合し、より世界に開かれた、優秀な若手研究者を支援する制度として新たなスタートを切りました。

制度の内容

本制度は、理化学研究所が、創造性、独創性に富む優れた若手研究者に自主的に研究できる場を与え、その力を十分に発現させることにより基礎科学発展の担い手として活躍を期待する制度です。対象とする研究分野は、数理科学、物理学I、物理学II、化学、生物科学、医科学、工学の学際的分野を含む科学技術分野で、理研で実施可能な研究です。

対象者は博士号取得者で、自らが理研において実施を希望する研究課題と理研の研究領域を勘案して設定した研究課題を自主的に遂行する意志のある者です。毎年、公募により募集を行い、所内研究者と外部有識者で構成される委員会で審査（書類審査、面接審査）・選考を行っています。平成30年度に採用された方より3年間の複数年契約を締結し、更に安定して研究に集中することが可能な環境が整えられました。

基礎科学特別研究員の受け入れにあたっては、研究課題を自主的に遂行できるよう受入研究室を定めて、必要な研究スペースの確保、研究施設及び設備の利用について便宜を図り、基礎科学特別研究員は所属長から助言を受けることができます。

平成20年10月からは育児休業取得者に対する在籍期間延長など規程の見直しも行い、本制度においてより良い研究環境を提供できるよう、ワークライフバランスにも配慮しています。また、近年の基礎科学特別研究員制度を取り巻く環境の変化を考慮し、令和5年度より給与及び研究費の増額を行うなど、支援を拡充しています。

これまで、2,033名の基礎科学特別研究員、153名の国際特別研究員（平成30年度で受入 終了）を受け入れており（令和7年3月現在）、現在の在籍者数は基礎科学特別研究員159名となっています。（令和7年10月現在）

令和7年10月
国立研究開発法人理化学研究所

Foreword

This Annual Report is a compilation of the research reports submitted by the Special Postdoctoral Researchers (SPDRs) working at RIKEN in fiscal 2024. The outline of the programs is as follows.

The programs

Creativity is required for the rapid advance of science and technology that will benefit Japanese society and contribute to the international community. To fill this need, RIKEN, in collaboration with the former Science and Technology Agency (currently a part of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology), launched the Special Postdoctoral Researcher (SPDR) Program in fiscal 1989. In fiscal 1997, the program was expanded to accommodate a larger number of candidates, and the program management was transferred to RIKEN. From fiscal 2016 the SPDR program has been merged with the Foreign Postdoctoral Researcher (FPR) program, launched in fiscal 2007 to provide young foreign researchers with similar opportunities, to form a new SPDR program to support excellent young researchers from Japan and overseas.

Program Features

The SPDR program offers young researchers with creative and innovative ideas an environment in which they can pursue independent research and prepare themselves to play a major role in advancing basic science. Fields covered include mathematical sciences, physicsI, physicsII, chemistry, biology, medical science, engineering, and any other fields related to research now being conducted at RIKEN.

SPDRs must have a PhD at the time of application, and must be able to independently pursue research themes decided on the basis of what they want to pursue and how that fits in with the research being conducted at RIKEN.

Candidates are recruited every year through open application, and selection is made by a committee comprised of outside experts as well as RIKEN scientists. Selection is based on submitted documents and interviews. From 2018 the SPDR contract has become a multiple-year contract valid for three (3) years in order to provide an environment with greater stability for the researchers so they are able to focus on carrying out their research.

Host laboratories must provide the SPDRs with an environment conducive to independent research, sufficient research space, and support for the use of required research facilities and equipment, as well as guidance from the laboratory head.

Since October 2008, revisions have been introduced in the program regulations to ensure a better work- life balance, such as allowing program extension when an SPDR has to take time off for childcare.

In addition, with consideration to changes in the environment surrounding the SPDR program in recent years, the support for the SPDRs has been expanded since FY2023, including increases in salary and research budget.

Since the program started, there have been a total of 2,033 SPDRs and 153 FPRs and there are currently 159 SPDRs (as of October 2025).

October 2025
RIKEN

目 次

2020年度採用者

XX-001	汎関数繰り込み群に基づいた密度汎関数理論による量子多体系の新たな第一原理的解析法の開発	横田 猛 17
--------	---	---------------

2021年度採用者

XXI-001	特性イプシロンサイクル及び導手公式の精密化	竹内 大智 21
XXI-002	定曲率ローレンツ多様体上の大域解析	甘中 一輝 22
XXI-003	代数多様体の最適退化と標準計量	井上 瑛二 22
XXI-004	DALI, an axion dark-matter telescope probing the 6 to 60 GHz band	Javier DE MIGUEL 23 HERNANDEZ
XXI-005	マルチストレンジネス核におけるハイペロン間相互作用の研究	江川 弘行 24
XXI-006	多波長観測によるブラックホールのスピンの測定とその宇宙論的な解釈	川室 太希 24
XXI-007	オスの養育行動促進回路の形成メカニズム	稲田 健吾 25
XXI-008	環境応答に伴うトランスクリプトーム変化を用いた交差耐性・交差感受性の予測	佐藤 匠哉 26
XXI-009	遺伝性心筋症における統合的オミックス解析に基づいた心不全進展機序の解明	寺本 了太 27
XXI-010	Using Pooled Cell Libraries to Associate Genetic Variance with Responses to Stimulus	Steven Matthew 28 HEATON
XXI-011	Investigating the Neural and Behavioral Mechanisms of Motor Skill Learning with Robotic Assistance, Passive Movement, and the Sense of Agency	Ethan OBLAK 29
XXI-012	Multi-modal Image Processing and Data Fusion for Collaborative Brain Image Analysis	Matthias Wilfried 29 SCHLACHTER
XXI-013	Towards twisted light devices with single-walled carbon nanotubes	Chee Fai FONG 30
XXI-014	超大型ウォルターミラーの開発とX線顕微鏡・望遠鏡への応用	山口 豪太 31

2022年度採用者

XXII-001	s-不変量のホモトピー的特徴づけとその応用	佐野 岳人	35
XXII-002	Optimal Transport and Euclidean Quantum Gravity	Christy Koji KELLY	36
XXII-003	共形場理論の構成と変形の数学的研究	森脇 湧登	36
XXII-004	理想的気候条件下における大規模雲群の自己組織化と多階層構造	柳瀬 友朗	37
XXII-005	等質空間上の調和 q-指数型分布族の分類	東條 広一	38
XXII-006	拡張された平均場理論を用いた原子核短距離相関の研究	内藤 智也	39
XXII-007	Heavy Quarks In The Viscous And Hot Magnetized QCD Medium And Its Phenomenological Implications In Relativistic Heavy-ion Collisions	Manu KURIAN	41
XXII-008	分子組成分布と機械学習を活用した星・惑星系形成の最初期過程の解明	大小田 結貴	42
XXII-009	New Technologies to Study Electric Properties of Exotic Nuclei	Martha Liliana CORTES SUA	43
XXII-010	High-mass Star Formation	Ross Alexander BURNS	44
XXII-011	超高空間分解能の赤外線観測と多波長観測による合体銀河が宇宙進化に果たした役割の解明	山田 智史	45
XXII-012	銀河磁場モデルに基づく最高エネルギー宇宙線起源天体の特定	樋口 諒	47
XXII-013	Nanostructured devices of quantum materials	Thomas Maximilian BIRCH	48
XXII-014	量子計算機を制御する超伝導量子インターフェース回路	向井 寛人	49
XXII-015	フラストレート格子上のトポロジカル物性	村山 陽奈子	50
XXII-016	普遍金属触媒が協働する有機ナトリウム化学の開拓	高橋 一光	51
XXII-017	分子のねじれを利用するエネルギー変換素子の創出	齋藤 仁志	51
XXII-018	強誘電異方性流体の創発物性機能の理解からさらなる新展開へ	西川 浩矢	52
XXII-019	Developing a Method for Extracting Cascades from <i>C. elegans</i> Whole-Brain Activities.	Chentao WEN	53
XXII-020	直列重複かつ冗長タイプの重複遺伝子を対象とした環境ストレス応答・馴化メカニズムの探索	江副 晃洋	55
XXII-021	大規模フィールドオミクス解析による、葉-根間の栄養バランス調節を司る遺伝子制御ネットワークの解明	大熊 直生	56

XXII-022	新生児マウスにおける低温耐性喪失機構の解明	齋藤 祐一	57
XXII-023	分裂期の染色体動態によって制御される受精卵の核内染色体配置と遺伝子発現プロファイルの解明	竹之内 修	58
XXII-024	植物遺伝学とケミカルバイオロジーの融合による葉緑体オートファジーの分子理解と応用展開	中村 咲耶	59
XXII-025	Understanding the Role and the Limits of Niche Conservatism in Speciation	Jose Said GUTIERREZ ORTEGA	59
XXII-026	チロシンセンシングを基軸とした新規寿命延長機構の解明	小坂元 陽奈	61
XXII-027	MECHANICAL ROLE OF YOLK-CYTOPLASM SEGREGATION IN EARLY EMBRYONIC DEVELOPMENT	Sameer THUKRAL	62
XXII-028	Decoding Gall Formation: A Computational Approach to Cellular Reorganization	Xin TONG	63
XXII-029	MOLECULAR MECHANISMS UNDERLYING LIGHT-MEDIATED REGENERATION	Yetkin Caka INCE	64
XXII-030	Evolution in non-standard genetic systems	Thomas James HITCHCOCK	65
XXII-031	Neocortical Circuits and Physiological States Underlying the Volitional Control of the Vocal Output in Marmoset Monkeys.	Cristina RISUENO SEGOVIA	66
XXII-032	Elucidating the Brain Mechanisms of Fatigue in Motor and Cognitive Functions Using Ultra-High-Field fMRI	Sofia NAGISA	67
XXII-033	血管内皮幹細胞を標的とした新規治療法探索のための患者特異的iPS細胞を用いたVHL病モデルの構築	伊藤 秀矩	68
XXII-034	Investigating Information Processing Strategies among Normal Ageing and Mild Cognitive Impairment Populations: An Eye-Movement Study	Alexandra Janina WOLF	69
XXII-035	自律神経中枢による発熱と免疫応答の制御機構の解明	内田 俊太郎	71
XXII-036	Human Variation Driven by Mobile Genetic Elements: Disease Association and Evolution	小嶋 将平	71
XXII-037	微生物を用いたCO ₂ からの高付加価値化合物生産技術の開発	藤原 良介	73
XXII-038	Recording Time-stamped Biological Events into Cellular DNA Through Genome Editing	Chih-Chieh (Jay) YU	74
XXII-039	光合成における光電変換機構の解明を目指した光STMと生体分子蒸着法の融合	今井 みやび	75
XXII-040	Advanced Designs and Characterization of Josephson Traveling-Wave Parametric Amplifiers	Chung Wai Sandbo CHANG	76

XXII-041	細胞膜の機械特性と遺伝子発現の統合解析による老化の解明	塩見 晃史	77
XXII-042	高分子科学と工学の融合による高感度疾患診断デバイスの開発	上田 智也	78

2023年度採用者

XXIII-001	高次元汚染データに頑健な汎用機械学習の確立	藤澤 将広	81
XXIII-002	進化戦略とベイズ最適化の融合による新品種開発における意思決定の最適化	濱崎 甲資	82
XXIII-003	作用素環の対称性の探求と、機械学習の数学的枠組みの構築	紅村 冬大	83
XXIII-004	トロピカル幾何学を用いた対数的Hodge構造の研究	山本 悠登	84
XXIII-005	誤り耐性超伝導量子計算機の実現に向けた古典-量子デバイスを統合する計算機システムアーキテクチャの研究	上野 洋典	85
XXIII-006	グラフ低ランク分解	ガラムカリ 和	86
XXIII-007	力学系の不変性に着目した生物における生理的制約を考慮する学習則	中村 絢斗	87
XXIII-008	低エネルギー核物理と高エネルギー天文学で探るI型X線バースト機構の解明	土肥 明	88
XXIII-009	Elucidating nucleon's mass and spin structures	Raza Sabbir SUFIAN	89
XXIII-010	Structure and Spectroscopy of Hadrons from the Quark Model	Ahmad Jafar ARIFI	90
XXIII-011	Universality in atomic and nuclear few-body systems	Lucas Michael Carlo HAPP	91
XXIII-012	Testing Strong Gravity with Black Holes: Gravitational Waves and Shadows	Che-Yu CHEN	92
XXIII-013	ミュオン原子X線精密分光による原子核半径の高精度決定	齋藤 岳志	93
XXIII-014	CP対称性の破れを探る重い原子核の殻模型計算	柳瀬 宏太	94
XXIII-015	連星系内の激しい相互作用と大質量星の多様な進化	平井 遼介	94
XXIII-016	横偏極陽子・陽子衝突実験の光子-ジェット対生成を用いたグルーオン軌道回転運動の研究	糠塚 元気	95
XXIII-017	Nitrogen-bearing Organic Molecules as a Probe to Study Interstellar Nitrogen Chemistry	Shaoshan ZENG	97
XXIII-018	トポロジカル超伝導体探索指針の確立とその検出理論の構築	小野 清志郎	98
XXIII-019	対称性適合多極基底を用いた第一原理有効模型計算法の開発と応用	大岩 陸人	99

XXIII-020	音響微小リング共振器を用いたカイラル量子ネットワークの開発	佐々木 遼 100
XXIII-021	Nonlinear responses, band geometry, and supersolids in density wave systems	Yingming XIE 101
XXIII-022	一般化アンサンブルを用いた有限温度シミュレーションのための量子アルゴリズムの開発	米田 靖史 102
XXIII-023	Materials Design of High-Temperature Superconductors and Quantum Spin Liquids from a Machine Learning Multiscale First-Principles Approach	Jean-Baptiste Pierre 103 Guy MOREE
XXIII-024	Resolving the Water Paradox: Thermally Driven Water Dynamics in Polyester Microdroplet Protocells for Peptide Bond Formation	Chen CHEN 104
XXIII-025	Transformation of Dinitrogen into Nitrogen-Containing Organic Compounds by Metal Hydride Complexes	Xiaoxi ZHOU 105
XXIII-026	Study on Electrochemical Interface Determining the Selective Oxygen Evolution Reaction in Acidic Seawater Conditions	Taejung LIM 106
XXIII-027	新構造型ヒドリド伝導体の探索と拡散メカニズム	矢口 寛 107
XXIII-028	対称ビスカルベンによる規則正しく配列するランタノイド単分子磁石の表面上での合成	田中 慶大 108
XXIII-029	霊長類における心的時間超越を伴う因果推論の神経機構の解明	永野 茜 108
XXIII-030	メタボロミクスによる葉のサイズ制御を司るマスター因子の探索	多部田 弘光 109
XXIII-031	ゼブラフィッシュにおけるGlycometabolome - 魚類の糖鎖機能の解明に向けた挑戦 -	本田 晃伸 111
XXIII-032	Pathogen recognition landscape of leucine-rich repeat receptor kinases in plants	Pok Man NGOU 112
XXIII-033	培養して明らかにするDPANNアーキアの真の生理生態	酒井 博之 113
XXIII-034	新規細胞極性「細胞キラリティ」に起源する多細胞の左右非対称性形成原理の解明	石橋 朋樹 114
XXIII-035	エクトドメインシェディングの基質選択を制御するリン酸化ネットワーク分子基盤の解明	津曲 和哉 115
XXIII-036	Study of the amygdalostriatal pathway in active avoidance processes in rats.	Mehdi Julien SICRE 116
XXIII-037	ニチニチソウ種子発芽過程における細胞の代謝的分化過程の解析	鶴崎 真妃 117
XXIII-038	動的環境下での多種微生物の共培養・共進化を可能とする自動実験システムの開発	芝井 厚 118

XXIII-039	Co-Evolution and Fusion of Interspecific Microbes for the Creation of New-to-Nature Metabolites	Yu ZHENG 118
XXIII-040	確率論的なWnt応答軟骨芽細胞の発生を起点とした気管縞状軟骨パターン形成機構の解明	中山 彰吾 120
XXIII-041	Early-life Environmental Impact on Critical Neuronal Circuits of Vocal Development	Jay Patrick 121 NAKAMURA
XXIII-042	層別機能的MRIによる精神疾患につながる脳ネットワーク解明のための技術開発とその精度評価	木村 一皓 121
XXIII-043	大規模神経活動記録により発見されたハブ細胞の分子基盤の解明	大本 育実 123
XXIII-044	Hunger Memory: How Brain Oscillations Translate Energy Homeostatic Status	Yijun ZHOU 123
XXIII-045	クローン性造血の解析を通じた疾患リスクの精緻化：ゲノム情報から環境要因の蓄積の評価	碓井 喜明 124
XXIII-046	新規な凝集体構造プロファイリングの技術開発によるタウ凝集体の構造伝播機構解明	佐野 俊春 125
XXIII-047	転写因子の機能異常による免疫疾患の分子病態解明と治療法の創出	山下 基 126
XXIII-048	単層薄膜を利用した低エネルギーアト秒電子ビームの生成と原子運動量分光への応用	立花 佑一 126
XXIII-049	Adaptive Low-rank Tensor Network Decomposition: Theory and Application	Yuning QIU 127
XXIII-050	定理証明支援系を用いた組合せ範疇文法の形式化	谷口 雅弥 129
XXIII-051	あらゆる植物種でミトコンドリアゲノム編集を可能とする、植物普遍的なポロソ酸輸送体を標的とした革新的メッセンジャーRNA送達システムの創成	吉永 直人 130
XXIII-052	Precisely Controlled Anisotropic Assembly of Colloidal Quantum Dots: Size, Energy Level, and Chemical Composition	Retno MIRANTI 131

2024年度採用者

XXIV-001	局所コンパクト群上の畳み込みに関する不等式と表現論・調和解析の関連	里見 貴志 135
XXIV-002	モチーフ理論の拡張とその数論幾何学への応用	小泉 淳之介 136
XXIV-003	計算資源制限下でも実現可能な脳の学習原理の解明	鳥取 岳広 136
XXIV-004	多階層進化理論による社会構造の構成的記述	板尾 健司 137

XXIV-005	A Canonical Task for Modeling Naturalistic Motor Learning	Matthew Stuart 138 FARRELL
XXIV-006	量子群の非可換トポロジーの探求とその応用	北村 侃 139
XXIV-007	不確実性を考慮した深層学習向けの専用ハードウェアアーキテクチャ	西田 圭吾 140
XXIV-008	Tracing the journey of molecular complexity in star forming regions via Deuterium Fractionation	Judit FERRER 141 _I_ASENSIO
XXIV-009	原子核の多様なクラスター構造研究：アイソスピン回転を用いた新展開	小山 俊平 142
XXIV-010	非平衡量子ダイナミクスによるホログラフィーの解明	福島 理 143
XXIV-011	強結合の場の理論の真空構造の解明	菅野 颯人 144
XXIV-012	一般化された対称性の格子ゲージ理論の観点からの厳密な定式化	森川 億人 145
XXIV-013	Finding the Missing Sulfur in the “Hot Disks” of Massive Protostars	Ziwei ZHANG 147
XXIV-014	重いクォーク測定による小さな衝突系におけるQGP研究	関口 裕子 148
XXIV-015	Achieving Robust Single-Photon Blockade with a Single Nanotip	Ran HUANG 149
XXIV-016	精密宇宙観測を実現するサブミリ波分光撮像技術の開拓	宇野 慎介 149
XXIV-017	Implementation of a Cold Strontium Atomic Interferometer for Gravitational Acceleration Sensing on an Optical Lattice Clock Apparatus	Quentin 150 D'ARMAGNAC DE CASTANET
XXIV-018	2色励起発光によるTHz応答測定法の開拓	西留 比呂幸 151
XXIV-019	拡張多極子をもたらす新奇な量子多体物理	野垣 康介 152
XXIV-020	局所および準局所保存量に基づく孤立量子系の熱平衡化の時間スケールの解明	千葉 侑哉 153
XXIV-021	高次Berry位相を用いたトポロジカル相の理論的研究	大山 修平 154
XXIV-022	第一原理計算に基づいたトポロジカル磁気構造における非平衡ダイナミクスと量子輸送現象の開拓	清水 宏太郎 155
XXIV-023	ファンデルワールス層状超伝導体を用いた対称性制御と新奇超伝導物性 の開拓	板橋 勇輝 156
XXIV-024	パルス強磁場・高圧力下トンネル分光測定の開発と応用	二本木 克旭 157
XXIV-025	結晶成長におけるトポロジカル相に誘起される非平衡パターン形成の 研究	田中 悠太郎 158
XXIV-026	Rare-Earth Metal Catalysis for Multi-functional Polymer Synthesis	Mengqing CHEN 159

XXIV-027	生体内で安定な人工金属触媒の開発と、組織特異的SQLE分解誘導剤合成への応用	吉岡 広大 159
XXIV-028	局所分子構造を反映する超高速キラル識別法の開拓： 光電子ヘリカル二色性の実証	池田 大 160
XXIV-029	酵素の基質認識能の曖昧さを活かしたCO ₂ 固定化技術の創成	四坂 勇磨 161
XXIV-030	Enzymatic Reaction into a Droplet	Elisa Liliane, 161 Bernadette RIOUAL
XXIV-031	細胞および生態系の代謝挙動の一般理論： 経済学と物理学からのアプローチ	山岸 純平162
XXIV-032	Exploring the Symmetry Diversification Mechanism via Analyzing the Morphological and Molecular Aspects of Diadumene Lineata Segmentation Patterning	Safiye Esra SARPER 163
XXIV-033	Molecular Controls of Plant Totipotency in Embryogenesis	Ping KAO 164
XXIV-034	Visualizing the 3D Architecture of Bacterial Photosynthetic Apparatus	Laura BRACUN 165
XXIV-035	Unlocking the Secrets Behind DHLC Biosynthesis: A Groundbreaking Solution to Combat Malaria Spread	Islam Adel Abdelhakim ... 166 AMIN
XXIV-036	アクチン細胞骨格が司るシグナル発生場形成の構成的理解	山本 啓 167
XXIV-037	細胞外マトリックスと接着分子のダイナミクスによる毛包幹細胞の運命制御 メカニズムの解明	大町 紘平 168
XXIV-038	Uncovering the Specific Roles of Phytohormone Co-Receptors Using Artificial Molecules	Jekson ROBERTLEE 169
XXIV-039	シストセンチュウ孵化促進物質の植物生理機能の解明	秋山 遼太 170
XXIV-040	マルチオミクス解析を起点とした四肢再生時の発生プログラム再起動 機構の解明	浅倉 祥文 171
XXIV-041	新規ハイスループットリボソームプロファイリング法による概日時計に おける翻訳制御メカニズムの解明	河本 尚大 171
XXIV-042	海馬－嗅内皮質回路における空間ナビゲーションの神経機構の解明	大内 彩子 172
XXIV-043	Investigate the therapeutic effect of immune cell therapy in the tumor microenvironment	Yun-Hsuan CHANG 173
XXIV-044	Mirror Neuron System Underlying Decision-Making in Social Interactions	Binglun LI 174
XXIV-045	空間トランスクリプトーム解析による統合失調症責任遺伝子群が もたらす共通分子病理の解明	中村 匠 175

XXIV-046	自己免疫疾患発症を抑制する核内因子 AIRE による新奇遺伝子発現調節機構の同定	宮尾 貴久176
XXIV-047	Identification of RNA-binding protein regulators of immunogenic non-coding RNAs through CRISPR knockout screening	Ahmad Luqman Bin177 ABDUL FATAH
XXIV-048	極超広視野二光子顕微鏡を用いた知覚生成の神経メカニズム解明	石津 光太郎178
XXIV-049	Cortico-Subcortical Neuronal Circuits Integrating Aversive Emotional States with Decision-Making	Tomoya OHNUKI178
XXIV-050	Elucidating The Circuit Mechanisms of Insight in the Mammalian Brain.	Hongshen HE179
XXIV-051	単一細胞発火で駆動する超微小レーザーの開発と全光での電気生理学解析法の創成	川崎 大輝180
XXIV-052	ナノ流体デバイスが拓く単一酵素分子の自己駆動拡散の直接計測	山本 晃毅180
XXIV-053	Automated Development of Databases of Histological Brain Imaging Data in Alzheimer’s Disease	Charissa Ting181 Amanda POON
XXIV-054	協調ゲーム理論を応用した人間と人工エージェント・ロボットの共創的意思決定メカニズムの解明	堀部 和也182
XXIV-055	Integrating Linguistic and Non-linguistic Information for Narrative Descriptions of Android Robots	Bowen WU183
XXIV-056	The Development of Tunnel Junction AlGaIn-based 220-230nm LEDs for “Human Safe” Disinfection and Sterilization Applications.	Muhammad Nawaz184 SHARIF

基礎科学特別研究員
2020 年度採用者

XX-001 汎関数繰り込み群に基づいた密度汎関数理論による量子多体系の新たな第一原理的解析法の開発

Development of first-principles methods for quantum many-body systems based on functional renormalization-group aided density functional theory

研究者氏名：横田 猛 Takeru YOKOTA

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

本研究課題は、物質の性質のミクロな構成粒子のレベルに基づいた解析、つまり多体問題の手法開発についてのものである。特に汎関数繰り込み群(FRG)や密度汎関数理論といった手法をテーマに研究を進めている。このようなアプローチでは、汎関数微分方程式(FDE)という複雑な偏微分方程式(PDE)をいかに解くかという問題に直面する。そこで本年度は主にFDEを解くアルゴリズムの開発に注力した。特に、近年急速に発展しているPDEを解く方法にPhysics-informed neural networks (PINNs)という機械学習に基づいた方法があり、その方法を用いてFDEを解く新たな手法を開発した。具体的には、格子空間などを導入することでFDEを高次元のPDEにすることができ、それにPINNを適用できるというアイデアを生み出した。その方法をFRGで現れるFDEに適用し、有効作用という多体系の様々な情報を持った量を計算するための定式化をまとめた。具体的な計算例として、ゼロ次元 $O(N)$ モデルという厳密解が知られたモデルに適用し、精度やどのくらいの複雑な系を解けるかを調べた。厳密解や摂動計算との比較により、この方法が実際に高精度なFRGの解法として機能することを数値的に示した。また、この方法では一つの場の配位だけではなく

様々な場の配位について同時に有効作用を求めることができる。このことから、非一様系といった従来のFRGの方法では太刀打ちするのが難しかった場合への新たなアプローチになると期待できる。本研究課題では密度汎関数理論への応用をテーマとして据えているが、この機械学習の方法はそれに対しても応用でき、本研究課題を大きく推し進めるための技術になり得る。本年度の研究をさらに有限次元の系に応用し、スカラーモデルにおける非一様状態や物質中の非一様な密度の電子に応用することは興味深い。さらにこのPINNsに基づいた方法は汎用的な方法で、フォック-プランク方程式といった統計系で現れる式への応用なども見通すことができ、このような広い分野への応用、およびPINNs自体の基礎的研究も含め今後の研究の展開が見込まれる。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Takeru Yokota, Physics-informed neural networks for solving functional renormalization group on a lattice, Phys. Rev. B 109, 214205 (2024).

基礎科学特別研究員
2021 年度採用者

XXI-001 特性イプシロンサイクル及び導手公式の精密化

On Refinements of Characteristic Epsilon Cycles and Conductor Formula

研究者氏名：竹内 大智 Daichi TAKEUCHI

受入研究室：革新知能統合研究センター

汎用基盤技術研究グループ

数理科学チーム

(所属長 坂内 健一)

本年度は主に、混標数のスキームに対して nearby cycles functor の理論を構築する研究に取り組んだ。nearby cycles とは、多様体上の関数の critical point の様子をコホモロジー的に捉えようとした時に自然に現れる対象である。 X を多様体とする(複素多様体でもよいし、有限体等の正標数の体上の代数多様体でもよい)。 X 上の関数 f は affine 直線 A への射と見做せるが、これを多様体の族、あるいはファイブレーションと考えることにする。そして f が A の原点で特異点を持っている状況を考える。具体例としては楕円曲線の族がある。 A でパラメータ付けられた楕円曲線の族であり、一般の点に対応する楕円曲線は滑らかだが原点に対応するものは退化している(つまり特異点を持っている)ものがあれば、その族の全空間を X として、 A への射影を f とすれば上のような状況になる。そのような X と f が与えられたとき、複素の場合は Milnor の定理により、原点の周りの任意に小さな近傍内にある一般の点 x に対して、 f の x 上のファイバーは x によらずに同型になることが知られている。特にそのコホモロジーは同型であり、これを nearby cycles cohomology とよぶ。この nearby cycles にはモノドロミー作用という自然な群の作用が付随しており、考えているコホモロジーは群の表現となる。このような構成を通

して、特異点の様子を表現論的に調べることができるといのが nearby cycles の理論の特徴である。

Nearby cycles の理論を混標数のスキームという体上の多様体ではない、より数論的な幾何学的対象に対して構成する問題を考える。多様体の場合には、affine 直線は一次元であり幾何的な性質が調べやすかった。一方で混標数の場合は考えるべき「affine 直線」は二次元になり、素朴な方法では nearby cycles を定義するのは困難である。本年度は Scholze 氏により開発された diamond のエタールコホモロジー論を使うことで、この困難を克服し nearby cycles を定義することに成功した。今後は nearby cycles の性質を調べて混標数の特異点論等に使えるような道具にしていきたい。

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Daichi Takeuchi : “Deligne-Laumon formula for local epsilon factor”, Pan Asia Number Theory Conference 2024, VIASM, Hanoi, Vietnam, 2024年7月
2. Daichi Takeuchi : “Constructing a nearby cycles functor for functions on mixed characteristic schemes”, L-functions and motives in Niseko 2024, 北海道, 2024年9月

XXI-002 定曲率ローレンツ多様体上の大域解析

Global Analysis on Lorentzian Manifolds with Constant Sectional Curvature

研究者氏名：甘中 一輝 Kazuki KANNAKA

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

本年度も昨年度に引き続き擬Riemann幾何学における不連続群論とその剛性問題に取り組んだ。Riemann幾何学が正定値の計量から定まる自然な距離を持つものに対して、本研究の対象となる擬Riemann幾何学は相対性理論で現れるような不定符号の計量を持つ幾何を扱う。

本年度では主に以下の(私自身が主導する)共同研究を行った。

- ①昨年度の成果として挙げた奥田隆幸氏(広島大学)と東條広一氏(理研AIP)との共同研究がProgress in Mathematics誌のアクセプトを得た。
- ②昨年度の成果として挙げた東條広一氏(理研AIP)との共同研究：幾つかの研究集会で講演を行った。準備中の論文の証明がまだまだ洗練させられる事が分かり、論文執筆に時間がかかっているがまもなく完了する予定である。
- ③コンパクトClifford-Klein形の変形の研究：符号(4、3)の負の定曲率なコンパクト多様体には、古典的なタイヒミュラー理論と同様に変形理論を持つ事を証明した。高次元の定曲率多様体はリーマン幾何学の設定では変形理論を持たない事に注意されたい(Mostow剛性定理)。この結果については論文の執筆を進めている。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Kannaka, K., Okuda, T., and Tojo, K. Zariski dense discontinuous surface groups for reductive symmetric spaces, 32 pages, to appear in "Symmetry in Geometry and Analysis -- Festschrift for Toshiyuki Kobayashi". M. Pevzner und H. Sekiguchi eds., Progress in Mathematics, Springer (2024).

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 甘中一輝, Zariski dense discontinuous surface groups for reductive symmetric spaces, "表現論と調和解析のひろがり"(代表者：田中雄一郎(東京大学)), 京都大学数理解析研究所, 2024年6月
2. 甘中一輝, コンパクトClifford-Klein形の変形, 京大数論合同セミナー(代表者：鈴木美裕), 京都大学, 2024年6月
3. K. Kannaka, Lie theory and rigidity theorem, iTHEMS NOW & NEXT keynote talk, 理化学研究所, 2024年7月

XXI-003 代数多様体の最適退化と標準計量

Degeneration of variety and canonical metric

研究者氏名：井上 瑛二 Eiji INOUE

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

本研究の目標はPerelmanエントロピーに關与する代数多様体の最適退化の存在と一意性の問題を解決することである。この間には代数多様体のK安定性やモジュライ理論という代数幾何的な背景を動機として辿り着くことができるが、Kähler幾何におけるPerelmanエントロピーが通常のRiemann幾何からは予見できない特別な性質をもつため、これに関してどのような構造の理論を作りうるかを明らかにしたいという微分幾何的な動機もある。

本年最終年度は、目標だった代数多様体の最適退化の存在と一意性の問題を解決した。これまで本分野の進展状況では解決困難な問題に思われていたが、Kähler時空上の多重ポテンシャル関数の「ひずみ」という新しい概念の導入とその性質の探究によって本問題を既存理論の手法に帰着できることを見出し、これによって問題を解決した。この成果は国内外の研究集会で発表し、現在執筆中の3編の論文で「ひずみ」「存在」「一意性」それぞれの成果を公開する予定である。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. E. Inoue, Equivariant calculus on mu-character and muK-stability of polarized schemes, to appear in Journal of Symplectic Geometry.

●口頭発表 Oral Presentations

1. E. Inoue, Distortion and Moment measure of L-psh function over trivially valued field, K-stability and moment maps, Isaac Newton Institute, Cambridge, May 16, 2024.

2. E. Inoue, Optimal degeneration of algebraic variety and Perelman entropy, Moduli spaces and Singularities, CRM, Montreal, June 23, 2024.

3. E. Inoue, Perelman entropy of Kahlerian spacetime, Aarhus Complex Geometry Workshop 2024, Aarhus University, Aarhus, June 26, 2024.

4. E. Inoue, Kahler時空のPerelmaエントロピー, 談話会, 東北大学, 仙台, 7月8日

5. E. Inoue, Non-archimedean aspect of Perelman entropy, One day workshop on complex and algebraic geometry, 東京大学, 東京, 7月17日

XXI-004 DALI, an axion dark-matter telescope probing the 6 to 60 GHz band

Name: Javier DE MIGUEL HERNANDEZ

Host Laboratory: Terahertz Sensing and Imaging Research Team
RIKEN Center for Advanced Photonics

Laboratory Head: Chiko OTANI

● Publications

Papers

1. *Echo-free quality factor of a multilayer axion haloscope*
(PRd accepted)

● Oral Presentations

Conferences

1. Talk at 19th Patras Workshop.

XXI-005 マルチストレンジネス核におけるハイペロン間相互作用の研究 Study of Hyperon-Hyperon Interaction in Multi-Strangeness Nuclei

研究者氏名：江川 弘行 Hiroyuki EKAWA
受入研究室：開拓研究本部
齋藤高エネルギー原子核研究室
(所属長 齋藤 武彦)

私は今年度、2022年にドイツGSIで取得したWASA-FRS実験のデータ解析を主に行ってきた。私がモンテカルロシミュレーションを元に開発したGraph Neural Network(GNN)を用いた機械学習による解析手法を改良し、実データに適用することでハイパー核生成事象の探索を行なった。GNNによる解析で精度の良い結果を得るために、検出器データの位置情報・時間情報の較正を、私が指揮をとりながら学生達を指導して行なった。この際、データ取得時の状況によるデータの変動も補正するために、取得データを細分化してそれぞれに対して補正パラメータを作成した。較正の結果得られた検出器の位置情報を元にモンテカルロシミュレーションで学習を行い、実データに適用するためのGNNモデルを作成した。それを用いてWASA検出器に入射した荷電粒子のトラックを検出し、さらに運動量・粒子の軌跡を推定することで、従来のKalman filterを用いたトラッキング手法に比べ検出効率を20%程向上させることに成功した。さらにWASAで検出した粒子に対して粒子識別を行い、その中からprotonと π^- を同時に検出した事象を選び出してinvariant massを計算することで Λ の質量に対応するピーク構造を観測し、 Λ の生成崩壊事象が検出できていることを確かめた。この際、異なるトリガーで検出され

たprotonと π^- を組み合わせるとMixed event解析をすることでバックグラウンド事象を見積もり、 Λ のシグナルが有意に検出できていることを確認している。こうしてWASA検出器によるトラッキングが正常に機能していることを確かめた。WASA検出器とFRSを組み合わせるとハイパー核生成崩壊事象を探索する解析は現在も進行中である。モンテカルロシミュレーションと比較しながらイベントのcut条件の設定し、WASAで検出した π^- とFRSで検出した ^3He のInvariant mass分布を調べることでハイパートライトンのピーク構造を探索している。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Escrig S., Rappold C., *et al.* : "First test of energy response of the micro-vertex detection system for the WASA-FRS Experiments", Nucl.Instrum.Meth.A **1064** 169392 (2024)*
2. Liu E., Drozd V., *et al.* : "A compact start time counter using plastic scintillators readout with MPPC arrays for the WASA-FRS HypHI experiment", Nucl. Instrum.Meth.A **1064** 169384 (2024)*
3. Sekiya R., Itahashi K., *et al.* : "Search for η' -mesic nuclei in $^{12}\text{C}(p, dp)$ reaction with the WASA detector at GSI-FRS", Nuovo Cim.C **47** 4, 230 (2024)*

XXI-006 多波長観測によるブラックホールのスピンの測定とその宇宙論的な解釈 Measurements of Black Hole Spins Based on Multi-wavelength Observations and Its Cosmological Interpretation

研究者氏名：川室 太希 Taiki KAWAMURO
受入研究室：開拓研究本部
榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム
(所属長 榎戸 輝揚)

研究課題の目標は、銀河中心にある超巨大ブラックホール(BH: Black hole)が宇宙論的な時間スケールでどのように成長してきたかをBHスピンを通じて明らかにすることである。これまでのスピン測定の多くは、超巨大BHに質量が定常的に降着している活動銀河核(AGN: active galactic nucleus)と言われる系について行われてきたが、超巨大ブラックホールの大部分は、質量降着

をあまりしていないより静穏な系であり、それらを含めた議論が極めて重要である。そこで、静穏系に一時的にはあるが急激な質量降着が起こり、それに伴う電磁波を観測することでスピン計測ができる突発現象、例えば星潮汐破壊現象やQuasi-periodic eruption(QPE)イベントが重要な観測対象と考えられている。そのような中、川室はこれら突発現象をサーベイ観測データから系統的

に探査する手法の構築を目指した。手法として、機械学習が一つ考えられるが、そこからさらに発展した量子計算機もしくは量子回路を用いた量子機械学習の有用性を調査した。量子機械学習の性能評価のためにまず、AGNの典型的な変動の模擬観測データを教師データとして、QPEの光度曲線を異常データとして異常が検出できるかを検証した。教師データの作成には、AGNに典型的なPower spectrum density (周波数毎の変動強度)を仮定し、Timmer & Koenig (1995) に則り光度曲線を再構築した。QPEに関しては、5天体から観測された複数のQPEを強度、継続時間、そしてduty cycleで特徴づけし、それらの頻度分布をもとに様々なQPEデータを作成した。学習には、短期的な情報に更に長期のトレンドも考慮できるLong Short-Term Memoryネットワークを用いた。量子機械学習では、特徴量(フラックス値)を量子ビットの2状態(例えば、 $|0\rangle$ と $|1\rangle$)の複素振幅に埋め込み、それらが複素球面上でどのように時間変化すべきかを学習させる。結果としてまず、古典的な機械学習も量子機械学習も教師データを上手く再現し、また、QPEのある光度曲線では、再現性が悪くなり異常としてQPEが検出できることを確かめた。更に、性能比較をしたところ、量子機械学習の方がより高い正答率で異常検知できることがわかった。この得られた量子機械学習モデルを

もとに、実際の大規模X線サーベイデータから突発現象を探査する予定である。

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Kawamuro T.: "A Comprehensive ALMA Study of Millimeter Continuum Emission from Hard X-ray Selected AGNs", EAS2024, Italy, 2024/July/1-5 (invited)
2. Kawamuro T.: "Quantum Machine Learning for the X-ray Identification of Black Holes Linked to Gravitational Waves", JOINT N3AS - iTHEMS MEETING ON QUANTUM INFORMATION SCIENCE IN MULTIMESSENGER ASTROPHYSICS, Japan, 2024/June/16-18

(セミナー発表)

1. 川室太希: "量子機械学習の天文データへの応用: 超巨大ブラックホール由来の異常X線変動の探査", 富岳成果創出加速プログラム第9回AI班会合, オンライン, 2024年6月27日
2. 川室太希: "精密X線分光と高精細ミリ波撮像を主軸としたブラックホールを取り巻く物質循環の解明", 宇宙地球科学セミナー, 大阪大学, 大阪, 日本, 2024年5月16日

XXI-007 オスの養育行動促進回路の形成メカニズム

Formation of Neural Circuits That Facilitate Parental Behavior in Males

研究者氏名: 稲田 健吾 Kengo INADA
受入研究室: 生命機能科学研究センター
比較コネクトミクス研究チーム
(所属長 宮道 和成)

多くの哺乳類種において、交尾未経験の雌雄は生来仔に対して親和的ではない。しかし自らの子孫を残すため、哺乳類は交尾から出産までの間に仔への親和性を高め、我が仔が生まれる頃には積極的に養育(子育て)行動をとるようになる。この養育行動を生み出す神経回路基盤や、仔への親和性を増す過程でそれらの神経回路にどのような変化が生じているのかはよく分かっていない。本課題ではマウスをモデル動物として、養育行動を生み出す神経メカニズムの解明に取り組んだ。

研究の最終年度となる本年度は脳視床下部室傍核のバソプレシン神経細胞に注目して研究を行った。この細胞種は古典的な研究から、養育行動を促進する作用を持つことが知られているが、詳しい解析はなされていない。

複数の実験を通して、まずバソプレシン神経細胞が雄マウスの仔マウスへの攻撃性抑制に関与していることを明らかにした。またこの機能を生み出すバソプレシンの作用点を探る中で、バソプレシンがオキシトシン受容体を活性化させるクロストーク現象が重要な役割を果たしていることを見出した。具体的にはバソプレシン神経細胞から放出されたバソプレシンは、視索前野という脳領域のオキシトシン受容体を活性化させることで、仔マウスへの攻撃を抑制していた。これらの結果は、養育行動におけるバソプレシンの機能を同定しただけでなく、その機能出力の過程にクロストーク現象が関与しているという興味深い事実を明らかにしたものである。一連の実験結果をまとめた論文は現在専門誌でレビュー中である。ま

た投稿論文の原稿をbioarxivで公開した。

本年度はこれらの研究成果に加えて、オキシトシンと養育行動に関するレビュー論文1報をNeuroscience Research誌に単著で発表した。この中では後発研究を促すため、1930年代から現在に至るげっ歯類の養育行動に関する知見を網羅的にレビューし、今後進むべき研究の方向性について議論した。また父親マウスの子育てを研究する中で感じたことについて、一般の読者を想定した総説を動物心理学研究誌に1報発表した。

●誌上発表 Publications

(総説)

1. Inada K.: “Neurobiological mechanisms underlying oxytocin-mediated parental behavior in rodents”, Neuroscience Research, <https://doi.org/10.1016/j.neures.2024.04.001>, (2024).
2. 稲田健吾: “マウスの父親がヒトの父親に見せるもの”, 動物心理学研究, 74(1), 29-30, (2024).

●口頭発表 Oral Presentations

1. 稲田健吾: “妊娠期の摂食動態を支える神経回路変化”, 第6回これからの神経回路研究会. 福岡. 2024年1月
2. Inada K.: “Neural circuit remodeling supports pregnancy-associated excessive food intake in female mice”, 第47回日本神経科学学会大会. 福岡. 2024年7月

XXI-008 環境応答に伴うトランスクリプトーム変化を用いた交差耐性・交差感受性の予測 Prediction of Cross Resistance and Collateral Sensitivity with Transcriptomic Changes in Response to Environmental Changes

研究者氏名: 佐藤 匠哉 Takuya SATO
受入研究室: 生命機能科学研究センター
多階層生命動態研究チーム
(所属長 古澤 力)

細胞の適応進化における交差耐性や交差感受性は、古くより議論されてきた重要な問題である。近年、実験技術の進歩により、交差耐性や交差感受性を実験室進化において調べることが可能になってきている。しかしながら、交差耐性や交差感受性を、進化前の細胞から得られる情報によって予測する理論は今のところ存在していない。その困難の一つは、異なる環境変化を統一的に扱う方法が存在していないことである。熱や飢餓、抗生物質など、細胞は様々な環境変化を経験する。これらを従来の遺伝子制御ネットワークへの影響を詳細に調べる方法により比較することは困難であり、多種多様な環境変化を統一的かつ簡単に比較することができる指標を考える必要がある。

近年、環境変化に対して細胞が応答・進化する際の表現型変化が、細胞の構成要素や環境変化の多様さに反して、はるかに少数の変数によって説明できることが明らかになってきている。この事実は、細胞による外部環境の認識が、少数自由度によって行われていることを示唆している。また、細胞の表現型変化は任意の環境で測定、比較可能な量であり、様々な環境変化を統一的に表現する指標となる可能性も有している。そこで本研究では、細胞の表現型変化(トランスクリプトーム変化)によって環境の特徴づけを行い、それを元に交差耐性および交差感

受性を予測する理論を構築するとともに、実験室進化のデータを用いてその検証を行うことを目的とする。

本年度は、生命システムにおける低次元構造をオープンデータから抽出することを目的として、Precise2.0を始めとする大腸菌のトランスクリプトームデータ集の解析を試みた。これらのデータは、栄養源や株など様々な面で実験条件が異なっているデータを含んでいる。解析の結果として、成長速度が最もトランスクリプトームデータへの影響が大きなパラメータであることがわかった。これは我々の進化実験データにおいても予想されていた内容であり、去年度は、成長速度の影響が少ない殺菌剤において、トランスクリプトーム変化が環境変化の効果を強く反映しており、その変化を用いることで交差耐性進化が予測可能であることを明らかにした。この研究をさらに進展させるためには、成長速度の効果を取り除くような手法の開発が必要となると考えられる。

●口頭発表 Oral Presentations

1. 佐藤匠哉, 古澤力: “ノイズを用いた細胞状態適応の効率の進化”, 日本物理学会 第91回年次大会, 札幌, 2024年9月

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Takuya Sato, Chikara Furusawa, Kunihiko Kaneko: “

XXI-009 遺伝性心筋症における統合的オミックス解析に基づいた心不全進展機序の解明 Investigation for Progression Mechanism of Heart Failure Using Integrative Omics Approaches to Inherited Cardiomyopathies

研究者氏名：寺本 了太 Ryota TERAMOTO
受入研究室：生命医科学研究センター
応用ゲノム解析技術研究チーム
(所属長 岡崎 康司)

心不全パンデミックと形容される心不全患者の増加が近年著しいが、その分子病態を標的とした薬剤は未だ存在しない。病態モデルとなる遺伝性心筋症における逆遺伝学的アプローチは、心筋の収縮単位であるサルコメア蛋白をコードする遺伝子の変異が心筋細胞膜電位維持機構を変質させる機序を明らかにした。しかしながら、心不全の病理学的本態である心筋細胞肥大および間質線維化のメカニズムは未だ不明である。本研究では多層的オミックス解析により心不全を醸成する因子を多次元的に理解し、その分子病態において創薬シーズを見出すことを目指した。申請者は特定のサルコメア遺伝子が家系ごとに異なる病理表現型を引き起こすことに注目し、迅速な生体機能評価が可能なゼブラフィッシュ変異モデルの心臓において発生段階的に一細胞RNAシーケンスおよびエピゲノム解析を行うことにより心筋組織の変性に関わる分子パスウェイを網羅的に同定する心不全病態の責任修飾分子探索研究を実施した。さらに、変異の機能解析を空間的に行うことを目的とした光学マッピング解析を病態モデル心において行い、疾患フェノタイプの電気生理学的病態とトランスクリプトーム情報を組み合わせるオミックス解析を行なった。2024年度は以下の実験および成果発表を行なった。

①心筋症モデルゼブラフィッシュにおける心臓光学マッピング解析により、構造特異的な活動電位異常の特定を行った。

- ②心筋症モデルゼブラフィッシュにおける心臓シングルセルRNA解析を行い、心房筋心筋細胞、心室筋心筋細胞、線維芽細胞にそれぞれ有意に発現が変動する分子を特定した。
- ③心筋症モデルゼブラフィッシュにおける心臓プロテオーム解析を実施し、心筋変性におけるタンパク挙動を解析した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Cui S, Hayashi K, Kobayashi I, Hosomichi K, Nomura A, Teramoto R, Usuda K, Okada H, Deng Y, Kobayashi-Sun J, Nishikawa T, Furusho H, Saito T, Hirase H, Ohta K, Fujimoto M, Horita Y, Kusayama T, Tsuda T, Tada H, Kato T, Usui S, Sakata K, Fujino N, Tajima A, Yamagishi M, and Takamura M.: "The utility of zebrafish cardiac arrhythmia model to predict the pathogenicity of KCNQ1 variants", J Mol Cell Cardiol.177 50-61(2023)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 寺本了太：“糖尿病性心筋症における心筋変性機構の解明”，第71回日本心臓病学会学術集会，東京，9月（2023）

XXI-010 Using Pooled Cell Libraries to Associate Genetic Variance with Responses to Stimulus

Name: Steven Matthew HEATON

Host Laboratory: Genome Immunobiology RIKEN Hakubi Research Team
RIKEN Center for Integrative Medical Sciences
Laboratory Head : Nicholas F. PARRISH

Genetic variation between populations, individuals, and individual cells results in differential stimulus responses, complicating the analysis and prediction of stimulus phenotypes at all scales. This research developed a novel donor pooling and sequencing technology for associating individual cellular responses with the genotypes of their respective donors. This enables high-resolution, massively multiplexed analysis of genotype-phenotype relationships.

To understand the genetic basis for differential stimulus responses in humans, cell libraries representing an inclusive cross-section of humanity were pooled from over 400 male and female cell donors (Europeans, Africans, Chinese, and Japanese) and exposed to various stimuli (e.g., anti-cancer drugs, SARS-CoV-2 viral gene expression, chronic EBV/HHV-4 infection and reactivation from latency, or immune receptor agonists). Cells were sequenced by gene-targeted or single-cell RNAseq, then analyzed using biochemical techniques and bioinformatic tools and pipelines developed in this research. This technology harnesses naturally occurring patterns of genetic recombination as a “native genetic barcode” to reliably deconvolute the stimulus-dependent biological signals from each cell and donor-of-origin represented in the pool. The performance of this technology was validated using multiple independent techniques involving donor- and sex-specific genetic markers, as well as stimulus-dependent phenotypes with known genetic associations. Our data reveal donor-specific, sex-specific, and ancestry-specific responses to these stimuli and patterns in immunoglobulin gene expression. Briefly, numerous genetic variants in thiopurine methyltransferase (*TPMT*), nudix hydrolase 15 (*NUDT15*), and inosine triphosphate pyrophosphohydrolase (*ITPA*) genes reportedly associated with thiopurine-based anti-cancer drug toxicity were confirmed or refuted. Dozens

of lncRNAs strongly associated with EBV reactivation from latency were identified, as well as extensive remodeling of biochemical and immune signaling pathways of host cells. Certain immunoglobulin genes, interferon-stimulated genes (ISGs), and immune chemokines show sex- or ancestry-dependent differences in expression before and after Toll-like receptor stimulation, which may partly explain globally observed differences in responses to infection and treatment. The mechanism of SARS-CoV-2 ORF3a-induced pathology was clarified, revealing a novel role for ORF3a as a virulence factor and potentially explaining in part why males are at considerably higher risk than females of developing severe COVID and COVID-related mortality. GWAS and eQTL mapping analysis may accelerate future drug and disease mechanism discovery. Our results underscore the need for detailed stratification of responses to infection and immune-modulating stimuli, which may inform the design and dosing of adjuvants, drugs, or other therapeutics. Implementing our technology requires neither genetic modification of samples nor specialized equipment outside of standard cell culture items, RNA sequencing facilities, and a desktop computer. This technology may enable virtually any laboratory to dissect genotype-dependent responses to their stimulus of interest at the population, individual, or single-cell level.

During these final three months of the SPDR research program, our results were combined with additional analysis and compiled for publication.

● Oral Presentations

Seminar

1. Heaton, S.M.: “One Journey with Viruses”, Researcher Discovery Evening, Wako, Japan 2024, June 2

XXI-011 Investigating the Neural and Behavioral Mechanisms of Motor Skill Learning with Robotic Assistance, Passive Movement, and the Sense of Agency

Name: Ethan OBLAK

Host Laboratory: Laboratory for Human Cognition and Learning
RIKEN Center for Brain Science
Laboratory Head : Kazuhisa SHIBATA

We rarely learn a brand-new motor skill: humans have a remarkable ability to adapt previously learned skills to new tasks and circumstances. Intermanual transfer is a well-studied example of such adaptation, in which skills learned with one hand can be reproduced with the other hand more easily than untrained skills. In the lab, intermanual transfer provides an imperfect view of how skill transfer occurs in daily life. These experiments typically maintain key visuospatial or numerical cues across hands that indicate to participants that the task is one that has been previously learned. For example, the task may use the number '1' to cue movements of the thumb and '5' the little finger. When participants perform the task with the untrained hand, this cue-action familiarity undoubtedly enhances the observed transfer. Many argue that without familiarity, complex movements such as long sequences of presses cannot be recalled; instead, transfer will result only from learning of low-level features such as sequential pairs of finger presses. In the present work, we investigated whether sequence-specific learning can occur without cue-action familiarity. The experiment (N=40) began with two days of 9-button sequence learning with the right hand, followed by a transfer test on day 3 with the left hand. Five sequences were learned, and then the five

mirrors of these sequences were tested alongside five novel sequences. Sequences were mirrored such that the numerical cues were no longer familiar. An extensive post-experiment questionnaire was administered to assess whether participants were aware of the sequence mirroring, with N=9 displaying conscious awareness of the manipulation. Surprisingly, a linear mixed effects model showed no significant interaction between awareness and sequence type, and participants were significantly faster at the mirrors than novel sequences, regardless of awareness. A further model was constructed to determine whether this transfer effect was sequence-specific or limited to lower-level finger pair transitions. The best-fit model predicted participants' Day3 performance using their individual Day2 (right hand) performance on a sequence-by-sequence basis. Models using the average Day2 sequence performance across all participants as a predictor resulted in a worse fit, and additional models mapping finger pair practice on Day2 to Day3 did not result in significant fits. Overall, our results provide strong evidence for sequence-specific transfer in the absence of cue familiarity, rejecting the common hypothesis that only low-level motor features are transferred without familiarity.

XXI-012 Multi-modal Image Processing and Data Fusion for Collaborative Brain Image Analysis

Name: Matthias Wilfried SCHLACHTER

Host Laboratory: Brain Image Analysis Unit
Integrative Computational Brain Science Collaboration Division
RIKEN Center for Brain Science
Laboratory Head : Henrik SKIBBE

This research aimed to enhance brain image analysis by developing a collaborative web platform and applying state-of-the-art computational methods. The platform, based on Nora-Image (<https://nora-imaging.com/>), integrates artificial intelligence (AI) to enable users from diverse disciplines to create dynamic processing pipelines that are tailored to their specific datasets. By incorporating user feedback, the platform continuously

improves, providing a robust environment for analyzing complex imaging data such as MRI scans and neuronal tracer datasets. Key functionalities include data sharing, annotation of ground truth data for training machine learning models, and tools for comparing AI model outputs with expert annotations, facilitating collaboration across research groups.

The research addressed the analysis and integration of

experimental brain data from multiple species, focusing on aligning datasets with standardized brain templates for accurate mapping and comparison. Pre-processing, registration, and integration workflows ensured data compatibility with computational tools. Advanced techniques for segmentation, cell detection, and neuron reconstruction were employed to uncover detailed insights into neural structures. Machine learning models, including convolutional networks for 3D imaging and graph neural networks for reconstructing neuronal connections, were explored to handle the complexities of brain imaging data.

While many methodologies showed promise, challenges such as adapting AI models to real-world segmented data highlighted limitations. Issues like differences in

spatial resolution and alignment across datasets were identified as potential barriers, underscoring the need for further investigation and model refinement.

This work highlights the potential of collaborative platforms and AI-driven methodologies in advancing brain research while emphasizing the need for further refinement to address existing challenges. Despite successes in integrating and analyzing brain data, challenges such as transferring AI models to real-world data highlight the need for continued refinement. This work underscores the importance of collaborative platforms and innovative computational tools in fostering cross-disciplinary research, paving the way for future advances in neuroscience.

XXI-013 Towards twisted light devices with single-walled carbon nanotubes

Name: Chee Fai FONG

Host Laboratory: Nanoscale Quantum Photonics Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head : Yuichiro KATO

Low dimensional materials, such as 1-dimensional (1D) carbon nanotubes, as well as 2-dimensional (2D) van der Waals layered crystals, including hexagonal boron nitride (hBN) and transition metal dichalcogenides (TMDCs), are at the forefront of scientific research due to their remarkable optical and electronic properties. In particular, when thinned down to a single layer with atomic thickness i.e., a monolayer, semiconducting TMDCs possess a direct bandgap. As a result, these TMDCs exhibit bright optical emission which is governed by their exciton (coulomb-bound electron-hole pair) responses even up to room temperature due to the large exciton binding energies of hundreds of meV. Many 2D materials exhibit large optical nonlinearities. The integration of two-dimensional (2D) materials with diverse target substrates, including nanophotonic architectures, offers a promising avenue to manipulate light-matter coupling, thereby facilitating the realization of high-performance hybrid devices such as lasers, nonlinear sources, and quantum emitters. However, the potential of 2D materials for dielectric environment engineering in hybrid nanophotonic devices is still largely unexplored. By employing 2D materials to manipulate the local dielectric environment, we demonstrate self-aligned hybrid nanocavities in which 2D material flakes are used to form the cavities locally at wherever they are placed along the PhC waveguides post-fabrication. We successfully fabricated such hybrid nanocavity devices with hBN, WSe₂ and MoTe₂ flakes on silicon PhC waveguides, obtaining Q factors as high as

4.0×10^5 . Remarkably, even monolayer flakes can provide sufficient local refractive index modulation to induce high Q nanocavity formation. We have also managed to observe cavity PL enhancement in a self-aligned MoTe₂ cavity device, with a cavity Purcell enhancement factor of about 15. Our results demonstrate the utility of 2D materials for dielectric environment engineering to create functional hybrid devices, with potential applications in hybrid integrated photonic circuits.

● Publications

Papers

1. C. F. Fong, D. Yamashita, N. Fang, S. Fujii, Y.-R. Chang, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. K. Kato, "Self-Aligned Hybrid Nanocavities Using Atomically Thin Materials," *ACS Photonics* **11**, 2247 (2024).
2. Y.-L. Ho, C. F. Fong, Y.-J. Wu, K. Konishi, C.-Z. Deng, J.-H. Fu, Y. K. Kato, K. Tsukagoshi, V. Tung, C.-W. Chen, "Finite-area membrane metasurfaces for enhancing light-matter coupling in monolayer transition metal dichalcogenides," *ACS Nano* **18**, 24173 (2024).
3. N. Fang, Y. R. Chang, S. Fujii, D. Yamashita, M. Maruyama, Y. Gao, C. F. Fong, D. Kozawa, K. Otsuka, K. Nagashio, S. Okada, Y. K. Kato, "Room-temperature quantum emission from interface excitons in mixed-dimensional heterostructures," *Nature Commun.* **15**, 2871 (2024).
4. S. Fujii, N. Fang, D. Yamashita, D. Kozawa, C. F. Fong, Y. K. Kato, "van der Waals decoration of ultra-high-Q silica microcavities for x^2-x^3 hybrid nonlinear

photonics,” *Nano Lett.* 24, 4209 (2024).

● Poster Presentations

1. C. F. Fong, D. Yamashita, N. Fang, S. Fujii, Y.-R. Chang, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. K. Kato, “Demonstration of hybrid photonic crystal nanocavity using atomically thin van der Waals flakes,” *META 2024, the 14th International Conference on Metamaterials, Photonic*

Crystals and Plasmonics, Toyama, Japan (July 16 2024).

2. C. F. Fong, D. Yamashita, N. Fang, S. Fujii, Y.-R. Chang, T. Taniguchi, K. Watanabe, Y. K. Kato, “Dielectric environment engineering with 2D materials for hybrid nanocavities”, *Fundamental Optical Processes in Semiconductors (FOPS) 2024*, Newfoundland, Canada (July 25, 2024).

XXI-014 超大型ウォルターミラーの開発と X 線顕微鏡・望遠鏡への応用

Development of Very Large Wolter Mirrors and Their Applications to X-ray Microscopes and Telescopes

研究者氏名：山口 豪太 Gota YAMAGUCHI
受入研究室：放射光科学研究センター
利用システム開発研究部門
SACLA ビームライン基盤グループ
ビームライン開発チーム
(所属長 矢橋 牧名)

X線顕微鏡は、高い透過力と短い波長から、電子顕微鏡や可視光顕微鏡にはない利点をもつ。ナノスケールのX線イメージングでは、走査型の技術が広く用いられているが、スキャン速度と精度によって性能が制限される。特に、ステージの急な加減速による振動が精密な位置制御を困難にし、高速なデータ取得を妨げる。イメージングの高速化のためには、露光回数を削減し、究極的には走査不要なシングルショットイメージングが有望である。さらに、シングルショットイメージングと、フェムト秒の超短X線パルスを生成できるX線自由電子レーザー(XFEL)を組み合わせれば、走査型では不可能な超高速イメージングを実現できる。

本年度の研究では、高NA・高効率のX線集光ミラーを活用したインラインホログラフィによる、シングルショットX線イメージングを開発した。インラインホログラフィの採用には2つの課題があった。第一に、空間分解能は光源として用いる発散ビームのサイズによって制約される。従来の集光システムは効率が低く光源の輝度を十分に活用できないため、小さく明るい光源を生成できる新たな光学系が必要であった。第二に、インラインホログラフィは照明光の波面に対して敏感であり、照射ビームの波動場が大きく変動するXFELでは特に顕著な問題となる。XFELパルスを用いたインラインホログラフィの高分解能化には、照射波動場の変動を補償できる新しい再構成アルゴリズムが必要とされていた。

これらの課題を克服するため、2つのアプローチを組み合わせた。ひとつは、10nm未満の集光が可能なXFEL

集光ミラーシステムであり、もうひとつはショット間照射波動場補正アルゴリズムである。前者では、7nmの極小光源を高効率に生成できる、ウォルターIII型設計に基づくAdvanced KBミラーシステムを採用した。後者では、照射波動場のショットごとの変動を、主成分回帰を用いてモデル化し、各ホログラムに対する最適な回帰係数を計算することで照射波動場を合成した。このアルゴリズムを基に、SASE FELの変動の影響を補償することに成功した。ナノサイズ粒子を試料に用いた実証実験により、類似する先行研究と比較して2桁高いFWHM 10nmの空間分解能を確認した。現在は、SPRING-8のアップグレードを見据え、高輝度X線ビームと本手法を組み合わせた三次元イメージングへの応用を進めている。

●口頭発表 Oral Presentations

1. Yamaguchi G., Yamada J., Shioi K., Osaka T., Inoue I., Inubushi Y., Kameshima T., Yamauchi K. and Yabashi M.: “Single-shot high-resolution in-line holography with XFEL”, *XOPT 2024 (International Conference on X-ray Optics and Application)*, Yokohama, Japan, April (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Yamaguchi G., Yamada J., Shioi K., Osaka T., Inoue I., Inubushi Y., Kameshima T., Yamauchi K. and Yabashi M.: “High-resolution single-shot in-line holography with XFEL”, *XRM 2024 (16th International Conference on X-Ray Microscopy)*, Lund, Sweden, August (2024)

2. 山口豪太, 山田純平, 伊藤篤輝, 塩井康太, 大坂泰斗,
井上伊知郎, 犬伏雄一, 亀島敬, 山内和人, 矢橋牧名:
“高分解能XFELインラインホログラフィの開発”, 第37

回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム,
姫路市, 1月(2024)

基礎科学特別研究員
2022 年度採用者

XXII-001 s-不変量のホモトピー的特徴づけとその応用

Homotopical characterization of the s-invariant and its applications.

研究者氏名：佐野 岳人 Taketo SANO

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

私の研究分野は結び目理論および低次元トポロジーであり2000年にM. Khovanovが創始したKhovanovホモロジー理論を主な研究対象としています。Khovanovホモロジー理論においてRasmussenは「s-不変量」と呼ばれる整数値の結び目の不変量を定義し、この性質を詳しく調べることが当初からの研究の目標でした。2024年度には次の二つの研究の進展がありました。

一つ目は佐藤光樹氏(名城大学)との共同研究で、2024年10月に論文誌“Topology and its Applications”に採録された“A family of slice-torus invariants from the divisibility of reduced Lee classes”です。この研究では修士論文での研究を拡張し、s-不変量に新しい定式化を与えた上で類似する不変量の族を構成するというものでした。

二つ目は単独の研究で、2024年5月に公開し同年12月に論文誌“Algebraic Geometry and Topology”に受諾された論文“Involutive Khovanov homology and equivariant knots”です。この論文では強可逆結び目と呼ばれる特殊な対称性を持った結び目に対してKhovanovホモロジー理論を拡張し、さらに「同変版のs-不変量」を定義することで、4次元多様体内のエキゾチック曲面对を検出するという応用を得ることができました。この論文では理論の構築のみならず、s-不変量の計算を行うためのプログラムを自ら開発し、iTHEMSのクラスタ計算機において大規模な計算を実行することで上述の応用を得ました。この論文に関する連続講演を沖縄科学技術大学院大学(OIST)や韓国科学技術院(KAIST)で行いました。

SPDR着任時の目標であった「s-不変量のホモトピー的特徴づけ」はまだ達成できていませんが、当初想定していなかった方向で研究の進展があり、低次元トポロジーへの応用については満足な成果が得られました。

●誌上発表 Publications

1. Taketo Sano: “Involutive Khovanov homology and equivariant knots”, Algebraic and Geometric Topology に採録予定(2024年12月受諾)。
2. Taketo Sano, Kouki Sato: “A family of slice-torus invariants from the divisibility of reduced Lee classes”, Topology and its Applications, Vol. 357, 109059 (2024).

●口頭発表 Oral Presentations

1. Taketo Sano: “Khovanov homology and its applications to low-dimensional topology”, Saga-Gakushuin Topology Seminar, Gakushuin U., Tokyo, Japan. Dec 2024.
2. Taketo Sano: “Involutive Khovanov homology and equivariant knots”, Extended KOOK Seminar 2024, Himeji-shi, Hyougo, Japan. Aug 2024.
3. Taketo Sano: “Khovanov Homology and Its Application to Low-Dimensional Topology” at Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, South Korea. Jul 2024.
4. Taketo Sano: “Khovanov Homology and Its Application to Low-Dimensional Topology” at the Okinawa Institute of Science and Technology (OIST), Okinawa, Japan. Jun 2024.
5. Taketo Sano: “Involutive Khovanov homology and equivariant knots”, Georgia Topology Summer School and Conference, Georgia U., Atlanta, USA. May 2024.
6. Taketo Sano: “Involutive Khovanov homology and equivariant knots”, Differential Topology Seminar '24, Tsukuba U., Ibaraki, Japan. Mar 2024.

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Taketo Sano: “Involutive Khovanov homology and equivariant knots”, iTHEMS NOW & NEXT, RIKEN, Saitama, Japan. Mar 2024.

XXII-002 Optimal Transport and Euclidean Quantum Gravity

Name: Christy Koji KELLY

Host Laboratory: Interdisciplinary Mathematical Sciences Program
RIKEN Interdisciplinary Theoretical and
Mathematical Sciences Program
Laboratory Head: Tetsuo HATSUDA

Whilst constructive approaches to Euclidean quantum gravity work for spacetime dimensions $D=2$, in the sense that an interesting nontrivial theory—in the form of Liouville theory—is naturally a description of Euclidean quantum spacetime in such dimensions, it has long been known that similar methods lead to pathologies in higher dimensions. An earlier mathematical result by the author indicated that this pathology could be avoided if instead of regularising the continuum manifold geometry by a piecewise linear structure, one instead took the perspective that Riemannian manifolds are a special class of well-behaved metric-measure space. The focus of my recent research has been to give physical substance to this technical mathematical result: why should a different way of ‘discretising’ a manifold give different physical results about the nature of the quantum state. It turns out that this is because a different choice of regularisation involves a different topology on the space of rough spacetime geometries and that this topology subtly encodes important physical information such as the degree of localisability of curvature (naively from our experience with mathematical quantum field theory we expect curvature, as a manifestation of gravitational self-energy, to lead to quantum fluctuations that become singular as we try to localise the curvature at a point), or the nature of symmetries for *quantum* spacetime geometries. While a careful study of the triangulations case would also reveal these pathologies, the metric-

measure space regularisation makes this much more apparent due to the subtlety of the stability theory of the simplest available notion of rough curvature (Ollivier curvature) in this context. The key point is that these quantum fluctuations associated with gravitational self-energy suppress baby universe nucleation and so avoid the basic pathology associated with higher-dimensional constructive Euclidean quantum gravity.

● Oral Presentations

1. Kelly, Christy, *A Selective Survey of Ideas, Tools and Results in Constructive Field Theory*. iTHEMS Math-Physics Seminar, RIKEN, Wako, February 2024.
2. Kelly, Christy, *A Selective Survey of Ideas, Tools and Results in Constructive Field Theory II*. iTHEMS Math-Physics Seminar, RIKEN, Wako, April 2024.

Conferences

1. Kelly, Christy, *Baby Universes and Branching Singularities in Euclidean Quantum Gravity*, NCTS-iTHEMS Joint Workshop on Matter to Spacetime: Symmetries and Geometry, NCTS, Taipei, August 2024.

● Poster Presentations

Conferences

1. Kelly, Christy, *Baby Universes and Branching Singularities in Euclidean Quantum Gravity*, Quantum Extreme Universe: Matter, Information and Symmetries, OIST, Okinawa, October 2024.

XXII-003 共形場理論の構成と変形の数学的研究

Mathematical study of construction and deformation of conformal field theory

研究者氏名: 森脇 湧登 Yuto MORIWAKI
受入研究室: 数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

場の量子論は素粒子スケールから宇宙規模の現象まで幅広い物理に関係する重要かつ基本的な物理理論であるが、その十分に満足いく数学的定式化はまだ得られていない。場の量子論の数学的研究には、代数的/解析的/幾何的側面があり、私はそれらを統合的に捉えることが場の量子論をより深く理解するための鍵であると考えて

いる。こうした側面の中でも代数的アプローチには最も明示的に例が構成できるというアドバンテージがあり、私は2次元共形場理論を operator product expansion (ある種の代数) によって定義するというプロジェクトをここ五年間行ってきた。2023年に Adv. Math 427より出版された論文では

[M1] Operator product expansionの公理系(代数的公理系)を導入した。

また2022年にarXivに投稿を行ったVertex operator algebra and parenthesized braid operad, arXiv:2209.10443では

[M2] 場の量子論の代数的側面と幾何学的側面を繋げる研究を行った。

これらの研究に基づき今年度は

[M3] 場の量子論の最も重要な物理量である相関関数系がOperator product expansionから数学的にwell-definedに構成できることを[M1]の定義と[M2]の結果を用いて証明した(arXiv:2410.02648)。

これらは場の量子論の代数的・幾何学的側面に関する研究であるが、今年度はこれらに加えYoh Tanimoto氏とMaria Stella Adamo氏との共同研究において

[AMT] [M3] で定義された相関関数系が解析的な場の量子論の公理系(Osterwalder-Schrader公理系)を満たすことを示した(arXiv:2407.18222)。

[AMT]により、代数的対象(operator product expansion)から解析的对象(無限次元Hilbert空間上の作用素値超関数)を得ることができ、代数と解析を繋ぐことができる。これらの研究成果は(5)のアメリカ・イタリア数学会など国内外の研究集会で発表を行った。

今後は場の量子論の研究と共に弦理論の数学的な研究を行う予定である。とくに[M2]において考察したのは場の量子論の定義される時空に関する幾何学的側面であったが、弦理論のターゲット時空としての幾何学的側面は、全く別の意味を持つ。現在はこうしたターゲット時空の幾何学的性質をこれまで行ってきた代数的・解析的研究に基づき調べている。

●誌上発表 Publications

1. Consistency of operator product expansions of Boundary 2d CFT and Swiss-cheese operad, arXiv:2410.02648.
2. (with M-S. Adamo and Y. Tanimoto) Osterwalder-Schrader axioms for unitary full vertex operator algebras, arXiv:2407.18222.

●口頭発表 Oral Presentations

1. Consistency of 2d Conformal field theory with boundary and Swiss-cheese operad, Nagoya Math-Phys seminar, Oct 4.
2. Operator product expansion and spacetime operad, KEK, Sep 10.
3. Algebraic structure of space-time geometry and operator product expansion, NCTS-iTHEMS Joint Workshop on Matters to Spacetime: Symmetries and Geometry, Taiwan, Aug 26-30.
4. Introduction to QFT, Factorization algebra and related topic, Shizuoka, Aug 12-14.
5. Conformal blocks of vertex operator algebra and parenthesized braid operad, AMS-UMI international Joint Meeting, July 23-26, 2024.
6. Conformal block, braided operad and factorization, Erlangen university, mathematical physics seminar, June 6.
7. Braided tensor category and vertex operator algebra with examples, Ningbo university, March 8.
8. Conformal block, braided multicategory and factorization, Topics on mathematical structures in string theory, Komaba, Feb 8-9.

XXII-004 理想的気候条件下における大規模雲群の自己組織化と多階層構造

Self-Organization and Multiscale Hierarchical Structure of Large-Scale Cloud Cluster under Idealized Climate Conditions

研究者氏名：柳瀬 友朗 Tomoro YANASE
受入研究室：開拓研究本部
富田数理気候学研究室
(所属長 富田 浩文)

雲は地球の気候を決定する上で重要な役割を果たすが、その理解は十分ではない。本研究は、積乱雲スケールから惑星スケールにいたる、大気の大規模なスケール間相互作用において、雲の自己組織化が果たす役割を明らかにすることを目指している。私たちはこれまでに先端的雲解像大気モデル「SCALE」とスーパーコンピュー

タ「富岳」を駆使した大規模数値実験により、雲集団が自発的に形成する大規模組織構造を明らかにしてきた。この大規模組織構造をより深く理解するために、今年度は昨年度に引き続き、低次元数理モデルを用いた水蒸気場の時空間パターン形成の理論的研究を行った。昨年度は既往研究に倣い大域結合系として定式化された数理モデ

ルを用いたが、今年度はより一般的な非局所結合系としての定式化へと変更することで、大域結合と非局所結合の違いが雲の自己組織化に伴う空間パターンの特徴的な長さに与える影響について詳細に調べた。この数理モデルは、雲が空間的にランダムに発生する散在対流レジームに対応する水平一様解をもつ。この一様解は微小擾乱に対しては安定である一方で、有限振幅の擾乱に対して不安定化し、湿った雲域と乾いた晴天域が水平分離した集合対流レジームに対応する双安定解へと遷移する可能性がある。遷移が起きるかどうかは、非局所結合による不安定化作用と局所結合(拡散)による安定化作用の間の拮抗で決定される。大域結合の場合には、最大水平波長が実効的な最大成長率を持つ。一方で、領域幅よりも小さな非局所結合スケールを与えた場合、結合スケール付近で最大成長率を持つ。空間次元周期境界条件を課した計算領域において直接数値実験を行うと、安定性解析で最大成長率を持つ空間パターンが選択された。さらに大域結合時の定常状態の空間発展に関する力学系の周期軌道について、Numerical Continuationと呼ばれる力学系の解の分岐解析手法を用いて調べた。特に、大域結合を特徴づける領域平均水蒸気量をパラメータとした解の追跡を行い、周期軌道とホモ・ヘテロクリニック軌道の無限周期分岐の存在を同定した。大域結合系においては波長無限大の解が存在できるという事実より、逆説的に、有限の特性距離を持つ大規模雲クラスターの理解には非局所結合と拡散が本質的に重要であるといえる。以上のように、本研究は非線形力学系・反応拡散系の観

点から大規模雲群の自己組織化と多階層構造に関する新たな数理的理解を深めた。

●誌上発表 Publications

(その他)

1. Yanase, T., Shima, S., Nishizawa, S., & Tomita, H.: "Nonlocally coupled moisture model for convective self-aggregation". arXiv preprint arXiv:2404.04146. doi:10.48550/arXiv.2404.04146 (2024)
2. 佐藤陽祐, 稲津将, 南出将志, 柳瀬友朗, 近藤誠, 大塚成徳, 吉田龍二, 佐藤拓人, 宮本佳明, 藤原泰, 末木健太, 高須賀大輔, 伊藤純至, 橋本明弘, 八代尚.: "第6回非静力学モデルに関する国際ワークショップ(第25回非静力学モデルに関するワークショップ)の報告", 天気, 71(2), 75-81 (2024)

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 柳瀬友朗, 島伸一郎, 西澤誠也, 富田浩文: "雲の大規模な自己組織化を表す非局所結合水蒸気モデル", 日本流体力学会年会2024, 仙台, 9月(2024)
2. 柳瀬友朗, 島伸一郎, 西澤誠也, 富田浩文: "対流自己集合化の非局所結合水蒸気モデル", 第44回大槌シンポジウム「多様な時空間スケールの先進的気象学・気候学・大気科学」, 大槌, 8月(2024)
3. Yanase, T.: "Onset mechanism and spatial characteristics of high-level hierarchical structure of convective self-aggregation", Workshop on Global Storm-Resolving Analysis Bridging Atmospheric and Cloud Dynamics, Hakone, Jun (2024)

XXII-005 等質空間上の調和 q -指数型分布族の分類

Classification of Harmonic q -exponential Families on Homogeneous Spaces

研究者氏名: 東條 広一 Koichi TOJO

受入研究室: 革新知能統合研究センター
汎用基盤技術研究グループ
数理科学チーム
(所属長 坂内 健一)

本研究の目的は、等質空間上の“良い” q -指数型分布族を表現論によって統一的に扱う枠組みを与え、それによって“良い” q -指数型分布族を分類することである。

機械学習や、情報幾何、統計学において、正規分布族やガンマ分布族などを含む指数型分布族は、理論上も応用上も重要な研究対象である。さらに近年、指数型分布族の拡張とみなせる q -指数型分布族 ($q=1$ のときは指数型分布族)が、複雑系の数理や統計力学分野で重要な役割を果たしている。また、ユークリッド空間のみならず、

データの構造と相性のよい幾何構造を持った標本空間による現象の解析も近年大きく進歩しつつある。 q -指数型分布族は定義上無数にある一方、解析によく用いられるものはその一部に過ぎない。それらは、数学的には標本空間を等質空間 G/H とする、 G 不変な対称性を持つ分布族とみなすことができる。ここで G はリー群、 H は G の閉部分群である。そこで、次のような問題が自然に考えられる:

問題: 等質空間 G/H 上の G 不変 q -指数型分布族を統一

的に扱う枠組みを与えよ。さらに重要な等質空間 G/H に対して、G 不変 q -指数型分布族を分類せよ。部分問題：重要な等質空間 G/H 上に応用可能で具体的な q -指数型分布族を与えよ。

これまでに吉野太郎氏との共同研究により、G/H 上の G 不変指数型分布族を表現論を用いて系統的に構成する手法を提案した。さらに部分問題について、上半平面上の SL(2, R) 不変な q -指数型分布族を明示的に与えた。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Kannaka K., Okuda T., and Tojo K., “Zariski dense discontinuous surface groups for reductive symmetric spaces”, *Progress in Mathematics, Symmetry in Geometry and Analysis—Festschrift for Toshiyuki Kobayashi* (2025)*, in print

●口頭発表 Oral Presentations

1. 東條広一, “等質空間上の調和指数型分布族”, 幾何セミナー, 立命館大学, 6月(2024)
2. 東條広一, “Conjugate prior for NEF-GHS”, 数理・情報系研究集会, 京都大学, 7月(2024)
3. 東條広一, “等質空間上の調和指数型分布族”, 広島幾何学研究集会, 広島大学, 10月(2024)
4. 東條広一, “Hurwitz-Radon number associated with classical Lie groups and its application”, 数理・情報系研究集会, 愛媛大学, 11月(2024)
5. 東條広一, “簡約リー群の推移的な作用を許容する指数型分布族について”, 2024年度表現論ワークショップ, とりぎん文化会館, 1月(2025)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 東條広一, “表現論を用いた指数型分布族の構成法”, MfIP連携探索ワークショップ, 大阪公立大学, 9月(2024)

XXII-006 拡張された平均場理論を用いた原子核短距離相関の研究

Study of Nuclear Short-Range Correlation by Beyond Mean-Field Theory

研究者氏名：内藤 智也 Tomoya NAITO

受入研究室：数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

原子核は、陽子と中性子(核子)から構成される量子多体系である。核子自由度から出発して、原子核構造を計算する手法として、平均場理論(密度汎関数理論)が知られている。この、密度汎関数理論による原子核構造計算は広く成功を収めているものの、計算に用いるエネルギー密度汎関数(有効相互作用)が第一原理的に導かれていないこと、核子間の短距離相関が正確に考慮できないこと、という2つの大きな課題が知られている。この2つの課題を解決することが、本研究課題である。

本年度は、原子核密度汎関数理論の応用として、究極の陽子過剰核である ^{164}Pb の構造を予言した。当該原子核は、今まで合成されていないものの、アップグレードされた理研RIBF施設では到達可能であると考えられ、この核を合成し、性質を測定することで、原子核エネルギー密度汎関数の制限、あるいは核子間の相関を理解することにもつながると考えられる。

また、本年も引き続き、量子色力学に基づいた、エネルギー密度汎関数のアイソスピン非対称項の導出を行った。いままでは荷電対称性の破れに着目していたが、本年度は荷電独立性の破れに着目した計算を行った。一方、実験データとの比較も必要となる。実験データに基

づきアイソスピン対称性の破れを精度よく決定するため、新たな物理量 mirror-skin thickness を提案した。これらの研究は現在投稿準備中である。

平均場理論で抜け落ちている粒子相関をより適切に取り込む手法の開発にむけ、共同研究者とともに、一様核子系(対称核物質)における密度行列についての解析を行った。本解析は、原子核密度汎関数理論に抜け落ちている相関に関する情報、特に有効質量に関係する物理を得るための第一歩である。

また、他にも理研RIBF施設などを用いた複数の実験グループと、原子核構造に関する議論を行い、実験解析のための理論計算データを提供した。

●誌上発表 Publications

1. Yoshida, S., Sato, T., Ogata, T., Naito, T. and Kimura M.: “Accurate and precise quantum computation of valence two-neutron systems”, *Phys. Rev. C* **109**, 064305 (2024)*
2. Naito, T., Kimura, M. and Sasano, M.: “ ^{164}Pb : A possible heaviest $N=Z$ doubly magic nucleus”, *Phys. Rev. Research* **7**, 013050 (2025)*
3. Tajima, H., Moriya, H., Naito, T., Horiuchi, W.,

Nakano, E. and Iida, K.: “Polaronic neutron in dilute matter: A p -wave Bose polaron”, Phys. Rev. C 111, 025802 (2025)*

プロシーディングス

1. Naito, T., Colò, G., Hatsuda, T., Liang, H., Roca-Maza, X. and Sagawa, H.: “Possible inconsistency between phenomenological and theoretical determinations of charge symmetry breaking in nuclear energy density functionals”, Nuovo Cim. C 47, 52 (2024)*
2. Sagawa, H., Naito, T., Roca-Maza, X. and Hatsuda T.: “QCD sum rule approach to Okamoto-Nolen-Schiffer anomaly”, PoS QNP2025, 201 (2025)*

●口頭発表 Oral Presentations

(国際会議・招待)

1. Naito, T.: “Impact of the isospin symmetry breaking on the nuclear equation of state —Towards accurate description of nuclear structure —”, 73rd OMEG-SSANP Workshop “ r -process nucleosynthesis and some specific topics for nuclear physics”, ソウル, 3月 (2024)
2. Naito, T.: “Quantum multi-body problems using unsupervised machine learning”, 77th OMEG Workshop, ソウル, 10月 (2024)
3. Naito, T.: “Impact of the isospin symmetry breaking on nuclear properties”, SSNET’24 —International Conference on Shapes and Symmetries in Nuclei: from Experiment to Theory —, オルセー, 11月 (2024)
4. Naito, T.: “From Density to Energy Density Functional”, International symposium: TRIP Usecase: Nuclear Transmutation 2025, 和光, 3月 (2025)

(国際会議・一般)

1. Naito, T., Colò, G., Hatsuda, T., Roca-Maza, X. and Sagawa, H.: “QCD-based charge independence breaking energy density functional”, The 10th International Conference on Quarks and Nuclear Physics (QNP2024), バルセロナ, 7月 (2024)
2. Naito, T., Colò, G., Hatsuda, T., Roca-Maza, X. and Sagawa, H.: “Microscopic determination of the isospin symmetry breaking energy density functional”, XII International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSym24), カーン, 9月 (2024)
3. Naito, T.: “Impact of the isospin symmetry breaking on nuclear densities”, Low-Energy Electron Scattering for Nucleon and Exotic Nuclei (LEES2024), 仙台, 10月 (2024)
4. Naito, T., Colò, G., Hatsuda, T., Roca-Maza, X. and Sagawa, H.: “Isospin symmetry breaking energy density functional based on quantum chromodynamics”,

RCNP-CENuM-OMEG Symposium on Nuclear Structure, Reaction, and Astrophysics (NuSRAP2024), 茨木, 12月 (2024)

5. Naito, T., Colò, G., Hatsuda, T., Roca-Maza, X. and Sagawa, H.: “Isospin symmetry breaking energy density functional based on quantum chromodynamics”, VIIth Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure —The Many Facets of Nuclear Structure — (Bormio2025), ポルミオ, 2月 (2025)

(国内会議・招待)

1. Naito, T.: “(一般シンポジウム講演) Phenomenological determination of nuclear equation of state: current status and future”, 日本物理学会 2024年春季大会, オンライン, 3月 (2024)
2. 内藤智也: “KISS で目指す究極の原子核密度汎関数”, RIBF mini-workshop “How can laser spectroscopy at KISS contribute valuable insights to nuclear models?”, 和光, 5月 (2024)
3. 内藤智也: “Mirror skin and isospin symmetry breaking”, 第2回「新しいスキンを考える会」, 京都 (オンラインで発表), 11月 (2024)
4. Naito, T. “What Is The Possible Heaviest $N = Z$ Nuclei?”, Advancing physics at next RIBF (ADRI25), 和光, 1月 (2025)

(招待セミナー)

1. 内藤智也: “Density distribution of Ca”, 東京工業大学 ハドロンセミナー, 東京, 5月 (2024)
2. Naito, T.: “Quantum multi-body problems using unsupervised machine learning”, ICCUB HadNucAtUB Seminar, バルセロナ, 7月 (2024)
3. Naito, T.: “Towards First-Principles Energy Density Functionals”, ICCUB HadNucAtUB Seminar, バルセロナ, 11月 (2024)
4. 内藤智也: “SCRIT のための理論計算”, 粒子ビーム科学研究領域セミナー, 宇治, 3月 (2025)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Naito, T., Colò, G., Hatsuda, T., Roca-Maza, X. and Sagawa, H.: “Isospin symmetry breaking energy density functional based on quantum chromodynamics”, Single-particle and collective motions from many-body correlation (PCM2025), 会津若松, 3月 (2025)

(受賞)

1. PCM2025 Jury Prize at “Single-particle and collective motions from nuclear many-body correlation (PCM2025)”

XXII-007 Heavy Quarks In The Viscous And Hot Magnetized QCD Medium And Its Phenomenological Implications In Relativistic Heavy-ion Collisions

Name: Manu KURIAN

Host Laboratory: Theory Group

RIKEN BNL Research Center,

RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science

Laboratory Head : Yoshitaka HATTA

Relativistic heavy-ion collisions at the Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) in the United States and the Large Hadron Collider (LHC) in Europe provide opportunity to study the strongly interacting Quark-Gluon Plasma (QGP) under extreme conditions. Heavy quarks, such as charm and bottom quarks, are valuable tools for understanding the properties of the QGP. To understand the heavy quark dynamics in the collision experiments, it is essential to calculate their interactions in a more realistic, evolving strongly interacting medium by using the decent developments in relativistic hydrodynamic simulations to account for the QGP's dynamic nature. Additionally, non-central heavy-ion collisions are believed to generate extremely strong magnetic fields. However, theoretical studies have not systematically included the effects of these magnetic fields and the QGP's viscosity on heavy quark observables. In FY2024, my research addressed two key aspects of these challenges.

In the first work (2403.13160), we tried to explore the evolution and lifetime of the magnetic field created in the initial stages of heavy-ion collisions. We conducted the theoretical formulation of magnetohydrodynamics in the context of relativistic heavy-ion collisions. We focused on developing a realistic stable second-order dissipative magnetohydrodynamics by deriving these equations with an improved collisional term that takes account the interactions in the medium from an effective kinetic theory.

In the second project (2409.15038), we studied the pre-equilibrium dynamics of the heavy quarks in the context of heavy-ion collisions. We studied the charm quark transport while including its energy loss in both pre-equilibrium and hydrodynamic stages of the evolution. The sensitivity of the heavy meson nuclear modification factor and flow coefficient to the early stage of heavy-ion collisions and bulk medium evolution is analyzed for Pb+Pb collisions at 5.02 TeV. Our study provides insights into the interaction strength of charm quarks during the early phase and within the quark-gluon plasma.

In addition to that, I explored effects of collisional

processes in the hot QCD medium to thermal dilepton production. The analysis has been done by employing a quasiparticle model for the thermal QCD medium which incorporates the realistic equation of state. We have shown that the collisional corrections have a significant impact on the thermal dilepton spectra.

● Publications

Original Paper

1. Sunny Kumar Singh, Manu Kurian, Vinod Chandra: Revisiting shear stress tensor evolution: Non-resistive magnetohydrodynamics with momentum-dependent relaxation time; Physical Review D 110, 014004 (2024), published*.
2. Charles Gale, Sangyong Jeon, Manu Kurian, Björn Schenke, Mayank Singh.: Simulating Charm Quarks in IP-Glasma Initial Stage and Quark-Gluon Plasma: A Hybrid Approach for charm quark phenomenology; arXiv: 2409.15038, submitted*.
3. Adiba Sheik, Manu Kurian, Santosh K Das, Vinod Chandra, Sadhana Dash, Basanta K. Nandi: Heavy Quark Transport Coefficients in a Viscous QCD Medium with Collisional and Radiative Processes; Springer Proceedings of Physics 304 (2024) 1174-1176, published*.
4. Lakshmi J. Naik, V. Sreekanth, Manu Kurian, Vinod Chandra: Chromo-turbulent fields and lepton pair production from collisional hot QCD medium; Proc. Ind. Natl.Sci.Acad. 90 (2024) 1, 145-149, published*.

● Oral Presentations

Conference

1. Manu Kurian (speaker): Simulating Charm Quarks in IP-Glasma Initial Stage and Quark-Gluon Plasma: A Hybrid Approach for charm quark phenomenology, 21st International conference on Strangeness in Quark Matter, Strasbourg, France, 3-7 June, 2024.
2. Manu Kurian [Invited Seminar speaker at Arizona State University], Heavy quarks and magnetic field, School of Applied Sciences and Arts, Arizona State University, US, 4-11 March, 2024.

XXII-008 分子組成分布と機械学習を活用した星・惑星系形成の最初期過程の解明

Unraveling the Very Early Stage of Star and Planet Formation with the Aid of Molecular Distributions and Machine Learning

研究者氏名：大小田 結貴 Yuki OKODA

受入研究室：開拓研究本部

坂井星・惑星系形成研究室

(所属長 坂井 南美)

惑星系はいつから作られ始め、どのように進化していくかを観測的に明らかにすることを目指している。惑星系形成の「始まり」はその後の進化の方向を決定付け、惑星系の多様性の要因となると考えられるが、未だに新たな観測的発見が続く未解明課題である。私は、①非常に若い原始星と円盤構造の形成過程の徹底解明と、②初期円盤が原始星とともに進化する「共進化描像」の確立という2つの研究を進めている。本研究では、そこでの複雑な構造を切り分けるため、観測される分子輝線が特定の物理状態を選択的に反映することに着目し、それらを「分子マーカー」として利用する。

本年度は、上記の目的に向けて、主に以下のような研究を行った。

1. 所属研究室との共同研究を進め、原始星 B335 の重水素濃度を調べた。円盤/エンベロープ構造における化学組成及び、その運動を明らかにし、論文としてまとめ出版した。
2. JWST で捉えた高温部分の物理構造 (アウトフロー) の理解を進め、論文としてまとめた。
3. 星形成初期の複雑性の原因を調べるため、新たなデータを PI として取得し、初期成果を学会で発表した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Yuki Okoda, Yoko Oya (Kyoto University), Nami Sakai

(RIKEN), Yoshimasa Watanabe (Shibaura Institute of Technology), Ana López-Sepulcre (Univ. Grenoble Alpes), Takahiro Oyama (RIKEN), Shaoshan Zeng (RIKEN), and Satoshi Yamamoto (Sokendai), 「CH₃OH and Its Deuterated Species in the Disk/Envelope System of the Low-Mass Protostellar Source B335」 *The Astrophysical Journal*, 970, 28, 18pp, (2024)

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Yuki Okoda, Yao-lun Yang, Nami Sakai, CORINOS and FAUST team members, “Molecular and Ionic lines in a Protostellar Outflow through JWST and ALMA”, r-EMU, Wako, June, 2024
2. Yuki Okoda, Yao-lun Yang, Nami Sakai, CORINOS and FAUST team members, “Outflow Shocked Regions in a Very Young Protostellar source”, COSPAR, Busan, July, 2024
3. 大小田結貴, 大屋瑤子, Logan Francis, Doug Johnstone, 犬塚修一郎, and FAUST members: 「若い原始星天体 IRAS 15398–3359 の形成進化が周囲に与える複雑な影響」、日本天文学会秋季年会、関西学院大学、9月 (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Yuki Okoda, Yoko Oya, Logan Francis, Doug Johnstone, Shuichiro Inutsuka, and FAUST members, “Effects of a Young Protostar’s Evolution on its Surroundings”, Next Generation, November, (2024)

XXII-009 New Technologies to Study Electric Properties of Exotic Nuclei

Name: Martha Liliana CORTES SUA
Host Laboratory: Radioactive Isotope Physics Group
RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science
Laboratory Head : Hiroyoshi SAKURAI

This project intends to develop a new experimental technique to measure for the first time in a simultaneous way the electric dipole and quadrupole response of exotic nuclei. Such measurement will increase our knowledge on the forces driving shell evolution and give us insight in the r-process nucleosynthesis. For this, we have designed a new setup based on Cerium-doped Aluminum-Gallium Garnet (GAGG).

During the last year, we finalized the characterization of 20 samples of GAGG coupled to Silicon Photomultipliers. We measured the energy and time resolution of each sample using standard calibration sources in the laboratory. Furthermore, we tested the response of the detectors at high energies in two ways: First using an Am-Be source which can produce gamma rays of 4.4 MeV. Second, we used the Pelletron tandem accelerator to induce (p,gamma) reactions in an Al target and produce gamma rays of up to 10 MeV.

In addition, two clusters, composed of four GAGG samples each, were mounted as replacements of the existing DALI2+ detectors and tested under real experimental conditions. The Doppler-corrected spectrum showed promising results and marks the success of an important milestone of the project. The detailed analysis of the data from this experiment is still ongoing.

Two experiments aiming to measure the quadrupole responses of Ca and Ni isotopes have been approved by the RIKEN Nishina Center Program Advisory Committee (PAC) with the highest priority and we expect it to run within this year. For these experiments we plan to use more clusters of GAGG detectors as a replacement of DALI2. A large international collaboration has been formed around this project and thanks to their support we expect to have about 80 samples of GAGG available within this year.

● Publications

Papers

1. P.J. Li, J. Lee, et al., Spectroscopy of deeply bound orbitals in neutron-rich Ca isotopes. *Physics Letters B* 855, 138828 (2024)
2. B. D. Linh, A. Corsi, et al., Onset of collectivity for argon isotopes close to $N = 32$. *Physical Review C* 109, 034312 (2024)
3. A. Jungclaus, P. Doornenbal, et al., Position of the single-particle $3/2^-$ state in ^{135}Sn and the $N = 90$ subshell closure. *Physics Letters B* 851, 138561 (2024)
4. M. Enciu, A. Obertelli, et al., Spectroscopy of ^{52}K . *Physical Review C* 110, 064301 (2024)

● Oral Presentations

Conferences

1. M. L. Cortes. "The HYPATIA project at RIBF". Advancing physics at next RI Beam Factory (ADRI25). Wako, Japan. January 22-23, 2025
2. M. L. Cortes. "The HYPATIA project: Development of a new gamma-ray spectrometer at the RIBF". Fourth Andean School on Nuclear Physics. Bogotá, Colombia. December 9-13, 2024
3. M. L. Cortes. "Intermediate-energy Coulomb excitation of $N = 52$ isotones towards ^{100}Sn ". 10th SUNFLOWER Workshop. Wako, Japan. September 5-7, 2024
4. M. L. Cortes. "Intermediate-energy Coulomb excitation of $N = 52$ isotones towards ^{100}Sn ". Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2024). Wiesbaden, Germany. Jun 24 - 28, 2024
5. M. L. Cortes. "From SEASTAR to HYPATIA: Probing nuclear structure via direct reactions at the RIBF with an upgraded gamma-ray spectrometer". "Reimei workshop" on Intersection of Nuclear Structure and Direct Reactions. Tokai Culture Center, Japan February 28 - March 1, 2024

XXII-010 High-mass Star Formation

Name: Ross Alexander BURNS

Host Laboratory: Star and Planet Formation Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head: Nami SAKAI

My research focuses on the formation of high-mass stars. These are stars which are more than 8 times the mass of the Sun. While they only constitute less than 1% of the stellar population they are far more impactful than low mass stars in terms of the kinds of atoms they can produce and their energetic output, via both strong ionising radiation fields and powerful protostellar outflows. While low mass star formation is reasonably well understood, the formation of high-mass stars remains unclear, despite their importance to the energy budget of astronomical environments and the formation of Life in the Universe. The main puzzles which remain are, how do high-mass protostars (the stage before the star is fully formed) grow (a process termed 'accretion') and how is their angular momentum dissipated. Theoretically, episodes of accretion via an accretion disk provides a viable pathway for high-mass protostars to form, however these theories lack observational confirmation. My research focuses on providing the observational tests of these theoretical aspects of high-mass star formation. My approach is to use radio frequency astronomical observations, focusing on maser emission, to monitor and image the accretion disks and outflows of high-mass protostars. In doing so, I have identified observational evidence of episodic disk accretion in a high-mass protostar (my work was the first confirmation of episodic disk accretion in a high-mass protostar, leading to two publications in *Nature Astronomy*). Now I focus on searching for more examples of accretion bursts in high-mass protostars to test if our recent findings are ubiquitous, unique, or one component in a variety of accretion mechanisms. To achieve this, I lead an international research collaboration called the Maser Monitoring Organisation (M2O). Our goal is to identify and investigate accretion bursts in high-mass stars by monitoring the methanol maser emission flares which are a signpost of accretion bursts. The M2O now has over 100 member astronomers and utilises telescopes from all over the world in cooperation so that each event can be observed in a multitude of wavelengths. Much of my work involves organising the team and ensuring that the collaboration operates smoothly. We have recently added several new telescopes to our repertoire of observational facilities, including the Allen Telescope Array in the USA, a geodesy station in Portugal, and an interferometer in Latvia. We now

have 14 radio telescopes monitoring maser emission in addition to accepted observation proposals on many world class imaging telescopes such as ALMA, JWST, JCMT, SMA, and all of the major very long baseline interferometry (VLBI) arrays presently available. We have published more than 25 papers since 2017 when the M2O was established. I also lead the Interferometer for Variable Astronomical Radio Sources (IVARS) project which uses two refurbished radio telescopes in Latvia to conduct high-cadence (~weekly) monitor of the maser line and radio continuum emission in a sample of high-mass protostars, with the goal of monitoring how these emission processes vary during and following an accretion burst.

● Publications

Papers

1. James O Chibueze, Chukwuebuka J Ugwu, Tomoya Hirota, Kee-Tae Kim, Tie Liu, Jakobus M Vorster, Jihyun Kang, Jungha Kim, Ross A Burns, Andrey M Sobolev, Jihye Hwang, Chang Won Lee, Mi Kyoung Kim, Koichiro Sugiyama, "*Spiral Arm, Rotating Structure and Outflow Cavity in Massive Star-Forming Region G23.43-0.18*", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Accepted for Publication (2024).
2. Janis Steinbergs, Karina Skirmante, Artis Aberfelds, Vladislavs Bezrukovs, Ivar Shmeld, Ross Alexander Burns; "*Interferometer for variable astrophysical radio sources*", *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, In press (2024)
3. OS Bayandina, RA Burns, A Caratti o Garatti, SE Kurtz, L Moscadelli, NN Shakhvorostova, AM Sobolev, Y Tanabe, IE Val'tts, Y Yonekura. "*Star formation in G11. 497-1.485: Two-epoch VLA study of a 6.7 GHz methanol maser flare*", *Astronomy & Astrophysics*, 684, A86, (2024)
4. Zulfazli Rosli, Ross A Burns, Affan Adly Nazri, Koichiro Sugiyama, Tomoya Hirota, Kee-Tae Kim, Yoshinori Yonekura, Liu Tie, Gabor Orosz, James Okwe Chibueze, Andrey M Sobolev, Ji Hyun Kang, Chang Won Lee, Jihye Hwang, Hafieduddin Mohammad, Norsiah Hashim, Zamri Zainal Abidin "*Limits of water maser kinematics: insights from the high-mass protostar AFGL 5142-MM1*", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 527, 4, (2024)
5. A Aberfelds, J Šteinbergs, I Shmeld, RA Burns;

"Five years of 6.7-GHz methanol maser monitoring with *Irbene radio telescopes*", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 526, 4, (2023).

6. Anita Hafner, James A Green, Ashie Burdon, Elena Popova, Dmitry Ladeyschikov, Shari Breen, Ross Alexander Burns, James O Chibueze, MD Gray, Busaba Hutawarakorn Kramer, Gordon MacLeod, Andrey Sobolev, Maxim Voronkov; "M2P2 I: Maser Monitoring Parkes Program data description and Stokes-I OH maser variability", Publications of the Astronomical Society of Australia, 41, 009, (2023).

● Oral Presentations

Conferences

1. Burns R.A., M2O Collaboration, "Maser flare follow-up observations: radio, (sub)mm and infrared", James Chibueze's Star Formation Seminar, Online, 1st March 2024.
2. Burns R.A., M2O Collaboration, "High-mass protostar, Accretion burst, Keplerian Disk, Spiral Arms?" High-mass star formation workshop, Yamaguchi Japan, 5 - 6 March 2024.
3. Burns, "Episodic accretion and its influence on the physical parameters in high-mass star formation regions" rEMU Evolution of Matter in the Universe,

RIKEN Japan, 5-7 June 2024

4. Burns R.A., IVARS Collaboration "VLBI observations of maser emission using a remote time standard" Latvia University Conference, 21 March 2024.
5. Burns R.A. et al. M2O Collaboration, "VLBI observations of maser flares", European VLBI Network Seminar, YouTube Live, 17th June 2024.
6. Burns R.A., M2O Collaboration, "VLBI observations of 6.7 GHz methanol masers during maser flares", 15th The East Asian VLBI Workshop, Port Dickens, Malaysia, 28th - 31st October 2024

● Poster Presentations

Conferences

1. Burns R.A., M2O Collaboration, "大質量原始星降着バーストをメーザー発光でのモニターとマッピング観測", 宇宙電波懇談会, Tokyo Japan, 4-5 March 2024
2. Burns R.A., M2O Collaboration, "VLBI observations of methanol masers during a high-mass protostar accretion burst", Next Generation Astrochemistry workshop, Tokyo Japan, 7-8 March 2024
3. Burns R.A., M2O Collaboration, "VLBI observations of methanol masers during a high-mass protostar accretion burst", Next Generation Astrochemistry workshop, Tokyo Japan, 19-22 November 2024

XXII-011 超高空間分解能の赤外線観測と多波長観測による合体銀河が宇宙進化に果たした役割の解明

Role of Mergers in Evolution of Galaxies and Supermassive Black Holes Revealed with Ultrahigh-spatial-resolution Infrared and Multiwavelength Observations

研究者氏名：山田 智史 Satoshi YAMADA

受入研究室：開拓研究本部

榎戸極限自然現象理研白眉研究チーム
(所属長 榎戸 輝揚)

今年度が最終年度であり、これまで銀河とその中心のブラックホール (BH) の相互進化の物理メカニズムの解明に取り組んできた。1~2年目は電波からX線までの多波長放射を同時に解く計算モデルを構築し、それを初めて多数の合体銀河に適用した。合体銀河は2つの銀河の衝突段階にあり、合体段階毎にBHへのガス降着とBHから銀河全体へのガスの輸送量を解き明かした。その結果、合体が進むにつれてBHへの質量降着率が増加すると共に、特にdust grain(水や重金属など、生命の源)の赤外線放射の平均温度が徐々に下がり、合体進化を通してBH中心から銀河へと離れている(輸送されている)ことが示唆され、BHが銀河全体に生命の源を供給できる描像を支持する(Yamada+23)。1~3年目にかけてX線衛星XRISMの開発にも取り組んだ。この装置は従来

の30倍以上のエネルギー分解能を持ち、従来では不可能だった「宇宙に満ちた多様な領域の高温プラズマの元素組成比や運動」が初めて精密測定できる。2023年9月に打上げに成功し、即時性能評価ツールの開発リーダーとして衛星を開発・運用してきた。

今年度は、XRISMの初期観測データでチームとして論文を発表してきた(Letter 3件、Nature 1件は受理済み)。特にBHへの質量降着が非常に激しい銀河の観測も行い、光速の約0.2~0.3倍の速度でBHから噴出する5種類以上の離散的な速度を持つ高温ガスの存在を初めて明らかにした。このBHの風の構造にも強い制限が与えられ、驚くことに、1年辺りで太陽100個分のガスを銀河にまで運んでいることが判明し、BHが銀河全体に大きな影響があることを示す重要な証拠となった(約10

名で共同執筆、XRISM Collaboration, Natureに投稿中)。

また、2024年4月に第一期観測提案(競争倍率は約5.6倍)があり、私が代表者としてXRISMの長時間観測(約80時間)を獲得し、9月にデータを取得した。観測天体は、>100を超える銀河の集団(銀河団)であり、力強いBHの風の存在が知られるH1821+643という銀河団である。XRISMチーム全体で多数の銀河団を観測しており、銀河団内部の高温ガスの乱流速度(プラズマの激しさ)は~100~160km/s程度と、落ち着いた構造を持つと報告されてきた。しかし、我々の観たH1821+643では~300km/sであり、従来の予想を遥かに上回るものであった。銀河団自体に特殊な構造はないため、これはBHの風が、1つの銀河からその1000倍も半径の広い「銀河団全体」にまで強い影響を与えていることを示唆する。つまり、BHは銀河や銀河団、そして太陽系や地球、人類にまで影響を与えられる描像を示唆する(PIとしてNature論文を執筆中)。3年間で22編(内、3編は主著)の論文、6つの受賞/感謝状、8つの研究資金(~3800万円;海外学振や次の東北大学際研の研究費も含む)も獲得し、総じて、課題の進捗は順調と考えている。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Yamada, S.; Ueda, Y.; Kawamuro, T.; Ricci, C.; Toba, Y.; Imanishi, M.; Miyaji, T.; Tanimoto, A.; Ichikawa, K.; Herrera-Endoqui, M.; Ogawa, S.; Uematsu, R.; Wada, K.: “[O IV]- and [Ne V]-weak Active Galactic Nuclei Hidden by Compton-thick Material in Late Mergers”, *The Astrophysical Journal*, Volume 965, Issue 2, id.153, 10 pp. (2024a)
2. Yamada, S.; Kawamuro, T.; Mizumoto, M.; Ricci, C.; Ogawa, S.; Noda, H.; Ueda, Y.; Enoto, T.; Kokubo, M.; Minezaki, T.; Sameshima, H.; Horiuchi, T.; Mizukoshi, S.: “X-Ray Winds in Nearby-to-distant Galaxies (X-WING). I. Legacy Surveys of Galaxies with Ultrafast Outflows and Warm Absorbers in $z \sim 0-4$ ”, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Volume 274, Issue 1, id.8, 22 pp. (2024b)
3. Nagoshi, S.; Iwamuro, F.; Yamada, S.; Ueda, Y.; Oikawa, Y.; Otsuka, M.; Isogai, K.; Mineshige, S.: “Probing the origin of the two-component structure of broad-line region by reverberation mapping of an extremely variable quasar”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 529, Issue 1, pp.393-408 (2024)
4. Uematsu, R.; Ueda, Y.; Kohno, K.; Toba, Y.; Yamada, S.; Smail, I.; Umehata, H.; Fujimoto, S.; Hatsukade, B.; Ao, Y.; Bauer, F. E.; Brammer, G.; Dessauges-Zavadsky, M.; Espada, D.; Jolly, J.; Koekemoer, A.

M.; Kokorev, V.; Magdis, G. E.; Oguri, M.; Sun, F.: “ALMA Lensing Cluster Survey: Full Spectral Energy Distribution Analysis of $z \sim 0.5-6$ Lensed Galaxies Detected with millimeter Observations”, *The Astrophysical Journal*, Volume 965, Issue 2, id.108, 21 pp. (2024)

5. Mizukoshi, S.; Minezaki, T.; Sameshima, H.; Kokubo, M.; Noda, H.; Kawamuro, T.; Yamada, S.; Horiuchi, T.: “Updated picture of the active galactic nuclei with dusty/dust-free gas structures and effects of the radiation pressure”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 532, Issue 1, pp.666-680 (2024)
6. Toba, Y.; Masu, K.; Ota, N.; Gao, Z.; Imanishi, M.; Yanagawa, A.; Yamada, S.; Dosaka, I.; Kakimoto, T.; Kobayashi, S.; Kurokawa, N.; Oki, A.; Soga, S.; Shibata, K.; Takeuchi, S.; Tsujita, Y.; Nagao, T.; Tanaka, M.; Ueda, Y.; Wang, W.: “Discovery of a hyperluminous quasar at $z = 1.62$ with Eddington ratio >3 in the eFEDS field confirmed by KOOLS-IFU on Seimei Telescope”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 76, Issue 6, pp.1173-1180
7. XRISM Collaboration: “The XRISM first-light observation: Velocity structure and thermal properties of the supernova remnant N 132D”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 76, Issue 6, pp.1186-1201 (2024)
8. XRISM Collaboration: “Overionized plasma in the supernova remnant Sagittarius A East anchored by XRISM observations”, 受理済み, *Publications of the Astronomical Society of Japan*
9. XRISM Collaboration: “XRISM Spectroscopy of the Fe K α Emission Line in the Seyfert Active Galactic Nucleus NGC 4151 Reveals the Disk, Broad-line Region, and Torus”, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 973, Issue 1, id.L25, 14 pp. (2024)
10. XRISM Collaboration: “The XRISM/Resolve View of the Fe K Region of Cyg X-3”, *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 977, Issue 2, id.L34, 13 pp.
11. XRISM Collaboration: “XRISM Reveals low non-thermal pressure in the core of the hot, relaxed galaxy cluster Abell 2029”, 受理済み, *The Astrophysical Journal Letters*
12. XRISM Collaboration: “The Bulk Motion of Gas in the Core of the Centaurus Galaxy Cluster”, 受理済み, *Nature*

●口頭発表 Oral Presentations

1. Yamada, S.: “X-ray Winds In Nearby-to-distant Galaxies (X-WING) – I: Legacy Surveys of Galaxies with Ultrafast Outflows and Warm Absorbers in $z \sim 0-4$ ”, 10th Galaxy Evolution Workshop, ASIAA, Taiwan, 2024年8月
2. Yamada, S.: “[O IV]- and [Ne V]-weak AGNs Hidden

- by Compton-thick Material in Late Mergers”, AGN across the sky: new windows opened by HSC and other wide-field surveys, Hokkaido Information University, 2024年8月
3. Yamada, S.: “X-ray Winds In Nearby-to-distant Galaxies (X-WING) – I: Legacy Surveys of Galaxies with Ultrafast Outflows and Warm Absorbers in $z \sim 0-4$ ”, AGN Feedback and Star Formation Across Cosmic Scales and Time, Teatro Cortesi, Italy, 2024年9月
 4. Yamada, S.: “Latest observational results of bright AGNs”, The History and Future of X-ray Astronomy 2024, Rikkyo University, 2024年12月
 5. 山田智史:「XRISM衛星で観る宇宙形成の姿」、「宇宙線学」の共創:宇宙線でつなぐ天体と生命の共進化の多角的探究、大阪公立大学、2024年5月
 6. 山田智史:「X-Ray Winds In Nearby-to-distant Galaxies (X-WING) Project」、最先端の観測装置と理論の両輪で探る降着現象の物理、京都大学、2024年5月
 7. 山田智史:「X-WINGプロジェクト:1999年から現在までに検出された $z \sim 0-4$ の全X線アウトフローとXRISMが開拓するAGN Feedbackの研究」、日本天

- 文学会2024年秋季年会、関西学院大学、2024年9月
8. 山田智史:「X線で観た銀河合体」、The Violent Universe、国立天文台、2024年9月(招待講演)
 9. 山田智史:「XRISM AO1: H1821+643の観測結果」、XRISM衛星AO1の結果を受けたAGNワークショップ、東北大学、2024年10月
 10. 山田智史:「XRISM衛星で開拓するブラックホール・銀河・銀河団の全体像」、大阪大学宇宙X線セミナー、大阪大学、2025年1月(セミナー講演)
 11. 山田智史:「XRISMの観測:H1821+643が示す銀河団へのAGN Feedbackの描像」、第3回XRISM衛星AGNワークショップ、福岡教育大学、2025年2月
 12. 山田智史:「XRISMの初期成果:巨大BH近傍から銀河団まで」、Revealing the Nature of Supermassive Black Hole Coronae with Synergy of XRISM and ALMA、大阪大学、2025年3月

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 山田智史:「Role of Mergers in Evolution of Galaxies and Supermassive Black Holes Revealed with Ultrahigh-spatial-resolution Infrared and Multiwavelength Observations」、SPDR成果発表会、理研、2025年1月

XXII-012 銀河磁場モデルに基づく最高エネルギー宇宙線起源天体の特定

Search for UHECR sources considering the deflection by the galactic magnetic field

研究者氏名: 樋口 諒 Ryo HIGUCHI

受入研究室: 開拓研究本部

長瀧天体ビッグバン研究室

(所属長 長瀧 重博)

10の20乗電子ボルトを超えるエネルギーを持つ宇宙線を最高エネルギー宇宙線(UHECR)と呼ぶ。UHECRの起源の観測的証拠は見つかっていない。北半球のテレスコープアレイ実験(TA 実験)・南半球のAuger 実験の両者の観測結果から、UHECRの到来方向分布の異方性(異方性)が報告されている。異方性はUHECR起源天体の分布と相関すると考えられる。そのためUHECRの観測事象数を増やす事・得られた異方性の統計解析から起源天体の種族を同定する事がUHECRの起源の解明において重要となる。

2023年度出版のTelescope Array 実験最高エネルギー粒子「アマテラス粒子」の検出を受けて、UHECRの中でも特に高エネルギー事象の到来方向の議論が高まりつつある。特に10の20乗eV以上のUHECRの到来方向分布からは、明確な異方性は見つかっていない。これを説明するためには、「(1)起源天体密度が高い(2)宇宙磁場が強い(3)重い原子核」の三つの可能性が考えられる

が、これらの縮退を解くことは難しい。

また、近年r過程由来の重元素粒子(例:ウラン)によってUHECR 起源を説明するアイデアが提唱されている(G. Farrar 2024, B.T. Zhang et al. 2024)。陽子や鉄よりも大きい磁場の偏向・より長い伝播距離によって、等方なUHECR分布を再現する事が容易となる。

上記の(1)-(3)仮定の縮退を解くために、申請者は大規模構造シミュレーションMillenium Run(Springel et al. 2005)の銀河カタログを用いて・陽子・鉄・ウランの場合に対して10の20乗eVの宇宙線の到来方向分布予測を行った。予想される到来方向分布から、10の20乗eVの宇宙線の到来方向分布が等方となる(1)-(3)のパラメータを制限した。その結果、10の20乗eVのUHECRの質量組成が陽子である場合は等方分布を再現できない事・ウランの場合は磁場が強い場合と起源天体密度が大きい場合において等方分布を説明できることがわかった。この成果は国際会議UHECR2024で発表し、論文

化を急いでいる。

●誌上発表 Publications

1. Higuchi, Ryo et al., Influence of Galactic magnetic fields on UHECR energy spectrum and mass composition on the Earth, PoS (ICRC2023) 460 (抄録)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Ryo Higuchi, "The importance of cosmic magnetic fields in the interpretation of ultrahigh-energy cosmic ray observations", Cosmic Magnetism in the Pre-SKA Era, Inamori Kaikain, Kagoshima University, Japan, May 27 - 31, 2024
2. Ryo Higuchi, "Constraints on super-heavy UHECR source model with a large-scale structure simulation", Nucleosynthesis and Evolution of Neutron Stars, Kyoto University, 2025年1月(予定)

3. 樋口諒、「宇宙線で結ぶ銀河と宇宙磁場」、「宇宙線学」の共創：宇宙線でつなぐ天体と生命の共進化の多角的探究、大阪公立大学、2024年5月
4. 樋口諒、「望遠鏡アレイ実験による最高エネルギー宇宙線観測と銀河磁場の影響の評価」、日本天文学会2024年秋季年会、関西学院大学、2024年9月

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Ryo Higuchi et al., "Insights on super-heavy UHECRs scenario with large-scale structure simulation", UHECR2024, Malargue, Argentina (2024)
2. Ryo Higuchi et al., "Correlation studies on UHECR arrival direction and source candidates, with a convolution of magnetic field and mass composition", UHECR2024, Malargue, Argentina (2024)
3. 樋口諒ほか、「大規模構造シミュレーションに基づく重元素最高エネルギー宇宙線起源の検討」、日本天文学会2025年春季年会、茨城大学、2025年(予定)

XXII-013 Nanostructured devices of quantum materials

Name: Thomas Maximilian BIRCH

Host Laboratory: Strong Correlation Quantum Transport Research Team
RIKEN Center for Emergent Matter Science

Laboratory Head: Yoshinori TOKURA

Electronic transport measurements are an indispensable tool for probing the fundamental nature of quantum materials. For example, in recent years, the fundamental symmetry properties and unique dynamic behaviours of quantum materials have been probed by nonlinear transport phenomena – where the Ohm's law of conduction breaks down. Moreover, exotic phenomena such as quasi-ballistic and hydrodynamic electron transport have been observed. However, for bulky single crystal materials, these nonlinear voltage signals can be rather small, and thus difficult to measure. Alternatively, while these signals can be larger in thin-film devices, which naturally have small cross sections, the material quality is typically inferior.

In our recent works, we have exploited focused ion beam (FIB) methods to fabricate microscale devices from high quality single crystal samples. With such a milling procedure, it is possible to microstructure a slab of the material on the sub-micrometer scale, thus producing devices with geometries which greatly enhance the nonlinear signals, to where they can easily be detected by lock-in measurements.

Our first target was the current-induced motion of magnetic skyrmions – nanoscale whirls of magnetisation which are topologically protected. In a metallic skyrmion-host, the conduction electrons couple to the winding, noncoplanar spin texture, and

this gives rise to remarkable quantum phenomena. Under an applied current, the electrons are deflected as they experience an emergent magnetic field while traversing the skyrmion lattice, giving rise to an additional transverse voltage known as the topological Hall effect. Above a certain current threshold, the magnetic skyrmions may depin from the underlying crystal lattice and begin to slide under the electron flow. This gives rise to an emergent electric field which opposes the initial transverse topological Hall voltage. The resulting emergent electrodynamics are dictated by the relative velocity of the conduction electrons and sliding magnetic skyrmions.

Classically, once the skyrmions totally depin from the atomic lattice, they should reach the conduction electron drift velocity, and thus the topological Hall effect would be completely cancelled. However, in a real multiband quantum material, such a cancellation is not guaranteed – the drift velocity of the conduction electrons is poorly defined, and in reality each electron band will exhibit a different momentum shift.

In our experiment, we utilised the FIB method to fabricate a microscale Hall bar device from a single crystal of the skyrmion host Gd_2PdSi_3 [1]. This allows for larger current densities to be applied, and increases the topological Hall effect signal. In the measurements, we detected the dynamic transition

of the skyrmion lattice motion from the pinned to creep and flow regimes, and observed the cancellation of the topological Hall effect. Our theoretical work proposes a possible mechanism behind this apparent emergent Galilean relativity. Typically the momentum shift of each conduction electron band is determined by the band-dependent relaxation time, and the whole electron distribution shifts to balance these dissipative effects. However, we argue that in the regime where the electron mean free path is larger than the skyrmion size, the skyrmion motion itself may dictate the momentum shift and thus act as a pacemaker for the conduction electrons.

In future projects, we shall apply this FIB fabrication method to study a multitude of quantum phenomena. For example, a similar experiment to that described above can be performed to study the sliding motion of charge density waves. Moreover, FIB fabrication allows for careful placement of contacts along symmetry axes of quantum materials, allowing detailed anisotropic transport measurements to be performed and probe underlying symmetry breaking effects. Finally, we recently developed the possibility to sculpt the single crystalline materials into three dimensional shapes, unlocking the potential for studying geometry-dependent transport effects in high-mobility quantum materials with long mean free paths.

● Publications

Original Paper

1. Birch M. T., et al.: Dynamic transition and Galilean relativity of current-driven skyrmions. *Nature* 633, 554-559 (2024).
2. Birch M. T., et al.: Influence of magnetic sublattice ordering on skyrmion bubble stability in 2D magnet Fe_3GeTe_2 . *ACS Nano* 18, 18246-18256 (2024).
3. Birch M. T., et al.: Control of stripe, skyrmion and skyrmionium formation in the 2D magnet Fe_3GeTe_2 by varying composition. *2D Materials* 11, 025008 (2024).

● Oral Presentations

Conferences:

1. Birch M. T., et al.: "Nonreciprocity in nanosculpted helices of high-mobility Weyl magnet $\text{Co}_3\text{Sn}_2\text{S}_2$ " CEMS Research Camp, Saitama, Japan. November (2024).
2. Birch M. T., et al.: "Dynamic Transition and Emergent Galilean Relativity of Skyrmions under Electron Flow" ICSM, Feithye, Turkey. May (2024).
3. Birch M. T., et al.: "Dynamic Transition and Emergent Galilean Relativity of Skyrmions under Electron Flow" SPP2137 Skyrmionics Conference, Kloster Seeon, Germany. September (2024).
4. Birch M. T., et al.: "X-ray Microscopy of Magnetic Topological Spin Textures – From van der Waals Magnets to Bulk Chiral Systems" Microscopy and Analysis Conference, Cleveland, USA. August (2024).

XXII-014 量子計算機を制御する超伝導量子インターフェース回路

Superconducting Quantum Interface Circuits For Control To Quantum Processors

研究者氏名：向井 寛人 Hiroto MUKAI
受入研究室：量子コンピュータ研究センター
超伝導量子シミュレーション研究チーム
(所属長 蔡 兆申)

量子コンピュータは近年多くの注目を集め大きく進歩している分野の一つです。その中でも超伝導体を用いたマイクロ波回路は広く用いられ最も量子コンピュータの実現に近いプラットフォームの一つとなっています。

超伝導量子回路からなる量子コンピュータの基本構成単位の超伝導量子ビットは希釈冷凍機と呼ばれる装置の中で10 mKという非常に極低温で動作させる必要があります。一方で、その量子状態の求められる精密な観測・制御のために室温から極低温までマイクロ波の配線が必要となります。既存の研究では少数の量子ビットの操作であったため、個別配線による冷凍機への影響は小さく抑えられていました。しかし、実用的な量子コンピュータに

は多くの量子ビットを集積することが求められ、それに伴う配線の影響は大きくなり冷却能力を超えてしまいます。

本研究ではこれまでの超伝導量子ビット制御を活かしながらも、配線数を削減できるインターフェースを開発しています。具体的には、本年度はインターフェースとなる超伝導マルチプレクサーの回路構築と、量子ビットを使用した量子スイッチの応用を研究し、その周辺技術についても研究を実施しました。

超伝導量子マルチプレクサーの開発において、共同研究を行いました。極低温環境下で信号を分配し、量子ビットの制御を行う実証を部分的に実現しました。現在この実証をより詳細に制御し量子ビットの完全な制御を目指

しています。

最後に本テーマの適応先である超伝導量子ビットチップの開発も行いました。基幹要素であるジョセフソン接合蒸着装置の導入及び立上げを実施しました。また、マルチ量子ビットチップについても設計、作成、評価を実施し動作することを確認しました。

このようにテーマの研究だけでなく超伝導量子コンピュータの実現に必要な基礎実験を行いました。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Daisuke Hoshi, Toshiaki Nagase, Sangil Kwon, Daisuke Iyama, Takahiko Kamiya, Shiori Fujii, Hiroto Mukai, Shahnawaz Ahmed, Anton Frisk Kockum, Shohei Watabe, Fumiki Yoshihara, and Jaw-Shen Tsai Entangling Schrödinger's cat states by seeding a Bell state or swapping the cats Nature Communications 16, 1309 (2025)
2. Shuji Nakamura, Teruaki Yoshioka, Sergei Lemziakov, Dmitrii Lvov, Hiroto Mukai, Akiyoshi Tomonaga, Shintaro Takada, Yuma Okazaki, Nobu-Hisa Kaneko, Jukka Pekola, Jaw-Shen Tsai Probing instantaneous quantum circuit refrigeration in the quantum regime Physical Review Applied 23, L011003 (2025)

XXII-015 フラストレート格子上的トポロジカル物性

Topological Phases on Geometrically Frustrated Lattices

研究者氏名：村山 陽奈子 Hinako MURAYAMA
受入研究室：創発物性科学研究センター
強相関物性研究グループ
(所属長 十倉 好紀)

カゴメ格子やハニカム格子などのフラストレート格子と呼ばれる構造を持ついくつかの磁性絶縁体では、量子スピン液体など、トポロジカルに非自明な基底状態や準粒子励起が知られている。近年では、フラストレート格子をもつ遍歴電子系も盛んに研究され、多くのトポロジカル電子構造や磁気構造が発見されており、そのような格子構造は新しいトポロジカル物性を探索するプラットフォームになると考えられている。そこで本研究では、フラストレート格子の一つである Shastry-Sutherland 格子に着目した。この格子構造は磁性絶縁体としてよく研究されてきたモデルだが、遍歴電子系についての研究はそれほど進んでおらず、他の格子構造とは本質的に異なる物性を有する可能性がある。とくにこの格子の対称性から許される Dzyaloshinskii-Moriya 相互作用は非共線的な磁気構造をもたらす可能性が高く、特徴的な磁気構造とそれによる特異な輸送現象が期待できる。本年度は、希土類元素による Shastry-Sutherland 格子を含む物質である Gd_2Cu_2In と Dy_2Cu_2In 単結晶の合成を行い、磁化とホール伝導率の詳細な温度依存性と磁場依存性を調べた。その結果、単純な強磁性相に加えて、非自明な磁気構造が

出現している可能性が示唆された。今後は希土類元素の L3 吸収端での共鳴 X 線散乱により、磁気構造を特定し、この格子構造特有の磁性と輸送現象を議論する。

ほかにも本年度は、電子ドープ型銅酸化物高温超伝導体 $Nd_{2-x}Ce_xCuO_4$ ($x = 0.15, 0.125$) や $Pr_{2-x}Ce_xCuO_4$ ($x = 0.15$) の単結晶試料の合成も行い、圧力下での輸送測定、AC 磁化測定、放射光を用いた構造解析を行った。その結果、希土類元素の種類によって超伝導転移温度の圧力依存性が全く異なることがわかった。今後は理論計算と共に、希土類元素が電子状態に与える影響を議論する。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. R. Namba, K. Imamura, R. Ishioka, K. Ishihara, T. Miyamoto, H. Okamoto, Y. Shimizu, Y. Saito, Y. Agarmani, M. Lang, H. Murayama, Y. Xing, S. Suetsugu, Y. Kasahara, Y. Matsuda, K. Hashimoto, and T. Shibauchi, Two-step growth of high-quality single crystals of the Kitaev magnet α - $RuCl_3$, Phys. Rev. Materials 8, 074404 (2024).*

XXII-016 普遍金属触媒が協働する有機ナトリウム化学の開拓 Exploring Organosodium Chemistry with Earth-Abundant Metal Catalysis

研究者氏名：高橋 一光 Ikko TAKAHASHI
受入研究室：環境資源科学研究センター
機能有機合成化学研究チーム
(所属長 Laurean ILIES)

有機ナトリウム化合物は1840年代に発見された。これは有機リチウム化合物や有機マグネシウム化合物 (Grignard 反応剤) といった有機金属反応剤の歴史の中でも最初期に当たる。それにも関わらず、現代において有機ナトリウム化合物の利用は皆無である。その理由として、有機ナトリウム化合物は反応性が高く不安定であるため精密な有機合成に使えないという固定観念があった。さらに有機ナトリウム化合物の調製は元来より難しく、これが応用研究への大きな障害となっていた。本研究では1世紀半に渡り日陰者であった有機ナトリウム化合物に焦点を当てる。本研究課題を達成した暁には、これまで未開拓であった有機ナトリウム化学を現代の有機金属化学のレベルにまで一挙に引き上げられる。

今年度は、「鉄触媒と酸化剤を用いる有機ナトリウム化合物の酸化的ホモカップリング反応」と「鉄触媒によるアリールナトリウム化合物とハロゲン化アルキルのクロスカップリング反応」の2つの合成反応について基質一般性の検討を実施した。酸化的ホモカップリング反応は幅広い有機ナトリウム化合物に対して適用可能であった。さらに本手法を用いて有機電子材料として知られる機能性分子を合成した。これらの有機ナトリウム化合物は我々が開発した還元的ソジ化あるいはハロゲン-ナトリウム交換反応によって系中で調製した。クロスカップリング反応において、求核剤であるアリールナトリウム化合物と

求電子剤であるハロゲン化アルキルの基質一般性を検討した。アルキル基やシリル基、メトキシ基、アミノ基といった頻出する官能基が置換したアリールナトリウム化合物で問題なく目的のカップリング反応が進行した。求電子剤についても同様に酸素原子や窒素原子、フッ素原子を内包したハロゲン化アルキルで良好に目的物を得た。クロスカップリングの反応機構の解明に向けて、スイス・ベルン大学の Hevia 教授と国際共同研究を実施した。その結果、クロスカップリング反応の達成の鍵であるジアミン添加剤は有機ナトリウム化合物の会合構造を緩和することで反応性を向上させるとともに、触媒である鉄に対して配位することでカップリング反応における反応性が制御されていることを見出した。本研究をまとめた成果は *Nature Synthesis* 誌に掲載される。

本研究課題を通じて、持続可能性と環境調和性に優れたナトリウムと鉄を基盤としたサステナブルなカップリング反応を世界で初めて達成した。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Takahashi I., Tortajada A., Anderson D. A., Ilies L., Hevia E. and Asako S.: "Iron-catalysed direct coupling of organosodium compounds", *Nat. Synth.* (2025). accepted*

XXII-017 分子のねじれを利用するエネルギー変換素子の創出 Energy Conversion Devices Using Molecular Twisting

研究者氏名：齋藤 仁志 Hitoshi SAITO
受入研究室：創発物性科学研究センター
創発機能高分子研究チーム
(所属長 但馬 敬介)

本研究は、共役有機分子のねじれに起因する電子状態の変化を利用した新たなエネルギー変換素子の創出を目標とした。特に共役系内に二重結合を挟んで双生イオン性を持つ化合物に着目した。このような共役双生イオン化合物は、主として非線形光学材料やクロミック材料など、外環境および光と特異的な相互作用を起こす点が注

目され研究されてきた。一方で、本研究では中心となる二重結合が動的にねじれることで基底状態からさらに電子雲の偏りを大きくし、最高被占軌道(HOMO)のエネルギー準位を大きく上昇させる点に着目し、光に限らずエネルギー変換を行う電子デバイスへの応用が可能ではないかと考えた。

計算化学からのアプローチでは、分子構造と構造変化に応じた電子のエネルギー状態のシミュレーションを行った。また、計算結果で得られた電子雲の確率分布から情報エントロピーの算出を行い、熱エネルギーを受けた高エネルギー状態の分子状態において電子雲のみの観点では逆に情報エントロピーが減少していることなどを確かめた。

また、共役双生イオン分子のほとんどは固体状態で分子運動がほぼ凍結していたため、分岐アルキル基を多数有することで融点を室温以下程度に下げ、凝集性を落とした共役双生イオン分子を合成した。この合成した共役双生イオン分子の温度可変UV-vis吸収スペクトルから固体薄膜状態でも温度の上昇に応じてバンドギャップを狭める様子の確認に成功した。また、この分子を強アクセプター材料であるF4-TCNQの薄膜上に塗布し、ドーパ状態の温度依存性を調べた。通常のドーパントでは温

度上昇によって脱ドーパが進行するのに対し、反対に温度の上昇によってドーパ効率が向上し、またその繰り返し性も良好である様子が確認できた。しかし、導電性やゼーベック効果などを調べるには十分ではなく、より深い検証には至らなかった。また、合成した共役双生イオン分子を添加したドナー材料・アクセプター材料との混合素子などの作成も行ったが、温度刺激等での特異的な電流電圧特性の発現は極めて微弱な範囲でありノイズとの切り離しが困難なレベルに留まった。

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. [Hitoshi Saito](#), Keisuke Tajima: “Energy Conversion Devices Using Molecular Twisting”, The 10th CEMS Research Camp, 熊谷市, 3月(2024)

XXII-018 強誘電異方性流体の創発物性機能の理解からさらなる新展開へ

Ferroelectric nematic materials: from scientific deepening and new developments

研究者氏名：西川 浩矢 Hiroya NISHIKAWA
受入研究室：創発物性科学研究センター
ソフトマター物性研究チーム
(所属長 荒岡 史人)

強誘電ネマチック(NF)における巨視的なキラリティの出現は、局所的な一軸性分極秩序を形成する傾向と、その場合における巨視的体積の静電エネルギーの増加とおよびその間のフラストレーションに関連している。本研究ではこのような自発的なキラリ基底状態の存在が、より弾性の大きな強誘電性スメクチックにおいて出現しうるかを探索することを目的とした。ねじれた強誘電性スメクチック構造を探索するために、我々はまずNF-SmAF相転移を示す2種類のトランベースの極性分子、nBOE-NO2およびnDIOLTを開発した。いずれの場合も、末端鎖が長い分子ではNF相が不安定化する傾向があり、一方SmAF(SmXF)相は安定化する傾向があった。DR、PRC、SHG測定により、NF、SmAF、SmXF相に強誘電性が存在することが明らかになった。反平行セルでは、NF、SmAF、SmXF相は消光位を示さず、ドメインウォール(DW)を示した。POM観察およびCD測定により、DWがキラリな隣接ドメインを分離し、ねじれたスメクチック(T-SmAFおよびT-SmXF)構造が形成していることが分かった。T-NFおよびT-SmAF状態では、nBOE-NO2のみに竜鱗紋様組織を示す中間構造が現れた。ねじれた構造(T-SmAFおよびT-SmXF)の生成は、

XRD研究でも裏付けられた。自立膜サンプルのXRDプロファイルでは、SmAF相とSmXF相において、有限の角度(約60°)を持つ2つの明確な回折ピークが観察された。さらに、反平行セルにおいて、イオン液体[BMIM][PF6] (1wt%)をSmAF相およびSmXF相にドーパすることで、部分的にねじれた構造が観察された。SmAF相およびSmXF相をラビング処理したPI膜板とラビング処理していないPS膜板で挟み込むと、ねじれた構造と部分的にねじれが解けた構造が現れた。この事実は、極性スメクチックブロックの自発的ねじれが、脱分極によって駆動されるNF相のキラリ基底状態を継承することによって生じたことを示唆している。重要なのは、このようなT-SmAFおよびT-SmXF構造がnBOE-NO2では圧倒的に多く生じる一方で、nDIOLTでは非ねじれ構造が好まれることである。これらの違いは、分子の立体障害、脱分極、弾性などの要因によって決定される可能性がある。このように極性誘起キラリティはNF相だけでなく、より強い弾性を持つスメクチック相においても生じることが明らかになった。このような極性誘起キラリティを、より秩序の高い極性(結晶)相において実現することにより、キラリティ誘起スピン選択性に基づくスピン偏極電

流を発生させるスピフィルターの新製に期待される。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Kikuchi H., Nishikawa H., Matsukizono H., Iino S., Sugiyama T., Ishioka T. and Okumura Y.: "Ferroelectric smectic C liquid crystal phase with spontaneous polarization in the direction of the director" *Adv.Sci.*, 11 2409827 (2024)*
2. Yamaguchi M., Okumura Y., Nishikawa H., Matsukizono H. and Kikuchi H.: "Memorable electro-birefringence effect exhibited by transparent liquid crystal/polymer composite materials" *Adv.Electron.Mater.*, 10, 2400055 (2024)*
3. Nishikawa H., Okada D., Kwaria D., Nihonyanagi A., Kuwayama M., Hoshino M. and Araoka F.: "Emergent ferroelectric nematic and heliconical ferroelectric nematic states in an achiral "straight" polar rod mesogen" *Adv.Sci.*, 11 2405718 (2024)*
4. Máthé M., Nishikawa H., Araoka F., Jáklí A. and Salamon P.: "Electrically activated ferroelectric nematic microrobots" *Nat.Commun.*, 15 6928 (2024)*
5. Okada D., Nishikawa H. and Araoka F.: "Tunable intracavity coherent up-conversion with giant nonlinearity in a polar fluidic medium" *Adv.Sci.* 11 2405227 (2024)*

(解説)

1. 西川浩矢, 荒岡史人: "メカノケミカル合成を用いた極性流体分子の高速スクリーニング", 日本液晶学会, 液晶, 29巻, 2025年1月発行予定.

●口頭発表 Oral Presentations

(国際)

1. Nishikawa H., Okada D., Kwaria D., Nihonyanagi A. and Araoka F.: "Observation of heliconical ferroelectric nematic phase in straight polar rod mesogens", 10th Japanese-Italian Workshop on Liquid Crystals (JILCW2024), Miyazaki, Japan, Sep. (2024)
2. Nishikawa H., Kwaria D., Nihonyanagi A. and Araoka F.: "Mechanochemical-assisted screening of ferroelectric fluid molecules", 29th International Liquid Crystal Conference (ILCC 2024), Rio de Janeiro, Brazil, Jul. (2024)
3. H. Nishikawa H.: "Ferroelectric fluid synthesis factory: Ferroelectric-nematic, -smectic, -heliconical nematic, -helielectric smectic etc.", Workshop on Ferroelectric Nematic Liquid Crystals, Ljubljana, Slovenia, May (2024)
4. Nishikawa H., Okada D., Kwaria D., Nihonyanagi A., Kuwayama M. and Araoka F.: "Emergent heliconical ferroelectric nematic phase in a "straight" and "rigid" polar rod mesogen", 2024 Japanese Liquid Crystal Conference, Toyama University (Gofuku campus), Japan, Sep. (2023)

XXII-019 Developing a Method for Extracting Cascades from *C. elegans* Whole-Brain Activities.

Name: Chentao WEN

Host Laboratory: Laboratory for Developmental Dynamics
RIKEN Center for Biosystems Dynamics Research
Laboratory Head : Shuichi ONAMI

Overview: Recent imaging technologies have enabled scientists to record whole-brain activity at single-neuron resolution. However, analyzing such comprehensive data in a quantitative manner remains challenging. This study aims to understand whole-brain activity in the nematode *C. elegans* by accurately extracting neuronal activity and identifying individual neurons. Additionally, it seeks to estimate dynamic, directional influences among neurons. This approach will help reveal cascades of neuronal activity that are critical to various brain functions, such as sensory processing, decision-making, and motor control, among others.

From 2022 to 2023, I developed a pipeline to analyze

cascades from whole-brain activity. I also enhanced my cell tracking method, 3DeeCellTracker, to improve cell segmentation and tracking accuracy, particularly when faced with poor image quality and large rotations. In 2024, I refined the 3DeeCellTracker further, enabling efficient cell tracking even under challenging conditions, such as freely moving worms or those undergoing significant deformations. The improved pipeline has been applied to challenging datasets from multiple collaborated laboratories and obtained satisfactory results. Additionally, I created computer-assisted software tools to manually correct tracking and identification errors. These advancements enable the extraction of more accurate whole-brain

neuronal activities and neuron IDs, enabling reliable follow-up analyses of neural cascades. Below are detailed descriptions of these advancements:

Efficient cell tracking under challenging conditions: Minimizing constraints on alive animals is vital for studying natural neuronal dynamics. To study whole-brain activity in fast-moving worms, high-speed imaging techniques can reduce motion artifacts, but they also introduce cumulative tracking errors and computational bottlenecks. To address these challenges, I developed a similarity matrix-based algorithm to optimize volume matching order, thereby reducing cumulative errors. Additionally, I improved tracking speed by narrowing the search space for cell matching and offloading time-intensive cell position refinement from CPU to GPU. These optimizations substantially cut runtime, for example, the cell tracking time for 10,000 image volumes of head neuron images can be reduced from 40.6 to 11.5 hours.

Collaborative applications: My tracking method has been applied to projects tracking neuronal activity in freely moving and semi-constrained *C. elegans*, as well as populational neuronal activity analysis in the zebrafish gut. These collaborations demonstrate the versatility and adaptability of the method across different experimental conditions and model organisms.

Error correction tools: For many of the real tasks, the automatic cell tracking and identification results inevitably contain errors. While these require manual proofreading, the process is often time-consuming and complex. I developed software tools to enhance correction efficiency. For tracking errors, the software integrates visual comparisons of raw cell images, tracked positions, and extracted neuronal signals, enabling quick adjustments. For identification errors, tools incorporating the comparisons of the identified neurons and their neighboring cells with the atlases facilitate accurate neuron ID assignments.

Future study: These advancements make it much easier to study the whole-brain activity obtained in naturalistic settings. The optimized tracking algorithms and innovative error correction tools can extract more accurate whole-brain activity along with their corresponding neuron IDs. By using these neuron activity and ID data, I will be able to analyze neural cascades at the whole-brain scale. Such insights

will contribute to a deeper understanding of neuronal interactions and pave the way for further exploration of brain functions. In addition, future efforts will refine these tools and extend their application to other model organisms and experimental conditions.

● Publications

Papers

1. Sprague D.Y., Rusch K., Dunn R.L., Borchardt J.M., Ban S., Bubnis G., Chiu G.C., Wen C., Suzuki R., Chaudhary S., Lee H.J., Yu Z., Dichter B., Ly R., Onami S., Lu H., Kimura D.K., Yemini E., Kato S., Unifying community whole-brain imaging datasets enables robust neuron identification and reveals determinants of neuron position in *C. elegans*. *Cell Reports Methods*, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.crmeth.2024.100964>
2. Matsumoto M., Matsushita K., Hane M., Wen C., Kurematsu C., Ota H., Nguyen B.H., Thai Q.T., Herranz-Perez V., Sawada M., Fujimoto K., Garcia-Verdugo M.J., Kimura D.K., Seki T., Sato C., Ohno N., Sawamoto K.*: Neuraminidase inhibition promotes the collective migration of neurons and recovery of brain function. *EMBO Mol. Med.* 16, 1228 – 1253. (2024). <https://doi.org/10.1038/s44321-024-00073-7>

Books

1. Wen C.*, Deep Learning-Based Cell Tracking in Deforming Organs and Moving Animals. *In: Imaging Cell Signaling. Methods in Molecular Biology*, vol 2800. Wuelfing, C., Murphy, R.F. eds. (New York, NY: Humana Press), pp. 203-215, 2024. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3834-7_14

● Poster Presentations

1. Wen C., Suzuki R., Zhang X., Shinkai S., Mu Y., Kimura K., Onami S., Integrated 3D Tracking and Registration Techniques for Large-Scale Neuronal Activity Extraction, 生理研研究会「大規模脳活動計測～我々は何を測り、どこへ行くのか?」, Okazaki, Japan, September 4-5, 2024.
2. Wen C., Suzuki R., Zhang X., Shinkai S., Mu Y., Kimura K., Onami S., Enhanced 3D cell tracking: Reliable and precise extraction of large-scale neuronal activity under challenging imaging conditions, The Future of Nematode Research 2024 (nFuture 2024), Online, August 27-28, 2024.

XXII-020 直列重複かつ冗長タイプの重複遺伝子を対象とした環境ストレス応答・馴化メカニズムの探索

Exploring New Mechanisms of Abiotic Stress Response and Acclimation in Tandem Duplicates with Redundancy

研究者氏名：江副 晃洋 Akihiro EZOE
受入研究室：環境資源科学研究センター
植物ゲノム発現研究チーム
(所属長 関 原明)

直列重複かつ冗長タイプの重複遺伝子は、シグナル伝達経路のハブの役割を持つ可能性がありながら、これまでの遺伝学的スクリーニングでは解析できないため、詳細な遺伝子機能解析が行われていない。これらの重複遺伝子は、モデル植物のシロイヌナズナでは環境ストレス応答・馴化に関連する可能性が高いことが分かった。そこで、これらの重複遺伝子の機能解析を行えば、作物などの環境ストレス応答・馴化の強化につながることを期待される。

本研究では、まず、様々な植物での直列重複かつ冗長タイプの重複遺伝子の保存性や機能多様性を評価する。その後、保存性の高い、または機能多様性が著しく高いまたは低い重複遺伝子のうち、環境ストレス応答・馴化シグナル経路で重要な機能を持つ遺伝子グループを同定する。注目した遺伝子グループの詳細な解析を行うことで、直列重複かつ冗長タイプの重複遺伝子が制御する未知の環境ストレス応答・馴化メカニズムの解明を目指す。

昨年度に上記のうち、重複遺伝子が多いコムギやキャッサバに対して、重複遺伝子の保存性や機能多様性の解析を行った。その結果、コムギの重複遺伝子は、シロイヌナズナと比較して一定の保存性はあったものの、コムギゲノム内での遺伝子機能の多様性が著しく低いことが分かった。これらの遺伝的多様性が低い原因について探索を行い、本年度はこの結果をまとめて論文化を行った(誌上発表・原著論文1に対応)。また、植物インフォマティクス研究会と分子生物学会でも発表を行った(それぞれ口頭発表1とポスター発表1に対応)。この結果のプレスリリースを行ったところ、多くの反響があり、様々な新聞記事として取り上げられた。

この論文化作業を進めるうちに、重複遺伝子と環境ストレス応答の間に強い関連性があるものの、過去の文献情報ではそれぞれが独立に言及されていることが多いと感じた。そこで、環境ストレスと重複遺伝子の関係性を総説としてまとめ、論文化した(誌上発表・総説1に対応)。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. [Ezoe, Akihiro](#) et al. "Decrease in Purifying Selection Pressures on Wheat Homoeologous Genes: Tetraploidization Versus Hexaploidization." *The Plant Journal*, 120.3 (2024). 1190-1205.
2. [Ezoe, Akihiro](#), et al. "Pathway-based prediction of the therapeutic effects and mode of action of custom-mademuherbal medicines." *Molecular Informatics* 43.11 (2024): e202400108.
3. Todaka, D., Quynh, D. T. N., Tanaka, M., Utsumi, Y., Utsumi, C., [Ezoe, A.](#), ... & Seki, M. (2024). Application of ethanol alleviates heat damage to leaf growth and yield in tomato. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1325365.

(総説)

1. [Ezoe, Akihiro](#), & Seki, Motoaki. (2024). Exploring the complexity of genome size reduction in angiosperms. *Plant Molecular Biology*, 114(6), 121.

(単行本)

1. 戸田陽介、江副晃洋、吉村恵実(旧姓:河野)、“Pythonで実践・植物画像解析ハンズオン v1.0”、株式会社フィトメトリクス、(2024)

●口頭発表 Oral Presentations

1. [江副晃洋](#)、[関原明](#)、“コムギの2回の異質倍数化イベントによるホメオログ遺伝子ペアの自然選択圧と機能分化への影響の比較”、第七回植物インフォマティクス研究会、北九州市、9月(2024年)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. [江副晃洋](#)、[関原明](#)、“コムギにおける4倍体化と6倍体化の自然選択圧への影響の比較”、第47回日本分子生物学会年会、福岡市、11月(2024)

XXII-021 大規模フィールドオミクス解析による、葉 - 根間の栄養バランス調節を司る遺伝子制御ネットワークの解明

Elucidation of gene regulatory networks involved in the modulation of nutrient supply/uptake balance between leaves and roots by large-scale field-omics.

研究者氏名：大熊 直生 Nao OKUMA

受入研究室：バイオリソース研究センター

植物 - 微生物共生研究開発チーム

(所属長 市橋 泰範)

現在までに1500種を超える植物のゲノムが公開されているが、スクリーニング的試験を含めても、その機能が検証された遺伝子は最も研究されているシロイヌナズナでさえ50%程度であり、イネでは2%未満とされている。この様に、従来の実験室内のみでの植物遺伝子の機能の解明には大変な時間的コストが掛かると考えられる。本研究では、農業圃場において様々な環境条件で栽培した作物の遺伝子発現や代謝産物データ、土壌および土壌細菌の大規模マルチオミクスデータと機械学習を組み合わせることで、ハイスループットに農業圃場で働く遺伝子の機能を推定することを試みた。

最初に、複数のクラスタリング手法や相関ネットワーク解析を用いて、共発現する遺伝子群に分類した。これらの遺伝子は、遺伝学的に同一経路上にあることが予想されるため、クラスターごとに、勾配ブースティングやPartial least squareベースの機械学習的な手法を組み合わせて、遺伝子機能の予測を試みた。具体的には、Transcriptome以外の複数のOmicsデータを教師データとし、クラスター内のTranscriptomeデータを予測するモデルを作成した。一つの例として、GO enrichment解析では光応答、窒素・糖代謝のタームがenrichしている遺伝子クラスター (Module1) の発現量を予測するために重要な特徴量は、植物体の窒素及び糖類の含有率や土壌中の糖類の含有率であることがわかった。これは、GOと機械学習による予測結果が一致していると捉えられる結果であり、解析結果としてリーズナブルであると考えられた。反対に、別の例として、GO termはエピジェネティックな作用に関わるものがenrichしている遺伝子クラスター (Module2) において、今回のマルチオミクスデータを用いた解析では、それらの発現量はほとんど土壌/根圏細菌の存在量で説明できるという結果が得られた。

次に、Module1とModule2の遺伝子について機能解析を行うために、シロイヌナズナT-DNAラインを用いて、変異体の解析を行った。Module1では、多くの変異体で野生型と比べて多くの変異体のバイオマスが減少した。炭素量は植物の生育の根幹をなす光合成と密接に関

係していることから、予測した結果と実際の機能が一致している可能性がある。更に、Module2の遺伝子のいくつかの欠損変異体では、土壌から抽出した微生物群を接種すると、野生型と比べて主根長が減少がみられた。無菌環境下での主根長には差がないことから、土壌微生物に対する感受性が変化している可能性がある。これらの結果から、本手法と圃場マルチオミクスデータを用いることで、遺伝子の機能を予測できる可能性があると考えられた。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Periodic cytokinin responses in *Lotus japonicus* rhizobium infection and nodule development Takashi Soyano, Akira Akamatsu, Naoya Takeda, Masaaki K. Watahiki, Tatsuaki Goh, Nao Okuma, Norio Suganuma, Mikiko Kojima, Yumiko Takebayashi, Hitoshi Sakakibara, Keiji Nakajima, Masayoshi Kawaguchi *Science* 2024年7月19日
2. Time course transcriptomic profiling suggests Crp/Fnr transcriptional regulation of nosZ gene in a N₂O-reducing thermophile Jiro Tsuchiya, Sayaka Mino, Fuki Fujiwara, Nao Okuma, Yasunori Ichihashi, Robert M. Morris, Brook L. Nunn, Emma Timmins-Schiffman, Tomoo Sawabe *iScience* 2024年11月15日

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Nao Okuma, Daisuke Sugiura, Ichiro Terashima, Masayoshi Kawaguchi, "Control of nitrogen metabolism under non-symbiotic conditions by the HAR1 receptor that regulates the number of nodules.", 第65回日本植物生理学会年会, 神戸大学, 3月 (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Nao Okuma, Daisuke Sugiura, Ichiro Terashima, Masayoshi Kawaguchi: "Lotus japonicus CLV1-Like Receptor HAR1 Regulates Nitrogen Utilization to Promote Growth Under Non-Symbiotic Conditions.", International Congress on Nitrogen Fixation, Rabat,

2024年9月

2. 大熊直生、熊石妃恵、福島敦史、小林奈通子、濱本昌一郎、草野都、成川恵、伊達康博、田野井慶太郎、二瓶直登、市橋泰範：“サイズとコマツナの大規模フィールドオミクスデータによる植物遺伝子機能の予測”、日

本植物学会、宇都宮大学、9月（2024）

3. 大熊直生、二瓶直登、市橋泰範：“アブラナ科とマメ科根圏からの生育促進細菌の探索”、日本微生物生態学会、広島国際会議場、10月（2024）

XXII-022 新生児マウスにおける低温耐性喪失機構の解明

Understanding the mechanism of the transient cold tolerance in neonatal mice

研究者氏名：齋藤 祐一 Yuichi SAITO

受入研究室：生命機能科学研究センター

心臓再生研究チーム

（所属長 木村 航）

多くの生物はしばしば訪れる生存困難な環境変化を乗り越えるために体温や呼吸、心臓の拍動などが低下した低代謝状態で生き残る能力を有している。一方で、冬眠動物以外の哺乳類はこのような能力をもたず、深部体温が数度低下するだけでも致命的な障害となるが、非冬眠動物においても新生児期には低体温に対する耐性をもつことが報告されている。新生児の低温耐性は現象として知られており、マウスなどの小型動物を中心に実験的にも検証されているものの、その成立と喪失の要因は明らかになっていない。低体温と復温により個体死に至るメカニズムの詳細、どのようにして新生児が低体温に伴う障害を逃れているのか、なぜ低温耐性が失われるのか、このいずれもが未解明である。

そこで本研究課題では、実験的に低体温と復温を誘導するモデルを用いて、低温および復温による障害メカニズムの包括的な解析、および低温耐性喪失の要因として、出生後の新生児に起こる内因性・外因性的な変化が低温耐性喪失に与える影響の解析を進めた。

本年度は、昨年度に引き続き新生児マウス心筋細胞初代培養系において細胞の低温感受性変化を担う経路の詳細な検討を進めた。また、出生後にも低温耐性を喪失しない冬眠動物であるシリアンハムスターを比較対象とすることで、出生後に低温耐性の喪失を回避するための分子機構の同定を行った。これらの検討により、少なくとも心臓において出生後に低温耐性が喪失する要因とその背景となる生理的变化を明らかにした。本研究結果から冬眠動物において同定された低温耐性喪失回避機構を非冬眠動物において活性化することで、低体温耐性を喪失した動物に対して必要に応じ低体温耐性を付与するという応用が期待される。

●誌上発表 Publications

（原著論文）

1. Yuichi Saito, Yuki Sugiura, Akane Sakaguchi, Tai Sada, Chihiro Nishiyama, Rae Maeda, Mari Kaneko, Hiroshi Kiyonari, Wataru Kimura: "Redox-dependent purine degradation triggers postnatal loss of cardiac regeneration potential", Redox Biology, in press.

●口頭発表 Oral Presentations

（学会）

1. Yuichi Saito, Wataru Kimura: "Interspecies metabolomic comparison revealed that purine metabolism regulates postnatal cardiomyocyte cell cycle arrest", METABOLOMICS 2024, Osaka, 6月（2024年）
2. Yuichi Saito, Wataru Kimura: "Postnatal alterations in cardiac purine metabolism cause cardiomyocyte cell cycle arrest", 57th Annual Meeting of the Japanese Society of Developmental Biologists, Kyoto, 6月（2024年）
3. 齋藤祐一：“出生による心筋増殖停止メカニズムの探索”，2024年度日本心脈管作動物質学会若手研究者交流シンポジウム，福岡，10月（2024年）
4. Yuichi Saito, Wataru Kimura: "Multispecies comparison of postnatal cardiomyocyte cell cycle arrest in mammals", EMBO Workshop Molecular mechanisms of developmental and regenerative biology, Kobe, 11月（2024年）
5. 齋藤祐一，木村航：“出生に伴う心筋増殖停止機構の異種間比較解析”，CVMW2024, Tokyo, 12月（2024年）
6. 齋藤祐一，木村航：“異種間比較による哺乳類低体温耐性喪失機構の解明”，第54回日本心脈管作動物質学会年会，福岡，1月（2025年）

●ポスター発表 Poster Presentations

（学会）

1. Yuichi Saito, Wataru Kimura: "Multispecies comparison of postnatal cardiomyocyte cell cycle arrest in mammals", EMBO Workshop Molecular mechanisms of developmental and regenerative biology, Kobe, 11月（2024年）

XXII-023 分裂期の染色体動態によって制御される受精卵の核内染色体配置と遺伝子発現プロファイルの解明

Embryonic Chromosome Territory and Gene Profiles Regulated by Dynamic Behavior during Mitosis

研究者氏名：竹之内 修 Osamu TAKENOUCHI
受入研究室：生命機能科学研究センター
染色体分配研究チーム
(所属長 北島 智也)

受精卵では発生のステージごとに、遺伝子発現プロファイルが変化していく。ステージ特異的な遺伝子発現プロファイルが発生を適切に進めるうえで重要であることが知られている。しかし、受精卵が遺伝子発現プロファイルをどのように変化させていくのかについては未解明な部分が多い。一方、FISHによる解析によって、マウスやウシ初期胚内の一部の染色体のテリトリーが変化することが確認された。特に、遺伝子発現が大きく活性化されるステージ以降にテリトリーが大きく変化することが明らかとなり、遺伝子発現プロファイルと染色体テリトリーの相関が示唆された。しかし、染色体テリトリーを攪乱・制御する方法は確立されておらず、染色体テリトリーと遺伝子発現が本当に相関しているのか検証できていない。また、間期における染色体は、比較的安定的な局在を示し、ダイナミックな動きが少ないことが知られており、初期胚の染色体テリトリーがどのように変化しているのかは不明である。そこで、本研究では、Cas9を用いた新規DNA配列標識技術を用いて、マウス初期胚における個々の染色体の動的挙動を分裂期から間期に至るまで網羅的に解析し、受精卵における染色体テリトリーと遺伝子発現プロファイルの制御メカニズムを解明する。本研究では、分裂期の個々の染色体の動的挙動に注目する。仮説として、分裂期において個々の染色体の動原体-微小管接合の安定性やタイミングがステージごとに変化し、細胞分裂の瞬間における染色体配置が間期の染色体テリトリーに変化を与え、遺伝子発現プロファイルの変化につながるという仮説を設定し、その証明を行っていく。

本年度は、受精卵を用いて個々の染色体特異的に存在するDNA配列の可視化を行った。

(1) 核内テリトリーの定量解析を行った。3D FISH

Probeでは可視化に限界があることが判明した。今後はIn situ sequence法の導入を検討する。

(2) 分裂期の個々の染色体の体積を定量するAI Segmentationプログラムの検討を行い、既存のプログラムでは定量が困難であることが判明した。他ラボと共同で染色体に特化したオリジナルのプログラムを構築する。

●口頭発表 Oral Presentations

1. Osamu Takenouchi, Koji Kyoda, Shuichi Onami, Tomoya Kitajima: "Development of an imaging toolbox for analysis of individual chromosome dynamics in live mouse oocytes", 理研Decode seminar, 神戸, 11月 (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Osamu Takenouchi, Yogo Sakakibara, Tomoya Kitajima: "Live chromosome identifying-and-tracking reveals size-based spatial pathway of meiotic errors in oocytes", EMBO workshop, 神戸, 11月 (2024)

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Osamu Takenouchi, Yogo Sakakibara, Tomoya Kitajima: "Live chromosome identifying and tracking reveals size-based spatial pathway of meiotic errors in oocytes", Science, 385(2024)

(総説)

1. 竹之内修、北島智也: "老化とともに崩壊する卵母細胞の染色体制御", 実験医学, (2024)
2. 竹之内修: "老化した卵母細胞の中で小さな染色体が分配異常になる原因の解明", 実験医学(2025)

XXII-024 植物遺伝学とケミカルバイオロジーの融合による葉緑体オートファジーの分子理解と応用展開

Interdisciplinary Approach between Plant Genetics and Chemical Biology for Understanding Molecular Mechanism of Chloroplast Autophagy

研究者氏名：中村 咲耶 Sakuya NAKAMURA

受入研究室：環境資源科学研究センター

分子生命制御研究チーム

(所属長 萩原 伸也)

植物細胞内で光合成によるエネルギー生産を担うオルガネラである「葉緑体」の機能は、植物の成長能力や作物の生産性を強く規定している。また、植物は生育段階や環境に応じて葉緑体を自ら分解することで、体内での効率的な栄養素の再利用を実現している。これまでに、真核生物に保存される細胞内分解系である「オートファジー」が、強烈な可視光や紫外線といった光ストレスによって傷害を受けた葉緑体を選択的に取り除くことを見出してきた。この仕組みを「クロロファジー」と呼んでいる。本研究では特に、損傷葉緑体を認識してオートファジーの主要因子と結びつける「レセプター機構」の解明など、クロロファジーの詳細な分子機構の解明を進めてきた。その達成のため、遺伝学、合成化学、ケミカルバイオロジーの手法を活用する融合研究を行った。

本年度は、前年度までに同定したクロロファジー機能因子候補について、その機能解析を進めた。着目している候補因子に蛍光タンパク質を融合させた可視化コンストラクトを前年度に作製しており、これを導入した形質転換シロイヌナズナを作出し、光ストレス時の細胞内局在解析を進めた。その結果、リン脂質結合ドメインをもつ一部の膜交通因子が、クロロファジーの分解対象となる損傷葉緑体表面に集積する様子などを捉えることに成功した。これらの解析から、細胞内でタンパク質の小胞輸送を行う仕組みである「膜交通」に関与するとされてきた因子が、クロロファジーの過程で機能することが明らかと

なった。

加えて、クロロファジーを人為的に誘導する技術基盤の構築にも取り組み、オートファジーにおいて分解対象を認識する鍵因子であるATG8を、葉緑体上に人為的に集積させる系を構築することに成功した。今後、この植物でクロロファジーが誘導できるか、個体レベルでの窒素利用効率が向上するか、などの解析を行うことで、葉緑体分解の活性化が植物の成長や栄養利用に及ぼす影響が詳細に明らかになることが期待される。

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 中村咲耶：“膜交通因子が関わる液胞への葉緑体輸送過程の解析”、第11回エンドメンブレンミーティング JANPER2024、熊本、9月(2024)
2. 中村咲耶、海老根一生、植村知博、上田貴志、萩原伸也、泉正範：“シロイヌナズナ葉において損傷葉緑体を除去するクロロファジーへの膜交通因子の関与”、第66回 日本植物生理学会年会、金沢、3月(2025)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. 中村咲耶、高木大輔、石田宏幸、萩原伸也、泉正範：“シロイヌナズナ葉においてクロロファジー分解対象となる葉緑体を生じさせる障害要因の解析”、日本土壤肥料学会 2024年度福岡大会、福岡、9月(2024)

XXII-025 Understanding the Role and the Limits of Niche Conservatism in Speciation

Name: Jose Said GUTIERREZ ORTEGA

Host Laboratory: Interdisciplinary Mathematical Sciences Program
RIKEN Interdisciplinary Theoretical and
Mathematical Sciences Program

Laboratory Head: Tetsuo HATSUDA

A well-known pattern of biodiversity is that the tropics (low latitudes, around the equator) shelter more species than temperate areas (high latitudes, closer

to the poles). This suggests that tropical species can coexist more easily with their relatives, despite being ecologically and functionally similar. The evolutionary

process(es) that created these trends are not known. One hypothesis is that when species diverge, they have to either withstand or avoid competition with their sisters, but the different conditions in tropical and temperate regions offer different opportunities and constraints. In the tropics, when sister species diverge, they can more easily maintain similar or identical ecological needs and functions because they experience relatively mild climatic and resource constraints, allowing them to withstand competition. In contrast, at high latitudes, when sister species diverge from one another, they must shift their needs and functions to avoid the harsher competition brought about by the larger climatic fluctuations and scarcer resources. To test this hypothesis, I am using two concepts taken from evolutionary biology: niche conservatism (NC), which is the tendency of species to maintain ancestral ecological requirements, such that species that are closely related tend to be ecologically and functionally similar; and niche divergence (ND), which is the tendency of species to differentiate from their sisters. If the hypothesis is correct, one would expect NC to be the dominant mechanism for speciation in the tropics, and ND to be the dominant mechanism in temperate areas. I focused on fern sister species that populate the American continent as a model group to understand the relationship between latitude and speciation. Using geographic and climatic data of ferns' localities, I constructed ecological niche models to test whether the niches are significantly more similar or dissimilar than expected from random, respectively corresponding to patterns of NC or ND. Instances when niches were neither significantly similar nor dissimilar were classified as cases of niche equivalency (NE). To clarify the latitudinal variation on the frequency of the three niche evolution categories (NC, ND, and NE), I calculated the proportions of ND:NC:NE of all fern species identified within each 1-degree latitudinal band. I divided all fern species found into two main groups of fern genera: tropical and temperate. From 342 sister species pairs analyzed, I found that NC is more common in the tropics than in temperate regions. This was especially true for species classified as belonging to the tropical genera. But surprisingly, NC was also common in temperate genera at high latitudes, where there is a high diversity of temperate species. These results suggest that tropical sister species tend to be phylogenetically predisposed to maintain ecologically similar niches, contrasting with the widespread idea that sister species avoid ecological competition to achieve genetic isolation leading to speciation. On the other hand, ND was equally common at all latitudes, suggesting a pervasive role

of natural selection leading to speciation regardless of perceived or actual environmental constraints. NE was the most common pattern, suggesting that in most cases, niche data analyses cannot clarify the relative roles of geographic and ecological isolation: both factors interplay in a process that remains unknown, and that I will cover in a future study. This research clarifies that NC might be often involved in the origin of species and the local community assemblies of ferns throughout the American continent. Future work exploring other groups and in other continents are needed to determine to which extent these results are representative of a wider global pattern.

● Publications

Papers

1. Deloso B., Gutiérrez-Ortega J.S., Ito-Inaba Y., Chang J.T., Lindstrom A.J., Terry L.I., Donaldson J., Tang W., Cave R., Gómez-Díaz J.A., Handley V., Griffith M.P. and Marler T.E.: Biological invasion by the cycad-specific scale pest *Aulacaspis yasumatsui* (Diaspididae) into *Cycas revoluta* (Cycadaceae) populations from Amami-Oshima and Okinawa, Japan. *Plant Species Biology*. in print.*
2. Englehardt J.D., Carrasco M.D., Gutiérrez-Ortega J.S., Deloso B.E., Matsubara N. 2024. Threats to cycad biocultural heritage in the Amami Islands, Japan. *Plant Species Biology*. <https://doi.org/10.1111/1442-1984.12494>. (2024).*
3. Pérez-Farrera M.A., Ramirez-Oviedo S.M., Martínez-Martínez M.G., Moreno Mendez G., Rocha Loreda A.G. and Gutiérrez-Ortega J.S.: *Ceratozamia chinantlensis* (Zamiaceae): A new cycad species from La Chinantla, Oaxaca, Mexico. *Taxonomy* 4(4): 733–747. (2024).*
4. Pérez-Farrera M.A., Díaz-Jiménez P., Quezada M.L., Marroquín-Tintí A., Delgado-Montejo H.M., Mendoza-Montejo S.A. and Gutiérrez-Ortega J.S.: *Ceratozamia guatemalensis* (Zamiaceae): A new cycad species from Mesoamerica. *Phytotaxa* 668(1): 63–80. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.668.1.4> (2024).*
5. Pérez-Farrera M.A., Martínez-Martínez M.G., Moreno-Méndez G., Vovides A.P. and Gutiérrez-Ortega J.S.: *Ceratozamia alba* (Zamiaceae): A new cycad species from the Selva El Ocote Biosphere Reserve in Chiapas, Mexico. *Phytotaxa* 666(4): 257–276. (2024).*
6. Gutiérrez-Ortega J.S. and Villarreal A., J.C.: A possible case of adaptive radiation in cycads. A commentary on “Transcriptome sequencing data provides a solid base to understand the phylogenetic relationships, biogeography and reticulated evolution of the genus *Zamia* L. (Cycadales: Zamiaceae). *Annals of Botany* 134(5): i–ii. (2024) *

● Oral Presentations

Conferences

1. Gutiérrez-Ortega J.S. 2025. Modes of speciation tend to vary with latitude in ferns. 72nd Annual Meeting of the Ecological Society of Japan. Sapporo, Hokkaido, Japan. 18 March, 2025.
2. Gutiérrez-Ortega J.S. 2024. Natural history of cycads: Deciphering the “Rosetta Stone of plant evolution”. Department of Biology, School of Education, Hoso Laboratory, Waseda University. 9 December 2024.
3. Gutiérrez-Ortega J.S. Discovering botany: an introduction to the Realm of Plants. ASCENT-6E. JST Next Generation Science and Technology Challenge Program. Chiba University. 15 July 2024.
4. Gutiérrez-Ortega J.S.. 2024. Patterns of ferns community assembly and diversification explain the

latitudinal gradient of biodiversity. iTHEMS NOW & NEXT, 19 July 2024.

● Poster Presentations

Conferences

1. Gutiérrez-Ortega J.S., Pérez-Farrera M.A., Matsuo A., Sato M., Suyama Y., Calonje M., Vovides A.P., Kajita T., Watano Y. 2024. Disparate patterns of niche evolution in the diversification of the Neotropical cycad genus *Ceratozamia* (Zamiaceae). RIKEN 28th Interdisciplinary Exchange Evening. 22 November 2024. Wako, Saitama Prefecture, Japan.
2. Gutiérrez-Ortega J.S.. Modes of speciation in ferns tend to vary with latitude. iTHEMS NOW & NEXT, 19 July 2024.

XXII-026 チロシンセンシングを基軸とした新規寿命延長機構の解明

Novel mechanisms of lifespan extension triggered by sensing tyrosine scarcity

研究者氏名：小坂元 陽奈 Hina KOSAKAMOTO

受入研究室：生命機能科学研究センター

栄養応答研究チーム

(所属長 小幡 史明)

体内アミノ酸量の感知は、あらゆる動物にとって栄養環境への適応のために必須の能力である。しかし、必須アミノ酸と比較して、食餌から摂らずとも体内で十分に生合成できるとされる「非必須」アミノ酸を感知するメカニズムの理解は立ち遅れている。ショウジョウバエを用いた解析から、非必須アミノ酸であるチロシンが体内で欠乏すると、*4E-BP*の発現上昇に代表される飢餓応答が脂肪組織特異的に誘導されることを見出した。興味深いことに、チロシンの単一摂取制限を行うことで、ショウジョウバエの寿命が延長することがわかった。チロシン制限が惹起する飢餓応答を介在する転写因子としてATF4を同定しているが、その活性化には古典的経路を介さない新規経路の存在が示唆された。そこで本研究課題では、チロシン制限が飢餓応答を誘導し、寿命延長をもたらす新たな分子機構の解明を目的とした。

本年度は、チロシンセンサー実体の候補タンパク質についての機能解析を行い、チロシン感知に関わる表現型への影響を検証した。また、前年度までに行ったATF4レポーター細胞株を用いたゲノムワイドスクリーニングの結果を受けて、候補遺伝子に対してショウジョウバエでの機能解析を行った。これらの結果、核内受容体やスプライシングファクターがATF4を制御する可能性について見出し、現在論文化を進めている。

一方、ショウジョウバエ成虫のチロシン制限中における表現型解析についての解析も進め、寿命延長のメカニズムや表現型発露に必要な条件についてまとめ、論文化して発表した。成虫期のチロシンだけでなく、幼虫期のチロシン量摂取も寿命制御に関与することを見出したため、発生期栄養環境の記憶メカニズムとして論文化中である。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Kosakamoto H., Aikawa H., Kitazawa S., Sakuma C., Okada R., Miura M. and Obata F.: “Dietary zinc restriction mimics protein restriction and extends lifespan in *Drosophila*”, bioRxiv. (2024)
2. Kosakamoto H., Sakuma C., Okada R., Miura M. and Obata F.: “Context-dependent impact of the dietary non-essential amino acid tyrosine on *Drosophila* physiology and longevity”, *Science Advances*, 10(35) eadn7167(2024)*

●口頭発表 Oral presentations

(学会)

1. Kosakamoto H. and Obata F.: “Nutritional memory of developmental diet mediated by storage protein Lsp2”, AusFly meeting 2024, Marysville, Australia, October (2024)

●ポスター発表 Poster presentations

1. Kosakamoto H. and Obata F.: “Developmental diet shapes lifespan via modulation of protein storage”,

16th Japan Drosophila Research Conference, Sendai, Japan, September (2024)

XXII-027 MECHANICAL ROLE OF YOLK-CYTOPLASM SEGREGATION IN EARLY EMBRYONIC DEVELOPMENT

Name: Sameer THUKRAL

Host Laboratory: Laboratory for Epithelial Morphogenesis
RIKEN Center for Biosystems Dynamics Research
Laboratory Head : Yu-Chiun WANG

The segregation of yolk from cytoplasm represents a fundamental process in early embryonic development across oviparous animals. Our research has revealed a novel mechanical function of this process in early development using *Drosophila* as a model system. We demonstrated that yolk-cytoplasm segregation requires active, polarized translocation of lipid droplets away from yolk and into the blastoderm. Through genetic manipulation of lipid droplet translocation, we found that disruption of this redistribution leads to increased motion and vortical, chaotic movement of yolk vesicles, indicating compromised yolk vesicle compaction and increased cytoplasmic fluidity. This phenotype proved specific to lipid droplet translocation defects rather than mere reduction in lipid droplet abundance. Through rheological assays using injected beads, we measured increased fluidity throughout mutant embryos during stages when lipid droplets normally translocate to the embryo periphery.

Mathematical modeling of yolk as an active colloid revealed that yolk vesicles experience depletion attractive forces due to exclusion volume effects. These forces facilitate yolk compaction and lead to the formation of a rigid yolk vesicle network capable of resisting shear stresses. When polarized translocation is lost, yolk vesicle compaction becomes impeded due to steric hindrance from lipid droplets. Further investigation suggest that inhomogeneous microtubule dynamics generate uncoordinated shear stresses driving yolk vesicle flow when compaction is compromised. The resulting undamped flow causes high membrane fluctuations, highly compliant cell shapes, and inefficient out-of-plane deformation in epithelial folds, regardless of the initiating fold mechanisms.

Our work demonstrates that proper segregation is essential for maintaining embryo rigidity during morphogenesis. The morphogenetic consequences of

this cytoplasmic fluidization proved profound, as all epithelial folds forming during gastrulation showed defects, displaying highly compliant cell shapes or loss of stable tissue deformation. These defects appeared independent of myosin contractility but dependent on microtubule dynamics, suggesting a novel mechanical pathway distinct from traditional cortical force generation.

Our ongoing research focuses on several key areas: quantitative rheological measurements of yolk material properties, systematic genetic perturbation of yolk components, metabolic profiling during syncytium-blastoderm transition, and phylogenetic comparison of yolk properties across species. Our preliminary survey across dipteran species reveals diverse patterns of lipid droplet sizes and localization, suggesting that cytoplasmic rigidity may have evolved and been attuned to distinct cytoarchitectural requirements during dipteran evolution. This research fundamentally changes our understanding of yolk-cytoplasm segregation by revealing its mechanical role in development, suggesting that this process mechanically rigidifies the embryo interior, preparing it for the syncytium-blastoderm transition and enabling proper gastrulation through mechanical stabilization.

● Oral Presentations

Conferences

Selected for talk:

1. EMBL-Mechanics of life meeting 2024
2. JSDB-Kyoto-2024
3. Team meeting of Transformative Grant in Aid A, NIBB, Okazaki, 2024

● Poster Presentations

Conferences

1. Mechanical self transformation of living systems meeting, Kyoto 2024

XXII-028 Decoding Gall Formation: A Computational Approach to Cellular Reorganization

Name: Xin TONG

Host Laboratory: Metabolome Informatics Research Team
RIKEN Center for Sustainable Resource Science
Laboratory Head : Masanori ARITA

The elm tree acts as a super host for over 30 galling species, providing a conducive environment for gall formation. Notably, galling aphids have the remarkable ability to induce de novo organogenesis in elm trees. Each galling aphid species orchestrates the formation of a unique gall, a process known as species-specific gall formation. Unlike typical plant structures such as leaves and roots, galls develop as distinct plant organs, quickly formed in response to parasitic organisms, and this phenomenon is observed across a wide range of plant species. However, the precise mechanisms by which galling organisms disrupt normal plant development and redirect it towards gall formation remain poorly understood. My study aims to shed light on the complexities of gall development by examining non-model organisms through high-resolution omic analysis. Our approach involves dissecting the early stages of gall organogenesis and closely tracking the cellular reorganization that occurs during gall development. To address this, we focus on generating FIB-SEM (Focused Ion Beam Scanning Electron Microscopy) volumes of gall tissue induced by the aphid *Hormaphis cornu* during its early galling phase, offering a detailed view of the cellular changes involved. This study employs computational methods to explore the early stages of gall formation through high-resolution omic analysis. Using focused ion beam scanning electron microscopy (FIB-SEM), we generate 3D data sets of gall tissue induced by the aphid *Hormaphis cornu*. Computational analysis is then applied to track cellular reorganization and detect structural changes at the cellular and subcellular levels. This approach allows for precise examination of the dynamic processes involved in gall development.

● Oral Presentations

Domestic Conferences

1. Xin TONG, Plant hackers: Galling insects extend their phenotypes on the trees by novel plant organogenesis, iTHEMS, RIKEN Wako, April 2024
2. Xin TONG, 非モデル生物に挑む：ニレの木におけるアブラムシの虫こぶ形成の解明, 森林総研, 日立, April 2024

International Conference

1. Xin TONG, My big dream: Uncover Aphid Gall Formation, The Sainsbury Laboratory, Norwich, UK, July 2024
2. Xin TONG, Unveiling the Art of Insect Phenotype Extensions on Plants, Cambridge University, UK, August 2024

● Poster Presentations

International Conference

1. Xin TONG, Understanding Intra- and Inter-cellular Changes Throughout Gall Formation, Janelia Research Campus of Howard Hughes Medical Institute, Ashburn, Virginia, May 2024
2. Xin TONG, Aphid-Induced Gall Formation on Elm Trees: Development & Species-Specific Organization, The 13th International Congress on Plant Molecular Biology, Cairns, Australia, July 2024
3. Xin TONG, My big dream: Uncover Aphid Gall Formation, The Sainsbury Laboratory, Norwich, UK, July 2024
4. Xin TONG, 3D Reconstruction and Characterization of Early Aphid Gall Organogenesis, The XXVII International Congress of Entomology, Kyoto, Japan, Aug 2024
5. Xin TONG, From Parasite to Plant: Understanding Gall Development in Elm Trees Through High-Resolution Omic Analyses, The Joint Meeting of the Annual Meeting of the Society of Population Ecology and Taiwan-Japan Ecology Workshop, November 2024

XXII-029 MOLECULAR MECHANISMS UNDERLYING LIGHT-MEDIATED REGENERATION

Name: Yetkin Caka INCE

Host Laboratory: Cell Function Research Team
RIKEN Center for Sustainable Resource Science
Laboratory Head : Keiko SUGIMOTO

Understanding plant regeneration is essential for agricultural sustainability and ecosystem resilience. Light significantly regulates plant development, but studies show inconsistent results regarding its role in regeneration, often due to non-standardised quantification methods, reliance on artificial regeneration systems that obscure the impact of environmental cues, and limitations in traditional mutant analyses. My research involves four interconnected projects focused on regulators of natural shoot regeneration process in *Arabidopsis*.

1. A semi-automated image analysis program for quantifying regeneration: Large-scale regeneration studies face challenges due to the limitations of manual analysis techniques, which can introduce bias. To overcome this, I developed an automated image analysis program using ImageJ that standardises and streamlines shoot counting in regeneration studies, ensuring efficiency and reproducibility. Additionally, I created a GFP marker to monitor early callus development, a process that is otherwise challenging to assess without specific markers.
2. Pre-culture light conditions impairs shoot competence acquisition: The impact of light on regeneration has often been studied in specific stages like callus growth and shoot induction, but little attention has been given to the condition of the explant before initiating regeneration. We found that hypocotyls from de-etiolated (light-grown) seedlings are largely impaired in shoot regeneration despite producing more callus compared to etiolated (dark-grown) seedlings. This suggests that light treatment prior regeneration negatively impacts shoot competence acquisition. Our working hypothesis is that light induces epigenetic changes that hinder the activation of shoot competence genes. We are currently employing single-cell multiomics to uncover the epigenetic and transcriptomic landscapes of light- and dark-treated hypocotyls, aiming to define molecular boundaries of pluripotency and shoot competence.
3. Light as an energy source during hormone-free regeneration: *Arabidopsis thaliana* is widely regarded as unable to regenerate shoots without exogenous hormone application. Traditional regeneration systems relying on hormones create

artificial conditions that obscure the role of environmental signals like light. In response, I developed a hormone-free regeneration system using decapitated *Arabidopsis* seedlings. In this system, new shoots regenerate in just few days without the involvement of key shoot apical meristem genes (*WUS* and *STM*) or the essential hormones in regeneration. I discovered that light is crucial for this regeneration, acting not as a signaling component but as an energy source. Photosynthesis inhibition and dark conditions completely impair shoot regeneration, but supplying exogenous metabolisable sugars rescues this phenotype. Interestingly, non-metabolisable sugars like turanose do not rescue regeneration, highlighting the energy-dependent role of sugars. I am currently investigating transcriptional changes to identify key genes involved in this process and testing mutants related to axillary meristem initiation and wound responses. Additionally, I aim to use HCR-RNA FISH to visualise key genes based on transcriptome analysis.

4. A versatile tool for inducible genetic manipulation of *Arabidopsis* seedlings: A major challenge in studying light's role during regeneration is the limited utility of light-related mutants, as their phenotypes often vary significantly across different regeneration stages. To overcome this, I developed an inducible CRISPR system with a dual reporter—GFP signal loss and recovery of Basta resistance via homology-directed repair (HDR) following Cas9 induction. This system has demonstrated 100% gene deletion efficiency in independent T1 seedlings and is also highly effective for inducible overexpression of other genes. I aim to test its application for tissue-specific deletions and knock-ins using HDR. This system will be applied in the previously outlined projects to dissect the roles of specific genes in light-regulated regeneration.

● Publications

Papers

1. Chen Y, Ince YC, et al. (2024). ELONGATED HYPOCOTYL5-mediated light signaling promotes shoot regeneration in *Arabidopsis thaliana*. *Plant Physiology*. kiae474, <https://doi.org/10.1093/plphys/kiae474>

● Oral Presentations

Conferences 1

1. Ince YC¹, Sugimoto K, 2024. *A versatile tool for inducible genetic manipulation of Arabidopsis seedlings*. 11th Plant Genomics & Gene Editing Congress, Raleigh, USA

● Poster Presentations

Conferences 1

1. Ince YC¹, Chen Y, Sugimoto K, 2024. *Illuminating the Impact of Light on Plant Regeneration: A Comprehensive Study Utilizing Automated Image Analysis*. ICAR2025, San Diego, USA

XXII-030 Evolution in non-standard genetic systems

Name: Thomas James HITCHCOCK

Host Laboratory: Interdisciplinary Mathematical Sciences Program
RIKEN Interdisciplinary Theoretical and
Mathematical Sciences Program
Laboratory Head : Tetsuo HATSUDA

Populations are often structured by factors such as age, geography, or sex. As genes flow between these different states of the world, it may structure the ancestry of the population, such that genes may spend more evolutionary time in some states than others. Over the course of this year, I have been developing a series of mathematical models to better understand two broad themes relating to class structure: (1) How do different inheritance systems shape patterns of genetic diversity? (2) How do different inheritance systems shape patterns of social behaviour?

Firstly, I have been investigating the unusual genetics of two speciose groups of flies (fungus gnats and gall midges), where, in these species, males receive, but don't pass on, genes from their fathers (known as paternal genome elimination). In addition, both these groups have an unusual sex determination system – monogeny - where females produce exclusively either sons or daughters. Both these genetic quirks are expected to drive distinct patterns in the genomes of these species, with slower rates of adaptation and larger genetic loads. We have been developing a series of theoretical models to make predictions about such patterns and testing them against data from a range of fungus gnat species. Similarly, I have been developing models to understand how different life cycles may alter the evolutionary trajectories of sex chromosomes. For example, when species have portions of their life cycles where they reproduce asexually, as seen in aphids and cynipid wasps.

Secondly, I have developed models showing how different inheritance systems and genetic systems are expected to shape patterns of social behaviour. For example, some organisms are chimeras, containing multiple, genetically distinct cell lineages within a single individual. This is seen in certain species of marmosets, corals, and algae. We have developed models showing how this may affect patterns of social

behaviour and generate conflicts between different tissues over such traits. Additionally, we have been developing new models to understand sex allocation patterns in *Varroa* mites, which have recently been found to display an unusual form of haplodiploidy, where males are in fact diploid clones of their mother. As males have an extra genome they can pass on, this can make their daughters less related to each other, and thus generates different predictions from classical sex ratio models.

● Publications

Papers

1. Baird, R. B., Hitchcock, T. J., Ševčík, J., Monteith, K. M., Gardner, A., Ross, L., & Mongue, A. J. (2025). Faster adaptation but slower divergence of X chromosomes under paternal genome elimination. *Nature Communications*, 16(1), 5288.

Preprints

1. [Hitchcock TJ](#), Baird RB, Gardner A and Ross L. Paternal genome elimination, monogenic reproduction, and the evolutionary genetics of atypical sex chromosome systems. bioRxiv. 10.1101/2024.10.23.619029
2. [Hitchcock TJ](#). Effective population size of X chromosomes and haplodiploids under cyclical parthenogenesis. bioRxiv. 10.1101/2024.04.05.586733
3. [Hitchcock TJ](#) and Patten MM. Chimerism and altruism. bioRxiv. 10.1101/2024.07.23.604446

● Oral Presentations

Conferences

1. "Evolutionary genetics of paternal genome elimination". Third Joint Congress on Evolutionary Biology, Montreal. July 26th -30th 2024.
2. "Evolutionary genetics of paternal genome elimination". International Congress of Entomology, Kyoto. August 25th -30th 2024.

3. "Chimerism and altruism". Internal Conflicts Special Topic Network, Groningen. October 14th-15th 2024.
4. "Evolutionary genetics of paternal genome elimination". Sciarid Fly Meeting, Cambridge (Virtual). December 16th 2024.
5. "Effective population size of X chromosomes under cyclical parthenogenesis". PopGroup 58, Sheffield. January 7th-9th 2025.

● Poster Presentations

Conferences

1. "Chimerism and altruism". Third Joint Congress on Evolutionary Biology, Montreal. July 26th -30th 2024.
2. "Chimerism and altruism". 7th Taiwan-Japan Ecology Workshop, Naha. November 15th-17th 2024.

XXII-031 Neocortical Circuits and Physiological States Underlying the Volitional Control of the Vocal Output in Marmoset Monkeys.

Name: Cristina RISUENO SEGOVIA

Host Laboratory: Brain Functional Dynamics Collaboration Laboratory
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head : Masanori MATSUZAKI

Vocal communication holds paramount significance in both human and animal interactions. Despite its prominence, our understanding of the laryngeal control and physiological substrates governing vocal signaling remains limited. Marmoset monkeys, *Callithrix jacchus*, are highly social and vocal primates and the anatomy and function of the larynx are conserved across primates. These features make marmosets valuable models for studying vocal communication and its neural, muscular, and physiological underpinnings. Cricothyroid (CT) and thyroarytenoid (TA) muscles are the primary intrinsic laryngeal muscles responsible for vocal pitch modulation. To investigate their role, bipolar silver electrodes were implanted into the right CT and TA for chronic electromyographic (EMG). Simultaneous measurements of physiological activity: electrocardiography (ECG) and respiration, have been undertaken with a custom-made non-invasive marmoset jacket system. Our results indicate that the larynx of the marmosets might be well-developed to produce controlled sounds during both inhalation (e.g. chirp calls) and exhalation (e.g. phee calls). The CT and TA muscle activity patterns correspond to phasic or tonic responses linked to peri-vocal timing. Regardless of activity pattern, there is a strong positive correlation between CT and TA activity. We also observed that pre-vocal muscle activity of CT and TA for ~100 ms is required to reach the desired vocal pitch or muscle tension at call onset independently of call type. During call production, muscular effort is predominantly necessary to increase call frequency by building tension to reach a higher vocal pitch. Frequency reduction in the call might rely more on passive mechanisms or reduced tension without significant muscular involvement. This

selective activation might reveal an energy efficiency mechanism during vocal production as the laryngeal muscles appear to be tuned to minimize energy expenditure by only activating when necessary, during dynamic pitch modulation of phasic activity. Overall, this pattern demonstrates a specialized control of pitch within the laryngeal-respiratory system, relying on both active and passive mechanisms to optimize vocal performance while minimizing energy expenditure. Occasionally, the default stereotyped call is divided into segments with periodical sound interruptions producing segmented calls. During segmented calls, the vocal fold muscles may remain partially engaged even during the pauses between segments. Even if the CT and TA muscles are active, the glottis may open slightly to allow inspiratory pauses or mini breaths. The mechanism described resembles a two-stage activation system, composed of a pattern generator and an activation trigger. The pattern generator or preparation stage, involving CT and TA EMG activity, appears to establish a default pattern for the desired output. The activation trigger or control stage, involving the respiration/subglottal pressure, acts as a switch that must be activated to enable the output. Additionally, the putative laryngeal motor cortex in ventral premotor areas, 6V, has been identified by ICMS mapping. In future experiments, two-photon microscopy will be used to identify the neural populations responsible for vocal signaling in marmoset monkeys. This multi-method approach will enable us to study the learning process to volitionally vocalize in marmoset monkeys at the neural, behavioral, and physiological scales.

● Oral Presentations

International Conferences

1. Risueno-Segovia C., Setsuie R. and Matsuzaki M.: "Physiological substrates of marmoset vocal communication". Center of Integrative Neuroscience 2024, Tübingen Germany, June 17.

● Poster Presentations

International Conferences

1. Risueno-Segovia C., Setsuie R. and Matsuzaki M.: "Vocal-cardiorespiratory coordination during the learning process to volitionally vocalize in marmoset monkeys". FENS Forum 2024, Vienna Austria, June 25-29.

Domestic Conferences

1. Risueno-Segovia C., Setsuie R. and Matsuzaki M.: "Vocal-cardiorespiratory coordination during the

learning process to volitionally vocalize in marmoset monkeys". 13th Japan Marmoset Research Association Conference 2024, Tokyo, February 20-21.

2. Risueno-Segovia C., Setsuie R. and Matsuzaki M.: "Vocal-cardiorespiratory coordination in the common marmoset". 2nd International Symposium on Biology of Behavior Modification 2024, Tokyo Japan, July 23.

3. Risueno-Segovia C., Setsuie R. and Matsuzaki M.: "Vocal-cardiorespiratory coordination in the common marmoset". Japan Neuroscience Society 2024, Hakata Japan, July 24-27.

4. Risueno-Segovia C., Setsuie R. and Matsuzaki M.: "Respiratory coordination of marmoset vocalizations". The 3rd Joint Poster Presentation for Young Scientists 2024, Wako Japan, September 12.

XXII-032 Elucidating the Brain Mechanisms of Fatigue in Motor and Cognitive Functions Using Ultra-High-Field fMRI

Name: Sofia NAGISA

Host Laboratory: Laboratory for Human Cognition and Learning
RIKEN Center for Brain Science
Laboratory Head : Kazuhisa SHIBATA

Performance in most of our everyday tasks is affected by physical and mental fatigue, which can lead to negative consequences, such as sports injuries and driving accidents. Recent research suggests that fatigue occurs not only due to peripheral physiological processes, but also due to control signals from the brain. For example, some endurance tasks feel less fatiguing when performed simultaneously with other tasks: jogging while talking to a friend or exercising while listening to music. However, it was unknown whether the additional tasks only lower the sensations of effortfulness and fatigue or they also improve performance, and if they do, what the underlying brain mechanism of this phenomenon is.

During the first year of the research, we demonstrated that our endurance performance can benefit from an additional task. We designed a fatiguing muscular endurance task in which participants had to grip a force sensor with the highest force they could sustain for 12 seconds. As an additional task, on some trials we added a simultaneous short-memory task, which was either moderately or highly demanding. Grip force was higher in double-task conditions, especially when the additional task was highly demanding, than when participants performed the grip task alone. In subsequent years, we developed behavioral paradigms to investigate two potential mechanisms of this phenomenon with different possible neural

implementations.

The first possible mechanism can be called active suppression: the brain might monitor the effortfulness of a task and actively suppress performance when the task is too effortful to prevent the body and brain from being damaged due to excessive use. If this is the case, such active suppression can be inhibited by diverting attention away from the effortful task thus preventing the monitoring of effortfulness. Using tactile stimulation device designed during the second year of research we carried out an experiment to test this possibility. We focused participants' attention on either the gripping or the opposite arm by introducing a task in which they were required to discriminate between tactile stimuli delivered to their arms. We predicted that attending to the gripping arm will increase active suppression and attending to the opposite arm will decrease it, thus respectively decreasing and increasing gripping force. However, we observed an equivalent increase in gripping force due to engaging in the simultaneous tactile discrimination task irrespective of the attended arm. These results are more consistent with another potential mechanism of double task benefit, namely facilitatory mechanism due to increased arousal.

During the second year we measured pupil size as a physiological marker of arousal and found that it correlated with both gripping force and task

difficulty. Last year we corroborated these findings by manipulating arousal in a new way. We kept the difficulty of the additional cognitive task constant but manipulated the amount of reward paid for it. Counterintuitively, but consistent with arousal account, gripping performance improved when the reward for the unrelated cognitive task was higher, accompanied by no significant effect on the cognitive performance.

Lastly, we are currently investigating which brain area is responsible for the change in arousal that leads to improve in performance during double-task conditions. We hypothesize that it is locus coeruleus (LC), because it is the main center within sympathetic pathway of the nervous system that regulates autonomic, cognitive and emotional arousal and its activation is correlated with pupil size as demonstrated by cell recordings in monkeys. We designed a functional magnetic resonance imaging experiment and confirmed some expected effects such as motor activation due to button presses and initiation of a grip. We are currently testing a scanning protocol

that will best allow for measurement of activation of LC, which is impossible with a typical whole brain scanning protocol due to its small size and subcortical location.

Overall, this year's research clarified the mechanism through which additional task benefits the performance in a fatiguing physical task and advanced the investigation of neural substrates of this phenomenon.

● Publications

Original papers

1. Nagisa, S. & Murakami, I.: Perceived duration of visual stimuli contracts due to crowding. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 50(12), 1206–1224. (2024). Published.

● Poster Presentations

Conferences

1. 渚ソフィア, 下條信輔, 柴田和久: 二重課題による成績向上効果, 日本基礎心理学会第43回大会, 松山, 11~12月(2024)

XXII-033 血管内皮幹細胞を標的とした新規治療法探索のための患者特異的 iPS 細胞を用いた VHL 病モデルの構築

Development of a disease model for von Hippel-Lindau syndrome using patient-specific iPS cells to identify novel therapeutics targeting for vascular endothelial stem cells.

研究者氏名: 伊藤 秀矩 Hidenori ITO

受入研究室: バイオリソース研究センター

iPS 細胞高次特性解析開発チーム

(所属長 城石 俊彦)

[目的] フォン・ヒッペル・リンドウ (von Hippel Lindau: VHL) 病は、E3ユビキチンリガーゼを蛋白質産物とするVhl遺伝子の変異を主原因とし、脳、網膜、脊髄を中心とする血管芽腫、さらには、腎嚢胞・腎細胞がんを発症する遺伝性難病である。これまでに、ヒトVHL病を模倣可能な疾患モデルが確立されておらず、病態解明および治療薬開発が困難となっている。そこで本研究では、VHL病患者特異的iPS (induced Pluripotent Stem) 細胞を用いたヒトVHL病疾患モデルを新たに構築し、本疾患の病態解析ならびに新規治療因子の探索を目的とする。

[方法] これまでに、健常者由来の血管内皮細胞、VHL病患者由来の血管内皮細胞に対し、プロテオミクス解析、RNAシーケンス解析を実施することで、VHL病患者由来の血管内皮細胞で特異的に高発現する新規治療因子を複数同定した。そこで本年度は、ゲノム編集

技術 (CRISPR-Cas9システム) を用いて、これら新規治療因子の遺伝子欠損iPS細胞株、ならびに、コントロールとして、本疾患の治療標的として注目されているHIF2 (Hypoxia inducible factor 2) 遺伝子欠損iPS細胞株の樹立を試みた。また、これらの樹立したiPS細胞から血管内皮細胞を誘導し、開発したヒトVHL病疾患モデルを用いて、治療効果を評価した。

[結果] VHL病患者特異的iPS細胞から、新規治療因子として同定した3遺伝子、ならびにHIF2遺伝子を標的としたフレームシフト変異を伴うiPS細胞を樹立した。実際に、樹立したiPS細胞において、各標的因子の蛋白質発現量が顕著に低下していることを確認した。続いて、これらのiPS細胞から、血管内皮細胞へと分化誘導を行い、血管オルガノイドモデルでの新生血管長を解析したところ、HIF2遺伝子欠損株と同様に、いくつかの新規治療因子欠損株でも顕著な血管長の抑制効果が見られた。さら

に現在、HIF2遺伝子欠損株と血管長抑制効果の見られた新規治療因子欠損株については、ヒト化血管マウスモデルでも同様の効果が見られるのか解析している。

[結語] 本年度は、同定した複数の新規治療因子に対する遺伝子欠損株を樹立した。これら新規治療因子の一部は、開発した血管オルガノイドモデルにおいて、既存のHIF2遺伝子欠損株と同様に、患者で誘導される過剰な血管新生の抑制効果を示した。今後、この疾患の原因因子であるVHL遺伝子変異と、同定した新規治療因子の蛋白質発現・機能制御の相関性を分子レベルで詳細に解明することで、本疾患の新たな発症メカニズムを明らかにし、既存のHIF2ターゲットとは異なる新規治療法を開発する。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Yutaka Arai, Hidenori Ito, Tomoya Shimizu, Yuzuno Shimoda, Dan Song, Mami Matsuo-Takasaki, Tadayoshi Hayata, Yohei Hayashi: "Patient-derived and gene-edited pluripotent stem cells lacking NPHP1 recapitulate juvenile nephronophthisis in abnormalities of primary cilia and renal cyst formation", *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 12, 1370723, 2024.
2. Miyu Mori, Shoko Yoshii, Michiya Noguchi, Daigo Takagi, Tomoya Shimizu, Hidenori Ito, Mami Matsuo-Takasaki, Yukio Nakamura, Satoru Takahashi, Hiromichi Hamada, Kiyoshi Ohnuma, Tadashi Shiohama, Yohei Hayashi: "Generation of human induced pluripotent stem cell lines derived from four Rett syndrome patients with MECP2 mutations", *Stem Cell Research*, 77, 103432, 2024.
3. Rui Li, Hazuki Tsuboi, Hidenori Ito, Daigo Takagi, Yun-Hsuan Chang, Tomoya Shimizu, Yutaka Arai,

Mami Matsuo-Takasaki, Michiya Noguchi, Yukio Nakamura, Kiyoshi Ohnuma, Satoru Takahashi, Yohei Hayashi: "Generation of human induced pluripotent stem cell lines derived from two glucose transporter 1 deficiency syndrome patients", *Stem Cell Research*, 81, 103584, 2024.

4. Mami Matsuo-Takasaki, Sho Kambayashi, Yasuko Hemmi, Tamami Wakabayashi, Tomoya Shimizu, Yuri An, Hidenori Ito, Kazuhiro Takeuchi, Masato Ibuki, Terasu Kawashima, Rio Masayasu, Manami Suzuki, Yoshikazu Kawai, Masafumi Umekage, Tomoaki M Kato, Michiya Noguchi, Koji Nakade, Yukio Nakamura, Tomoyuki Nakaishi, Naoki Nishishita, Masayoshi Tsukahara, Yohei Hayashi: "Complete suspension culture of human induced pluripotent stem cells supplemented with suppressors of spontaneous differentiation", *Elife*, 12, RP89724, 2024.
5. Yuji Nashimoto, Yusuke Kanno, Hidenori Ito, Mustafa ŞEN: "Editorial: Modelling and sensing platform for cancer and tumour microenvironment", *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 12, 1432352, 2024.

●口頭発表 Oral Presentations

1. 伊藤秀矩、佐藤伊織、辺見康子、若林玲実、高崎真美、野口道也、中村幸夫、林洋平、"患者特異的iPS細胞を用いたヒトVHL病疾患モデルの開発"、日本組織培養学会 第96回大会、つくば国際会議場、6月27日 - 6月28日(2024年)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 伊藤秀矩、佐藤伊織、辺見康子、若林玲実、高崎真美、林洋平:"患者特異的iPS細胞を用いたヒトVHL病疾患モデルの開発"、第11回Wakate BRC Conference (WBC)、理化学研究所筑波事業所、11月20日(2024年)

XXII-034 Investigating Information Processing Strategies among Normal Ageing and Mild Cognitive Impairment Populations: An Eye-Movement Study

Name: Alexandra Janina WOLF

Host Laboratory: Cognitive Behavioral Assistive Technology Team
Goal-Oriented Technology Research Group
RIKEN Center for Advanced Intelligence Project
Laboratory Head: Mihoko OTAKE

Dr. Alexandra Wolf's SPDR project aims to detect cognitive impairments, particularly Alzheimer's disease (AD), using eye-tracking technology. Given the global challenge of neurocognitive disorders and the rising healthcare costs, early detection is crucial.

Dr. Wolf's research focuses on the potential of gaze metrics to differentiate between healthy individuals and those with mild cognitive impairment (MCI), with the goal of improving screening methods for early dementia detection. The study integrates

eye-tracking data with cognitive and behavioral assessments to explore the relationship between visual scanning patterns and cognitive function. Preliminary results from the study show an intriguing finding: participants with MoCA scores between 20 and 25 outperformed those with scores between 26 and 30 in visual memory recall. This counterintuitive result may reflect heightened compensatory attention in participants with lower MoCA scores, who may exert more effort and focus due to their awareness of potential cognitive decline. Conversely, individuals with higher MoCA scores may rely on their natural cognitive abilities and invest less effort in the task, potentially leading to lower recall rates despite better baseline cognitive function. These results align with compensation theory in aging, which suggests that individuals with MCI often engage compensatory strategies to maintain performance. Additionally, the effort-performance tradeoff and overconfidence effect may further explain the observed pattern in task performance. Looking forward, the study aims to continue exploring how cognitive state impacts gaze behavior. Analyzing reaction times and gaze metrics will provide further insights for understanding cognitive aging. In conclusion, Dr. Wolf's research, combining eye-tracking technology with behavioral and cognitive data, holds promise for advancing clinical diagnosis and early monitoring of Alzheimer's disease, potentially offering valuable biomarkers for translational practices in the coming decade.

● Publications

1. Tripanpitak K., Wolf A., Umeda S. and Otake-Matsuura M. EEG-Based Biomarkers of Cognitive Decline Associated with Alzheimer's Disease and Mild Cognitive Impairment: A Systematic Review (*submitted*)
2. Wolf, A., Salobar-Garcia, E., Bandara, D. S. V., Ravienna, K., eds. (2024). Early indicators of cognitive decline, Alzheimer's disease, and related dementias captured by neurophysiological tools. Lausanne: Frontiers Media SA. doi: 10.3389/978-2-8325-4814-1
3. Wolf A., Ravienna K. and Salobar-Garcia E. (2024) Editorial: Early indicators of cognitive decline, Alzheimer's disease, and related dementias captured by neurophysiological tools. *Front. Psychol.* 15:1393724. doi: 10.3389/fpsyg.2024.1393724

● Oral Presentations

1. Wolf A. Eye Movement Abnormalities in Older Adults With and Without Mild Cognitive Impairment, Healthy Longevity Talent Incubator, National University of Singapore (NUS) Yong Loo Lin School of Medicine, June 13th 2024, Singapore

● Poster Presentations

1. Wolf A., Tripanpitak K.. and Otake-Matsuura M. Gaze Behavior among Older Adults: Exploring Cognitive Processes through a Decision-Making Paradigm and Memory-Recall Task. *Conference of Experimental Psychologists TeaP 2024* (March 18th, 2024, Regensburg, Germany)
2. Wolf A. and Otake-Matsuura M. INFORMATION PROCESSING STRATEGY AMONG CLINICAL POPULATIONS IN A DECISION-MAKING TASK: AN EYE MOVEMENT STUDY. LAMDA-RIKEN AIP Joint Workshop, June 6th, 2024, Nanjing, China
3. Wolf A., Tripanpitak K.. and Otake-Matsuura M. Gaze Behavior in Older Adults: A Comparative Study of Mild Cognitive Impairment in Naturalistic Tasks. European Conference on Visual Perception ECVP2024, August 28th, 2024, Aberdeen, Scotland
4. Wolf A. and Otake-Matsuura M., Investigating Information Processing Strategies among Normal Ageing and Mild Cognitive Impairment Populations: An Eye-Movement Study. FY 2024 SPDR Research Report Session, January 16th, 2024, Wakoshi, Japan

● Other:

1. Dr. Alexandra Wolf successfully curated a Research Topic in *Frontiers in Psychology* titled "Early Indicators of Cognitive Decline, Alzheimer's Disease, and Related Dementias Captured by Neurophysiological Tools" (accessible here: <https://www.frontiersin.org/research-topics/44219/early-indicators-of-cognitive-decline-alzheimers-disease-and-related-dementias-captured-by-neurophysiological-tools>). This collection, featuring 14 accepted manuscripts, has garnered significant attention with over 45,200 views and 12,465 downloads. Additionally, Dr. Wolf contributed to the e-book's completion by authoring an editorial manuscript, further underscoring her active role in advancing research on cognitive decline and dementia.

XXII-035 自律神経中枢による発熱と免疫応答の制御機構の解明

Identification of brain centers controlling thermogenesis and immune responses via the autonomous nervous system

研究者氏名：内田 俊太郎 Shuntaro UCHIDA

受入研究室：生命機能科学研究センター

比較コネクトミクス研究チーム

(所属長 宮道 和成)

発熱は生命活動の維持に必須の反応であり、骨格筋の収縮によるふるえ熱産生と、褐色脂肪組織 (BAT) による非ふるえ熱産生によって発現される。近年、特定のニューロンを人為的に操作する技術によって、体温のセットポイントを規定する視床下部内の詳細な神経集団解明されているが、その下流で発熱を制御する交感神経の詳細な回路接続や細胞構成は不明であった。本研究の目的は、発熱を担う「延髄の前運動ニューロン→交感神経の節前ニューロン→節後ニューロン」という3つのコンポーネントに着目し、その細胞集団と詳細な回路接続、およびその生理的な活動動態を明らかにすることである。

前年度、延髄縫線核 (MRN) の vGluT3 陽性ニューロン (vGluT3^{MRN}) の軸索マッピングにより、これらのニューロンが交感神経節前ニューロンだけでなく、骨格筋の筋緊張を制御する前運動ニューロン領域や外側腕傍核にも投射することを示した。

本年度は、vGluT3^{MRN} ニューロンが発熱に関与する行動の「出力ハブ」として機能する可能性に着目した。光遺伝学的手法でこのニューロンを活性化させると、体温上昇やふるえ様行動が誘導され、骨格筋の前運動ニューロン領域を介したふるえが示唆された。また、交感神経活性化の指標である毛の逆立ちも観察された。麻酔下での実験では、vGluT3^{MRN} ニューロンの活性化により頸部筋肉の筋電電位が上昇した。今後、二重操作系実験により、投射先である前運動ニューロン領域を抑制することで

ふるえや筋電電位の上昇が抑制されるかを検討する。

また、近年、視床下部の視索前野の特定のニューロンを興奮させると人工冬眠様の低代謝状態 (QIH) が生じることが明らかにされている。昨年度に実施したイメージング実験で体温の低下中や低体温維持期において vGluT3^{MRN} ニューロンの活動が著明に抑制され、体温の復温期になると再び活動が亢進することを見出した。本年度はこのニューロンを薬理遺伝学的に抑制した実験を行い、このニューロンが温度上昇に必要なことを検証した。その結果、QIH における低体温自体には影響しなかったが、深部体温と BAT の表面温度の復温が著明に遷延することを明らかにした。本年度の研究成果によって、vGluT3^{MRN} ニューロンが BAT 以外の臓器を介して熱産生を誘導していること、及び体温上昇に必要な領域であることを示し、単なる交感神経の前運動ニューロンという古典的理解をアップデートすることができた。

●誌上発表 Publications

1. Parallel Labeled-Line Organization of Sympathetic Outflow for Selective Organ Regulation in Mice. Harima Y, Tsurutani M, Yamada S, Uchida S, Inada K, Hagihara M, Irie S, Shigeta M, Abe T, Inoue YU, Inoue T, and Miyamichi K. "Parallel Labeled-Line Organization of Sympathetic Outflow for Selective Organ Regulation in Mice." *Nature Communications*, 15: 10478 2024*.

XXII-036 Human Variation Driven by Mobile Genetic Elements: Disease Association and Evolution

研究者氏名：小嶋 将平 Shohei KOJIMA

受入研究室：生命医科学研究センター

免疫器官形成研究チーム

(所属長 古関 明彦)

ヒトの多様性は遺伝要因と環境要因により生み出される。疾患も同様であり、本研究では疾患の遺伝素因を解析している。特に、これまで検出が困難であったゲノム多型である転移因子多型に着目し、見過ごされてきた疾患

リスクを解明することを目的とした。

我々は昨年度、日本人コホートにおける転移因子多型の検出と42疾患とのゲノムワイド関連解析 (GWAS) を *Nature Genetics* 誌に報告した (Kojima et al., 2023)。

本年度はこの研究を拡張し、ウイルスゲノムの挿入と疾患との関連を解析した。およそ1%のヒトはゲノムに遺伝性のヒトヘルペスウイルス6のゲノムを有する。これはヒトの進化の過程で生殖系列にウイルスゲノムが挿入されたことに由来し、私は本ウイルス挿入のヒト全ゲノムシーケンスデータからの検出手法開発を行っていた(Kojima et al., 2021, PLoS Genetics)。本手法をアメリカ合衆国の大規模バイオバンクに適用し、疾患ワイドな統計関連解析を行った。その結果、遺伝性のヒトヘルペスウイルス6と自己免疫疾患である全身性エリテマトーデス(SLE)との関連を見出した。日本人においても同様の結果が見られるかを確認するため、日本人の自己免疫疾患コホートを解析した。本研究は岡田随象チームリーグとの共同研究である。その結果、日本人コホートにおいてもSLEとの関連が見られた。また、SLEの疾患スコアとの正の相関があり、重症化リスク因子であることも考えられた。疾患メカニズムとして、遺伝性のヒトヘルペスウイルス6が抗ウイルス免疫応答を惹起していると仮説立て、次にSLE患者においてヒトヘルペスウイルス6がに対する免疫応答が起きているかを確認した。本解析では、血清・血漿中にヒトヘルペスウイルス6に対する抗体が存在するかどうかを、ハイスループットな抗体スクリーニング系であるファージ免疫沈降法を用いて解析した。その結果、遺伝性のヒトヘルペスウイルス6を有するSLE患者にのみ観察される特異的な抗原抗体反応が観察された。この結果は遺伝性のヒトヘルペスウイルス6が抗免疫応答を惹起するSLEの重症化リスク因子であることを示唆する。外来性のウイルスの感染だけでなく、ヒトゲノムに存在するウイルス配列も自己免疫疾患のリスクとなることを世界に先駆けて解明した。本研究内容はNature Genetics誌に発表した(Sasa*, Kojima*, Koide* et al., 2025, *co-first)。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Noah Sasa, Shohei Kojima, Rie Koide, Takanori Hasegawa, Ho Namkoong, Tomomitsu Hirota, Rei Watanabe, Yuumi Nakamura, Eri Oguro-Igashira, Kotaro Ogawa, Tomohiro Yata, Kyuto Sonehara, Kenichi Yamamoto, Toshihiro Kishikawa, Saori Sakaue, Ryuya Eda, Yuya Shirai, Yuichi Maeda, Takuro Nii, Shotaro Chubachi, Hiromu Tanaka, Haruka Yabukami, Akari Suzuki, Kimiko Nakajima, Noriko Arase, Takashi Okamoto, Rika Nishikawa, Shinichi Namba, Tatsuhiko Naito, Ippei Miyagawa, Hiroaki Tanaka, Masanobu Ueno, Yosuke Ishitsuka, Junichi Furuta, Kayo Kunimoto, Ikko Kajihara, Satoshi Fukushima, Hideaki Miyachi, Hiroyuki

Matsue, Masahiro Kamata, Mami Momose, Toshinori Bito, Hiroshi Nagai, Tetsuya Ikeda, Tatsuya Horikawa, Atsuko Adachi, Tsukasa Matsubara, Kyoko Ikumi, Emi Nishida, Ikuma Nakagawa, Mayu Yagita-Sakamaki, Maiko Yoshimura, Shiro Ohshima, Makoto Kinoshita, Satoru Ito, Toru Arai, Masaki Hirose, Yoshinori Tanino, Takefumi Nikaido, Toshio Ichihata, Shinya Ohkouchi, Taizou Hirano, Toshinori Takada, Ryushi Tazawa, Konosuke Morimoto, Masahiro Takaki, Satoshi Konno, Masaru Suzuki, Keisuke Tomii, Atsushi Nakagawa, Tomohiro Handa, Kiminobu Tanizawa, Haruyuki Ishii, Manabu Ishida, Toshiyuki Kato, Naoya Takeda, Koshi Yokomura, Takashi Matsui, Akifumi Uchida, Hiromasa Inoue, Kazuyoshi Imaizumi, Yasuhiro Goto, Hiroshi Kida, Tomoyuki Fujisawa, Takafumi Suda, Takashi Yamada, Yasuomi Satake, Hidenori Ibata, Mika Saigusa, Toshihiro Shirai, Nobuyuki Hizawa, Koh Nakata, Japan COVID-19 Task Force, Shinichi Imafuku, Yayoi Tada, Yoshihide Asano, Shinichi Sato, Chikako Nishigori, Masatoshi Jinnin, Hironobu Ihn, Akihiko Asahina, Hidehisa Saeki, Tatsuyoshi Kawamura, Shinji Shimada, Ichiro Katayama, Hannah M. Poisner, Taralynn M. Mack, Alexander G. Bick, Koichiro Higasa, Tatsusada Okuno, Hideki Mochizuki, Makoto Ishii, Ryuji Koike, Akinori Kimura, Emiko Noguchi, Shigetoshi Sano, Hidenori Inohara, Manabu Fujimoto, Yoshikazu Inoue, Etsuro Yamaguchi, Seishi Ogawa, Takanori Kanai, Akimichi Morita, Fumihiko Matsuda, Mayumi Tamari, Atsushi Kumanogoh, Yoshiya Tanaka, Koichiro Ohmura, Koichi Fukunaga, Seiya Imoto, Satoru Miyano, Nicholas F. Parrish, and Yukinori Okada: "Blood DNA virome associates with autoimmune diseases and COVID-19", Nature Genetics, Online ahead of print(2025)*

2. Akiko Oguchi, Akari Suzuki, Shuichiro Komatsu, Hiroyuki Yoshitomi, Shruti Bhagat, Raku Son, Raoul Jean Pierre Bonnal, Shohei Kojima, Masaru Koido, Kazuhiro Takeuchi, Keiko Myouzen, Gyo Inoue, Tomoya Hirai, Hiromi Sano, Yujiro Takegami, Ai Kanemaru, Itaru Yamaguchi, Yuki Ishikawa, Nao Tanaka, Shigeki Hirabayashi, Riyo Konishi, Sho Sekito, Takahiro Inoue, Juha Kere, Shunichi Takeda, Akifumi Takaori-Kondo, Itaru Endo, Shinpei Kawaoka, Hideya Kawaji, Kazuyoshi Ishigaki, Hideki Ueno, Yoshihide Hayashizaki, Massimiliano Paganì, Piero Carninci, Motoko Yanagita, ITEC Consortium, Nicholas Parrish, Chikashi Terao, Kazuhiko Yamamoto, and Yasuhiro Murakawa: "An atlas of transcribed enhancers across helper T cell diversity for decoding human diseases", Science 385 eadd8394(2024)*

3. Inka Häkkinen, Gamze Yazgeldi Gunaydin, Lari Pyöriä, Shohei Kojima, Nicholas Parrish, Maria F.

Perdomo, Juho Wedenoja, Klaus Hedman, Seppo Heinonen, Eero Kajantie, Hannele Laivuori, Juha Kere, Shintaro Katayama, and Satu Wedenoja: "Fetal cord plasma herpesviruses and preeclampsia: an observational cohort study", *Scientific Reports*, 14 14605(2024)*

4. Shoichi Ashida, Shohei Kojima, Takashi Okura, Fumihiro Kato, Wakako Furuyama, Shuzo Urata, and Yusuke Matsumoto: "Phylogenetic analysis of the promoter element 2 of paramyxo- and filoviruses", *Microbiology Spectrum* 12:e00417-24(2024)*

(総説)

1. Shohei Kojima, "Investigating mobile element variations by statistical genetics", *Human Genome Variation*, 11 23 (2024)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. 小嶋将平: "Methodology for previously overlooked genetic variants and applications in biobank study", 日本人類遺伝学会第69回大会, 札幌グランメルキュール, 10月(2024年)

2. 小嶋将平: "見逃されてきた多型を全ゲノムデータから見つける技術開発と疾患の遺伝要因の解明", NGS EXPO 2024, 大阪府立国際会議場, 9月(2024年)

XXII-037 微生物を用いた CO₂ からの高付加価値化合物生産技術の開発

Development of Technology for Valuable Chemicals Production from CO₂ Using Microorganisms

研究者氏名: 藤原 良介 Ryosuke FUJIWARA
受入研究室: 環境資源科学研究センター
細胞生産研究チーム
(所属長 近藤 昭彦)

本研究では、代謝改変大腸菌を用いたCO₂からの直接発酵生産技術を開発し、高付加価値化合物を生産する。まず、独自技術であるパラレル代謝工学 (PMPE) により目的化合物生産に関わる代謝系を他の代謝系から独立させ、生産収率を向上させる。次に、CO₂から生産可能なメタノール及びエタノールを資化する外来代謝経路を導入し、これらの炭素源から効率的な目的化合物の生産を行う。最終的に、メタノール資化経路とCO₂固定化反応を組み合わせ、CO₂からの直接的な有用化合物生産技術の開発を目指す。本年度は、昨年度に引き続き有用化合物であるイソプレノイド等を高効率に生産可能な微生物の構築を目指し、大腸菌の遺伝子破壊株の構築を行った。中央代謝に関わる多くの遺伝子破壊に成功し、アセチルCoAを菌体内に蓄積する代謝改変株の構築に成功した。同代謝改変株を用い、アセチルCoA誘導体生産のモデルケースとしてメバロン酸の生産を試みたところ、既報を越える生産量および生産収率を達成した。

また、*Methylorubrum extorquens*を宿主に用いて、上記と異なるアプローチでのCO₂由来原料からの物質生産技術の開発にも取り組んだ。*M. extorquens*はメタノールやエタノールといったCO₂由来の低分子化合物を資化することが出来る点で近年注目を集めている。一方で、*M. extorquens*は取り込んだ炭素源の多くをCO₂に酸化してしまうため物質生産収率が低いという課題があ

る。本研究では内在する4つのギ酸デヒドロゲナーゼ遺伝子を全て破壊することに成功し、ギ酸からCO₂への炭素漏出を遮断した代謝改変株の構築に成功した。また*M. extorquens*野生株に対して、ある標的化合物を合成するための外来経路を導入することで、メタノールから標的化合物を生産することにも成功した。さらに、内在のアセチルCoAシンターゼ (ACS) の過剰発現により、エタノール炭素源下での細胞増殖速度及び最大菌体量を大幅に改善することに成功した。ACS過剰発現株にてエタノールからの標的化合物の生産を検討した結果、メタノールを炭素源とした場合と比較し、有意に高い生産性を示した。これらの結果を踏まえ、今後CO₂由来原料からの物質生産における*M. extorquens*の利用技術の更なる発展が期待される。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Nonaka D., Hirata Y., Mayumi Kishida, Ayana Mori, Ryosuke Fujiwara, Akihiko Kondo, Yutaro Mori, Shuhei Noda, and Tsutomu Tanaka: "Parallel metabolic pathway engineering for aerobic 1,2-propanediol production in *Escherichia coli*", *Biotechnology Journal* 19(8) (2024) *

2. Shuhei Noda, Yutaro Mori, Yuki Ogawa, Ryosuke Fujiwara, Mayumi Dainin, Tomokazu Shirai, and Akihiko Kondo: "Metabolic and enzymatic

engineering approach for the production of 2-phenylethanol in engineered *Escherichia coli*", *Bioresource Technology* 130927-130927 (2024)*

(総説)

1. 藤原良介, 田中勉: "糖代謝の制御可能な改変微生物の開発事例", 微生物を用いた有用物質生産技術の開発 ~バイオマス由来化学品・エネルギーの事業採算性向上と環境負荷低減の方策~

●口頭発表 Oral Presentations

1. 藤原良介: "CO₂由来低分子からの超高収率スチレン生産", JST ACT-X 第6回領域会議, 葉山, 1月(2024)
2. 藤原良介: "有用物質生産のための微生物代謝改変技術に関する研究", 化学工学会第89年会, 大阪, 3月(2024)
3. 藤原良介: "CO₂由来低分子からの超高収率スチレン生産", JST ACT-X 第7回領域会議, 葉山, 9月(2024)

XXII-038 Recording Time-stamped Biological Events into Cellular DNA Through Genome Editing

Name: Chih-Chieh (Jay) YU

Host Laboratory: Laboratory for Cell Function Dynamics
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head: Atsushi MIYAWAKI

Studies of biology and medicine will benefit from a method that can non-invasively monitor biological events (such as infection or inflammation) in freely moving animals over long durations, but existing tools cannot fulfill these needs. Recent advances in genomic editing technologies have raised possibility of storing ongoing biological signals into the genomic DNA, which can be later extracted from the animal tissue and sequenced, potentially enabling continuous monitoring of event history in vivo. Although pioneering studies have shown the feasibility of this strategy, the lack of a cell-powered time-keeping mechanism prevents existing recorders from reporting the timing of biological event occurrence, which sets a major limitation on the usefulness of this strategy. This research aims to develop an intracellular clock that can store the timing of user-defined biological events in the genome of single cells. To achieve this, a biological timer was designed by continuously inducing DNA mutations at a selected genomic locus, so that the quantity of the mutations would allow inference of how much time has elapsed since clock activation.

Research efforts this year focused on characterizing the performance of proposed biological timer in cultured mammalian cells. A human-derived cell line, HEK293T, was genome-edited to constitutively express biological components that advance the timer. The cell line was maintained over several months, and genomic DNA was extracted from the cell line

every week during this period. Nanopore long-read sequencing was performed to read out the target genomic locus in full length. The genomic sequence was analyzed via a custom software to quantify accumulated mutations. Results indicated that the quantity of mutations were mostly monotonically increasing with the duration since mutagenesis started, confirming the potential use of the system as a cell-autonomous timer. However, the experiments highlighted two core problems that will limit the usefulness and potential applications of the current system: (A) The current system has a very low mutation rate (~0.3 mutations/month); a consequence of this low rate is that in order to estimate elapsed time with the timer, it is necessary to pool genomic DNA over many cells (> 100's), which prohibits single-cell analysis, and also hinders a timestamp-copying scheme that is central for building the proposed event recorder. (B) The current system appears to negatively affect cell health, resulting in a declining proportion of cells expressing the system over time. Ongoing and upcoming experiments focus on exploring potential solutions to address these two core problems, such as by incorporating additional copies of the genes that advance the clock, by genetically knocking out DNA repair enzymes that hinders formation of mutations, and by screening through various mutation-inducing enzymes for optimal mutation rate and minimal adverse effects on cell health.

XXII-039 光合成における光電変換機構の解明を目指した光 STM と生体分子蒸着法の融合 Development of Biomolecular Deposition-Photon STM for Elucidation of Photoelectric Conversion Mechanism in Photosynthesis

研究者氏名：今井 みやび Miyabi IMAI
受入研究室：開拓研究本部
Kim表面界面科学研究室
(所属長 金 有洙)

光合成の重要な初期過程の一つに、光励起された葉緑素からの電子移動(光電変換)がある。その効率は極めて高く、詳細な機構解明のため盛んに研究が行われてきた。従来の研究には主に光学分光法が用いられてきたが、その空間分解能は光の回折限界程度(数百nm)に制限されていた。そのような状況下において、我々は本年、光STMを用いて原子分解能での光電変換観測を実現し、原著論文として報告した[M. I-Imada, Nature 2022]。今後はこの手法を葉緑素に適用し、光合成における光電変換機構の解明を目指す。現状で、光STMで葉緑素など構造が柔軟な分子を観測し単一分子分光を行ったという報告例はほとんど存在しない。これは、試料作製が困難なことに起因する。原子レベルで清浄な試料を作製するためには、一般的に加熱を伴う真空蒸着が用いられるのが、生体分子は熱に弱く真空蒸着に適さない。我々は加熱を伴わない生体分子蒸着機構を光STMに融合することで、葉緑素の光STM観測を実現する。本研究ではまず、生体分子蒸着機構(エレクトロスプレー蒸着機構:ESD)を光STMに融合した装置開発し、テスト試料として長鎖オリゴチオフェン(24T-Si-Dod)の蒸着を行った。この分子は分子量・分子長共に、STM研究でよく用いられてきたフタロシアニン(Pt)の10倍以上あり、真空蒸着は困難である。ESDによって分子液滴スプレーが放出されるエミッターの位置や溶液の流量や最適化した結果、24T-Si-Dod/Au(111)はSTM観測に耐えうる純度の試料作製に成功し、構造観測と伝導特性の原子分解能計測に成功した。次に葉緑素分子の蒸着に取り組んだ。溶媒の種類や溶液の流量を変えて蒸着を繰り返すことにより、貴金属基板上に葉緑素分子由来と考えられる分子集合体を確認することができた。次年度は葉緑素分子の単一分子分光に挑戦する。本年度はさらに、原子分解能の光電変換計測法の発展にも取り組んだ。燐光を示す金属Pt単一分子を試料とし、2種類の励起状態を介して生成される光電流計測に成功し、光電流生成に寄与する分子軌道の可視化に成功した。今後、新たに発展させたこの計測法を葉緑素分子に適用することを目指している。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Jaehyun Bae, Miyabi Imai-Imada*, Hyung Suk Kim, Minhui Lee, Hiroshi Imada, Youichi Tsuchiya, Takuji Hatakeyama*, Chihaya Adachi*, Yousoo Kim*: "Visualization of multiple-resonance-induced frontier molecular orbitals in a single multiple-resonance thermally activated delayed fluorescence molecule", ACS Nano 18 (2024) 17987.

●口頭発表 Oral Presentations

1. Miyabi Imai-Imada, Hiroshi Imada, Yousoo Kim, "Real time and real space investigations of exciton creation and annihilation processes in a single molecule", International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices in Winter 2025 (ALC-W 2025), Furano, Japan, Jan. (2025).
2. Miyabi Imai-Imada, "Atomic-scale visualization of photocurrent channels within a single molecule", The 10th International Symposium on Surface Science (ISSS-10), Kita-kyushu, Japan, Oct. (2024). (Invited)
3. Miyabi Imai-Imada, "Photon-STM study of exciton creation and annihilation processes in a single molecule", META 2024, 14th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Toyama, Japan, July. (2024). (Invited)
4. Miyabi Imai-Imada, "Atomic-scale investigation of photoelectric energy conversion in a single molecule", International Conference on Nano-photonics and Nano-optoelectronics (ICNN 2024), Yokohama, Japan, Apr. (2024). (Invited)
5. Miyabi Imai-Imada, "Atomic-scale investigation of photocurrent generated by a single molecule", IBS-QCR Center Kick-off Symposium, Gwangju, Korea, Dec. (2024) (Invited)
6. 今井みやび, 「単一分子で生じる光電エネルギー変換」, 2025年日本物理学会春季大会, 2025年3月(Invited)

XXII-040 Advanced Designs and Characterization of Josephson Traveling-Wave Parametric Amplifiers

Name: Chung Wai Sandbo CHANG

Host Laboratory: Superconducting Quantum Electronics Research Team
RIKEN Center for Quantum Computing
Laboratory Head : Yasunobu NAKAMURA

In FY2024, we implemented an established system gain calibration method using a qubit-coupled transmission line with power-dependent transmission characteristics. This implementation enabled comprehensive characterization of our Josephson Traveling-Wave Parametric Amplifiers (JTWPAs), allowing us to evaluate not only their gain but also their added noise and performance metrics including saturation power. Building upon our previous windowed-modulation JTWPA design, we optimized the choice of window function and we were able to achieve gain exceeding 20 dB across a bandwidth greater than 4 GHz. The devices demonstrated high performance with minimal added noise of 1.3 quanta at 20 dB gain and a saturation power of -95 dBm, while maintaining negligible backward gain—positioning our JTWPAs at the forefront of current technology. Besides amplifications, by using the same JTWPA design, we applied two pump tones with one positioned below the bandgap, leading to the observation of phase-dependent gain—a signature of single-mode squeezing. This observation suggests potential applications in quantum state tomography through the implementation of tunable traveling squeezers. We also explored the implementation of resonant-phase-matching (RPM) based JTWPAs, which traditionally offer superior performance and design flexibility compared to modulation-based approaches. Conventional lumped-element RPM JTWPAs excel in phase correction efficiency but struggle with resonator-frequency homogeneity in their implementations. Meanwhile, the alternative waveguide-based RPM variants achieve high resonator-frequency homogeneity but are inefficient in providing correction for phase matching. Our novel distributed-coupling RPM (dcRPM) JTWPA design successfully combine the advantages of both approaches while eliminating their respective limitations. With our proposal, we fabricated multiple dcRPM JTWPA devices and verified our design experimentally by gain measurement. The results from our dcRPM JTWPAs demonstrated

promising performance, achieving 18-20 dB gain over 5 GHz range using only 660 junctions, almost a 75% reduction in junction number needed compared to our previous window-modulated designs. With this dcRPM mechanism, we are exploring new possibilities for JTWPA variants, including traveling single-mode squeezers and metamaterial waveguide-based single photon detectors.

● Publications

Paper

1. Busnaina Jamal H., Shi Zheng, McDonald Alexander, Dubyna Dmytro, Nsanzineza Ibrahim, Hung Jimmy S. C., [Chang C. W. Sandbo](#), Clerk Aashish A. & Wilson Christopher M.: Quantum simulation of the bosonic Kitaev chain, Nature Communications volume 15, Article number: 3065 (2024)

● Oral Presentations

Conferences

1. Chang C. W. Sandbo, F. van Loo Arjan, Kutsuma Hiroki, Tamate Shuhei and Nakamura Yasunobu: “Josephson traveling-wave parametric amplifiers based on aluminum coplanar lumped-element waveguides”, APS March Meeting 2024, Minneapolis USA 2024, March 3-8.

● Poster Presentations

Conferences

1. Chang C. W. Sandbo, F. van Loo Arjan, Tamate Shuhei and Nakamura Yasunobu: “Josephson traveling-wave parametric amplifiers based on aluminum coplanar lumped-element waveguides”, Czech-Japan workshop on quantum information 2024, May 21-23
2. Chang C. W. Sandbo, F. van Loo Arjan, Tamate Shuhei and Nakamura Yasunobu: “Josephson traveling-wave parametric amplifiers based on aluminum coplanar lumped-element waveguides”, Swiss-Japanese Quantum Symposium 2024, Tokyo Japan 2024, June 5-7

XXII-041 細胞膜の機械特性と遺伝子発現の統合解析による老化の解明

Integration of Mechanical Phenotyping of Cell Membrane and Transcriptome along Aging

研究者氏名：塩見 晃史 Akifumi SHIOMI

受入研究室：開拓研究本部

新宅マイクロ流体工学理研白眉研究チーム

(所属長 新宅 博文)

細胞の力学特性は、細胞老化における重要な表現型の一つであると同時にそれらの制御因子としても注目されている。しかし、細胞の細胞表面張力は細胞間の不均一性が高く、遺伝子発現変動と細胞の細胞表面張力を繋ぐ詳細な分子カスケードには未だ不明な点が多い。そこで本研究では、これまで技術的に困難であった細胞の力学特性解析と遺伝子発現解析を統合するマルチオミクス解析法を開発し、細胞老化における細胞の細胞表面張力の制御機構を解明することを目標に研究を行った。

本年度は、本研究で開発した細胞表面張力と遺伝子発現を1細胞解像度かつ大規模に統合解析する新規手法 ELASTomics (Electroporation-based Lipid-bilayer Assay for cell Surface Tension and transcriptomics) が、Nature Communications に掲載された。現在 ELASTomics法を用いた共同研究を広く展開しており、細胞競合や新規リン脂質スクランブラーゼ、リン脂質合成酵素といった様々な生命現象やタンパク質と力学特性変化の関連の探索を進めている。また、ELASTomics法を1細胞解析にとどまらず、組織やオルガノイドへの適用を目指した手法の検討も進めており、MDCK細胞で形成した単層オルガノイドに対し、均一に ELASTomicsを適用させることで、細胞競合によって組織内の老化細胞が除去される際の集団的な力学特性変化を測定するモデルの構築に成功した。

さらに本年度は、前年度に引き続きUCLAのDino Di Carlo教授との共同研究として開発中の細胞の遺伝子発現と細胞変形能を1細胞解像度かつ大規模に統合解析する新規手法MECHANomics(Membrane extensional cytometry via hydrodynamic stretching for analyzing observable mechanical phenotype and transcriptomics)の検討を進めた。理化学研究所にてUCLAで行った実験の追試を実施し、UCLAと同様の結果が得られることを確認したほか、異なる接着細胞株4種(MCF7, HeLa, NIH:3T3, HEK293)および浮遊細胞株2種(KU812, K562)に対して、変形能に 관련된物質の細胞内輸送が確認され、異種細胞株間でもMECHANomics測定が可能であることが示された。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Shiomi A., Kaneko T., Nishikawa K., Tsuchida A., Isoshima T., Sato M., Toyooka K., Doi K., Nishikii H., and Shintaku H.: "High-throughput mechanical phenotyping and transcriptomics of single cells", Nat. commu., 15 3812(2024)

(総説)

1. 塩見晃史, 金子泰洸ポール, 西川香里, 土田新, 新宅博文: "ELASTomics: 細胞の力学特性と遺伝子発現の統合解析法", 「生物物理」65巻1号(予定)

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Shiomi A.: "Combined Analysis of Cell Mechanics and Transcriptome", The 19th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS2024), Kyoto, Japan, May(2024)
2. 塩見晃史: "High-throughput mechanical phenotyping and transcriptomics of single cells", JST-CREST 多細胞若手の会2024, 金沢, 8月(2024)
3. Shiomi A., Kaneko T., Nishikawa K., Dino D. C. and Shintaku H.: "Integration of mechanical phenotyping and transcriptomics by ELASTomics and MECHANomics", The 52nd Naito Conference, Sapporo, Japan, Oct.(2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Shiomi A., Kaneko T., Nishikawa K., Dino D. C. and Shintaku H.: "Combined analysis of static and dynamic cell-mechanics with unbiased transcriptomics for thousands of single cells", International Union for Pure and Applied Biophysics (IUPAB2024), Kyoto, Japan, Jun.(2024)
2. Shiomi A., Kaneko T., Nishikawa K., Dino D. C. and Shintaku H.: "Combined analysis of static and dynamic cell mechanics with unbiased transcriptomics for thousands of single cells", International Symposium on Mechanical control of biological self-organization, Kyoto, Japan, Jun.(2024)

3. Shiomi A., Kaneko T., Nishikawa K., Dino D. C. and Shintaku H.: "Combined analysis of cell-mechanics with unbiased transcriptomics for thousands of single cells", 2024 年度 京都大学医生物学研究所リトリート, 京都, 9月 (2024)
4. Shiomi A., Kaneko T., Nishikawa K., Dino D. C. and Shintaku H.: "Integration of mechanical

phenotyping and transcriptomics by ELASTomics and MECHANomics", The 52nd Naito Conference, Sapporo, Japan, Oct.(2024)

5. 塩見晃史, 金子泰洸, 西川香里, 土田新, Dino Di Carlo, 新宅博文: "細胞の力学特性と遺伝子発現の統合解析法", 第15回マイクロ・ナノ工学シンポジウム, 仙台, 11月 (2024)

XXII-042 高分子科学と工学の融合による高感度疾患診断デバイスの開発

Development of High-Sensitive Disease Diagnostic Device by Integrating Polymer Science and Engineering

研究者氏名：上田 智也 Tomoya UEDA
受入研究室：開拓研究本部
渡邊分子生理学研究室
(所属長 渡邊 力也)

本研究は、機能性高分子によってデバイス表面を制御・改質することによって、測定対象とする生体分子の単離を効率的に行い、内容物の検出を高感度化するデバイスを開発することを目的とした。

本年度は昨年度に引き続き、測定対象の生体分子として腐敗アミノ酸を産生する食中毒菌中の酵素に着目した。食中毒は集団発症する恐れがあるため、その食中毒の原因となる食中毒菌を迅速かつ簡便に診断・同定することが不可欠である。食中毒は、菌体中に存在する酵素がタンパク質中のヒスチジンをヒスタミンに変換しこれを摂取することによって起こるアレルギー様反応である。本研究では、酵素と蛍光分子のカップリング反応を利用した迅速かつ簡便なヒスタミン産生酵素の検出技術の開発を行った。

ヒスタミン産生酵素の検出には、ヒスタミン脱炭酸酵素および酸化還元応答蛍光分子であるレゾルフィンを用いたカップリング反応を利用した。ヒスタミン産生酵素によってヒスチジンからヒスタミンが産生され、そのヒスタ

ミンはヒスタミン脱炭酸酵素によってアルデヒド化される。この反応にレゾルフィンがカップリングすることで還元されて生じる蛍光(還元体：レゾルフィン)を測定することでヒスタミン産生酵素を検出する。このカップリング反応における至適条件(buffer組成, pH, 温度)を見出し、レゾルフィン由来の蛍光を測定することでヒスタミン産生酵素の検出に成功した。さらに、自動分注機を用いて全自動でヒスタミン産生酵素の検出にも成功している。

これによって食中毒菌を直接検出する手法を確立し、魚肉食品や作業現場から酵素を迅速簡便に検出し食中毒の予防に繋がることが期待される。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Ueda T., Shinoda H., Makino A., Yoshimura M., Iida T., Watanabe R., "Purification/amplification-free RNA detection platform for rapid and multiplex diagnosis of plant viral infections", *Analytical Chemistry*, 95, 25, 9680–9686 (2023).

基礎科学特別研究員
2023 年度採用者

XXIII-001 高次元汚染データに頑健な汎用機械学習の確立

Establishing Robust Machine Learning for High-Dimensional Contaminated Data

研究者氏名：藤澤 将広 Masahiro FUJISAWA

受入研究室：革新知能統合研究センター

汎用基盤技術研究グループ

不完全情報学習チーム

(所属長 杉山 将)

本研究課題：「高次元汚染データに頑健な汎用機械学習の確立」の達成においては、汎用的な機械学習アルゴリズムの性質に関するより正確な汎化性能の理解を深める研究が重要となる。なぜなら、学習アルゴリズムによって得られる汎化性能の実態をできるだけ精緻に反映した理論がなければ、近年注目されている汎化と頑健性のトレードオフ関係などに対する建設的な議論を行うことが難しいからである。

そこで今年度は、機械学習における予測の不確実性の定量評価方法、とりわけ校正誤差 (Calibration error; CE) に着目し、CEの推定量である期待校正誤差 (Expected calibration error; ECE) に生じるバイアス、およびECEに基づく不確実性評価の汎化に関する理論的探求を行い、その知見に基づいて、汎化性能が理論的に保証された校正アルゴリズムの開発を行った。これらに加え、昨年度から所外の研究者と連携して取り行っている「物理情報を利用するニューラルネットワーク」の汎化性能に関する理論研究を進展させた。

今年度の研究活動によって創発された成果の概要は以下の通りである。

- (1) 機械学習モデルによる分類予測の不確実性を評価する際に用いられるCEの推定量であるECEについて、推定バイアスに関する包括的な理論解析を初めて提供した。特に、代表的なビンニング手法である一様質量・一様幅ビンニングに対して推定バイアスの上界を導出し、その収束レートを示すとともに、バイアス最小化のための最適なビン数を初めて明らかにした。さらに、これらの解析を、情報理論的手法を下敷きに汎化誤差解析へと発展させ、「未知データに対するECE」を定量的に評価可能にする上界を与えた。
- (2) ビンニングに基づくECEによる不確実性評価と、その値が悪かった場合に予測確率を「補正」する再校正手法に関する詳細な理論解析を行なった。既存研究では二値分類問題にのみ焦点が当てられており、多くの再校正手法は、補正後の性能が未知のデータに汎化するかに関する理論保証を欠いていた。そこで我々は、PAC-Bayes理論に基づき、校正の文

脈における汎化誤差に対する「最適化可能な」上界を導出した。これにより、理論上は汎化性能の向上を目指す再構成方法が導出され、数値実験により、従来手法を上回る性能を発揮することを実証した。

- (3) Fourier neural operator (FNO) は、好ましくない初期値を与えられると、層数が増えるにつれて学習が不安定になり、予測性能が悪化することが知られている。本研究では、この初期化バイアスのメカニズムを、平均場理論を用いて明らかにした。特に「カオスの縁」(edge of chaos)の観点から、FNO特有のモード切り捨てによって生じる順伝播・逆伝播の挙動を明らかにし、それが全結合型ニューラルネットワークの振る舞いと共通していることを示した。そして、この結果に基づき、初期化バイアスに起因する訓練不安定性を軽減する新たな初期化手法を提案した。実験により、提案手法が深層FNOの安定的な学習を可能にすることを確認した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Futami, F. ^(#) and Fujisawa, M. ^(#,†): “Information-theoretic generalization analysis for expected calibration error.” In *Advances in Neural Information Processing Systems 38 (NeurIPS2024)*, in print (2024). ([#]: Equal contribution; [†]: Corresponding author)
2. Koshizuka, T., Fujisawa, M., Tanaka, Y., and Sato, I.: “Initialization Bias of Fourier Neural Operator: Revisiting the Edge of Chaos.” In *Advances in Neural Information Processing Systems 38 (NeurIPS2024)*, in print (2024).

(プレプリント)

1. Fujisawa, M. ^(#) and Futami, F. ^(#): “PAC-Bayes Analysis for Recalibration in Classification.” arXiv preprint: 2406.06227 (2024). ([#]: Equal contribution)

(他1件)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Fujisawa, M. Generalization analysis for calibration. Seminar series (invited talk). Thom building, University of Oxford, UK, 28, Nov. 2024.

●ポスター発表 Poster Presentation

(学会)

1. Fujisawa, M. "Generalized Bayesian inference based on Hölder scores." ELLIS Robust ML Workshop, Scandic Marina Congress Center, Finland, 27, Jun. 2024.
2. Futami, F. and Fujisawa, M.: "Information-theoretic generalization analysis for expected calibration error." The 38th Conference on Neural Information

Processing Systems (NeurIPS), Vancouver Convention Center, Canada, 11, Dec. 2024.

3. Koshizuka, T., Fujisawa, M., Tanaka, Y., and Sato, I.: "Initialization Bias of Fourier Neural Operator: Revisiting the Edge of Chaos." The 38th Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS), Vancouver Convention Center, Canada, 11, Dec. 2024.

(他7件)

XXIII-002 進化戦略とベイズ最適化の融合による新品種開発における意思決定の最適化

Combination of Evolution Strategy and Bayesian Optimization to Optimize Decision-making in the Development of New Varieties

研究者氏名：濱崎 甲資 Kosuke HAMAZAKI

受入研究室：革新知能統合研究センター

目的指向基盤技術研究グループ

分子情報科学チーム

(所属長 津田 宏治)

本研究課題では、育種計画、すなわち新品種開発における意思決定を最適化することを目的とした。ここでの意思決定とは、例えばどの個体を選抜するか、また選抜した個体同士を交配する際に、各交配組に対してどの程度次世代個体数を割り当てるか、ということである。本研究では、まず育種シミュレーションを用いて各交配戦略に基づく育種計画で将来的にどの程度優れた新品種が作出できるかを評価した上で、新品種の遺伝的能力が最大となるように交配戦略に関わるパラメータを最適化する。この最適化が実現すれば、極めて専門性の高い育種家を頼らずとも、誰にでも交配戦略を自動的に決定できようになるため、同研究の育種分野にもたらす影響は極めて大きいといえる。

今年度は、上記を念頭に置いて、より柔軟かつ高速な最適化手法の開発に取り組んだ。具体的には、自動微分とよばれる技術を応用し、育種シミュレータを微分可能なものとして実装した。自動微分では、シミュレータの各操作を微分可能な形で実装することで、シミュレータ全体の勾配情報を計算することができる。本研究では育種シミュレータをPyTorchで微分可能な形で実装することにより、上記の新品種の遺伝的能力の交配戦略パラメータに対する勾配情報を計算可能にした。ここで、本来各交配組に割り当てる次世代個体数を決定する際に、不連続な操作が生じるが、本研究では、Gumbel-softmax関数を応用して育種過程を近似することでこれを解決した。さらに、得られた勾配情報を勾配法へと応用することで、交配戦略の最適化の実現に成功した。結果、最適化した交配戦略

が最適化しない場合を上回ることが明らかになった。同結果については、国内学会の口頭発表で発表したほか、現在海外ジャーナルへと投稿中である。同研究は受入研究室との議論の中で生まれたものであり、より発展させていくことで、例えば深層学習などと組み合わせたより柔軟な最適化が可能になることが期待される。これにより、育種シミュレーションを利用した意思決定の現状を大きく変えることにつながる可能性がある。

●誌上発表 Publications

1. Hamazaki K., Iwata H.: "AI-assisted selection of mating pairs through simulation-based optimized progeny allocation strategies in plant breeding", *Frontiers in Plant Science*, 15: 1361894. (2024)
2. Okada M., Barras C., Toda Y., Hamazaki K., Ohmori Y., Yamasaki Y., Takahashi H., Takanashi H., Tsuda M., Hirai Yokota M., Tsujimoto H., Kaga A., Nakazono M., Fujiwara T., Iwata H.: "High-Throughput Phenotyping of Soybean Biomass: Conventional Trait Estimation and Novel Latent Feature Extraction Using UAV Remote Sensing and Deep Learning Models", *Plant Phenomics*, 6:0244. (2024)
3. Sakurai K., Hamazaki K., Inamori M., Kaga A., Iwata H.: "Cross Potential Selection: A Proposal for Optimizing Crossing Combinations in Recurrent Selection Using the Usefulness Criterion of Future Inbred Lines", *G3: GENES, GENOMES, GENETICS*, jkae224. (2024)

●口頭発表 Oral Presentations

1. 濱崎甲資, 岩田洋佳, 津田宏治: “微分可能な育種計画: 自動微分を利用した勾配法による育種戦略の最適化”, 日本育種学会 第146回講演会, 広島, 9月 (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 濱崎甲資, 津田宏治, 岩田洋佳: “ゲノミック予測のモデル更新を加味した育種計画における後代割当戦略の最適化”, 日本育種学会 第145回講演会, 東京, 3月 (2024)

XXIII-003 作用素環の対称性の探求と、機械学習の数学的枠組みの構築

Symmetries of operator algebras and the construction of mathematical frameworks for machine learning

研究者氏名: 紅村 冬大 Fuyuta KOMURA
受入研究室: 革新知能統合研究センター
汎用基盤技術研究グループ
数理科学チーム
(所属長 坂内 健一)

本研究課題は作用素環論と関数解析について純粋数学および応用数学の両側面から研究を行うものである。本年は純粋数学的な研究を主に行った。以下、その詳細を述べる。

本研究の主な対象は亜群 C^* 環と呼ばれる作用素環である。亜群 C^* 環とは、エタール亜群と呼ばれる対象から構成される C^* 環であり、1980年前後に Renault によって発案された。本分野の基本的な問題は、亜群 C^* 環の性質をエタール亜群の言葉で特徴づけることである。本年度は対称性の観点から、亜群 C^* 環とエタール亜群の関係について研究を行った。また、本結果を力学系から得られる C^* 環や有向グラフから得られる C^* 環 (グラフ C^* 環) に応用し、グラフ C^* 環に関する未解決問題を一般化した形で解決することに成功した。以下、この結果について説明する。

有向グラフが与えられると、その上の infinite path からなる空間と、infinite path の最初の辺を忘れるという写像 (片側シフト) が得られる。これらは記号力学系と呼ばれる対象であり、力学系の理論でよく研究されている対象である。他方で、有向グラフからグラフ C^* 環と呼ばれる C^* 環が構成される。有向グラフ上の片側シフトとグラフ C^* 環の関係については近年様々な研究が行われており、例えば2017年に Brownlowe らは片側シフトの連続軌道同値類がグラフ C^* 環とそのカノニカルな可換部分環の同型類から復元できることを示した。連続軌道同値類は弱い同値関係であり、例えば力学系の時間に関する情報は忘れてしまう。片側シフトの時間に関する情報をグラフ C^* 環から復元するという問題については、2023年に Armstrong らによって力学系の共役類の復元方法が得られている。これに関連する問題として、片側シフトの eventual な共役類とグラフ C^* 環のゲージ作用との関

係について未解決問題が2012年に Conti らによって提案されていた。私はこの未解決問題を、エタール亜群の技術を用いて解決し、片側シフトよりも一般の力学系で同様の主張が成り立つことを証明した。本結果はそれ自体が興味深い一方、亜群 C^* 環の理論を具体的な問題の解決に役立てられた点に意義があると考えている。

●誌上発表 Publications

(総説)

1. 紅村冬大, “*-homomorphisms between groupoid C^* -algebras”, 第 63 回実函数論・函数解析学合同 シンポジウム講演集, 2024.

(プレプリント)

1. F. Komura, Weyl groups of groupoid C^* -algebras, arXiv: 2409.04906, 2024 (submitted).

●口頭発表 Oral Presentations

1. *-homomorphisms on groupoid C^* -algebras, 理化学研究所 AIP 数理科学チームセミナー, 慶應義塾大学, June, 19, 2024.
2. *-homomorphisms on groupoid C^* -algebras, Semigroups, groupoids and C^* -algebras, Soo-rim Art Center (Seoul, Korea), July, 4, 2024.
3. *-homomorphisms on groupoid C^* -algebras, 第63回実函数論・函数解析学合同シンポジウム, 東京大学, September, 9, 2024.
4. Weyl groups of groupoid C^* -algebras, 2024 年度 関数解析研究会, 北海道大学, September, 18, 2024.
5. Weyl groups of groupoid C^* -algebras, 東大作用素環セミナー, 東京大学, October, 8, 2024.
6. Weyl groups of groupoid C^* -algebras, Kyoto Operator Algebra Seminar, 京都大学数理解析研究所, October, 18, 2024.
7. 力学系と作用素環/dynamical systems and operator

XXIII-004 トロピカル幾何学を用いた対数的 Hodge 構造の研究 Logarithmic Hodge structure via tropical geometry

研究者氏名：山本 悠登 Yuto YAMAMOTO
受入研究室：数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

複素代数多様体の一変数退化族は、非アルキメデスの付値体である複素数体上の形式 Laurent 級数体上の代数多様体とみなせる。Nicaise–Xu–Yu は、Kontsevich–Soibelman の提案に基づき、極大退化する Calabi–Yau 多様体の非アルキメデスの解析化と極小因子の対数的端末モデルを用いて、非アルキメデスの幾何学における SYZ ファイブレーションの類似を構成した。これは、非アルキメデスの解析空間から、エッセンシャルスケルトンと呼ばれる部分集合へのレトラクションであり、非アルキメデスの SYZ ファイブレーションと呼ばれる。これは底空間であるエッセンシャルスケルトンに特異性付き整アフィン構造を誘導するが、このようにして得られる整アフィン構造は、Gross–Siebert プログラムにおいてトーリック退化から構成されるものと比べて特異性が異なる。この差異に注目して、Gross–Siebert プログラムと非アルキメデスの SYZ ファイブレーションの間の関係について研究を行った。具体的には、Calabi–Yau 完全交叉のトーリック退化の場合に、非アルキメデスの解析空間のエッセンシャルスケルトンが、Gross–Siebert プログラムの双対交叉複体と、区分的整アフィン多様体として自然に同一視されることを示した。また、非アルキメデスの解析空間をトロピカル化する写像と、トロピカル多様体を区分線型に潰す写像の合成が、非アルキメデスの SYZ ファイブレーションになることを示した。この非アルキメデスの SYZ ファイブレーションは、Nicaise–Xu–Yu によって構成されたものとは異なり、底空間に誘導される特異性付き整アフィン構造は、Gross–Siebert プログラムのものとは一致する。

また、上述の結果を metric SYZ 予想に応用する研究を行った。metric SYZ 予想は、SYZ 予想を弱めたもので、偏極 Calabi–Yau 多様体の一変数極大退化族 $\{X_t\}_t$ に対して、特殊 Lagrange トーラス束の構造を持つ X_t の部分集合 U_t の族 $\{U_t\}_t$ であって、 U_t の Calabi–Yau 測度が、 $t \rightarrow 0$ の極限で X_t 全体の Calabi–Yau 測度に収束するようなものが存在することを主張する。metric SYZ 予想が成り立つための十分条件として、Yang Li によって

導入された comparison property と呼ばれるものがあるが、これは一変数退化族 $\{X_t\}_t$ を、複素数体上の形式 Laurent 級数体上の代数多様体とみなしたものの、非アルキメデスの Monge–Ampère 方程式の解のポテンシャルに対する代数幾何学的な条件である。国立台湾大学の後藤慶太氏との共同研究で、Calabi–Yau 完全交叉のトーリック退化の場合に、対応するトロピカル Monge–Ampère 方程式の解が、トロピカル空間の ambient の Euclid 空間上の凸関数の制限によって与えられるとき、この comparison property が成り立つことを証明した。これは、Calabi–Yau 完全交叉の場合に、metric SYZ 予想を導く comparison property をさらに、Euclid 空間内の凸関数に関する主張に帰着させたものであると言える。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Yuto Yamamoto, "Period integrals of hypersurfaces via tropical geometry", *Int. Math. Res. Not. IMRN*(2024), no. 15, 11386–11425(2024)*
2. Yuto Yamamoto, "Non-archimedean SYZ fibrations via tropical contractions", arXiv:2404.04972(2024)
3. Keita Goto and Yuto Yamamoto, "Toric degenerations of Calabi–Yau complete intersections and metric SYZ conjecture", arXiv:2407.09133(2024)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Yuto Yamamoto, "The Gross–Siebert program and non-archimedean SYZ fibrations", Geometric Analysis seminar, Westlake University, 5月(2024)
2. Yuto Yamamoto, "The Gross–Siebert program and non-archimedean SYZ fibrations", 日本数学会2024年度秋季総合分科会, 大阪大学, 9月(2024)
3. Yuto Yamamoto, "Period integrals of hypersurfaces via tropical geometry", NCTS Seminar in Algebraic Geometry, National Taiwan University, 10月(2024)
4. Yuto Yamamoto, "Period integrals of hypersurfaces via tropical geometry", Seminar, Pusan National University, 1月(2025)

XXIII-005 誤り耐性超伝導量子計算機の実現に向けた古典—量子デバイスを統合する 計算機システムアーキテクチャの研究

Computer System Architecture Integrating Classical and Quantum Devices for Fault-tolerant Superconducting Quantum Computers

研究者氏名：上野 洋典 Yosuke UENO

受入研究室：量子コンピュータ研究センター

超伝導量子計算システム研究ユニット

(所属長 田淵 豊)

量子計算機は次世代の計算基盤として盛んに研究開発が進められており、その中でも超伝導素子を用いた量子ビットから成る超伝導量子計算機は有望であると考えられている。超伝導量子ビットはその動作のために、希釈冷凍機により作られるミリケルビン程度の極低温環境を必要とする。そのため、室温環境で動作する古典計算機による量子ビットの制御には冷凍機内外にまたがる膨大な配線が必要であり、この配線が超伝導量子計算機のスケラビリティを制限している。特に、古典計算機による誤り訂正プロセスを必要とする誤り耐性量子計算機の場合にはこの影響は顕著である。

本研究では計算機アーキテクチャ分野の知見を活用して、量子ビットおよびその制御を行う古典計算デバイスを統合する超伝導量子計算機システムの実現を目指す。本年度は(1) 誤り訂正機構を持たない量子計算機を対象とした、異なる温度環境間にまたがる配線を低減する計算機アーキテクチャ、および(2) 誤り耐性量子計算機を対象とした、省ハードウェアリソースで高速なプログラム実行を実現する計算機アーキテクチャについて取り組んだ。

(1) について、広範な変分量子アルゴリズムを対象として、量子ビットの観測値を極低温環境内で圧縮して室温環境に送信する手法を提案した。これにより、異なる温度環境間の通信ボトルネックを解消し、異なる温度環境間の配線を低減することが期待される。また、極低温環境内でその手法を実行するアーキテクチャを、超伝導デジタル回路の一種であるSFQ回路を用いて設計した。本研究内容に関して原著論文を1篇執筆し、国内学会での口頭発表1件および国際学会でのポスター発表1件をおこなった。

(2) について、代表的な誤り耐性量子計算手法である格子手術を対象として、省ハードウェアリソースで高速なプログラム実行を実現する計算機アーキテクチャについての研究を行った。本研究項目においては、プログラム実行時間におけるボトルネックを解析する手法を提案した。その後、その手法に基づいてプログラム実行が高速かつ省ハードウェアリソースなアーキテクチャを提案し

た。また、共同研究者とともに、論理量子ビットを効率的に利用する階層化アーキテクチャと命令セットの提案、および論理量子ビットの初期配置を最適化する手法について取り組んだ。本研究内容に関して、計算機アーキテクチャ系トップ国際会議での論文採択1件、国内学会での口頭発表1件、および国際会議での口頭・ポスター発表それぞれ1件の成果が得られた。また、主著論文を計算機アーキテクチャ系トップ国際会議に投稿済みである。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Kobori T., Suzuki Y., Ueno Y., Tanimoto T., Todo S. and Tokunaga Y.: “LSQCA: Resource-Efficient Load/Store Architecture for Limited-Scale Fault-Tolerant Quantum Computing”, in Proceedings of 2025 IEEE International Symposium on High-Performance Computer Architecture, accepted.
2. Ueno Y., Imamura S., Tomida Y., Tanimoto T., Tanaka M., Tabuchi Y., Inoue K. and Nakamura H.: “C3-VQA: Cryogenic Counter-Based Co-Processor for Variational Quantum Algorithms”, IEEE Transactions on Quantum Engineering, in print.

●口頭発表 Oral Presentations

1. 上野洋典：“量子計算機アーキテクチャのための異分野間共同研究のすすめ”，第1回FTQCアーキテクチャ研究会，高松，11月(2024)
2. 齋藤卓，上野洋典，谷本輝夫，田淵豊，玉手修平，中村宏：“格子手術に基づく誤り耐性量子計算のボトルネック解析によるアーキテクチャ検討”，第250回情報処理学会システム・アーキテクチャ研究会，8月(2024)
3. 上野洋典，今村智史，富田祐永，谷本輝夫，田中雅光，田淵豊，井上弘士，中村宏：“変分量子アルゴリズム向け極低温SFQアーキテクチャ”第249回情報処理学会システム・アーキテクチャ研究会，6月(2024)
4. Ueno Y.: “A 2.5D qubit plane architecture for efficient lattice surgery-based FTQC”, YITP Quantum Error Correction Workshop, Kyoto, Mar. (2024)
5. Ueno Y.: “Online surface code decoder with a superconducting circuit”, Kobe Quantum Error Correction Symposium, Kobe, Jan. (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Matsuo S., Yamashita S. and Ueno Y.: “An Optimization Method for Initial Placement of Logical Qubits in Lattice Surgery using Simulated Annealing”, 24th Asian Quantum Information Science Conference, Sapporo, Japan, Aug. (2024)

2. Ueno Y., Imamura S., Tomida Y., Tanimoto T., Tanaka M., Tabuchi Y., Inoue K. and Nakamura H.: “SFQ counter-based precomputation for large-scale cryogenic VQE machines”, Work in progress poster session in the 61st Design Automation Conference, San Francisco, USA, Jun. (2024)

XXIII-006 グラフ低ランク分解

Graph Low-rank Decomposition

昨年度は、テンソルの軸やデータの特徴間の相互作用によるデータ分解を定式化した。この分解モデルに隠れ変数（潜在相互作用）を加えることによって、凸最適化の繰り返しによってデータの低ランク分解が可能となる。また、情報幾何学的な解析によって、本手法は、任意の低ランク構造に適用可能であるという汎用性と、停留点への収束が保証されるという安定性の両立を実現する初のデータ分解アルゴリズムであることが確認できた。さらに、この分解アルゴリズムを高次の特徴空間内の双対平坦構造上で解析したところ、様々な低ランク構造の混合でデータを分解した場合にも、上述の安定性が損なわれないことが分かった。従来のデータ分解においては、モデル選択として低ランク構造を1つ定める必要があるが、提案中の枠組みでは主要な低ランク構造の混合での分解を行い、低ランク構造の混合比もデータから自動的に学習する。これによってモデル選択（低ランク構造の選択）の手間を省きつつ従来手法よりも優れた近似性能を有する分解手法の開発に成功した。本成果は査読付きワークショップAAAI 25 Workshop on Connecting Low-rank Representations in AIに採択済みであり、国際会議ICLR2025に投稿中である。また、本手法は物理学にインスパイアされた相互作用解析に基づく手法という事もあり、SQAI量子埋め込みセミナーでの講演依頼や、連続講義「物理屋のための機械学習講義」で講義依頼を受けるなど、物理学の専門家との学際的な交流も行っている。

研究者氏名：ガラムカリ 和 Kazu GHALAMKARI
受入研究室：革新知能統合研究センター
汎用基盤技術研究グループ
構造的学習チーム
(所属長 河原 吉伸)

●口頭発表 Oral Presentations

(学会・研究会)

1. ガラムカリ和：“Many-body Approximation for Non-negative Tensors”, 第22回 情報科学技術フォーラム (FIT2024), トップコンファレンスセッション, 広島工業大学, 9月(2024年)
2. Kazu Ghalamkari: “Tensor Factorization via Multi-Body Modeling on Statistical Manifold”, IEEE Conference on Artificial Intelligence 2024: Workshop on Tensor Models for Machine Learning (TMML2024), Singapore, June, 2024
3. ガラムカリ和：“高次相互作用によるテンソル分解”, データ解析の数理ワークショップ：力学系・トポロジー・機械学習の協奏, 九州大学伊都キャンパス, 6月(2024年)
4. ガラムカリ和：“モード間相互作用によるテンソル分解”, 第4回 TREFOIL 研究会, 日本橋 AIP オフィス, 東京, 2月(2024年)

(セミナー)

1. ガラムカリ和：“データの high-order 相関を捉えるテンソル分解”, SQAI 量子埋め込みセミナー, 東京大学本郷キャンパス, 4月(2024年)

●ポスター発表 Poster Presentations

(査読付き国際ワークショップ)

1. Kazu Ghalamkari, Jesper Løve Hinrich and Morten Mørup: “Non-negative Tensor Low-rank Decompositions Through the Lens of Information Geometry”, AAAI 25 Workshop on Connecting Low-rank Representations in AI, Philadelphia, March (2025)

XXIII-007 力学系の不変性に着目した生物における生理的制約を考慮する学習則 Biologically plausible learning rule with a focus on invariance in dynamical systems

研究者氏名：中村 絢斗 Kento NAKAMURA
受入研究室：脳神経科学研究センター
知覚神経回路機構研究チーム
(所属長 風間 北斗)

動物は多様な感覚刺激を神経細胞の応答パターンにより区別して脳内に表現し記憶する仕組みを備えている。記憶を正しく呼び起こすためには、その鍵となる応答パターンが時間と共に安定して存在する必要があるであろう。しかしさまざまな動物種や脳領域における近年の網羅的計測により、同じ感覚刺激に対する応答パターンが時間と共にドリフトしていく現象が明らかになってきた。応答パターンのドリフトが記憶や学習に与える影響については未解明な点が多い。

本年度は所属研究室や他研究室で観察されている、ドリフトの示す時間的に不変な性質の研究を進めた。ドリフトの研究においては、複数の刺激に対する応答パターン群を同時に追跡したデータが得られている。これを解析すると、刺激に対する各応答パターンはそれぞれ初期状態から変化していくが、にもかかわらず応答パターン間の相関関係、つまり類似度は安定に保存されるという結果が複数観察されている。応答パターン間の類似度は、一つの刺激に対する学習結果を他の刺激に対してどれだけ汎化させるか、それとも干渉させないかを定める大事な量である。この学習上重要な量を不変に保つ性質が、神経回路の比較的シンプルな機構で実現していることを見出した。具体的には、シナプス重みの揺らぎを2層の神経回路モデルに導入してドリフトの性質を再現した上で、層に含まれるニューロンの数が大きければ応答パターン間の相関関係が安定に保たれることを示した。また比較のために、シナプスの重みではなく膜電位に揺らぎを入れた場合を考えると、相関があらゆる刺激間で高くなり識別が難しくなることを観察した。ドリフトに与えるこうした影響の違いが学習の効率にも反映されうることを、環境が変化する下での連合学習の設定で数值的・解析的に示した。

今後は本モデルで扱っていないフィードバック結合の

影響や学習に基づく変化も考慮した上で、相関関係の不変性が保たれる一般的な条件を議論したり、数值的・解析的な知見に基づいてドリフトが機能的意義を持つ可能性について探索したいと考えている。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Kento Nakamura, Tetsuya J. Kobayashi: "Gradient sensing limit of an elongated cell with orientational control", *Physical Review E*, 110,064407 (2024)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Kento Nakamura: "Optimal control of run-and-tumble chemotaxis under sensory noise and its biochemical implementation", *Theoretical Biology Seminar*, Kyoto, Japan, Aug. (2024).

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Kento Nakamura, Keita Endo, Hokto Kazama: "Discriminability-preserving representational drift with synaptic fluctuation", *日本神経回路学会*, 9月 (2024)
2. Kento Nakamura, Keita Endo, Hokto Kazama: "Synaptic fluctuation induces representational drift while preserving discriminability", *Bernstein Conference*, Frankfurt am Main, Germany, Sep. (2024)
3. Kento Nakamura, Keita Endo, Hokto Kazama: "Synaptic fluctuation induces representational drift while preserving discriminability", *RIKEN CBS Annual Retreat*, Gotemba, Japan, Nov. (2024)
4. Kento Nakamura, Keita Endo, Hokto Kazama: "Synaptic fluctuation induces representational drift while preserving discriminability", *RIKEN CBS Co-Creation International Conference*, Wako, Japan, Jan. (2025)

XXIII-008 低エネルギー核物理と高エネルギー天文学で探る I 型 X 線バースト機構の解明 Revealing Type-I X-ray bursts from Low-energy nuclear physics and high-energy astronomy

研究者氏名：土肥 明 Akira DOHI
受入研究室：開拓研究本部
長瀧天体ビッグバン研究室
(所属長 長瀧 重博)

鉄より重い陽子過剰な重元素の生成過程を説明する有力なサイトとして、I型X線バーストと呼ばれる、降着中性子星の表面付近での核燃焼に伴うX線突発天体が有力であると考えられている。こうしたX線バースターでは質量数が最大100程度の陽子過剰核を作ることができるが、現実的にどの程度重い元素が合成されるかはわかっていない。また、近年通常より継続時間が異常に長いX線バーストが観測されているが、こちらも未だに理論的に解明されていない。そのため、X線バーストの光度曲線・元素合成の両方の精密なモデルが重元素の起源やX線観測の理解に重要である。

本年は、2024年2月～3月に超小型X線天文衛星NinjaSat等によってパルサーSRGA J144459.2-604207から複数のX線バーストが観測された。この天体は、今まで私が対象にしてきた“clocked” bursterであることがわかった。そのため、NinjaSatのチームと共同でSRGA J14444の解析を行った。私は、従来改良してきたX線バーストコードHERESを用いて光度曲線の計算を行い、SRGA J14444は、clocked bursterとしては初の、太陽系組成と比べてHeリッチな物質が降着している天体であることが明らかになった。れにより、初期の伴星が重かった(大雑把には2倍の太陽質量以上)ことが推測される。観測された再帰時間と定常放射カウンtrateの関係から、SRGA J14444は2倍の太陽質量を超えるmassiveな中性子星である可能性も示された。後者は、私の前年度の研究成果(Dohi et al. 2024, ApJ 960, 14)の結果を用いている。最終的な観測と理論のバーストの再帰時間 Δt と継続時間 τ の比較を、図に示した。太陽系組成(水素・ヘリウム比 X/Y=2.9)と比べてヘリウムリッチなX線バーストHERESモデルが、SRGA

J14444の観測を再現できていることがわかる。この成果は、日本初超小型X線天文衛星NinjaSatの最初の科学成果であり、比較的小さな観測装置でも中性子星の爆発現象を探ることができることを示している。

今年度は観測グループとの共同研究に集中した。次年度は、より改良した理論モデルの構築や、元素合成の性質、長いX線バーストの機構を調べていく予定である。

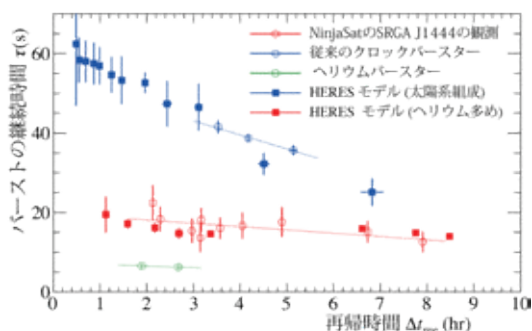
●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Hiroyuki Tajima, Yuta Sekino, Daisuke Inotani, Akira Dohi, Shigehiro Nagataki, and Tomoya Hayata, "Non-Hermitian p-wave superfluid and effects of the inelastic three-body loss in a one-dimensional spin-polarized Fermi gas" Phys. Rev. Research 6, 023060 (2024).
2. Hajime Sotani, and Akira Dohi, "Gravitational wave asteroseismology of accreting neutron stars in a steady state" Accepted for publication in Physical Review D
3. Akira Dohi, Nobuya Nishimura, Ryosuke Hirai, Tomoshi Takeda, Wataru Iwatari, Toru Tamagawa, Amira Aoyama, Teruaki Enoto, Satoko Iwata, Yo Kato, Takao Kitaguchi, Tatehiro Mhira, Naoyuki Ota, Takuya Takahashi, Sota Watanabe, and Kaede Yamasaki, "Evidence of non-Solar elemental composition in the clocked bursts from SRGA J144459.2–604207", accepted for publication in PASJ Letter
4. Tomoshi Takeda, Toru Tamagawa, Teruaki Enoto, Takao Kitaguchi, Yo Kato, Tatehiro Mihara, Wataru Iwakiri, Masaki Numazawa, Naoyuki Ota, Sota Watanabe, Arata Jujo, Amira Aoyama, Satoko Iwata, Takuya Takahashi, Kaede Yamasaki, Chin-Ping Hu, Hiromitsu Takahashi, Akira Dohi, Nobuya Nishimura, Ryosuke Hirai, Yuto Yoshida, Hiroki Sato, Syoki Hayashi, Yuanhui Zhou, Keisuke Uchiyama, Hirokazu Odaka, Tsubasa Tamba, and Kentaro Taniguchi "NinjaSat monitoring of Type-I X-ray bursts from the clocked burster SRGA J144459.2–604207", accepted for publication in PASJ Letter

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)



図：再帰時間 Δt と継続時間 τ の観測と理論モデル

1. Akira Dohi, "Modeling of Clocked X-ray Bursters ", Theories of Astrophysical Big Bangs 2025, RIKEN, Feb. 17-19
2. Akira Dohi, "An approach to constrain neutron-star structure from Clocked bursters" Origin of Matter and Galaxy 17 (OMEG17), CYNN HOTEL, Chengdu, China, September 7-13, 2024.
3. Akira Dohi, "Modeling Type-I X-ray Bursters with HERES", RIKEN Symposium on Evolution of Matter in the Universe (r-EMU), RIKEN, June 5-7, 2024.
4. 土肥明、猪谷大輔、関野裕太、田島裕之、長瀧重博 "中性子星 NS 1987A の将来観測を利用したクラスト内部の中性子超流動の調査" 日本物理学会2024年秋季大会, 北海道大学, 2024年9月
5. 土肥明、西村信哉、平井遼介、武田朋志、岩切渉、三原建弘、玉川徹、青山有未来、岩田智子、榎戸輝揚、大田尚享、加藤陽、北口貴雄、高橋拓也、渡部蒼汰、山崎楓 "X線バースト天体 SRGA J144459.2-604207 から推定される連星進化への示唆" 日本天文学会2024年秋季大会, 関西学院大学, 2024年9月

XXIII-009 Elucidating nucleon's mass and spin structures

Name: Raza Sabbir SUFIAN

Host Laboratory: Computing Group

RIKEN BNL Research Center

RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science

Laboratory Head : Taku IZUBUCHI

Description of research: Nearly all the mass of the visible universe is contained within atomic nuclei, with the mass of these atomic nuclei determined by the mass of the nucleons (protons and neutrons). Understanding the mechanism that generates ~99% of nucleon's mass due to interactions of nearly-massless quarks and massless gluons remains as one of the biggest challenges in physics. Another question that has remained unresolved is how the spin and orbital angular momenta of three valence quarks, a sea of virtual quark- antiquark pairs, and gluons conspire together to make up nucleon's total spin $1/2$. While the origins of nucleon mass and spin remain elusive, unraveling the processes that pertains to the predominance of matter over antimatter in the universe is also of fundamental importance. Achieving precise determination of neutrino-nucleon scattering cross sections is essential for elucidating the behavioral difference between neutrinos and antineutrinos in neutrino oscillation experiments, which could hold the key to comprehending the origin of matter-antimatter asymmetry in the universe.

To understand the nucleon spin puzzle, the first lattice QCD calculation of gluon helicity parton distribution function and gluon's contribution to nucleon spin was determined in *Phys. Rev. D* 108 (2023) 7, 074502. The research showed that gluon's contribution to proton spin is nonzero and positive. The result of this publication was confirmed afterwards in the most recent analysis of the experimental data at the Relativistic Heavy-Ion Collider (RHIC) at the Brookhaven National Lab. Additionally, in collaboration with members at the RIKEN-BNL Research Center, I have been extensively

working on the application of generative models in machine learning to predict matrix elements in large nucleon boost which is currently inaccessible in lattice calculations. One significant advantage of the generative machine learning is that it is no longer limited to simply classifying data, it can generate new data. These techniques of learning the deep correlation in the existing lattice data and examining the quantum correlations of boosted hadron at large momenta followed by proper validations, will have a significant impact on the prediction of lattice QCD matrix elements outside currently accessible momenta and facilitate determinations of various quantum correlation functions.

Nuclear model buildings are essential to effectively analyze the data of neutrino-nucleon scattering cross sections, enabling the investigation of neutrino oscillations. This task requires the direct incorporation of scattering amplitudes at the nucleon level, especially in the resonance and shallow in- elastic regions, which are not well known theoretically or experimentally. Gaining precise knowledge of the neutrino-nucleon scattering cross-sections, which can be determined from perturbatively calculable leptonic tensor and nonperturbative hadronic tensor, is indispensable for exploring charge-parity (CP) symmetry violation in the leptonic sector. In the *arXiv:2311.04206 (to be published in Physical Review D)*, we presented the a lattice QCD calculation of nucleon's hadronic tensor to determine the nucleon's elastic and resonance structures for the first time. This research also opens an avenue for exploring neutrino-nucleon scattering cross sections and essentially exploring CP violation in the leptonic sector to investigate matter-antimatter

asymmetry in the universe.

In the support of RIKEN's recent efforts towards understanding physical phenomena using Quantum Computing, in my most recent research in *Phys. Rev. Res.* 6 (2024) 3, 033107, we introduced a novel implementation of second order Trotterization for the isotropic Heisenberg spin chain. This was also coupled with precise measurements of staggered magnetization expectation values across a substantial range of qubits, reaching up to 100 qubits on the real quantum devices. This achievement establishes the potential of these quantum devices for investigating properties of large-scale quantum systems. Given that any quantum computing endeavor involves the implementation of spin chain systems, the planned extensions of this work will have significant implications for our understanding of strongly coupled quantum many-body systems and essentially lead towards realistic quantum computing of nuclear physics systems.

● Publications

Papers

1. G. de Teramond, A. Paul, S. Brodsky, A. Deur, H. Dosch, T. Liu, Raza Sufian, The strong coupling in the nonperturbative and near-perturbative regimes (Under review in Physical Review Letters) *arXiv:2403.16126* [hep-ph]

● Oral Presentations

Conferences

1. Raza Sufian, Inverse Problems and Uncertainty Quantification in Nuclear Physics, Institute of Nuclear Theory, University of Washington, July 2024: Inverse problems in lattice QCD calculations of hadron structures
2. Raza Sufian, EIC workshop, University of Tokyo, May 2024: EIC Physics from Lattice QCD: Origin of the Nucleon Spin and Mass Structures
3. Raza Sufian, From Quarks and Gluons to the Internal Dynamics of Hadrons, Center for Frontiers in Nuclear Science, Stony Brook University, May 2024: Gluonic structure of the proton from lattice QCD

XXIII-010 Structure and Spectroscopy of Hadrons from the Quark Model

Name: Ahmad Jafar ARIFI

Host Laboratory: Few-body Systems in Physics Laboratory
RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science
Laboratory Head : Emiko HIYAMA

Hadrons, composite particles of quarks and gluons, are governed by the strong interaction. While Quantum Chromodynamics (QCD) serves as the fundamental theory, the nonperturbative nature of strong interactions at low energies necessitates effective models to describe hadron structure. The constituent quark model has been successful in explaining various hadronic phenomena, but many puzzles remain unresolved. Ongoing and planned experiments worldwide aim to deepen our understanding of hadrons and their internal structure. At RIKEN, we focus on studying hadron structures using quark models with various approaches. Understanding the role of quark degrees of freedom is crucial for revealing the structure of hadrons. This year, our research covered mesons, baryons, and nuclear matter, with some advancements in each area. For mesons, we investigated the structure of ground-state heavy mesons using single Gaussian ansatz (SGA) and Gaussian expansion method (GEM) wave functions in light-front quark model (LFQM). By fitting mass spectra and decay constants, GEM provided improved asymptotic behavior near (1-

x), consistent with perturbative QCD, and better described power-law damping in the high-momentum region. Additionally, GEM predicted faster fall-off of electromagnetic form factors in the low- Q^2 region, offering a more realistic description of meson structures. We also explored radiative transitions in pseudoscalar and vector charmonia, bottomonia, and B_c mesons, focusing on M1 transitions. Our study demonstrated self-consistency in the model and our results align with available experimental data and lattice QCD, suggesting future experimental tests for validation.

In nuclear matter, we combined LFQM with the quark-meson coupling (QMC) model to study modifications of meson structures in dense environments. This year, we studied the modifications of electromagnetic form factors (EMFFs) of light and heavy-light pseudoscalar mesons in a nuclear medium. By combining the LFQM with the quark-meson coupling (QMC) model, we analyzed in-medium EMFFs and charge radii of mesons with different quark flavors. Our results showed that the EMFFs of charged mesons decrease more rapidly with increasing nuclear density,

while neutral mesons increase. The charge radii of mesons also grow with nuclear density, with the rate depending on the mesons' quark content. While pions and kaons undergo significant modifications, heavy-light mesons are only slightly affected.

In the baryon sector, we focused on the two-pion emission decays of singly heavy baryons, analyzing both sequential and direct decay processes. Using the chiral quark model and chiral-partner scheme, we estimated coupling constants and provided valuable insights into the structure of heavy baryons. For instance, our findings suggest that the $\Lambda_c(2625)$ is a λ -mode excitation with $J^P = 3/2^-$. Additionally, the production of charmed baryons has been also analyzed from the heavy-quark spin symmetry.

These efforts provide valuable insights into hadron structures, bridging gaps in QCD phenomenology and guiding future experimental and theoretical studies. Our work continues to advance the understanding of hadrons as bound states of quarks and gluons, contributing to the broader field of particle physics.

● Publications

Papers

1. Arifi A. J., Happ L, Ohno S., and Oka M. Structure of heavy mesons in the light-front quark model. *Phys. Rev.D* 110, 014020 (2024).
2. Ponkhuha N., Arifi A. J., Samart D. Two-pion emission decays of negative parity singly heavy baryons. *Arxiv:2407.10063*.
3. Ridwan M., Arifi A. J., Mart T. Self-consistent M1 radiative transitions of excited Bc and heavy quarkonia with different polarizations in the light-

front quark model. *Arxiv:2409.13172*.

4. Arifi A. J., Hutauruk P. T. P., Tsushima K. In-medium electromagnetic form factors of pseudoscalar mesons from the quark model. *Arxiv: 2412.09883*.
5. Monkata N., Sawasdipol P., Ponkhuha N., Suntharawirat R., Arifi A. J., and Samart D. Heavy-quark spin symmetry violation effects in charmed baryon production. *Arxiv: 2412.18280*.

● Oral Presentations

1. Arifi A. J.: "Self-consistent light-front quark model analysis of meson structure" The 23rd International Conference on Few-Body Problems in Physics (FB23). Beijing, China 2024, Sep 22-27.
2. Arifi A. J.: "Structure and properties of mesons in light-front quark model" International workshop on J-PARC hadron physics 2024. Ibaraki, Japan 2024, July 23-25.
3. Arifi A. J.: "Light-front quark model analysis of hadron structure" Workshop on Universality of Strongly Correlated Few-body and Many-body Quantum Systems. Sendai, Japan 2024, Sep 3-6.
4. Arifi A. J.: "Recent development in hadron structure using the light-front quark model" International Conference for Particles and Radiation (ICPR 2024). Manila, The Philippines 2024, Oct 17-19.
5. Arifi A. J.: "M1 radiative decays in light-front quark model" Research Center for Accelerator and Radioisotope Science (RARIS) Workshop. Sendai, Japan 2024, Nov 20-21.
6. Arifi A. J.: "Two-pion emission decays of singly heavy baryons" East Asian Workshop on Exotic Hadrons 2024. Nanjing, China 2024, Dec 8-11.

XXIII-011 Universality in atomic and nuclear few-body systems

Name: Lucas Michael Carlo HAPP

Host Laboratory: Few-body Systems in Physics Laboratory
RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science
Laboratory Head : Emiko HIYAMA

Universality is an interesting concept in few-body physics, which can occur when quantum mechanical interactions support a nearly resonant state (very weakly bound or just unbound). In this scenario, physical properties of few-body systems depend only on a small set of low-energy parameters, offering a common description across various systems as e.g. for nuclear physics or ultracold atoms. Especially in systems of cold atoms, the resulting three-body states are however often not true bound states but resonant states, which are characterized by a finite lifetime, since they can decay or break up into their constituent

subsystems.

In the past fiscal year, I have deepened the analysis of such three-body resonances which I started in my first SPDR year. In particular, I constructed a simple two-channel model which captures the essence of the transition before and after break-up. This allowed me to understand the underlying mechanism that can protect the system against such a spontaneous decay. Moreover, by identifying that this stabilization can be achieved by tuning accessible parameters (e.g. an external magnetic field) I was able to greatly improve the relevance of my theory for experimental

realizations.

In addition, I continued to collaborate with my colleague on his main field of research in hadron physics. Here, we studied the structure of heavy mesons within the light-front quark model and unveiled the relevance of relativistic approaches.

● Publications

Papers

1. Arifi A.J., Happ L., Ohno S. and Oka M.: Structure of heavy mesons in the light-front quark model. *Phys. Rev. D* 110, 014020 (2024)*
2. Schnurrenberger T., Happ L. and Efremov M.: Borromean states in a one-dimensional three-body system. *Phys. Rev. Res.* 7, 013090 (2025)*
3. L. Happ and P. Naidon: Stabilization of three-body resonances to bound states in a continuum, arxiv:2503:02037

● Oral Presentations

Conferences

1. Happ L. "Dependence of three-body resonance

lifetimes on the mass ratio and dimensionality", Ultracold Atoms Japan 2024, Onna Japan 2024, April 09-12

2. Happ L. "Mass Ratio Dependence of Three-Body Resonance Lifetimes in 1D and 3D", APS DAMOP Meeting 2024, Fort Worth USA 2024, June 03-07
3. Happ L. "Lifetimes of three-body resonances", UQS-Tohoku-2024, Sendai Japan, August 26- September 27
4. Happ L. "Lifetimes of three-body resonances: dimensionality and mass ratio", UQS-Tohoku-2024 Conference, Sendai Japan, September 04-05
5. Happ L. "Lifetimes of three-body resonances: dimensionality and mass ratio", International school of nuclear physics, Erice Italy, September 16-22
6. Happ L. "Lifetimes of three-body resonances: dimensionality and mass ratio", International conference on few-body problems in physics FB23, Beijing China 2024, September 22-27
7. Happ L. "Stabilization of three-body resonances to bound states in a continuum", 4th Franco-Japanese workshop on Few-body Problems in Physics from Atoms to Quarks, Caen France 2025, March 03-07

XXIII-012 Testing Strong Gravity with Black Holes: Gravitational Waves and Shadows

Name: Che-Yu CHEN

Host Laboratory: Interdisciplinary Mathematical Sciences Program

RIKEN Interdisciplinary Theoretical and Mathematical Sciences Program

Laboratory Head : Tetsuo HATSUDA

The recent advancements of gravitational wave detection and black hole imaging technologies allow us to probe strong gravity regimes around black holes. In particular, we can test whether the black holes in our universe are really described by the Kerr geometry in General Relativity, i.e., we can test the Kerr black hole hypothesis.

One particularly important property of black holes is that they are covered by an event horizon, which defines a spacetime boundary from which nothing can escape. However, quantum gravitational corrections may possess horizon scales, and may even avoid the formation of event horizon itself, leading to the models of horizonless compact objects. This year, we worked on a project of imaging horizonless compact objects. The compact objects in the model are extremely compact in the sense that they have a surface very close to the would-be event horizon. However, there is no event horizon, so light rays can propagate through the objects and may eventually escape and be observed. We found that these penetrating light rays may generate a set of inner light

rings on the shadow images when the compact objects are lit up by surrounding light sources. However, if the compact objects have very strong inner redshifts, these inner light rings can be darkened because of the delay of arrival of these light rays in a reasonable observational timescale. This implies that a horizonless compact object may cast an image that is very close to a classical black hole.

Another feature of Kerr black holes is the equatorial reflection symmetry. This year, we identified the unique observational feature when a black hole breaks its reflection symmetry. In particular, the morphology of the Keplerian disk may cast a concave dent at the inner part of its approaching side. This is due to the fact that the light rays and the disk are shifted in a way that they miss each other due to the reflection asymmetry. Such a concave dent on the disk morphology can cause a shift of the blue horns on the line profiles.

● Publications

Original Papers

1. Chen Che-Yu, Yokokura Yuki: Imaging a semi-classical horizonless compact object with strong gravity, *Phys. Rev. D* 109 (2024) 10, 104058*
2. Chen Che-Yu, De Felice Antonio and Tsujikawa Shinji: Linear stability of vector Horndeski black holes, *JCAP* 07 (2024) 022*
3. Chen Che-Yu, Pu Hung-Yi: Observational features of reflection asymmetric black holes, *JCAP* 09 (2024) 043*

● Oral Presentations

Conferences

1. Chen Che-Yu: Resonant orbits and chaos of rotating black holes beyond circularity, GC2024, Kyoto, February (2024)
2. Chen Che-Yu: Imaging a semi-classical horizonless compact object with strong redshift, KPS meeting

(online), April (2024)

3. Chen Che-Yu: Imaging a semiclassical horizonless compact object: Darkening effect through inner redshifts, JGRG33, Osaka, December (2024)

Seminars

1. Chen Che-Yu: Observational features of black holes without equatorial reflection symmetry, Rikkyo U., March (2024)
2. Chen Che-Yu: Observational features of black holes without equatorial reflection symmetry, RESCEU seminar (online), June (2024)
3. Chen Che-Yu: Testing the Kerr black hole hypothesis, National Central U., Taoyuan, Taiwan, December (2024)
4. Chen Che-Yu: Is black hole spectroscopy reliable in testing GR?, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, December (2024)

XXIII-013 ミュオン原子 X 線精密分光による原子核半径の高精度決定

High-Precision Determination of Nuclear Radius via Muonic X Ray Spectroscopy

研究者氏名：齋藤 岳志 Takeshi SAITO

受入研究室：開拓研究本部

東原子分子物理研究室

(所属長 東 俊行)

ミュオン原子X線の高精度測定を行うため、硬X線・ γ 線領域の光子に感度を持つ超伝導転移端検出器 (TES) マイクロカロリメータ型検出器の開発および加速器施設での運用を行なった。新しく導入した検出器の初めての運用試験を2024年2月に茨城県東海村J-PARC MLFにて実施し、加速器施設的环境が検出器に与える影響を評価した。また測定予定のミュオン原子X線を測定し、preliminaryなスペクトルを得た。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Saito T. Y., et al., "Application of Hard X-Ray and Gamma-Ray TES Microcalorimeter at Accelerator Facility", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, in print
2. Go S., et al., "Demonstration of nuclear gamma-ray polarimetry based on a multi-layer CdTe Compton camera", *Scientific Reports*, volume 14 2573 (2024)
3. Mizuno R., et al., "Development of wide range photon detection system for muonic X-ray spectroscopy"

Nuclear Instrument and Methods A, volume 1060, 169029 (2024)

4. Koyama S., et al., "Mirror symmetry at far edges of stability: The cases of ^8C and ^8He ", *Physical Review C*, 109, L031301 (2024)

●口頭発表 Oral Presentations

(研究会)

1. 齋藤岳志 "高分解能ミュオン原子分光による原子核研究の将来", 第2回中間子科学の将来検討会, 那須, 7月 (2024)
2. 齋藤岳志 "TES検出器を用いたミュオン原子分光", *Muon 科学と加速器研究2025*, 大阪, 1月 (2025)
3. Saito T. Y. "Muonic nuclear spectroscopy with TES microcalorimeters", ADRIB25, Wako, January (2025)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Saito T. Y., et al., "Application of Hard X-Ray and Gamma-Ray TES Microcalorimeter at Accelerator Facility", ASC24, Salt Lake City, September (2024)

XXIII-014 CP 対称性の破れを探る重い原子核の殻模型計算

Shell model study of heavy nuclei for probing CP violation beyond the standard model

研究者氏名：柳瀬 宏太 Kota YANASE
受入研究室：仁科加速器科学研究センター
核子多体論研究室
(所属長 木村 真明)

本研究では、ジルコニウム同位体とその周辺の原子核についての準粒子真空殻模型による大規模計算を進めた。これらの同位体では、低エネルギーで球形と四重極変形および八重極変形が共存しており、このように多様な状態を統一的に記述するためには、十分に大きい模型空間で定義された適切な有効相互作用が必要である。準粒子真空殻模型は、これらの変形状態を記述するのに必要な大きさの模型空間を扱うことができる手法である。

まず、昨年度から進めてきた有効相互作用の構築を完了し、中性子数50から70までの同位体について、低エネルギー状態の励起エネルギーや電磁遷移強度を統一的に再現するような有効相互作用を構築した。新たな発見として、中性子数が66から70までの同位体では、基底状態において非軸対称な四重極変形が実現することが明らかとなった。これは近年、理研RIBFで行われたガンマ線分光実験の結果とも一致している。

次に、特に八重極変形に注目した波動関数の解析を行った。中性子数が60未満のジルコニウム同位体は、四重極変形の大きさはほぼ0であるが、八重極変形の大きさは中性子数の増加に伴い徐々に大きくなる。特に、ジルコニウム96原子核では非常に大きな電気八重極遷移B(E3)が測定されており、本研究ではこの実験値を再現している。また、近年のガンマ線分光実験では、ジルコニウム96原子核について別の興味深い結果も得られている。ジルコニウム96は四重極変形の小さい基底バンドと、四重極変形の大きい励起バンドで構成されており、この単

純な描像に基づけばバンド間の電磁遷移は非常に小さいはずである。ところが、特定のスピン状態からのバンド間遷移がある程度の大きさを持つことが測定された。本研究では、八重極変形のなかでも特に具体的な形状を解析することで、八重極変形の大きい基底バンドと四重極変形が大きい励起バンドという新たなバンド構造が形成されていることを示した。この新しい描像では、強いバンド間遷移を理解できるだけでなく、静的な八重極変形が実現することも示している。

●口頭発表 Oral Presentations

1. 柳瀬宏太, 角田佑介, 大塚孝治, 清水則孝: ジルコニウム同位体とその周辺での変形共存, 日本物理学会第79回年次大会, 北海道大学, 2024年9月.
2. Kota Yanase: Shape coexistence of Zr and the neighboring isotopes described by nuclear shell model, VIIth Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure, 2025年2月.
3. Kota Yanase: CP-odd nuclear moments evaluated by nuclear shell model, Single-particle and collective motions from nuclear many-body correlation (PCM2025), 2025年3月.

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 柳瀬宏太: 原子核殻模型計算による変形共存の記述, 第11回「富岳」を中核とするHPCIシステム利用研究課題 成果報告会, 品川グランドセントラルタワー, 2024年10月

XXIII-015 連星系内の激しい相互作用と大質量星の多様な進化

Energetic Interactions Between Stars and the Diversity of Massive Stellar Evolution

研究者氏名：平井 遼介 Ryosuke HIRAI
受入研究室：開拓研究本部
長瀧天体ビッグバン研究室
(所属長 長瀧 重博)

重力崩壊型超新星爆発を起こす大質量星(約8太陽質量以上)は、その大半が連星を形成すると考えられている。連星系では質量輸送などの相互作用を経て進化が複雑になり、超新星爆発の観測的性質も多様化する。また、超新

星爆発は伴星や連星軌道に大きな影響を与えることが知られており、両者を統一的に理解することが重要である。

本研究では、超新星爆発前後の連星軌道の変化に関し、従来の定説を覆す新しいモデルを提案した。通常、超新

星後には中性子星が残されるが、その誕生時には「キック」と呼ばれる瞬発的な加速が生じるため、連星は高い離心率を持つか、もしくは解体されると考えられてきた。実際、観測される長周期の中性子星連星は高い離心率を示しており、低離心率のものは短周期連星に限られている。しかし、Gaia衛星の観測により、長周期かつ低離心率の中性子星連星(Gaia NS1など)が複数発見され、既存の超新星キックモデルではこれらの形成を説明できないことが問題となっていた。

キックは超新星爆発の非対称性に起因し、加速のタイムスケールは通常数秒程度とされる。一方、1970年代には非対称な磁場をもつ中性子星が回転することで加速される「ロケット機構」と呼ばれる理論が提唱されており、中性子星が数年から数十年にわたって持続的に加速される可能性が指摘されていた。しかし、このモデル単独では観測されるキック速度の10分の1程度しか説明できないため、長らく主流の理論から外れていた。

キックのような瞬発的加速と軌道周期より長い持続的加速では連星軌道の変化が定性的に異なる。後者の描像は古典シュタルク問題とも呼ばれるが、今回この問題の解析解を永年近似のもとで導くことに成功した。ロケット加速によって連星軌道は周期を保ったまま離心率が上下に振動することを示した。また、強い瞬発的キックと弱いロケット機構を組み合わせた場合に連星軌道がどう変化するかを調査し、キックによって軌道が長周期・高離心率に達したのちにロケット機構によって離心率が下がることでGaia NS1のような長周期・低離心率連星が容易に形成できるということを示した。また、逆に離心率がさらに上がることもあるため超新星から数か月ないし数年後に中性子星と伴星の衝突が起こる場合もあるだろうと予想している。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Hirai R., Podsiadlowski Ph., Heger A. and Nagakura H.: "Neutron star kicks plus rockets as a mechanism for forming wide low-eccentricity neutron star binaries", *The Astrophysical Journal Letters*, Volume 972, Issue 1, id.L18, 8 pp. (2024)*
2. Hirai R.: "Post-supernova binary interactions", *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège [En ligne]*, Volume 93 - Année 2024, No 3 - 41st Liège International Astrophysical Colloquium, 206-215 (2024)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Hirai R.: "Post-supernova binary interactions: the tale of SN2022jli", *The Progenitors of Supernovae and their Explosions*, Dali (China), Aug. (2024)
2. Hirai R.: "Supernovae in the context of binary evolution", *Stars in Brisbane & 10th Australian Exoplanet Workshop*, Brisbane (Australia), Nov. (2024)
3. Hirai R.: "The chaotic history of Eta Carinae", *Fundamentals of Stellar Outflows: Celebrating and Amplifying the Scientific Life of Stan Owocki (StanFest)*, Leuven (Belgium), Jul. (2024)
4. Hirai R.: "Post-supernova binary interactions: the tale of SN2022jli", *41st Liège International Astrophysical Colloquium: The eventful life of massive star multiples*, Liege (Belgium), Jul. (2024)
5. 平井遼介, "Binaries and explosions", *Fukui binary workshop 2024*, 福井県立大学, 5月(2024)
6. 平井遼介, "Physics of massive binaries", *Yamada lab 20th Anniversary Workshop*, 早稲田大学, 3月(2024)

XXIII-016 横偏極陽子・陽子衝突実験の光子 - ジェット対生成を用いたグルーオン軌道回転運動の研究

Study of gluon orbital angular momentum using photon-jet pair production from a transversely polarized proton-proton collision

研究者氏名：糠塚 元気 Genki NUKAZUKA
受入研究室：仁科加速器科学研究センター
RHIC 物理研究室
(所属長 秋葉 康之)

クォーク・グルーオン(合わせてパートン)レベルでの陽子の内部構造の研究は1960年代から続けられており、現在では3次元の位置や運動量空間における分布関数や陽子スピン、パートンスピンへの依存性が盛んに研究さ

れている。陽子構造研究の最重要課題である陽子スピンの成り立ちを理解するためにはグルーオンの軌道回転を決定する必要があるが、現在はその存在さえ明らかではない。本研究ではアメリカ・ブルックヘブン国立研究所

のRelativistic Heavy Ion Collider (RHIC) 加速器と2023年から稼働を始めた sPHENIX 検出器を用いて横偏極陽子・陽子衝突により生成される光子-ジェット対を測定し、陽子スピンの対する角度分布の非対称度を求め、グルーオン軌道回転の有無を決定する。

報告者は今年度の sPHENIX データ収集において Intermediate Silicon Tracker (INTT) のオペレーション全般を統括する責を担った。2023年ランの終了後行われた MVTX 検出器、TPC 検出器のメンテナンスに伴う INTT 読み出し基盤の取り出しのため、2024年は読み出し基盤を再び設置し、セットアップを再構築することから始めた。他グループの作業との兼ね合いのため想定の半分という限られた作業時間のもとでセットアップ再構築と動作テストを完了させ、無事 RHIC 稼働に間に合わせることができた。4月から横偏極陽子・陽子衝突が始まり、報告者は共同研究者や学生を率いて INTT の試験運転を行った。最重要課題である読み出しタイミングの最適化を5月末に完了し6月からは sPHENIX 検出器全体で安定的にデータ集積しはじめた。

INTTには標準的なトリガー駆動の他に連続読み出しによる運転モードがある。これはトリガーを要求せず、全時間のデータを収集する手法である。トリガー駆動に比べて収集データ量を飛躍的に増やすことができるため、是が非でも実現すべき項目だが、トリガー駆動と大きく異なる動作機構のため検出器の運転を司るファームウェアの変更を必要とし、試験運転で検出器の安定性や収集したデータの確認が不可欠である。全時間にわたって取得したデータの確認は非常に複雑で、他検出器との相関や単位時間ごとに INTT の区切り荷電粒子の飛跡再構成を行うなど低レベルから高レベルまでのあらゆる試験を報告者を中心に行い、連続読み出しモードでの INTT の運転を確立させ、8月から適用した。

9月30日に横偏極陽子・陽子衝突のデータ収集を完了し、データの解析に取り組んでいる。現在は光子-ジェット対のジェットに着目し、横運動量分布の確認やカロリメータトリガーのパフォーマンスの調査、モンテカルロシミュレーションの結果との比較などを行っている。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Jalal N. A., ..., Nukazuka G. *et al.*: "Centrality dependence of Lévy-stable two-pion Bose-Einstein correlations in $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV Au+Au collisions", Phys. Rev. C 110 064909(2024)

2. Jalal N. A., ..., Nukazuka G. *et al.*: "Jet modification via π^0 -hadron correlations in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", Phys. Rev. C 110 044901(2024)
3. Guennadi D. A., ..., Nukazuka G. *et al.*: "High-Statistics Measurement of Collins and Sivers Asymmetries for Transversely Polarized Deuterons", Phys. Rev. Lett. 133 101903(2024)
4. Guennadi D. A., ..., Nukazuka G. *et al.*: "Final COMPASS Results on the Transverse-Spin-Dependent Azimuthal Asymmetries in the Pion-Induced Drell-Yan Process", Phys. Rev. Lett. 133 071902 (2024)
5. Jalal N. A., ..., Nukazuka G. *et al.*: "Identified charged-hadron production in p+Al, $^3\text{He}+\text{Au}$, and Cu+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV and in U+U collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 193\text{GeV}$ ", Phys. Rev. C 109 054910(2024)
6. Nukazuka G for on behalf of the sPHENIX Collaboration: "sPHENIX overview", Proceedings of the 58th Rencontres de Moriond (2024) (accepted).

●口頭発表 Oral Presentations

1. 糠塚元氣, 他 sPHENIX Collaboration: "sPHENIX Cold-QCD プログラム", 日本物理学会 2024 年春季大会, オンライン, 3 月 (2024) .
2. (Invited) Nukazuka G. for the sPHENIX Collaboration: "sPHENIX overview", 58th Rencontres de Moriond 2024, La Thuile, Italy, April (2024).
3. (Invited) Nukazuka G.: "Prospects with the sPHENIX", 2024 RHIC/AGS ANNUAL USERS' MEETING, New York, USA, June (2024).
4. 糠塚元氣, 秋葉康之, 池本真尋, 榎園昭智, 加藤智也, 加納麻衣, 菊池陸大, 近藤崇, 宍倉遼太, 下村真弥, 辻端日菜子, 中川格, 長谷川勝一, 蜂谷崇, 藤原愛実, 森本菜央: "RHIC 偏極陽子・陽子衝突における sPHENIX Intermediate Silicon Tracker の性能評価と現状", 日本物理学会第 79 回年次大会, 北海道札幌市, 9 月(2024) .
5. G. Nukazuka for the sPHENIX Collaboration: "Measurement of $dE_T/d\eta$ Au+Au collisions at 200 GeV with sPHENIX at RHIC", The 12th International Conference on Hard and Electromagnetic Probes of High-Energy Nuclear Collisions, Nagasaki, Japan, September (2024).
6. (Invited) G. Nukazuka: "Measurements of Sivers function at fixed target experiment and colliders", Early Career EPIC Collaboration Seminar Series, Online, October (2024).
7. (Invited) G. Nukazuka on behalf of the INTT Collaboration: "Streaming Experience with sPHENIX INTT", Streaming Readout Workshop SRO-XII, Tokyo, Japan, December (2024)

XXIII-017 Nitrogen-bearing Organic Molecules as a Probe to Study Interstellar Nitrogen Chemistry

Name: Shaoshan ZENG

Host Laboratory: Star and Planet Formation Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head: Nami SAKAI

The project aims to establish the chemical inventory of nitrogen-bearing complex organic molecules across the Galaxy and determine whether and how their presence, complexity, and abundance vary with different physical conditions. To achieve the goals, we have taken two different approaches: constraining the physical environments where the detected molecules reside and searching for new molecular species. By taking part the ALMA CMZ Exploration Survey (ACES) large program, we are able to gain access to observational data mapping the whole central molecular zone in our Galactic Centre with high resolution and high sensitivity. The present study has targeted the Sgr B2 region and worked on the data analysis which will help to study the kinematic and morphology of the molecular cloud G+0.693-0.027 that is known to be one of the richest molecular repositories in the interstellar medium (ISM). Several molecular species that are considered as density, temperature, and shock tracers detected in the data have been used to constrain the physical conditions of the molecular cloud. The results are not only essential to understand the molecular excitation conditions and abundances but also hitting the formation mechanism in the region. Furthermore, laboratory measured spectroscopy by SUMIRE was utilised in combination with observational ALMA data to determine the methanol deuteration in low-mass protostar V883 Orionis in the Galactic disc. Such practise has demonstrated the importance of accurate and precise spectroscopic data for astronomical study of molecules. Since methanol is considered to be a parent molecule for more complex organic molecules, determining accurately its abundance is critical to be compared with other molecular species.

On the other hand, new observational data have been taking towards various astronomical sources to search for nitrogen molecular species. Towards Galactic Centre molecular cloud G+0.693-0.027, numbers of first detections in the ISM have been reported. With the new data, we have included more transitions of the same species with better signal to noise level so that the tentative detection can be confirmed and detection become more robust. Besides the Galactic Centre, participating the Complex Organic Molecules in Protostars with ALMA Spectral Surveys (COMPASS) large program allows us to search for

nitrogen-bearing organic species a sample of 11 low-mass protostars through unbiased spectral surveys. This study complements to the results obtained from the Galactic Centre and provides better constraints for physicochemical modelling and laboratory experiments adapted for different environments.

● Publications

Papers

1. Zeng, S., Jeong, J., Oyama, T., Lee, J., Yang, Y. and Sakai, N.: Determining the methanol deuteration in the disk around V883 Orionis with laboratory measured spectroscopy. *ApJ*. under review.
2. Jimenez-Serra, I., Zeng, S., Yang, Y., Taillard, A., Rey-Montejo, M., Colzi, L., Sakai, N. and Fuente, A: Measuring metal-sulfides in interstellar dust with PRIMA. *JATIS*. Submitted.
3. Colzi, L., Martín-Pintado, J., Zeng, S. ; Jiménez-Serra, I., Rivilla, V. M., Sanz-Novo, M., Martín, S., Zhang, Q. and Lu, X.: Excitation and spatial study of a prestellar cluster towards G+0.693-0.027 in the Galactic centre. *A&A*. 690. October 2024
4. Tamanai, A., Oyama, T., Watanabe, Y., Sakai, T., Nakatani, R., Zeng, S., Kleiner, I. and Sakai, N: Laboratory Measurement of CH₃¹⁷OH Transitions in the Frequency Range from 216 to 264 GHz for Astronomical Application. *ApJ*. in print.
5. Cosentino, G., Jiménez-Serra, I., Barnes, A. T., Tan, J. C., Fontani, F., Caselli, P., Henshaw, J. D., Law, C. Y., Viti, S., Fedriani, R., Hsu, C. -J., Gorai, P., Zeng, S. and De Simone, M: Interaction between the Supernova Remnant W44 and the Infrared Dark Cloud G034.77-00.55: shock induced star formation? *A&A*. in print.
6. Rey-Montejo, M., Jiménez-Serra, I., Martín-Pintado, J., Rivilla, V., Megías, A., San Andrés, D., Sanz-Novo, M., Colzi, L., Zeng, S., López-Gallifa, A., Martínez-Henares, A., Martín, S., Tercero, B., de Vicente, P. and Requena-Torres, M: Discovery of MgS and NaS in the Interstellar Medium and Tentative Detection of CaO. *ApJ*. 975. November 2024
7. Murillo, N., Fuchs, C., Harsono, D., Sakai, N., Hacar, A., Johnstone, D., Mignon-Risse, R., Zeng, S., Hsieh, T., Yang, Y., Tobin, J and Persson, M: The factors that influence protostellar multiplicity: I. Gas temperature, density, and mass in Perseus with

- Nobeyama. A&A. 689. September 2024
8. Cosentino, G., Tanm, J., Jiménez-Serra, I., Fontani, F., Caselli, P., Henshaw, J., Barnes, A., Law, C., Viti, S., Fedriani, R., Hsu, C., Gorai, P and Zeng, S: Deuterium fractionation at the shock interface between the molecular cloud G034.77 and the Supernova remnant W44. EAS2024
 9. Okoda, Y., Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Lopez-Sepulcre, A., Oyama, T., Zeng, S. and Satoshi, Y.: CH₃OH and Its Deuterated Species in the Disk/Envelope System of the Low-mass Protostellar Source B335. ApJ. July 2024
 10. San Andrés, D., Rivilla, V., Colzi, L., Jiménez-Serra, I., Martín-Pintado, J., Megías, A., López-Gallifa, A., Martínez-Henares, A., Massalkhi, S., Zeng, S., Sanz-Novo, M., Tercero, B., de Vicente, P., Martín, S., Requena-Torres, M., Molpeceres, G and García de la Concepción, J.: First Detection in Space of the High-energy Isomer of Cyanomethanimine: H₂CHCN. ApJ. May 2024.
 11. Sanz-Novo, M., Rivilla, V., Müller, H., Jiménez-Serra, I., Martín-Pintado, J., Colzi, L., Zeng, S., Megías, A., López-Gallifa, A., Martínez-Henares, A., Tercero, B., de Vicente, P., Martín, S and Requena-Torres, M.: Discovery of Thionylimide, HNSO, in Space: The first N-, S-, and O-bearing Interstellar Molecule. ApJ Letters. L25. April 2024.
 12. Sanz-Novo, M., Rivilla, V., Müller, H., Jiménez-Serra, I., Martín-Pintado, J., Colzi, L., Zeng, S., Megías, A., López-Gallifa, A., Martínez-Henares, A.,

Tercero, B., de Vicente, P., Martín, S and Requena-Torres, M.: Interstellar Detection of O-protonated Carbonyl Sulfide, HOCS+. ApJ. 965. April 2024.

● Oral Presentations

Conferences

1. Zeng, S. "Formamide deuteration across COMPASS sources". COMPASS annual meeting (online), December 3-5
2. Zeng, S. "Searching for the missing S". i-Link annual meeting, Madrid, Spain, November 28-29
3. Zeng, S., Jeong, J., Oyama, T., Lee, J., Yang, Y. and Sakai, N. "Determining the methanol deuteration in the disk around V883 Orionis with laboratory measured spectroscopy". COSPAR, Busan, Korea, July 14-21
4. Zeng, S, Rivilla, M., Jiménez-Serra, I., Colzi, L., Martín-Pintado, J., Tercero, B., de Vicente, P., Martín, S and Requena-Torres, M. "Probing the interstellar chemistry: N-bearing COMs". Visiting Seol National University, Seoul, Korea, July 10-13

● Poster Presentations

Conferences

1. Zeng, S., Jeong, J., Oyama, T., Lee, J., Yang, Y. and Sakai, N. "Determining the methanol deuteration in the disk around V883 Orionis with laboratory measured spectroscopy". Next Generation Astrochemistry meeting. Tokyo, Japan, March 7

XXIII-018 トポロジカル超伝導体探索指針の確立とその検出理論の構築

A guiding principle of search and detection for topological superconductors

研究者氏名：小野 清志郎 Seishiro ONO

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

超伝導体のクーパー対の対称性(以下、ペアリング対称性と呼ぶ)は、超伝導現象の理解において重要である。特に、重い電子系超伝導体であるCeCuSi₂の発見以来、s波超伝導体でない非従来型超伝導体への関心が高まっている。しかし、これら非従来型超伝導体のペアリング対称性を特定することは一般に困難であり、多くの議論が交わされている。最近の研究では、超伝導体のノード構造やトポロジーがペアリング対称性の理解に役立つ可能性が示されている。例えば、異なるペアリング対称性が異なるトポロジカル相やノード構造をもたらすことが知られている。しかしながら、特定の対称性の下でどのようなトポロジカル超伝導相やノード構造が実現可能かという分類問題とその特徴付けは未だ解決されていない。加

えて、トポロジーの同定自体が難しく、実験的に確立されたトポロジカル超伝導体はまだ存在しない。本研究は、これらの課題に解決し、トポロジカル超伝導相の分類と特徴づけに関する一般論を完成させ、実験的な検出方法を提案することを目指す。

本年度は、昨年度までに発展させたトポロジカル不変量を、実際の物質においても計算できるような定式化をした。これらの成果は、理論研究にとどまらず、物質探索を可能にするという点において、他分野への波及効果も期待できる。また、トポロジカル超伝導体を実験的にどのように同定するかという課題に対しても、トポロジカル超伝導体のエッジモードによる実験的判定手法を(理論的に)提案した。

これらの結果を踏まえ、来年度は理論の実際の物質に対して、我々の理論を適用することを目指す。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Zhongyi Zhang, Ken Shiozaki, Chen Fang and Seishiro Ono, “Fermi-surface diagnosis for s -wave-like topological superconductivity,” arXiv:2407.20231.
2. Hirokazu Kobayashi, Han Bi, James Jun He, and Seishiro Ono, “Optical response of edge modes in time-reversal symmetric topological superconductors,” arXiv:2411.09985.
3. Hidetoshi Wada, Katsuaki Naito, Seishiro Ono, Ken Shiozaki, and Shuichu Murakami, “General corner charge formulas in various tetrahedral and cubic space groups,” Phys. Rev. B 109, 085114 (2024).

●口頭発表 Oral Presentations

(招待講演)

1. Seishiro Ono, “Fermi-surface diagnosis for s -wave-like topological superconductivity”, From Matter to Spacetime: Symmetries and Geometry, National Center for Theoretical Sciences, Aug. 2024.

(学会)

1. Seishiro Ono, “Fermi-surface diagnosis for s -wave-like topological superconductivity”, APS Global Physics Summit, California, US, Mar. 2025

●受賞 Awards

1. The Conference of Condensed Matter Physics 2024 Best Poster Awards,

XXIII-019 対称性適合多極子基底を用いた第一原理有効模型計算法の開発と応用

Development of Ab initio Effective Model Calculation Methods Using Symmetry-Adapted Multipole Basis and its Application

研究者氏名：大岩 陸人 Rikuto OIWA

受入研究室：創発物性科学研究センター
計算物質科学研究チーム
(所属長 有田 亮太郎)

物質が示す多彩な秩序状態や応答現象の微視的起源を解明し、新奇物性の発見に繋げるためには、物質に即した計算模型を構築することが重要である。現実物質の諸物性を対象とする模型解析においては、ワニエ関数を用いて得られるワニエ有効模型が幅広く利用されているが、従来のワニエ関数法には以下のような課題がある。(i) バンドのディスエンタングルメントとワニエ関数の最局在化において反復計算が必要なため、計算コストが増大する。(ii) ワニエ関数は原子軌道と比較して対称性が低いため、原子軌道の情報が必要な計算が困難になることに加え、各種物理量に対応する演算子表現が不明瞭になる。(iii) ワニエ有効模型は系の対称性を厳密には満たさない。(iv) 数値的に得られる模型ハミルトニアンから、対象物性の起源を解明することは困難である。

以上の背景を踏まえ、本研究では電子多極子表現論を活用することで従来のワニエ関数法とは異なる新たな第一原理有効模型計算法を開発した。

(1) 対称性適合 Closest ワニエ模型構築法の開発

Closest ワニエ関数法は与えられた原子軌道に最も近いワニエ関数を構築する手法であり、ウィンドウ関数を用いることで反復計算なしにバンドのディスエンタングルメ

ントができる。さらに、得られた有効ハミルトニアンを全対称表現に属する対称性適合多極子基底の線型結合に分解することで、Closest ワニエ模型を対称化する方法を開発した。各多極子基底は結晶場、スピン軌道相互作用、電子ホッピングなどに対応し、電磁場等の各種外場に対応する対称性を有するため、対象物性の微視的起源の解明に適した模型を構築することができる。

(2) 対称性適合 Closest ワニエ模型を自動構築する Python ライブラリ開発

(1) で開発した模型の対称化も含めた一連の計算手法を Python ライブラリ SymClosestWannier として実装し、GitHub (<https://github.com/CMT-MU/SymClosestWannier>) で一般公開した。

(3) キラルな Te の螺旋構造の安定化機構の解明

螺旋構造を有するキラル結晶はキラリティ誘起スピン選択性 (CISS) に代表される特異な現象を示すことから注目を集めている。キラル結晶の掌性、およびキラリティ由来の現象を制御するためにはキラルな螺旋構造の微視的安定化機構を理解することが重要である。最近、電子系の自由度を微視的に記述する多極子完全基底が整理され、キラリティは電気トロイダル単極子 (G_0) によって

特徴づけられることが示された。そこで、螺旋構造を有する最も単純なキラル結晶である単体Teの有効模型を考え、螺旋構造の微視的安定化機構を電気トロイダル多極子の視点から定量的に解析した。まず、螺旋軸とTe原子間の距離を変化させることでアキラルな1次元鎖構造とキラルな螺旋構造においてそれぞれDFT計算を行った。次に、得られた電子状態からClosestワニエ関数法に基づき有効ワニエ模型を導出し、多極子基底の線型結合に分解した。モデルパラメータに対応する線型結合係数を比較した結果、 G_0 と電気トロイダル四極子(G_4)が掌性に対応して符号が反転し、 G_4 が最も支配的であることを明らかにした。また、 p_x , $p_y \leftrightarrow p_z$ 軌道間の最近接ホッピ

ングに対応するボンドクラスター型の G_4 が螺旋構造の安定化において重要な役割を果たすことを明らかにした。

●口頭発表 Oral Presentations

1. Rikuto Oiwa, Akane Inda, Satoru Hayami, and Hiroaki Kusunose, "Microscopic stability mechanism of the helical structure of Tellurium", New Frontiers in Advanced Magnetism 2024, Hokkaido University, Sapporo, Japan, 6, Aug. 2024.
2. 大岩陸人, 印田朱音, 速水賢, 楠瀬博明: 「単体Teの螺旋構造の微視的安定化機構」、日本物理学会 第79回年次大会 2024年9月16日

XXIII-020 音響微小リング共振器を用いたカイラル量子ネットワークの開発

Development of Chiral Quantum Network Using Acoustic Microring Resonators

研究者氏名: 佐々木 遼 Ryo SASAKI

受入研究室: 量子コンピュータ研究センター
ハイブリッド量子回路研究チーム
(所属長 野口 篤史)

超伝導量子コンピュータの大規模化には、量子ビットの集積化やマイクロ波素子の微細化など、克服すべき重要な課題が複数存在する。中でも、マイクロ波素子の微細化は特に重要である。従来のマイクロ波素子は数センチメートルの大きさを持ち、希釈冷凍庫内の限られた空間に多数の素子を配置することが難しい。この課題を解決するために、同じ周波数において波長が約5桁短い音波を利用した微小なマイクロ波素子の開発を目指している。

本研究では、光導波路と類似した構造を持つ音響導波路を利用し、制御性の高いマイクロ波素子の実現を目指している。本年度は、音響導波路の磁場変調に取り組み、微細なアイソレータやサーキュレータへの応用可能性を探った。具体的には、圧電薄膜を波長程度の幅に加工して音波が伝搬する導波路を作製し、その表面に磁性薄膜を蒸着したデバイスを構築した。このデバイスにおいて弾性波強度の磁場依存性を測定した結果、特定の磁場で伝搬強度の減衰が観測された。これは、弾性波のエネルギーが磁性体中のマグノン励起との結合により吸収されたことを示している。また、マッハ・ツェンダー干渉計の構造を持つデバイスを作製し、同様に磁場依存性を観測したところ、同じ磁場領域で伝搬強度の増加が確認された。これは、通常の弾性波と磁性体の結合系では見られない現象であり、干渉計構造による弾性波の干渉が原因と考えられる。さらに、干渉計デバイスの磁場変化量は

単純な導波路デバイスの約5倍であり、デバイス構造による磁場応答の向上を実証することができた。しかしながら、非相反な伝搬応答は測定精度内では確認できず、この原因は今後の研究で明らかにする予定である。

一方、音響導波路の低損失化に関する研究も進めた。導波路の加工方法を改善し、圧電薄膜の支持基板材料を変更することで、当初に比べ大幅に損失を低減することに成功した。また、温度依存性や構造依存性、周波数依存性などの性能評価を進め、損失源を特定しつつある。これらの結果を基に、さらなるデバイス設計の最適化を進める予定である。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. K. Taga, R. Hisatomi, R. Sasaki, H. Komiyama, H. Matsumoto, H. Narita, S. Karube, Y. Shiota and T. Ono: "Generation of Phonons with Out-of-Plane Angular Momentum by Superposition of Longitudinal Surface Acoustic Phonons", J. Magn. Soc. Jpn, 2501R004 (2024)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Yuya Yamaguchi, Shinsuke Hara, Ryo Sasaki, Rekishu Yamazaki, Pham Tien Dat, Shingo Takano, Yu Kataoka, Junichiro Ichikawa, Ryo Shimizu, Issei

Watanabe, Naokatsu Yamamoto, Kouichi Akahane, Atsushi Kanno, Tetsuya Kawanishi: "Electrical Characterization of Traveling-Wave Thin-Film Lithium Niobate Modulator at Frequencies up to 220

GHz", IEEE Photonics Conference, Roma, Nov (2024)
2. 佐々木遼, 山崎歴舟, 山口祐也, 野口篤史, "強磁性薄膜を持つフォノンニック導波路における磁気弾性変調効果", 札幌, 9月(2024)

XXIII-021 Nonlinear responses, band geometry, and supersolids in density wave systems

Name: Yingming XIE

Host Laboratory: Strong Correlation Theory Research Group
RIKEN Center for Emergent Matter Science
Laboratory Head : Naoto NAGAOSA

In the year 2024, I mostly focus on studying density wave physics, and have completed three projects related to this topic. In the first project, we aimed to understand the nonreciprocal nonlinear responses in moving charge density waves (CDWs). The incommensurate CDWs can exhibit steady motion in the flow limit after depinning, behaving as a nonequilibrium system with time-dependent states. Since the moving CDW, like an electric current, breaks both time-reversal and inversion symmetries, one may speculate the emergence of nonreciprocal nonlinear responses from such motion. Following the principle of Galilean relativity, we resolve this time-dependent hard problem in the lab frame by mapping the system to the comoving frame with static CDW states through the Galilean transformation. We explicitly show that the nonreciprocal nonlinear responses would be generated by the movement of CDW states through violating Galilean relativity. This work has now been published on *npj Quantum Materials* 9, 82 (2024).

In the second project, we aimed to study how the phase shifts, band geometry interplay and results intriguing properties in triple-Q density waves. In this project, we systematically investigate the significant effects stemming from both triple-Q CDW and spin density waves (SDW) order parameters, with particular emphasis on potential phase shifts. We demonstrate that these phase shifts play a crucial role in influencing the interference effects of triple-Q density waves on electronic states. Due to such interference, the band geometry in the momentum space becomes nontrivial at the hot spots, where multiband Dirac-like fermions are induced near the Fermi energy. Furthermore, we explicitly establish

that the nontrivial band geometry, combined with symmetry-breaking induced by phase shifts, leads to a variety of intriguing linear and nonlinear responses. This work has now been published on *Phys. Rev. B* 110, L241108 (2024).

In the third project, we aimed to understand the supersolids in quasi-one-dimensional systems. The supersolid is a long-sought phase in condensed matter physics, characterized by the coexistence of density wave and superfluid orders. In this project, we investigate the emergence of supersolids in Luttinger-Emery liquids using a variational method. As the system consists of coupled Luttinger-Emery liquid chains, we refer to this phase as a quasi-one-dimensional supersolid. Notably, we demonstrate that the quasi-one-dimensional supersolid phase is energetically favorable in chains with finite size or short-range order. Furthermore, we investigate the collective dynamics of these coexisting charge density waves and superconducting states, identifying a quasi-Goldstone mode. Our theory provides valuable insights into both the ground state and the dynamic properties of supersolids in strongly correlated systems. This work has now been posted on Arxiv.

● Publications

1. Ying-Ming Xie, Hiroki Isobe, and Naoto Nagaosa. Nonreciprocal nonlinear responses in moving charge density waves. *npj Quantum Materials* 9, 82 (2024).
2. Ying-Ming Xie, and Naoto Nagaosa. Phase shifts, band geometry and responses in triple-Q charge and spin density waves. *Phys. Rev. B* 110, L241108 (2024).
3. Ying-Ming Xie, Naoto Nagaosa. Quasi-one-dimensional Supersolids in Luther-Emery Liquids, arXiv: 2501.02185 (2025).

XXIII-022 一般化アンサンブルを用いた有限温度シミュレーションのための 量子アルゴリズムの開発

Development of Quantum Algorithms for Finite Temperature Simulations Using Generalized Ensembles

研究者氏名：米田 靖史 Yasushi YONETA
受入研究室：量子コンピュータ研究センター
量子計算理論研究チーム
(所属長 藤井 啓祐)

自然界における熱平衡化のメカニズムを理解することで、熱的状态準備のための効率的な量子アルゴリズムの開発のための知見を得ることを目的とした。量子多体系の有限温度シミュレーションを効率的に行うためには、量子計算機上で熱平衡状態を構築するための効率的なアルゴリズムが不可欠である。しかし、一般の量子多体系で平衡状態を準備することは、量子計算機を用いた場合でも非常に困難な問題であると予想されている。一方で、現実の量子多体系のほとんどが比較的速やかに熱平衡状態に緩和することが経験的に知られている。このため、現実の量子多体系の熱平衡化のメカニズムを理解することが、効率的な量子アルゴリズムの開発の鍵となると考えられる。

本年度は、現実の量子多体系が熱平衡状態に緩和するメカニズムの解明を目指し、現実的な量子多体系が属するとされる非可積分系において、理論的な解析を進めた。固有状態熱化仮説は、非可積分系のエネルギー固有状態は熱的であるとする仮説であり、非可積分系のダイナミクスを説明する上で極めて重要な役割を果たす。しかし、非可積分系の解析は非常に困難であるため、これまでこの仮説の検証は数値的にしかなされてこなかった。この課題に対して、本研究では、非可積分系とその熱的固有状態の組の具体例を解析的に与えることに成功した。まず、理論的に扱いやすい体積則状態のクラスを提案し、これらの状態が熱的純粋状態であることを示した。次に、これらを固有状態とするHamiltonianを完全に特定し、さらにそれらのうちのいくつかが非可積分であることを厳密に証明した。この結果は、非可積分系の理論的な取り扱いが可能であることを示す、数少ない例のひとつ

つである。また、この成果を基に、新しい熱的純粋状態の構成法を考案した。この方法はテンソルネットワーク法との親和性が高く、従来の手法と比較して、大幅に少ない計算リソースで大規模な系を扱うことが可能であることを示した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Wei Z., Yoneta Y.: “Counting atypical black hole microstates from entanglement wedges”, JHEP 05 (2024) 251*
2. Kusuki Y., Tamaoka K., Wei Z., Yoneta Y.: “Efficient simulation of low-temperature physics in one-dimensional gapless systems”, Phys. Rev. B 110, L041122 (2024)*
3. Chiba Y., Yoneta Y.: “Exact Thermal Eigenstates of Nonintegrable Spin Chains at Infinite Temperature”, Phys. Rev. Lett. 133, 170404 (2024)*
4. Yoneta Y.: “Thermal pure states for systems with antiunitary symmetries and their tensor network representations”, Phys. Rev. Research 6, L042062 (2024)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 米田靖史, 千葉侑哉: “テンソルネットワーク法のための熱的純粋状態”, 日本物理学会第79回年次大会, 札幌, 9月(2024)
2. Yoneta Y., Chiba Y.: “Thermal Pure States for Systems with Antiunitary Symmetries”, APS Global Physics Summit 2025, Anaheim, USA, Mar. (2024)

XXIII-023 Materials Design of High-Temperature Superconductors and Quantum Spin Liquids from a Machine Learning Multiscale First-Principles Approach

Name: Jean-Baptiste Pierre Guy MOREE

Host Laboratory: First-Principles Materials Science Research Team
RIKEN Center for Emergent Matter Science
Laboratory Head : Ryotaro ARITA

Achieving superconductivity at room temperature and normal pressure remains one of the biggest challenges in condensed matter physics. Success in this area has the potential to revolutionize technology, leading to numerous applications that could impact daily life. Despite significant progress in both experimental and theoretical research over the past decades, the precise microscopic mechanism behind high-temperature superconductivity remains unclear. Uncovering this mechanism is a crucial step toward designing new superconducting materials that function near standard conditions.

This project focuses on uncovering the microscopic principles behind high-temperature superconductivity by utilizing first-principles calculations as a guiding tool. We concentrate specifically on copper oxides, known as cuprates, that are hole-doped. These materials are ideal for examining how different material compositions affect the experimentally observed superconducting transition temperatures. At standard pressure, cuprates hold the record for the highest transition temperatures, reaching up to approximately 138 Kelvin, with a range that varies significantly from about 10 Kelvin to 138 Kelvin.

To model superconductivity in these copper oxides, we employ a cutting-edge multiscale computational method designed to address the behavior of correlated electrons. This approach reduces the crystal structure of the copper oxide to a square lattice formed by copper atoms in the CuO_2 plane. Within this square lattice, the electrons experience strong interactions that are crucial to the superconducting properties. These electronic interactions are described by solving a low-energy effective Hamiltonian, which captures the essential physics of the system. The parameters of this Hamiltonian depend on the material and are computed directly from first-principles calculations. The initial phase of this study aims to predict the superconducting transition temperature based on the parameters of the low-energy effective Hamiltonian. We have successfully established a link between the experimentally observed transition temperature and the calculated parameters. This relation was then used to predict how the transition temperature varies with

pressure in the compound $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$. Under standard conditions, this material has a transition temperature close to 138 Kelvin, which increases to about 164 Kelvin when subjected to higher pressure. This prediction was made possible by computing how the Hamiltonian parameters change with pressure.

The second phase of the project involves predicting how the chemical composition influences the parameters of the low-energy effective Hamiltonian in cuprates. To develop new high-temperature superconductors, understanding these chemical dependencies is essential. We address this challenge by combining our multiscale computational approach with machine learning techniques. Specifically, we developed a machine learning algorithm that produces transparent relationships between physical quantities, such as how the Hamiltonian parameters depend on the chemical properties of the material, like radii and charges of ions in the block layer between two CuO_2 planes. This algorithm, applied to a training set of 36 different cuprates, reveals how changes in chemical variables can be used to adjust the Hamiltonian parameters. Its predictions are consistent with established experimental data, offering valuable insights for designing new materials. Beyond superconductivity, the versatility of this algorithm makes it applicable to a wide range of other physical systems, providing a new approach to material discovery and design.

● Publications

Papers

1. Morée J.-B. and Arita R.: Universal chemical formula dependence of *ab initio* low-energy effective Hamiltonian in single-layer carrier-doped cuprate superconductors: Study using a hierarchical dependence extraction algorithm. *Phys. Rev. B* 110, 014502 (2024) *
2. Morée J.-B., Yamaji Y. and Imada M.: Dome structure in pressure dependence of superconducting transition temperature for $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$: Studies by *ab initio* low-energy effective Hamiltonian. *Phys. Rev. Research* 6, 023163 (2024) *
3. Rathnayaka S., Yano S., Morée J.-B., Kawashima K.,

Akimitsu J., Brown C.M., Neufeind J., and Louca D.: Sensitivity of electronic structure to crystal distortions in infinite-layered LaNiO_2 , *Phys. Rev. B* **111**, 014518 (2025)

● Oral Presentations

Conferences

1. Morée J.-B. and Arita R.: “Universal chemical formula dependence of *ab initio* low-energy effective Hamiltonian in single-layer carrier-doped cuprate superconductors: Study using a hierarchical dependence extraction algorithm” JPS Spring Meeting, online 2024, March 18-21.
2. Morée J.-B. and Arita R.: “Elucidation of the competition between T and T’ structural phases in

cuprate superconductors” JPS Spring Meeting, online 2025, March 18-21.

● Poster Presentations

Conferences

1. Morée J.-B. and Arita R.: “Universal chemical formula dependence of *ab initio* low-energy effective Hamiltonian in single-layer carrier-doped cuprate superconductors: Study using a hierarchical dependence extraction algorithm” JPS Autumn Meeting, Sapporo Japan 2024, September 16-19.
2. Morée J.-B. and Arita R.: “Explicit machine learning approach for design of high-temperature superconductors: Application to cuprates” CDRTS 2025, Tokyo Japan 2025, July 21-24.

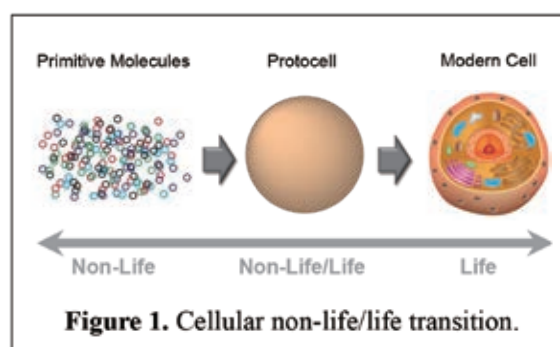
XXIII-024 Resolving the Water Paradox: Thermally Driven Water Dynamics in Polyester Microdroplet Protocells for Peptide Bond Formation

Name: Chen CHEN

Host Laboratory: Biofunctional Catalyst Research Team
RIKEN Center for Sustainable Resource Science
Laboratory Head : Ryuhei NAKAMURA

Membranless droplets formed through liquid-liquid phase separation (LLPS) offer promising models for protocells, the precursors to modern cells. However, the structures and functions of primitive LLPS protocells remain largely unexplored. Recently, polyester droplets formed by the dehydration of hydroxy acid monomers have been proposed as candidate membraneless LLPS protocells that may have existed on early Earth. This research proposes to investigate the assembly, structure, and stability of these polyester droplets, focusing on their unique approach to address the “water paradox”, where water, though essential for life, simultaneously inhibits polymerization reactions and degrades biomolecules. Furthermore, these droplets, functioning as microreactors subject to temperature fluctuations, can facilitate peptide bond formation. By elucidating how these membraneless droplets enable biomolecule synthesis in aqueous conditions, our research aims to offer new insights into the origins of cellular life and its evolution towards modern cells (Figure 1). Currently, we have successfully conducted polyester dehydration synthesis and demonstrated droplet assembly upon rehydration. Additionally, we have explored peptide bond formation by incorporating amino acid-like monomers to induce dehydration reactions at elevated temperatures. Micro-Raman mapping has been employed to analyze the spatial distribution of these monomers, revealing that

their concentration within individual droplets can increase by several orders of magnitude. At present, we are leveraging Raman spectroscopy to detect characteristic amide bonds within polyester microdroplets under high-temperature conditions. This analysis aims to confirm the occurrence of thermally-driven dehydration synthesis and to



elucidate the conditions under which early peptide-like structures may have formed in prebiotic environments. This phase of the research is being conducted in collaboration with researchers both inside and outside RIKEN, enabling a comprehensive analysis.

● Publications

Papers

1. Poddar, A., Satthiyasilan, N., Wang, P. H., Chen, C.,

- Yi, R., Chandru, K., Jia, T. Z. (2024). Reactions Driven by Primitive Nonbiological Polyesters. *Accounts of Chemical Research*, 57(15), 2048-2057.
2. Sithamparam, M., Afrin, R., Tharumen, N., He, M. J., Chen, C., Yi, R., Chandru, K. (2025). Probing the Limits of Reactant Concentration and Volume in Primitive Polyphenyllactate Synthesis and Microdroplet Assembly Processes. *ACS Bio & Med Chem Au*.

● **Poster Presentations**

International Conference

1. Chen, C., Jia, T. Z., Nakamura, R.: Creation of a Membraneless Protocell with Earth-abundant Transition Metal Catalysts, IUPAB2024, Kyoto Japan 2024, June 24-28. (Student and Early Career Researcher Poster Award)

Domestic Conference

1. Chen, C., Jia, T. Z., Nakamura, R.: Creating a Membraneless Protocell with Earth-abundant Transition Metal Catalysts, The 47th Annual Meeting of the Molecular Biology Society of Japan, Fukuoka Japan 2024, November 26-29.

XXIII-025 Transformation of Dinitrogen into Nitrogen-Containing Organic Compounds by Metal Hydride Complexes

Name: Xiaoxi ZHOU

Host Laboratory: Organometallic Chemistry Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head: Zhaomin HOU

Investigating the reactions of well-defined metal hydride complexes at the molecular level is of both fundamental interest and practical significance due to their relevance to industrial processes such as the Haber–Bosch process and petroleum refining. In this research, we focused on studying the reactivity of two types of titanium hydride complexes: the PNP-ligated binuclear titanium tetrahydride complex [(^{acri}PNP)Ti]₂(H)(μ₂-H)₃ (**1**) (^{acri}PNP = 4,5-bis(diisopropylphosphino)-2,7,9,9-tetramethyl-9H-acridin-10-ide) and the Cp'-ligated trinuclear titanium heptahydride complex [(Cp'Ti)₃(μ₃-H)(μ-H)₆] (**2**) (Cp' = C₅Me₄SiMe₃). Their performance was evaluated in hydrodenitrogenation (HDN, an essential process in petroleum refining) and in the activation and functionalization of dinitrogen (N₂) with carbon-based reagents.

Both the two titanium hydride complexes exhibit remarkable reactivity in the denitrogenation of pyridines. For the PNP-ligated binuclear titanium tetrahydride complex **1**, we discovered an unprecedented denitrogenative ring-contraction reaction. Reaction of pyridine with **1** under mild conditions yielded a cyclopentadienyl/nitride complex **3**, where two titanium atoms are bridged by a nitride group, and one titanium atom is bonded to a cyclopentadienyl group derived from the denitrogenation and ring-contraction of pyridine. Mechanistic insights were obtained through isolation of key intermediates and density functional theory (DFT) calculations, revealing a stepwise pathway involving pyridine coordination, H₂ release, C=N

reduction, C–N bond cleavage (ring-opening and denitrogenation), and C–C coupling (ring-closing). Notably, C–H activation in an isopropyl group of the PNP ligand contributed to stabilizing the ring-contracted product. This work provides unprecedented mechanistic insights into the denitrogenation of aromatic N-heterocycles and represents a novel example of skeletal editing of such compounds. For the Cp'-ligated trinuclear titanium heptahydride complex **2**, we discovered the first example of denitrogenative C–C bond cleavage and rearrangement of pyridines. This process revealed novel C–C bond cleavage pathways and skeletal rearrangements of pyridines during denitrogenation. This study offers fresh perspectives on hydrodenitrogenation reactions at the molecular level.

We found that both metal hydride complexes exhibit unique reactivity in activating and functionalizing N₂ with carbon-based reagents such as isocyanides and alkenes, in collaboration with other researchers in our laboratory. For the PNP-ligated binuclear titanium tetrahydride complex **1**, we achieved the first example of N₂ cleavage and selective multicoupling with isocyanides within its dititanium framework. Meanwhile, for the Cp'-ligated trinuclear titanium heptahydride complex **2**, we demonstrated hydroamination of simple alkenes with N₂ in its trititanium framework. This reaction enabled simultaneous activation of alkenes and N₂, leading to selective C–N bond formation and the production of alkyl amines upon subsequent hydrogenation and protonation.

● Publications

Papers

1. Zhou, X., Zhuo, Q., Shima, T., Kang, X., Hou, Z.. Denitrogenative Ring-Contraction of Pyridines to a Cyclopentadienyl Skeleton at a Ditunganium Hydride Framework. *J. Am. Chem. Soc.* **2024**, *146*, 31348-31355.
2. Zhuo, Q., Yang, J., Zhou, X., Shima, T., Luo, Y., Hou,

Z.. Dinitrogen Cleavage and Multicoupling with Isocyanides in a Ditunganium Dihydride Framework. *J. Am. Chem. Soc.* **2024**, *146*, 10984-10992.

3. Shima, T., Zhuo, Q., Zhou, X., Wu, P., Owada, R., Luo, G.; Hou, Z.. Hydroamination of Alkenes with Dinitrogen and Titanium Polyhydrides. *Nature* **2024**, *632*, 307-312.

XXIII-026 Study on Electrochemical Interface Determining the Selective Oxygen Evolution Reaction in Acidic Seawater Conditions

Name: Taejung LIM

Host Laboratory: Biofunctional Catalyst Research Team
RIKEN Center for Sustainable Resource Science
Laboratory Head : Ryuhei NAKAMURA

Proton exchange-membrane water electrolysis (PEMWE) is one of the mature techniques to generate H₂ as the cleanest alternative to fossil fuels because of the zero-carbon emission during the H₂ cycle. The O₂ evolution reaction (OER) is a key reaction to compensate for electrons consumed to generate H₂. When considering low-grade water, such as reverse osmosis (RO) filtrate, as a source of PEMWE, the remaining Cl⁻ impurity in acidic conditions provokes the parasitic Cl₂ evolution reaction (CER), corrodes electrolyzer compartments and wastes electricity. Moreover, the relationship between OER and CER has been understood following the scaling relationship, that is, an electrocatalyst that easily catalyzes OER can also be highly active for CER and vice versa. This is because the two reactions share common intermediates, indicating difficulty in controlling selectivity by material modification alone. This research aims to study the electrochemical interface to circumvent the OER/CER scaling relationship and further suggests the fundamentals for developing advanced PEMWE using low-grade water. The simplest way to control the electrochemical interface is by changing the ion compositions of electrolyte. The effect of spectator cations on the mass transport of reactants has been rarely studied compared to the electron transfer kinetics.

In this fiscal year, we demonstrated that alkali metal cations can modulate the diffusion coefficient of chloride ions, enabling suppression of chlorine evolution during water electrolysis at diffusion-limiting conditions (>100 mA cm⁻²). Evidence for the cation-dependent diffusion coefficient is provided by non-zero intercepts in both Levich and modified Koutecký–Levich plots using a rotating ring disk electrode, indicating the presence of an additional, cation-dependent diffusion layer that suppresses

chloride diffusion. Numerical simulations based on the double diffusion model quantify this effect, resulting in a linear correlation between the cation-dependent diffusion barrier and the structural entropy of cation hydration. Among the cations examined here, the strength of the diffusion barriers was found to be in the order of LiCl>NaCl>HCl>KCl>CsCl and exhibited clear linearity with the structural entropy of hydration ($\Delta_{\text{struc}}S$) for each cation. This result indicates that the rigid hydrogen bond network in the presence of Li⁺ and Na⁺ decreases the Cl⁻ diffusion coefficients within the cation-dependent layer (D_f) due to their negative $\Delta_{\text{struc}}S$. On the contrary, Cs⁺ and K⁺ have positive $\Delta_{\text{struc}}S$, indicating that the hydrogen bond network is disrupted, leading to an increase of D_f . Given that diffusion is independent of the specific reactant-catalyst combination, ion-dependent reactant diffusion is also applicable to other electrochemical reactions having issues with ionic impurities, and thus may promote the development of efficient low-grade water electrolysis.

● Publications

Papers

1. Lim T., Ooka H. and Nakamura R.: Cation-controlled diffusion of chloride ions during electrochemical chlorine evolution in acidic media. *Nat. Chem.* submitted *; preprint in *ChemRxiv* (<https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2024-rr0c3>).

● Oral Presentations

Conferences

1. Lim T.: "Study on Electrochemical Selectivity Between Chlorine Evolution and Oxygen Evolution Reactions" Electrosynthesis: Light, Life, and Materials Perspective, Seoul Korea 2024, June 11-12.

XXIII-027 新構造型ヒドリド伝導体の探索と拡散メカニズム

Development of Hydride-ion Conductors with New Crystal Structural Family

研究者氏名：矢口 寛 Hiroshi YAGUCHI

受入研究室：開拓研究本部

小林固体化学研究室

(所属長 小林 玄器)

今後の社会の持続的な発展のために電気化学デバイスの開発が求められている。このようなデバイスの作動温度はエネルギー収支に有利かつ工業廃熱を利用できる中温域 (200~400°C) が望まれている。ヒドリド (H⁻) は中温域で固体の中を高速拡散可能であると共に、その高い還元力から高い反応性を有しており、H⁻を利用した電気化学デバイスは既存のデバイスよりも高性能になると期待されていた。しかしながら、電気化学デバイスの基幹材料である固体電解質として応用可能なH⁻導電体が見つかっておらず、これまで作製されてこなかった。昨年度の研究でBa_{1.65}Sr_{0.1}LiH_{2.3}O_{1.1}が330°Cで0.2 S/cmを超える極めて高いH⁻導電率と既存の物質よりも広い範囲で電氣的熱的に安定であることを見出した。高導電率と高安定性を兼ね備えたこの材料の発見により、これまで実現できていなかったH⁻導電体を用いた電気化学デバイス応用が可能となった。本年度はこの材料を固体電解質として使い、電気化学的にNH₃を合成するデバイスを作製した。アノードにはRuPt/C、カソードにはPt/Cを用い、アノード側にN₂、カソード側にH₂を流しアノード側でH⁻とN₂を反応させることでNH₃が合成可能なセル構成となっている。このデバイスでは類似のプロトン (H⁺) 導電体を用いたデバイスよりも10²-10⁵倍高いNH₃の発生速度を達成した。さらに、この発生速度から換算したN₂からNH₃への転換効率は熱触媒の転換効率の理論値よりも高く、反応場に電気化学的にH⁻を供給することの利点を示した。また、このデバイスの性能を向上させる目的で電極材料の開発も行っている。電極材料にはイオン導電性の他に電子伝導性が求められるが、既存のほぼすべてのH⁻導電体は電子伝導性が極めて低いため、新規物質の開発が求められている。現在このような性質を持つ新構造型H⁻導電体を含む候補材料を6種類発見し、電気化学デバイスの電極材料としての応用を検討している。

●誌上发表 Publications

1. Fumitaka Takeiri, Keiko Kusumoto, Kosuke Kawai,

Hiroshi Yaguchi, Takashi Saito, Kazuhiro Mori, Saburo Hosokawa, Masashi Okubo, and Genki Kobayashi, Li₂NbHO₂: a new transition-metal oxyhydride with rock-salt-type structure, *Chem. Commun.*, 60, 14388-14390(2024)*

2. Yuvraj Vaishnav, Rohit K Rai, Walid Al Maksoud, Fumitaka Takeiri, Shusaku Hayama, Hiroshi Yaguchi, Samy Ould-Chikh, Marcell Toth, Raza Ullah Shah Bacha, Bambar Davaasuren, Maxim Avdeev, Genki Kobayashi, and Yoji Kobayashi, Selective Hydride Interstitials Induced in a High-Entropy Lanthanide Oxyhydride, *Chem. Mater.*, 36, 10504-10513(2024)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. 矢口寛, 岡本啓, 齊藤高志, 森一広, 中裕美子, 青木芳尚, 北野政明, 小林玄器, Ba-Sr-Li 系酸水素化物の固体電解質性能とヒドリドイオン導電型アンモニア合成デバイスへの応用, 第50回固体イオニクス討論会, 大阪, 2024/12/10
2. 矢口寛, 複合アニオン化合物のイオン伝導と結晶構造, 日本セラミックス協会 第37回秋季シンポジウム, 名古屋, 2024/09/12
3. 矢口寛, 小林玄器, Ba_{1.75}LiH_{2.7}O_{0.9}系H⁻導電体の固体電解質性能, 第18回固体イオニクスセミナー, 茨城, 2024/09/03
4. 矢口寛, 岡本啓, 齊藤高志, 森一広, 竹入史隆, 小林玄器, Ba-Li 系酸水素化物の高温相安定化とヒドリド導電性, 粉体粉末冶金協会2024年度春季大会, 横浜, 2024/05/23

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Hiroshi Yaguchi, Kei Okamoto, Fumitaka Takeiri, Genki Kobayashi, Stabilization of a hydride superionic conducting phase via cation substitution in Ba-Li based oxyhydride, PRiME 2024, Honolulu (State of Hawaii), 2024/10/09.
2. Hiroshi Yaguchi, Kei Okamoto, Fumitaka Takeiri, Genki Kobayashi, High Temperature Phase Stabilization and Hydride Conductivity of Ba-Li based Oxyhydride, Nantes (France), 2024/03/11

XXIII-028 対称ビスカルベンによる規則正しく配列するランタノイド単分子磁石の表面上での合成

Janus Biscarbene Enabled on-surface Synthesis of Aligned Lanthanide Single Molecule Magnets

研究者氏名：田中 慶大 Keita TANAKA
受入研究室：開拓研究本部
Kim 表面界面科学研究室
(所属長 金 有洙)

本研究ではバルクでの単分子磁石設計の指針を参考にして、対称ビスN-ヘテロ環状カルベン (NHC) という有機配位子とランタノイド原子を順次、基板上に真空蒸着させることで、基板表面上で直接、単分子磁石を合成することを目標としている。

本年度は、窒素原子上にイソプロピル基を持つ、tert-ブチル基をもつNHCを両端に持つ対称ビスカルベン(NHC^{iPr}、NHC^{tBu})のAu(111)とAg(111)上での結合様式に関して、低温超高真空走査トンネル顕微鏡(LT-UHV-STM)と偏光依存吸収端近傍X線吸収微細構造スペクトル(NEXAFS)測定により分析した。また、NEXAFS分析を高エネルギー加速器研究機構(KEK)で行うために、STMのプレップチャンバーを組み替え、複数のサンプルを超高真空下でKEKまで運搬できるようにし、分子配向の温度依存性を詳細に調べるために同チャンバーに熱電対を取り付けた。

去年度にNHC^{iPr}は基板上で互いに反発する分子鎖を形成することが、STMにより観測されたが、分子配向に関して確定させることができなかった。そこで、偏光依存NEXAFS測定を行うことで、NHC^{iPr}が基板に対して横たわっている(分子内のベンゼン環が基板と並行)になっていることが明らかになった。NHC^{tBu}に関しても、温和

な条件で蒸着させた場合にはNHC^{iPr}に似た分子鎖を形成、X線結晶構造解析による結果と比較することで、分子はNHC^{iPr}と同様の分子配向をとることがわかった。分子間に基板から引き抜いた金属原子があるかどうかを確認するために、dI/dVマッピングによって局所状態密度の空間分布を調べたところ、分子間に金属原子があることを示唆するデータが得られ、有機金属分子鎖を形成していることがわかった。去年度、NHC^{tBu}がアニーリングによって直立することが示唆されたが、アニーリング温度を制御するすべがなかった。今年度は加熱温度による表面の状態を調べることができ、加熱温度を70度程度にし、加熱時間を長くすることで、分子の基板からの脱離を防ぎ、直立した分子の3量体を主とする分子修飾表面を調製することができた。さらに、被覆率を大きくすると、様々な分子集合体が形成されるため、STM像による分子配向の判断が困難なため、来年度に偏光依存NEXAFS測定により、基板に横たわった分子鎖から直立した分子への移行を観測する予定である。また、分子膜上にランタノイド原子を蒸着させ、STMによって、基板表面上で調製された新規ランタノイド錯体の電子状態に関して調査していく予定である。

XXIII-029 霊長類における心的時間超越を伴う因果推論の神経機構の解明

Neural Mechanisms of Causal Reasoning with Mental Time Transcendence in Primates

研究者氏名：永野 茜 Akane NAGANO
受入研究室：脳神経科学研究センター
思考・実行機能研究チーム
(所属長 宮本 健太郎)

ヒトは、現在、目の前で起きている事象から、実際に目撃していない、未来に起こる事象を推測したり(順向推論)、過去に起きたであろう事象を推測したりする(逆向推論)ことができる。この、心的時間超越を伴う、ヒトの因果推論能力は、どのような神経機構によって支えられているのかということは依然として明らかとなっていない。

い。更に、非ヒト動物が未来の時点进行を想像する能力を示した研究はあっても、過去の時点进行を想像する能力を直接的に示した研究はない。そこで、本研究では、比較認知科学の知見を取り入れて、新たな行動課題を開発する。ニホンザルを対象とした推論課題を実施することで、心的時間超越を伴う因果推論能力の進化的起源を、哺乳

類の共通祖先からヒトに至るまでの進化過程のうちヒト以前の時点まで遡ることができる可能性について検討可能となる。被験体の推論課題成績が一定水準に到達した後、時間を超越した因果推論の神経機構を解明するために、機能的磁気共鳴画像 (fMRI) 法といった神経生理学の技術を用いるという、比較認知科学と神経生理学を融合させたアプローチを行う。

本研究では、ニホンザルを対象とした推論課題を実施する。この推論課題では、被験体に、幾何学図形を用いたアニメーションを提示する。このアニメーションのうち一時点の場面は知覚可能であるが、未来や過去の場面が隠されており、サルにそれらの隠された場面の具体的内容について2肢選択を通して答えさせる。今年度は、ニホンザル2頭を対象にモックMRI内での行動訓練を行った。1頭については、幾何学図形の色や個数の遅延見本合わせの訓練まで完了させることができた。現在、順向推論

課題に移行するための訓練を実施中である。残り1頭については、幾何学図形の色の見本合わせの訓練まで完了させることができた。現在、幾何学図形の個数の見本合わせ訓練を実施中である。今年度は、この訓練の途中経過について、日本動物心理学会にてポスター発表を行った。

●誌上発表 Publications

(単行本)

1. 永野茜：“齧歯類の道具使用”, 『動物の行動と心の事典』, 朝倉書店, 印刷中.

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 永野茜, 長谷川拓, 宮本健太郎：“Development of a behavioral task to investigate the neural mechanisms of prospective reasoning in macaques”, 日本動物心理学会 第84回大会, 愛知県犬山市, 10月(2024)

XXIII-030 メタボロミクスによる葉のサイズ制御を司るマスター因子の探索

Metabolomic Strategy for The Identification of Master Regulators of Leaf Size

研究者氏名：多部田 弘光 Hiromitsu TABETA

受入研究室：環境資源科学研究センター

代謝システム研究チーム

(所属長 平井 優美)

葉器官を構成する細胞の数が減少した場合、それを相補するかのように葉肉細胞が顕著に肥大する「補償作用」という現象が知られている。この現象は、未だに解明されていない「葉面積制御機構」の解明に資すると期待されている現象である。植物の葉は主な可食部となるため、その面積制御機構の解明は、基本的な生命現象の理解だけでなく、農学的な観点から社会活動にまで波及的な効果を及ぼすと期待できる。そこで本課題では、典型的な補償作用を示す *fugu5* 変異体を用いて、当該現象の分子メカニズム解明に取り組み、葉を構成する細胞数と細胞サイズの協調を担う鍵因子群を同定することを目指す。

昨年度は、経時的に回収した実生サンプルをオミクス解析に供することで、複数の候補因子の特定に成功した。今年度はそれらの成果を受け、実行的に関与する代謝酵素や遺伝子群の特定を試みた。

(1) インドールグルコシノレート (iGSL) の分解に寄与する酵素 PYK10 と TGG2 は、*fugu5* 変異体において顕著に高発現する遺伝子であったため、これらは補償作用に関わる酵素群である可能性が高いと推測された。そこで、この仮説を検証するため、PYK10 と TGG2 の機能を喪失した SLAK の T-DNA ラインを獲得し、*fugu5* との

二重変異を作出することで、逆遺伝学的実証実験を試みた。その結果、*pyk10 fugu5* および *tgg2 fugu5* の二重変異体はいずれも、*fugu5* で確認されるはずの葉肉細胞の顕著な肥大が生じていなかった。よって、これらの酵素は葉面積の制御に不可欠なコア代謝酵素であることが明らかになった。

(2) 分解した iGSL より生じるインドール環をオーキシン骨格へ利用する代謝酵素 NSP1 も、PYK10 と TGG2 と同様に *fugu5* において発現量が増加していた。そこで、この代謝酵素の過剰発現体を作成し、*fugu5* の顕著な細胞肥大がさらに増進されるのかを確認した。作出した *35S::NSP1/fugu5* の細胞形態を定量したところ、過剰発現体ではオーキシンの過剰供給とともに観察される Overcompensated Cell Enlargement (OCE) が生じていた。すなわち、iGSL の分解を抑制すると細胞肥大は抑圧され、インドール環の再利用を促進すると細胞肥大は顕著に促進されることが見出されたため、iGSL は葉面積の制御に重要な代謝産物であることが明らかになった。

(3) シングルセル解析より、これらのコア代謝酵素が葉のどの細胞種で発現するかを確認し、遺伝子発現アトラスを作成した。その結果、コア代謝酵素である PYK10

とNSP1は葉肉細胞ではなく、表皮細胞で高発現していることが明らかになった。また、iGSLの合成酵素も表皮細胞で顕著に発現していた。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Hiromitsu T. and Masami Y.H. :“L-2-aminopimelic acid acts as an auxin mimic to induce lateral root formation across diverse plant species”, *FEBS Lett.*, 598(15):1855-1863, (2024)*
2. Kai U., Yushiro F., Hiromitsu T., Tomoyoshi A. and Masami Y.H. : “ Omics-based Identification of the Broader Effects of 2-hydroxyisoflavanone Synthase Gene Editing on a Gene Regulatory Network Beyond Isoflavonoid Loss in Soybean Hairy Roots”, *Plant & Cell Pysiol.*, in press*

●口頭発表 Oral Presentations

1. 多部田弘光 : “Functional amino acids that control plant growth”, 第97期 学术報告 湖南農業大学, 長沙, 11月(2024)
2. 多部田弘光 : “Functional amino acids that control plant growth”, 学术報告 温州大学, 温州, 11月 (2024)
3. Mengyao W., Hiromitsu T., Kinuka O., Ayuko K., Ryuichi N., Toshiki I., Kiminori T., Mayuko S., Mayumi W., Hiromichi A., Hiroshi T., Tsubasa S., Kouji T., Yozo O., Keisuke Y., Ryoichi S., Ali F., Takayuki K. and Masami Y.H. : “Functions of the phosphorylated pathway of serine biosynthesis in development of *Marchantia polymorpha*”, *Marchantia Workshop 2024*, Hiroshima, Nov (2024)
4. 多部田弘光 : “大豆根圏変化に資する新規成分の同定と生合成経路の探索”, 第27回 不二たん白質研究財団研究報告会, 大阪, 5月(2024)
5. Mengyao W., Hiromitsu T., Kinuka O., Ayuko K., Ryuichi N., Toshiki I., Kiminori T., Mayuko S., Mayumi W., Hiromichi A., Hiroshi T., Tsubasa S., Kouji T., Yozo O., Keisuke Y., Ryoichi S., Ali F., Takayuki K. and Masami Y.H. : “Functions of the

phosphorylated pathway of serine biosynthesis in development of *Marchantia polymorpha*”, 第65回日本植物生理学会年会, 神戸, 3月(2024)

6. Mariko A., Hiromitsu T., Momoko T., Toshiya Y., Masami Y.H. and Kazuhiko N. : “The developmental and metabolome analysis of *Cuscuta root*”, 第65回日本植物生理学会年会, 神戸, 3月(2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Hiromitsu T., Hiroyuki K., Testuya M., Sato M., Hirokazu T., Ali F. and Masami Y.H. : “Auxin converted from indole glucosinolate degradation product controls the amplitude of cell enlargement in cotyledon size regulation in *Arabidopsis thaliana*”, *S BIO24 Conference*, Pont-à-Mousson, Sep (2024)
2. 多部田弘光, 古賀皓之, 佐藤心郎, 塚谷裕一, Ferjnal Ali, 平井優美 : “インドールグルコシノレートの分解に由来するオーキシンは補償作用における過剰な細胞肥大を引き起こす”, 日本植物学会第88回大会, 宇都宮, 9月(2024)
3. 多部田弘光, 古賀皓之, 佐藤心郎, 塚谷裕一, Ferjnal Ali, 平井優美 : “葉面積制御に伴うオーキシンの一過的上昇は代謝ネットワークを介したインドールグルコシノレートの分解によって引き起こされる”, 第41回植物バイオテクノロジー学会, 仙台, 8月(2024)
4. Hiromitsu T., Hiroyuki K., Testuya M., Sato M., Hirokazu T., Ali F. and Masami Y.H. : “Multi-platform widely-targeted metabolomics unveiled a core metabolic process that contributes to cotyledon size regulation”, *Metabolomics2024*, Osaka, Jun (2024)
5. Hiromitsu T., Tetsuya M., Ali F. and Masami Y.H. : “Widely targeted metabolomics and subsequent label-free analysis identified candidate metabolites that control hypocotyl elongation in the model plant *Arabidopsis thaliana*”, *American Society for Mass Spectrometry 2024*, Anaheim, Jun (2024)
6. 多部田弘光, 平井優美 : “双子葉植物の根において側根形成を促進する新規機能性アミノ酸の同定”, 第65回日本植物生理学会年会, 神戸, 3月(2024)

XXIII-031 ゼブラフィッシュにおける Glycometabolome
- 魚類の糖鎖機能の解明に向けた挑戦 -
Glycometabolome in Zebrafish (*Danio rerio*)
-toward understanding the function of glycan in fish-

研究者氏名：本田 晃伸 Akinobu HONDA
受入研究室：開拓研究本部
鈴木糖鎖代謝生化学研究室
(所属長 鈴木 匡)

魚類における糖鎖研究は、小型魚類を用いた糖鎖関連遺伝子欠損症のモデルとしての研究が大部分を占めている。そのため、魚類または魚種特異的な糖鎖構造、その生合成および代謝経路に関しては、大部分が未解明のままとなっている。さらに、魚類では他の脊椎動物とは異なる糖鎖代謝経路を持つことが示唆されているにも関わらず、その代謝経路を担う責任酵素の同定すら行われていなかった。そのため、魚類独自の糖鎖の生理機能は明らかになっていない。この知識的なギャップを埋めるために、ゼブラフィッシュを用いて、魚類の糖鎖生合成および代謝機構の全容を明らかにしようと研究を行っている。

本年度は、昨年度に同定することに成功した魚類特有の糖鎖代謝酵素 (*N*型糖鎖脱離酵素: Ngly2) の立体構造を Cryo-EM により明らかにした。構造学的に予想された基質特異性と実際に行った生化学的実験結果は一致していた。また、*ngly2* 欠損ゼブラフィッシュを用いて、表現型の解析を行った。その結果、*ngly2* 欠損ゼブラフィッシュは他のリソソーム酵素欠損ゼブラフィッシュに見られるような表現型は確認されなかった。しかし、受精卵のサイズが小さくなり、受精卵中に含まれる遊離糖鎖がほとんど消失するというユニークな表現型が確認された。遊離糖鎖は初期発生に重要な栄養源であるピテロジェニンや受精の表層反応に関与するヒョーソフォリン由来であることが予想されており、これらタンパク質のプロセッシングを *N*型糖鎖の脱離によって、助けているのではないかと考えている。現在は、遊離糖鎖の消失がどのように受精卵のサイズを小さくするのか、そのメカニズムに関し

てピテロジェニンとヒョーソフォリンを中心に解析を行っている。

また、魚類独自の糖鎖生合成経路に関しては、タンパク質の発現系が確立できなかった。そのため、標的遺伝子をゼブラフィッシュの培養細胞でノックアウトし、その後、グライコム解析を行い、糖鎖構造の変化より、責任遺伝子を同定することにした。そのため、ゼブラフィッシュ培養細胞での CRISPR/Cas9 システムによるゲノム編集技術の確立を行っている。

●誌上发表 Publications

1. Honda, J. Seino, C. Huang, M. Nakano, T. Suzuki: Occurrence of free glycans in salmonid serum. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 742, 151096 (2025)
2. C. Huang, A. Honda, T. Suzuki: Free oligosaccharides in serum. *BBA Advances*, 7, 100139 (2025)

●口頭発表 Oral Presentations

1. 本田晃伸、清野淳一、藤平陽彦、平山弘人、植木雅志、鎌田勝彦、鈴木匡: Ngly2 の系統学的分布と酵素学的性状. 第43回日本糖質学会, 横浜, 2024. 9
2. 本田晃伸、鈴木匡: 魚類特異的な *N*型糖鎖脱離酵素: Ngly2. 第47回日本分子生物学会, 福岡, 2024. 11

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 本田晃伸、清野淳一、藤平陽彦、平山弘人、植木雅志、鎌田勝彦、鈴木匡: Ngly2 の酵素学的性状および生理機能. 第97回日本生化学会, 横浜, 2024. 11

XXIII-032 Pathogen recognition landscape of leucine-rich repeat receptor kinases in plants

Name: Pok Man NGOU

Host Laboratory: Plant Immunity Research Group
RIKEN Center for Sustainable Resource Science
Laboratory Head : Ken SHIRASU

Plant diseases pose a significant threat to global food security, causing major losses in agricultural productivity. A critical strategy for sustainable disease management is the identification and deployment of plant immune receptors (PRRs) that perceives pathogen-derived molecules (or PAMPs). However, traditional genetic approaches have limited the discovery of immune receptors to a few model species, and it remains challenging to identify these receptors in diverse crops. My work addresses this limitation by integrating bioinformatics, synthetic biology, and biochemical techniques to systematically characterize a subclass of PRRs, LRR-RLK-XII, across 285 plant species.

I identified a novel immune receptor from pomelo, named SCORE, which detects cold-shock proteins (CSPs) from a broad range of pathogens. I found that SCORE and a previously identified *Solanum*-specific receptor, CORE, independently evolved to recognize the same conserved peptide within CSPs (csp15), marking the first known case of convergent evolution in plant immune receptors that perceives the same peptide. Further analysis revealed that SCORE orthologs across angiosperms exhibit remarkable polymorphism in csp15 recognition, highlighting a dynamic evolutionary arms race between plant immunity and pathogen evasion.

By leveraging structural predictions and phylogenetic insights, I identified key amino acid residues governing CSP recognition and engineered SCORE variants capable of detecting CSPs from economically significant pathogens, including those responsible for fire blight, citrus greening, clubroot, and root-knot nematodes. This work represents a major step forward in plant immunity research, providing an efficient

platform for discovering novel immune receptors across diverse species. Our findings not only advance our understanding of host-pathogen co-evolution but also offer valuable tools for engineering durable disease resistance in crops, contributing to global food security and sustainable agriculture.

Overall, the project is going well as planned. We are preparing a manuscript to be submitted to *Science* by March 2025. We are also preparing to apply for a patent with this project.

● Publications

Papers

1. Bruno Pok Man Ngou, Michele Wyler, Marc W. Schmid, Yasuhiro Kadota and Ken Shirasu, Evolutionary trajectory of pattern recognition receptors in plants. *Nat. Commun.* 15, 308 , 2024*
2. Yukihisa Goto, Yasuhiro Kadota, Malick Mbengue, Jennifer D. Lewis, Hidenori Matsui, Noriko Maki, Bruno Pok Man Ngou, Jan Sklenar, Paul Derbyshire, Arisa Shibata, Yasunori Ichihashi, David S. Guttman, Hirofumi Nakagami, Takamasa Suzuki, Frank L.H. Menke, Silke Robatzek, Darrell Desveaux, Cyril Zipfel and Ken Shirasu, The leucine-rich repeat receptor kinase QSK1 regulates PRR-RBOHD complexes targeted by the bacterial effector HopF2Pto, *The Plant Cell*, 36 : 4932-4951, 2024*

● Oral Presentations

Conferences

1. Bruno Pok Man Ngou, Wyler M, Schmid MW, Kadota Y, Shirasu K, "Evolutionary trajectory of pattern recognition receptors in plants", Guangzhou, China, 2024/10/18, Presentation in overseas conference

XXIII-033 培養して明らかにする DPANN アーキアの真の生理生態 Unraveling the true ecophysiology of DPANN archaea by cultivation

研究者氏名：酒井 博之 Hiroyuki SAKAI
受入研究室：バイオリソース研究センター
微生物材料開発室
(所属長 大熊 盛也)

地球上のアーキア多様性の約半分を占めるDPANN群は、極めて多様な環境に生息する絶対共生性アーキアとして、生理・生態・進化の観点から微生物生態学分野において最も注目されている生物群のひとつである(以後DPANNアーキア)。しかし、培養成功例が数例しかないため、本群の生理生態はほとんど未知である。本研究では、メタゲノムDNA解析などの培養を介さない解析技術では絶対に明らかにすることのできないDPANNアーキアの真の生理生態を、申請者および受入研究室が培ってきた培養技術およびバイオリソース(培養株)を駆使して明らかにすることを目的とする。

2024年度は、共同研究責任者(Co-PI)として採択された国際共同研究助成プログラムHFSP Early Career Grantsの研究課題“Unraveling the multi-layer relationship between archaeal symbionts and their viruses”に注力して研究を進めた。具体的には、オランダのGroningen大学において約1カ月間、アーキアウイルスの基本的な培養法を学ぶとともに、自身のDPANNアーキア培養技術を共同研究先へ技術指導した。修得した技術と自身の培養技術を組み合わせることでアーキアウイルスの分離培養を試みた結果、6株のアーキアウイルスを分離培養することに成功し、そのうち5株の全ゲノム配列を決定した。予備実験の結果、2株はDPANNアーキアに感染する新規ウイルスの可能性が高く、これが事実であれば世界で初めてDPANNウイルスの培養に成功したことになり、微生物生態学分野において極めて影響力の大きな研究成果が得られつつある。一方、上述の研究課題に注力したこともあり、DPANN培養株の性状解析は進捗がやや遅れている。しかしながら、これまでに得られた実験結果(DPANN培養株の生理性状、ゲノム性状、進化系統関係、細胞形態など)を論文としてまとめて投稿し、*ISME Journal*(共同第一著者、IF:12.3)や*Nature Communications*(共著、IF:16.1)等の国際的評価の高い学術誌への論文掲載につながった。共同研究として進めていたグライコプロテオーム解析についても一定の研究成果が得られ、DPANNアーキアの細胞表面糖鎖の基本構造について記述した共著論文が*Journal of Bacteriology*誌へ掲載された。

2025年度は、分離に成功したアーキアウイルスを

DPANN・宿主共培養系へ感染させた際の動態を調査する。これにより、ウイルス・寄生性アーキア・宿主間の相互作用を明らかにすることを旨とする。並行して、これまで培養に成功した11株のDPANNアーキアについて、それらの生理生態をより深く理解するための基礎的研究(生理性状解析、宿主範囲の調査、ゲノム解析、トランスクリプトーム解析、蛍光顕微鏡観察、電子顕微鏡観察など)を着実に進める。得られた研究成果は適宜論文としてまとめて誌上発表を目指す。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Sakai H.D., Nur N., Suwanto A., Kurosawa N.: “Complete genome sequence of strain KD-1^T, the type strain of *Sulfurisphaera javensis*, isolated from an Indonesian hot spring”, *Microbiol Resour Announc*, 0:e00664-24 (2024)*
2. Nakagawa S., Sakai H.D., Shimamura S., Takamatsu Y., Kato S., Yagi H., Yanaka S., Yagi-Utsumi M., Kurosawa N., Ohkuma M., Kato K., Takai K.: “N-linked protein glycosylation in *Nanobdellati* (formerly DPANN) archaea and their hosts”, *J Bacteriol*, 206:e00205-24 (2024)*
3. Johnson M.D., Shepherd D.C., Sakai H.D., Mudaliyar M., Pandurangan A.P., Short F.L., Veith P.D., Scott N.E., Kurosawa N., Ghosal D.: “Cell-to-cell interactions revealed by cryo-tomography of a DPANN co-culture system”, *Nature Communications*, 15(1):7066 (2024)*
4. Johnson M.D., Sakai H.D. (Co-first), Paul B., Nunorura T., Dalvi S., Mudaliyar M., Shepherd D.C., Shimizu M., Udupa S., Ohkuma M., Kurosawa N., Ghosal D.: “Large attachment organelle mediates interaction between *Nanobdellota* archaeon YN1 and its host”, *The ISME Journal*, 18(1):wrae154 (2024)*
5. Nakagawa S., Imachi H., Shimamura S., Yanaka S., Yagi H., Yagi-Utsumi M., Sakai H., Kato S., Ohkuma M., Kato K., Takai K.: “Characterization of protein glycosylation in an Asgard archaeon”, *BBA Advances*, 6:100118 (2024)*

(図書)

1. Sakai H.D., Itoh T., Kato S., Nur N., Suwanto N., Ohkuma M., Kurosawa N.: “*Microcaldota* phyl. nov.”,

In: Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria, (submitted)*

2. Sakai H.D., Itoh T, Kato S, Johnson M.D., Shepherd D.C., Nur N., Suwanto N., Ghosal D., Ohkuma M., Kurosawa N.: "Microcaldus", In: Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria, (submitted)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. 酒井博之, 布浦拓郎, 黒沢則夫, 大熊盛也: "ナノアーキア・宿主アーキア・アーキアウイルス共培養系の諸性状解析", 日本 Archaea 研究会第36回講演会, 京都府, 7月(2024)
2. 高見清正, 酒井博之, 面川博美, 中村光一, 黒沢則夫: "新規好熱好酸性ナノアーキア KR1 株の分類学的解析", 日本 Archaea 研究会第36回講演会, 京都府, 7月

(2024)

3. 森田祥空, 酒井博之, 島村繁, 武藤久, 澤山茂樹, 高井研, 中川聡: "酸性温泉に由来する新規 *Nanobdellati* (DPANN アーキア) 及び宿主アーキアのグライコプロテオミクス", 日本 Archaea 研究会第36回講演会, 京都府, 7月(2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 酒井博之, 黒沢則夫, 布浦拓郎, 望月智弘, 大熊盛也: "*Nanobdellati* アーキアに感染するウイルスの探索", 第25回極限環境生物学会, 東京, 11月(2024)
2. 高見清正, 面川博美, 中村光一, 酒井博之, 黒沢則夫, 新規好熱好酸性ナノアーキア KR1 株のゲノム解析: "日本微生物生態学会第37回大会", 広島, 10月(2024)

XXIII-034 新規細胞極性「細胞キラリティ」に起源する多細胞の左右非対称性形成原理の解明

Elucidation of the Mechanism by which Cell Chirality Emerges Left-right Asymmetric Morphogenesis at the Multicellular Level

研究者氏名: 石橋 朋樹 Tomoki ISHIBASHI
受入研究室: 生命機能科学研究センター
フィジカルバイオロジー研究チーム
(所属長 柴田 達夫)

器官の正常な左右非対称性は、器官それ自体の機能や器官どうしの連携に必須である。近年、このような多細胞レベルの左右非対称性に、細胞キラリティが関与することが分かってきた。細胞キラリティとは、細胞レベルの左右非対称性であり、細胞の特定方向への回転やねじれなどという形で観察される。細胞キラリティと多細胞レベルの左右非対称性との相関は多様な生物種で報告されている一方で、細胞キラリティが多細胞レベルの左右非対称性を生み出すメカニズムはほとんど不明である。本研究では、明瞭な細胞キラリティを示す上皮系培養細胞を用いて、多細胞レベルの左右非対称な振る舞いを再構築し、細胞キラリティを多細胞の左右非対称性へと変換する遺伝的・機械的メカニズムの解明を目指す。

今年度は、まず細胞キラリティそのものが生まれる分子メカニズムの解明に注力した。私は、これまでに細胞キラリティへの関与が明らかになっていた formins と I 型 Myosin の関与を調べ、I 型 Myosin が細胞キラリティ形成に重要であることをつきとめた。この研究成果は、理論と結果をまとめて、現在 bioRxiv で発表するとともに、共筆頭著者として eLife 誌に論文投稿中である。

さらに現在は、多細胞スケールの左右非対称性形成についても研究を進めている。現在用いている上皮系培養

細胞が分裂して多細胞コロニーを形成しても、細胞が集団として時計回り回転することを見出し、細胞配置換えの際に観察される rosette 形成が頻発することを見出し、これを理論と実験をあわせて解析中である。また、多細胞回転時においてこの多細胞回転には、細胞間接着と細胞-基質間接着のバランスが重要な役割を果たすことを見出し、細胞バーテックスモデルから、これらの細胞接着機構が集団回転方向を決定するのに十分であることを明らかにした。また、細胞をチューブ状に整形し、管レベルのねじれを観察することができる系も開発した。この系により、細胞キラリティが器官レベルの左右非対称性を生み出す仕組みの解析が可能となった。現在、ライブイメージングから、細胞キラリティと集団回転のさらなる定量解析をおこなっている。

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Ishibashi T., Nishizawa R., Shibata T.: "Cellulr-level left-right asymmetry, cell chirality, induces the chiral collective rotation of multicellular colony", The 47th Annual Meeting of the Molecular Biology Society of Japan, Fukuoka International Congress Center, Hakata, Japan, 11月(2024)

- Ishibashi T., Shibata T.: “細胞キラリティが左右非対称な細胞集団回転へ変換される仕組みの解明”, The 76th Annual Meeting of the Japan Society for Cell Biology, つくば国際会議場, 筑波, 日本, 7月 (2024)
- Ishibashi T., Shibata T.: “Cellulr-level left-right asymmetry, cell chirality, induces the chiral collective rotation of multicellular colony”, 21st IUPAB

- Congress, ICC Kyoto, Kyoto, Japan, 6月 (2024)
- Ishibashi T., Shibata T.: “Cellulr-level left-right asymmetry, cell chirality, induces the chiral collective rotation of multicellular colony”, The 57th Annual Meeting of the Japan Society of Developmental Biologists, Miyako Messe, Kyoto, Japan, 6月 (2024)

XXIII-035 エクトドメインシェディングの基質選択を制御するリン酸化ネットワーク分子基盤の解明

Molecular Basis of the Phosphorylation Network Regulating Substrate Selectivity of Ectodomain Shedding

研究者氏名：津曲 和哉 Kazuya TSUMAGARI
受入研究室：生命医科学研究センター
融合領域リーダー育成プログラム
プロテオーム恒常性研究ユニット
(所属長 今見 考志)

多くの膜タンパク質は膜型プロテアーゼによって切断され、その細胞外ドメインを遊離する。この現象は、エクトドメインシェディング (シェディング) と呼ばれる。先行研究において、細胞種によってシェディング基質が大きく異なることが確認された。しかし、同じ細胞外からの刺激に対して、細胞種ごとに異なった膜タンパク質をシェディング基質として決定する制御メカニズムは不明であった。個別の基質に着目した研究から、膜タンパク質のリン酸化がシェディング感受性を制御することや、細胞内シグナル伝達に依存して異なった膜タンパク質がシェディングされることが報告されている。このような背景から、リン酸化は普遍的にシェディングを制御する因子の一つであるのではないかと考え、シェディングプロテオミクスとリン酸化プロテオミクスを組み合わせ、シェディングを制御するリン酸化部位をシステムティックに同定することを本研究の目的とした。

本年度は、以下の研究内容について取り組んだ。

(1) さまざまなシェディング阻害薬および活性化薬を組み合わせた計20条件の試料を5種の細胞株について調製し、計400試料の培養上清プロテオームの測定を行った。

(2)(1)に対応する、計120試料のリン酸化プロテオーム試料を調製し、測定を行った。

(3) データベースサーチおよび相関解析のための基礎

検討を行った。

(4) ADAMプロテアーゼと相互作用し基質選択や機能を制御し得るタンパク質を探索するためのADAM-APEX2 (or AirID) コンストラクトの作成を行った。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

- Tsumagari K., Ogata K., Ishihama Y. and Imami K.: “Protocol for TMT-labeling of peptides in quantitative proteomics”, J. proteome data methods, 6, 6(2024)*
- Deng K., Isobe Y., Tsumagari K., Kato T., Arai H., Imami K. and Arita M.: “12/15-lipoxygenase-derived electrophilic lipid modifications in phagocytic macrophages”, ACS Chem. Biol. in print*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

- 津曲和哉, 今見考志: “脂質修飾大規模解析のためのプロテオーム解析技術開発”, 日本プロテオーム学会2024年大会, 青森, 6月(2024)
- Tsumagari K., Imami K.: “Defining proteoforms through post-translational modification proteomics”, Advancement and application of methods for proteoform-centric proteomics Japanese-German Research Symposium, 京都, 11月(2024)

XXIII-036 Study of the amygdalostriatal pathway in active avoidance processes in rats.

Name: Mehdi Julien SICRE

Host Laboratory: Laboratory for Neural Circuitry of Learning and Memory
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head : Joshua Patrick JOHANSEN

In hazardous environments, animals must rapidly shift from immediate fear reactions to more adaptive avoidance strategies to ensure survival. This transition involves moving beyond basic defensive responses, such as fleeing at the first sign of danger, toward an active approach that integrates decision-making, motor coordination, and the capacity to anticipate potential threats. Our study focuses on dissecting the neural circuits responsible for this shift, with particular emphasis on the interplay between emotional processing within the basolateral amygdala (BLA) and the goal-directed action circuits of the nucleus accumbens (NAc) in the striatum.

We developed a rat “shuttle” task in which an auditory cue predicts an electric shock, prompting the animal to avoid the shock by moving into a second compartment. This setup enables precise tracking of how avoidance behaviors emerge and stabilize, and we employ fiber photometry, electrophysiology, and optogenetics to record and manipulate neural activity throughout learning. Fiber photometry revealed distinct temporal patterns of activity in the BLA-to-NAc and ventral tegmental area (VTA)-to-NAc projections, closely mirroring the development of effective motor strategies. Concurrently, electrophysiological recordings highlighted plastic mechanisms in NAc neurons, underscoring the critical role of this circuit in refining goal-directed responses to threats.

To further explore the importance of BLA-to-NAc communication, we used a closed-loop optogenetic approach. In this paradigm, the animal’s escape or

avoidance movements automatically triggered real-time inhibition of the BLA-to-NAc pathway. By selectively disrupting these signals during the initial learning phase, we demonstrated the necessity of this projection for guiding adaptive avoidance behaviors.

Looking ahead, we aim to deepen our understanding of the wider circuit by determining how different neuronal populations within the NAc—such as D1- and D2- dopamine receptor expressing medium spiny neurons and distinct interneuron classes—contribute to learning and decision-making. This step will help us build a comprehensive model of how animals transition from reflexive fear responses to proactive, goal-directed avoidance strategies, ultimately illuminating the broader principles of adaptive behavior in threatening situations.

● Publications

1. Mehdi Sicre, Frederic Ambroggi and Julie Meffre.: Two distinct neuronal populations in the rat parafascicular nucleus oppositely encode the engagement in stimulus-driven reward-seeking. *Current Neuropharmacology* (2024)

● Poster Presentations

1. *FENS Forum 2024, Vienna, Austria*. “Neuronal encoding of active avoidance in the nucleus accumbens.” M. Sicre and J. Johansen
2. *NEURO2024, Fukuoka, Japan*. “Neuronal encoding of active avoidance in the nucleus accumbens.” M. Sicre and J. Johansen

XXIII-037 ニチニチソウ種子発芽過程における細胞の代謝的分化過程の解析

Analysis of Cellular “Metabolic Differentiation” during Seed Germination in *Catharanthus roseus*

研究者氏名：鵜崎 真妃 Mai UZAKI

受入研究室：環境資源科学研究センター

代謝システム研究チーム

(所属長 平井 優美)

多くの植物の特化代謝産物は細胞種特異的に合成・蓄積される。ニチニチソウ (*Catharanthus roseus*) のアルカロイドは、IPAP細胞で合成されたイリドイドを原料として表皮細胞特異的に合成され、中間体及び最終産物が異形細胞・乳管細胞と呼ばれる特殊な形態の細胞に蓄積されることが知られている。特定の細胞が特異的な代謝をどうして行うことができるのか、特異的な代謝を行うのに必要な条件がどういったものなのかは全く分かっていない。本研究では、細胞種特異的かつ横断的にアルカロイド生合成を行うニチニチソウの、細胞が分化に伴い特異的な代謝を行えるようになる過程、すなわち細胞の「代謝的な」分化過程を追跡し、その時期やそれを駆動する因子・条件を解明することを目標としている。植物のもつ合成酵素遺伝子を酵母等の生育が容易な生物に導入し化合物の大量生産を目指す代謝工学的研究が世界中で積極的に行われているが、成功例はほとんどないことから、植物特化代謝においては酵素遺伝子の導入の他に重要な要素が存在することが考えられる。細胞の代謝的分化に関する知見が得られることは、代謝工学的研究におけるブレークスルーに繋がることが期待される。

本年度は、昨年度から引き続きこれまでに取得したニチニチソウ種子胚の発芽過程におけるトランスクリプトームデータ及びメタボロームデータの解析を進め、種子発芽時における代謝制御機構を考察すると共に、公共データとの統合解析により代謝的分化に重要な遺伝子を探索した。これに加え、昨年度は植物体での候補遺伝子スクリーニング・遺伝子機能解析成果が得られなかったことを踏まえ、ニチニチソウ培養細胞やカルスにおける形質転換方法や候補遺伝子の機能解析方法を検討した。また、植物体での実験のみでは細胞レベルでの解析が困難であることから、脱分化しアルカロイド代謝能を喪失した培養細胞への中間代謝物・阻害剤投与実験並びに培養

条件の変更等によりアルカロイド代謝を回復させる方法を探索し、脱分化とアルカロイド代謝との関係性の詳細を探った。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Uzaki M, Mori T, Sato M, Wakazaki M, Takeda-Kamiya N, Yamamoto K, Murakami A, Guerrero DAS, Shichijo C, Ohnishi M, Ishizaki K, Fukaki H, O'Connor SE, Toyooka K, Mimura T and Hirai MY: Integration of cell differentiation and initiation of monoterpenoid indole alkaloid metabolism in seed germination of *Catharanthus roseus*. *New Phytologist*.242(3):1156-1171 (2024)*

(総説)

1. Yamamoto K, Uzaki M, Takahashi K and Mimura T. Current status of MSI research in Japan to measure the localization of natural products in plants. *Current Opinion in Plant Biology* 102651 (2024)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. 鵜崎真妃：「薬用植物ニチニチソウの細胞種特異的なアルカロイド代謝と乳管細胞の分化」、第15回植物電子顕微鏡若手ワークショップ、理化学研究所横浜キャンパス、11月(2024年)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 鵜崎真妃、山本浩太郎、三村徹郎、平井優美：「ニチニチソウにおける細胞の代謝的分化を駆動する新奇遺伝子の探索」、第65回日本植物生理学会年会、神戸、3月(2024年)
2. 鵜崎真妃、山本浩太郎、三村徹郎、平井優美：「ニチニチソウにおける細胞の代謝的分化を駆動する新奇遺伝子の探索」、日本植物学会第87回大会、宇都宮、9月(2024年)

XXIII-038 動的環境下での多種微生物の共培養・共進化を可能とする自動実験システムの開発

Development of Co-culture and Co-evolution Systems for Multiple Microbial Species using Laboratory Automation Technology

研究者氏名：芝井 厚 Atsushi SHIBAI

受入研究室：生命機能科学研究センター
多階層生命動態研究チーム
(所属長 古澤 力)

本研究の目的は、複数の微生物を安定的に共培養できる自動システムを実験室内で構築することである。通常、2種類以上の微生物を共培養する場合、その共存状態は不安定になりやすい。しかし、本研究では、受け入れ先が開発した全自動培養装置を活用し、培養環境を動的に制御するシステムを構築した。このシステムを用いることで、微生物種の存在比をリアルタイムで観察しつつ、目的とする状態を維持できるような制御が可能となる。前年度までの研究進捗として、複数の細菌種の存在比を定量・制御するため、事前に蛍光タンパク質と抗生物質耐性遺伝子の組を発現するよう改変した大腸菌株セットを作成した。その結果、緑色蛍光タンパク質を発現しカナマイシン耐性を持つ大腸菌株、および赤色蛍光タンパク質を発現しクロラムフェニコール耐性を持つ大腸菌株を準備することに成功した。これらを基に、自動培養系では測定結果を次ステップの薬剤添加量にフィードバックする自動実験システムを開発した。また、計画外の進展として、蛍光顕微鏡を全自動培養装置に組み込むことにも成功した。これにより、顕微鏡画像から得られる細胞形態情報を用いて集団構造を推定することが可能となり、研究の

多角的な展開が期待される。本年度は、この自動実験システムを用いて、細菌が薬剤添加環境下で耐性進化する様子を調べる実験を実施した。特に、複数の抗生物質を同時に添加し、そのバランスを動的に変化させる条件下で、大腸菌が進化しやすい経路と進化しにくい経路が存在することを明らかにした。今後の展望として、これまでに準備した材料と全自動培養システムを活用し、複数種の細菌の共培養状態の制御実験を実施する予定である。また、研究の発展として、複数薬剤を同時に添加し、それぞれの濃度を多様に調整する自動化技術を応用し、薬剤の組み合わせが細胞増殖に及ぼす影響を網羅的に解析するシステムの開発を計画している。この進展により、研究終了後の発展課題の計画も具体化しつつある。

●誌上发表 Publications

(総説)

1. Shibai, A., Furusawa, C.: "Development of specialized devices for microbial experimental evolution", *Development Growth & Differentiation*, 66(7), 372-380 (2024)

XXIII-039 Co-Evolution and Fusion of Interspecific Microbes for the Creation of New-to-Nature Metabolites

Name: Yu ZHENG

Host Laboratory: Natural Product Biosynthesis Research Unit
RIKEN Center for Sustainable Resource Science
Laboratory Head: Shunji TAKAHASHI

In FY2024, I focused mainly on two projects and have the following outcomes:

1) To the best of our knowledge, enzymes that catalyze intramolecular Diels-Alder ([4+2] cycloaddition) reactions are frequently reported in natural product biosynthesis; however, no native enzymes utilising Lewis acid catalysis have been reported. Verticilactam is a representative member of polycyclic

macrolactams, presumably produced by spontaneous cycloaddition. We report that the intramolecular [4+2] cycloadditions can be significantly accelerated by ferredoxins (Fds), a class of small iron-sulphur (Fe-S) proteins. Through iron atom substitution by Lewis acidic gallium (Ga) iron and computational calculations, we confirm that the ubiquitous Fe-S cluster efficiently functions as Lewis acid to accelerate

the tandem [4+2] cycloaddition and Michael addition reactions by lowering free energy barriers. Our work highlights Nature's ingenious strategy to generate complex molecule structures using the ubiquitous Fe-S protein. Furthermore, our study sheds light on the future design of Fd as a versatile Lewis acid catalyst for [4+2] cycloaddition reactions. (Zheng, Y., *et al.*, *Nat. Commun.*, 15, 5779 (2024).)

2) The adenosine 5'-monophosphate-mimicking nucleoside sulfamates are pharmaceutically important compounds that target aminoacyl-tRNA synthetases (aaRSs) and other adenylate-forming enzymes. Ascmycin is a unique naturally occurring alanyl adenosine sulfamate isolated from *Streptomyces* sp. 80H647. In this study, we successfully enhanced the in vivo conversion of dealanylascamycin to ascamycin by constitutively expressing an extra copy of *bldA* and *adpA* regulatory genes. More importantly, we performed gene expression analysis and protein structure-function prediction to identify alanyl-tRNA synthetase (AlaRS)-like enzymes: AcmF and AcmD. AcmF efficiently catalyzes the aminoacylation reaction during ascamycin biosynthesis, and this reaction is dependent on the Ala-tRNA^{Ala} supplied by AcmD. AcmF is a truncated AlaRS-like enzyme containing only the aminoacylation and tRNA recognition domains, whereas AcmD has an intact AlaRS-like architecture that efficiently supports AcmF activity by exhibiting resistance to the AcmF-produced ascamycin. In addition, we have produced the glycy- and seryl-derivatives of ascamycin using the AcmD-AcmF enzyme pair. The mechanistic study identified Glu232 and several residues that play important roles in AcmF catalysis. To the best of our knowledge, AcmF is a representative class II aaRS-like enzyme catalyzing tRNA-dependent aminoacylation during natural product biosynthesis. These findings provide a potential chemoenzymatic approach for the synthesis of aminoacyl nucleoside sulfamates. (Zheng, Y., *et al.*, *ACS Catal.*, 14, 3533–3542 (2024).)

In the SPDR program, I will dig deeper into 1) the de novo design and engineering of iron-sulphur proteins as versatile electron carriers and Lewis acid catalyst for [4+2] cycloaddition reactions; 2) the use of AcmF as a starting scaffold for the chemoenzymatic synthesis of bioactive aminoacyl nucleoside sulfamate compounds. These will contribute to the for the creation of New-to-Nature metabolites. In the same time, I have applied the "Forecasting Biosynthesis Approach" in natural product biosynthesis research. Therefore, I will continue to use this AI-based methodology to reveal the biochemical mechanism of natural product biosynthesis.

● Publications

Papers

1. Zheng, Y., Sakai, K., Watanabe, K., Takagi, H., Shiozaki-Sato, Y., Misumi, Y., Miyanoiri, Y., Kurisu, G., Nogawa, T., Takita, R., Takahashi, S. "Iron-sulphur protein catalysed [4+2] cycloadditions in natural product biosynthesis". *Nat. Commun.*, 15, 5779 (2024).
2. Zheng, Y., Morita, N., Takagi, H., Shiozaki-Sato, Y., Ishikawa, J., Shin-ya, K., Takahashi, S. "Alanyl-tRNA Synthetase-like Enzyme-Catalyzed Aminoacylation in Nucleoside Sulfamate Ascmycin Biosynthesis". *ACS Catal.*, 14, 3533–3542 (2024).

● Oral Presentations

Conferences

1. Zheng, Y., Morita, N., Takagi, H., Shiozaki-Sato, Y., Ishikawa, J., Shin-ya, K., Takahashi, S. "Alanyl-tRNA Synthetase-like Enzyme-Catalyzed Aminoacylation in Ascmycin Biosynthesis". *The 2024 Annual Meeting of the Society for Actinomycetes Japan (SAJ)*, Tokyo, Japan, September 10 - 11, 2024.
2. Zheng, Y., Morita, N., Takagi, H., Shiozaki-Sato, Y., Ishikawa, J., Shin-ya, K., Takahashi, S. "Biosynthesis and self-resistance mechanisms of ascmycin". *The 66th symposium on the chemistry of natural products*, Kyoto, Japan, September 4 - 6, 2024.

Symposiums

1. Zheng, Y., Sakai, K., Watanabe, K., Takagi, H., Shiozaki-Sato, Y., Misumi, Y., Miyanoiri, Y., Kurisu, G., Nogawa, T., Takita, R., Takahashi, S. "Iron-sulphur protein catalysed [4+2] cycloadditions in natural product biosynthesis". *学術変革領域研究(A) 予知生命科学 第3回若手シンポジウム*, 苫小牧, 2024年 8月 24日~8月25日.

● Poster Presentations

Conferences

1. Zheng, Y., Takahashi, S. "Iron-sulphur protein catalysed [4+2] cycloadditions in natural product biosynthesis". *The 5th International Conference on Natural Products Discovery and Development in the Genomic Era*, San Diego, CA, US, January 4 - 9, 2025.
2. Zheng, Y., Morita, N., Takagi, H., Shiozaki-Sato, Y., Ishikawa, J., Shin-ya, K., Takahashi, S. "Biosynthesis and self-resistance mechanisms of ascmycin". *The 2025 Annual Meeting of Japan Society for Bioscience, Biotechnology, and Agrochemistry (JSBBA)*, Sapporo, Japan, March 4 - 8, 2025.

XXIII-040 確率論的な Wnt 応答軟骨芽細胞の発生を起点とした気管縞状軟骨パターン形成機構の解明

Understanding of tracheal cartilaginous stripe pattern formation driven by the stochastic generation of wnt-responsive cells

研究者氏名：中山 彰吾 Shogo NAKAYAMA
受入研究室：生命機能科学研究センター
呼吸器形成研究チーム
(所属長 森本 充)

本年度では、軟骨細胞によるECMダイナミクス制御がどのようにして周期的パターンを生み出すのか明らかにするために、①ECMダイナミクス介した軟骨細胞の動態解析、②ECM操作によるin vivo気管軟骨パターンへの影響の2つの項目に大きくわけて、研究を遂行した。

①ECMダイナミクス介した軟骨細胞の動態解析

我々は、マイクロパターンングを創るための新技術であるPRIMO2を用いて、軟骨コラーゲンであるtype2コラーゲンの濃度勾配を2次元Dish上で作成することに成功した。

そこにマウスから取り出した気管軟骨細胞を入れることで、Haptotaxisの有無を検討したところ、コラーゲン濃度の濃い方へと軟骨細胞が動く様子が確認された。以上の結果により、軟骨細胞は自身が生成するコラーゲンの局所的な濃度勾配を生み出し、自発的に集まる可能性が示された。

②ECM操作によるin vivo気管軟骨パターンへの影響

これまでに、軟骨細胞のECM合成と分解を利用し、周期パターンを生み出すことが示唆されてきた。そこで、In vivo下で、ECMの合成・分解を抑制することで、パターンにどのような影響を及ぼすのか検討した。具体的には、コラーゲン合成に必須の因子であるHSP47の阻害剤により、コラーゲン合成の抑制を再現し、コラーゲン分解酵素であるMMPの阻害剤を用いて、コラーゲン分解を抑制した。妊娠12日のマウスに各種阻害剤を投与した

のち、妊娠14日で解剖し、胎児の気管軟骨を調べたところ、合成の抑制に伴って、軟骨凝集数は減少し、逆に、分解の抑制により軟骨凝集数は増加した。このことから、ECMの合成・分解のバランスがパターン形成に重要であることが示された。

今後は、パターン形成の根幹にあるメカニズムを探索する目的で、in vitro再構成系の確立を目指す。

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Shogo Nakayama: "Self-organization of Wnt-responsive chondrocytes in periodic pattern formation", YRF, 神戸, 3月(2024)
2. 中山彰吾、森本充: "Wnt 応答性軟骨芽細胞を起点とする細胞外マトリックス時空間制御を介した形態形成システムの理解", 分子生物学会, 博多, 11月(2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Shogo Nakayama, Mitsuru Morimoto: "The understanding of tracheal mesenchyme patterning at single-cell resolution", 細胞生物学会, つくば, 7月(2024)
2. Shogo Nakayama, Mitsuru Morimoto: "Self-organized periodic aggregation of chondrocyte driven by extracellular matrix dynamics", 理研BDRリトリート, 神戸, 10月(2024)

XXIII-041 Early-life Environmental Impact on Critical Neuronal Circuits of Vocal Development

Name: Jay Patrick NAKAMURA

Host Laboratory: Laboratory for Molecular Mechanisms of Brain Development
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head: Tomomi SHIMOGORI

The development of language is known to be highly vulnerable to disruption by environmental influences in early life but what neurodevelopmental changes underlie these disruptions is not known. The common marmoset (*Callithrix jacchus*) is a non-human primate that is uniquely suited for these investigations due to their vocal development, which display many language-like characteristics, as well as their alloparental rearing strategy, which is thought to also have been the evolutionary driver for language in humans. This research project aims to investigate vocal development in marmosets to identify the underlying circuitry and see how they are impacted by the rearing environment in early life.

Research activity this year focused on collecting continuous long-term naturalistic recordings of marmosets from birth to 6 months of age. We found stereotyped trajectories of vocal behaviour, where infants increased their volubility to around the 4th week before reaching a peak and declining to a baseline level shortly after. However, the trajectories and call type distributions appeared to be dependent on the parents of the offspring; marmosets born to

the same parents, but different litters, showed more similar trajectories compared to unrelated marmosets. Additionally, artificially reared marmosets that lacked parental vocal input had altered trajectories which were partially restored in some aspects with the reintroduction of vocal interactions, provided by experimenters using voice changer tools. Further investigations will aim to determine what features of vocal interactions are important in driving vocal development and the significance of the timing of these features. The experimental plan for the upcoming year focuses on chemogenetic manipulation of vocal circuits during windows of interest to achieve these aims.

● Poster Presentations

1. Nakamura J.P., Shimogori T.: "Naturalistic marmoset vocal development", The 47th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (JNS) NEURO2024, Fukuoka Japan, July 24-27 (2024).
2. Nakamura J.P., Shimogori T.: "Naturalistic marmoset vocal development", Center for Brain Science Retreat 2024, Gotemba Japan, November 28-29 (2024).

XXIII-042 層別機能的 MRI による精神疾患につながる脳ネットワーク解明のための技術開発とその精度評価

Development of a technique for elucidating the brain networks that lead to psychiatric disorders using laminar functional MRI and evaluation of its accuracy.

精神疾患に対する客観的な評価指標の構築は社会的に重要な課題である。このために、日々の思考や行動を支える脳ネットワークの機能を定量的かつ正確に評価することが急務となる。さらに、脳ネットワークの機能を個人ごとに正確に評価できれば、治療ターゲットとなる脳ネットワークが個人ごとに同定され、精神疾患における個別治療に寄与する可能性がある。この中で、機能的磁気共鳴画像 (fMRI) によって算出される脳領域間の活動の

研究者氏名: 木村 一皓 Ikko KIMURA

受入研究室: 生命機能科学研究センター

脳コネクトミクスイメージング研究チーム
(所属長 林 拓也)

同期度 (機能的連絡性) が注目されているものの、同指標による診断法ははまだ確立していない。

本研究課題は、上記の機能的連絡性を算出する改善法の1つとして、層別fMRIを用いることを提案したものであった。同手法は、大脳皮質を脳表面からの深さごとに解析し、方向性のある機能的連絡性が算出するものである。これにより、方向性のある情報伝達の異常をより正確に把握できる可能性がある。本年度は、所属研究室内の

研究者らと協力しながら、本研究で用いるマカクザルのfMRIのデータセットの解析の方法論の構築に携わった。

また、本年度は本研究計画とも関連する、以下の2つのプロジェクトを行った。

1. 課題時fMRIにおけるPROFUMOの有用性の検討

PROFUMOはfMRIデータを少数のネットワークに分解する近年提案された手法であり、安静時fMRIのデータでは従来法よりも個人差をより反映することが報告されている。層別fMRIと同様、当手法も精神疾患につながる脳ネットワークを同定するための手法として有用な可能性がある。しかしながら、PROFUMOのfMRIがどこまでの種類のfMRIのデータセットに対して適用可能かは、未だ分かっていない。そこでヒト脳コネクトームプロジェクト内の50名のヒトfMRIデータセットに対してPROFUMOを適用し、PROFUMOの課題時fMRIに対する有用性を評価した。その結果、安静時fMRIで抽出されるモードを課題時fMRIにおいてもPROFUMOが抽出できることを確認し、得られた出力は課題時fMRI中の行動を反映することが示唆された。

2. フェルモキシトール造影MRIによるマカクの脳における血管のレイヤー構造の解明

所属研究室内では脳の層別ミエリンマッピングにより、脳の層構造の特徴を全脳で明らかにする試みがなされてきた。本研究では同様のことを血管構造においてもできないかを検討した。これにより脳血管における神経解剖学的・発生的な知見が深まると期待される。木村は解析パイプラインの作成と統計解析に携わっており、eLifeへの受理に至った。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. [Kimura, I.](#), Hayashi, M.J., Amano, K.: Immediate effect of quadri-pulse stimulation on human brain microstructures and functions. *Imaging Neuroscience*, in print*
2. [Kimura, I.](#), Bijsterbosch, J.D., Glasser, M.F., Hayashi, T.: Dynamics of functional modes represent behavior during task fMRI. *Aperture Neuro*, 4, 2852–2853 (2024)*

3. Autio, J.A., [Kimura, I.](#), Ose, T., Matsumoto, Y., Ohno, M., Urushibata, Y., Ikeda, T., Glasser, M.F., Van Essen, D.C., Hayashi, T.: Mapping vascular network architecture in primate brain using ferumoxytol-weighted laminar MRI. *eLife*, Accepted*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Joonas A. Autio, [Ikko Kimura](#), Takayuki Ose, Yuki Matsumoto, Masahiro Ohno, Yuta Urushibata, Takuro Ikeda, Matthew F. Glasser, David C. Van Essen, Takuya Hayashi: Charting vascular network architecture in primate brain using ferumoxytol-weighted laminar MRI, *International Society for Magnetic Resonance in Medicine 2024*, Singapore, May(2024)

(招待講演)

1. 木村一皓：経頭蓋磁気刺激の基礎とその応用，ミユキ技研脳科学セミナー2024，大阪，7月(2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. [Ikko Kimura](#), Janine D. Bijsterbosch, Matthew F. Glasser, Takuya Hayashi: Dynamics of functional modes represent behavior during task fMRI, *Organization for Human Brain Mapping 2024*, Seoul, June(2024)
2. 木村一皓, Janine D. Bijsterbosch, Matthew F. Glasser, 林拓也：機能的モードのダイナミクスは課題時fMRI中の行動を反映する，第26回日本ヒト脳機能マッピング学会，宇都宮，2月(2024)
3. 杉本匡紀，[木村一皓](#)，林正道：空間及び時間弁別能力の個人差を反映する神経解剖学的基盤，*NEURO2024*，福岡，7月(2024年)
4. Masakazu Sugimoto, Ikko Kimura, Masamichi J. Hayashi: Dissociable Neuroanatomical Correlates of Spatial and Temporal Processing, *Organization for Human Brain Mapping 2024*, Seoul, June(2024)
5. 杉本匡紀，[木村一皓](#)，林正道：Transcranial static magnetic stimulation dissociates the causal involvement of the parietal cortex in spatial and temporal processing, *脳と心のメカニズム 冬のワークショップ2024*，北海道，1月(2024年)

XXIII-043 大規模神経活動記録により発見されたハブ細胞の分子基盤の解明

Revealing the Molecular Basis of Hub Neurons Discovered by Large-Scale Neural Activity Recordings

研究者氏名：大本 育実 Ikumi OOMOTO

受入研究室：脳神経科学研究センター

触覚生理学研究チーム

(所属長 村山 正宜)

脳には機能的順位の高いハブ細胞が存在する。このハブ細胞がどのような分子基盤を持っているのかを明らかにすることが本研究の目的である。本研究では、ハブ細胞の関与が予測される記憶の固定化に着目し、マウスが床面情報を固定化している睡眠中に、数万細胞の神経活動を同時記録できる広視野2光子カルシウム(Ca^{2+})イメージングを行い、ネットワーク解析からハブ細胞を同定していく。遺伝子発現解析を実施することでハブ/非ハブ細胞間で分子的な差があるかを探索する。本研究の遂行は、ネットワーク生理学と分子遺伝学との融合を先導し、新しい神経科学分野の開拓につながると期待する。

本年度は、(1) 睡眠・覚醒時や記憶固定化の際に特異的に起こるネットワーク上の変化の解析と(2) 大規模神

経活動記録を実施した細胞群を固定脳切片内で同定するための技術開発の改良を行った。

●口頭発表 Oral Presentations

1. 大本育実, 村山正宜.: “大脳皮質における効率的なネットワーク構造の創発機構”, 学術変革領域(A)「動的コネクトームに基づく脳機能創発機構の解明」キックオフミーティング, 福岡, 2024年4月
2. 大本育実, 村山正宜.: “ノンレム睡眠中のマウスにおける単一細胞解像度の機能ネットワークは、空間的に混在したモジュールに分離される”, 大阪大学大学院生命機能研究科・CiNetセミナー, 大阪, 2024年4月
3. 大本育実, 村山正宜.: “覚醒/睡眠に関連した広域ネットワーク構造”, 第30回脳神経医学専攻若手研究者発表会, 東京, 2024年7月

XXIII-044 Hunger Memory: How Brain Oscillations Translate Energy Homeostatic Status

Name: Yijun ZHOU

Host Laboratory: Laboratory for Circuit and Behavioral Physiology
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head: Thomas John MCHUGH

Central regulation of food intake is crucial for animal survival. Interoception, or the sensing of internal states, is essential in this regulation, allowing the body to adjust behaviors to meet physiological needs. This process supports both homeostatic balance and hedonic adaptation by guiding responses to hunger and satiety—subjective feelings that are central to energy homeostasis. However, feeding behavior cannot be fully explained by a simple feedback loop between hunger and eating; cognitive influences also play significant roles, as evidenced by multiple eating disorders. Therefore, a primary question in our research is whether internal states, such as hunger, can serve as cues influencing feeding behavior in ways comparable to external stimuli like food odor or taste. During FY2023, we successfully trained mice to discriminate between two internal cues: hunger versus satiety. We then asked which cue would dominate

when internal and external signals conflicted. A parallel situation arises in everyday life—for instance, encountering highly palatable food right after a large meal. Do we heed external palatability or internal satiety? To investigate this, we employed a conditioned place preference task, training mice to associate one chamber with hunger and another with satiety. We then presented an external cue indicating hunger while the mice were actually sated and asked them to choose a “poke” position. Surprisingly, their behavior was guided more by the external cue than by their actual internal state, which is consistent with the latest human feeding behavior theory that exteroceptive actually dominates.

Next, by using Cre and Flp recombinases in combination with a transsynaptic virus, we mapped the inputs to POMC neurons in the arcuate nucleus and confirmed a hippocampal-hypothalamic

projection. Perturbing this projection influenced both the feeding and learning aspects of the task. Fiber photometry recordings of populational calcium activity in postsynaptic POMC neurons revealed that these neurons not only became active following food intake (as previously studied) but also exhibited anticipatory activity before meals (food-anticipatory activity, FAA). Inhibiting or exciting neurons by DREADD in the dorsal subiculum altered this FAA-related activity. These findings suggest that the identified neural pathway plays a significant role in internal state-driven feeding behavior and underscore

the importance of this circuit for flexible associative memory retrieval based on internal contextual information. We propose that understanding this form of “internal state memory” brings us one step closer to promoting healthier eating behaviors.

● Poster Presentations

Conferences

1. Zhou Yijun, Thomas McHugh. A hippocampal-hypothalamic circuit underlying interoceptive energy homeostasis., Neuro2024, Fukuoka Convention Center, Fukuoka, Japan

XXIII-045 クローン性造血の解析を通じた疾患リスクの精緻化： ゲノム情報から環境要因の蓄積の評価

Accurate Disease Risk Estimation Considering Clonal Hematopoiesis: Evaluating Accumulation of Environmental Factors From Genomic Information

研究者氏名：碓井 喜明 Yoshiaki USUI

受入研究室：生命医科学研究センター
基盤技術開発研究チーム
(所属長 桃沢 幸秀)

これまで様々な遺伝的要因を用いて多くの疾患のリスクモデルが構築されてきている。だが、疾患リスクには遺伝的要因のみならず環境要因も影響しており、双方の影響を考慮することで疾患のリスクモデルがより精緻なものになることが想定される。しかし、ヒトを取り巻く環境要因は種類が多彩な上、複雑に絡み合っていることもあり、大規模かつ定量的な評価は困難であることが多い。更に、そのような評価が可能であったとしても、それらは私たちが存在として認識することが可能なものに限られている。

そのような中、加齢とともに体細胞変異が血液細胞において拡大するクローン性造血の存在が近年明らかになっている。クローン性造血は造血器疾患のみならず、心血管疾患など様々な疾患のリスクと関連することが知られている。更に、加齢とともに増加するクローン性造血は、個々人が曝露されてきた様々な環境要因が蓄積されてきたマーカーともみなすことができる。しかし、国内外問わずこれまでのクローン性造血の評価はシーケンシング量が限られる全ゲノムシーケンシングや全エクソンシーケンシングを中心としているため、変異アリル頻度が小さな変異に関しては想定される変異の多くは検出されておらず、クローン性造血の存在は過小評価されてきた。また、小さな変異を詳細に評価することができても技術的な課題もあり、疫学的評価に必要な大規模なデータ基盤は構築されてこなかった。本研究では、遺伝的要因ならびに環

境要因の双方が複雑に関わっているクローン性造血を高解像度かつ大規模に評価することを通じて、疾患のリスクモデルの精緻化ならびに疾患の病態解明に寄与することを目指す。

2024年度は、2023年度に確立したクローン性造血の実験系・データ解析系を用いて数万人規模での解析を継続して行った。その結果、従来のシーケンシングデータで想定されるより多くのクローン性造血の保持者の同定に成功した。その結果を基に、日本人特有の遺伝・環境要因の交互作用や変異の選択の特徴などを明らかにすることができた。特に、クローン性造血の臨床的意義は遺伝子によって異なっており、従来知られている疾患に加え、より広い範囲において臨床的意義をもたらしていることが明らかとなった。今後は引き続き解析を行い、より詳細なクローン性造血の意義の解明や、従来のリスクモデルと組み合わせることでリスクの精緻化を目指してゆく予定である。

●誌上発表 Publications

(総説)

1. 碓井喜明.: “大規模ゲノム解析を通じたリンパ腫の遺伝的要因の評価”, 医学のあゆみ, 289 9 618-622 (2024)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Usui Y., Endo M., Iwasaki Y., Iijima H., Matsuda

K., and Momozawa Y.: "Landscape of clonal hematopoiesis in *TP53*: evaluation among 140k Japanese individuals", The 86th Annual Meeting of the Japanese Society of Hematology, Kyoto, Japan, Oct. (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Usui Y., Endo M., Iwasaki Y., Iijima H., Matsuda K., and Momozawa Y.: "Large-scale evaluation of the

clinical impact of clonal hematopoiesis in *TP53*", The 83rd Annual Meeting of the Japanese Cancer Association, Fukuoka, Japan, Sep. (2024)

2. Usui Y., Iijima H., Endo M., Aoi T., Iwasaki Y., Nakagawa H., Matsuda K., and Momozawa Y.: "Landscape of clonal hematopoiesis among East Asian individuals aged 80 years and older", American Society of Human Genetics 2024, Denver, USA, Nov. (2024)

XXIII-046 新規な凝集体構造プロファイリングの技術開発によるタウ凝集体の構造伝播機構解明

Understanding propagation mechanism of distinct tau aggregates by developing a novel aggregate profiling technology

研究者氏名：佐野 俊春 Toshiharu SANO
受入研究室：脳神経科学研究センター
タンパク質構造疾患研究チーム
(所属長 田中 元雅)

アルツハイマー病の蓄積タンパク質であるタウの病理は疾患進行によるシナプス消失や認知機能障害と相関する。また、アルツハイマー病患者脳ではタウ病理が現れる前からタウオリゴマーがシナプスに蓄積し、動物モデルや細胞モデルにおいては異常タウの蓄積がシナプス機能障害やシナプス消失を引き起こす。これらのことから、タウはシナプスに対する毒性を有すると考えられているが、そのメカニズムに関しては不明な点が多い。ポストシナプスの膜直下にはシナプス後肥厚 (Postsynaptic Density, PSD) と呼ばれる巨大なタンパク質複合体が存在するが、PSDはタンパク質の相分離によって形成されと考えられている。本研究課題ではポストシナプスにおける液液相分離のタウによる攪乱がシナプス障害に寄与しているとの仮説を立て、タウやポストシナプス関連分子の細胞内分布・動態を明らかにし、タウによるシナプス障害の分子機序解明へ繋げることを目的とする。また、タウの翻訳後修飾や会合状態、立体構造によって、シナプスに与える影響が異なるかも明らかにする。

本年度は主に細胞を用いて、シナプスタンパクの相分離について調べることを試みた。青色光に反応して二量体を形成するタンパクであるCRY2とPSD95の融合タンパクをHEK293細胞に発現させることで、光照射によりPSD95のクラスターリングを誘導できるようになった。レンチウイルスを用いて、この融合タンパクを初代培養神経細胞に発現させることも試みたが、発現量が低く、神経細胞での挙動は確認できていないという課題が残った。

また、ポストシナプスの足場タンパクであるSynGAP1の切断体をPSD95と共発現させることでも細胞内におけるPSD95のクラスターリングを誘導できた。これら2種の細胞系に対し、タウの共発現やリポフェクションによる細胞内へのタウの導入を行ったところ、タウはPSD95のクラスターとは共局在しないという結果が得られた。また、タウ線維を細胞内に導入してもPSD95のクラスターは消失しなかった。これらの結果はin vitroのデータとは異なっていて、in vitroと細胞では環境が異なるということ、および、細胞内においてはタウとPSD95の両者と相互作用する分子がタウのシナプスへの局在を仲介している可能性が示唆された。また、2種の細胞系に1,6-ヘキサンジオール処理を行ってもPSD95のクラスターは確認されたため、PSD95のクラスターは1,6-ヘキサンジオール抵抗性を持つと考えられる。

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Toshiharu Sano, Shingo Tamai, and Motomasa Tanaka.: "Effects of tau on phase separation in postsynaptic density", 学術変革領域(A)クロススケール新生物学第四回領域会議, 仙台市, 5月 (2024)

2. Toshiharu Sano, Shingo Tamai, and Motomasa Tanaka.: "Effects of tau on phase separation in postsynaptic density", The 3rd Brain Medical Science Collaboration Division Poster Session, Wako, September (2024)

XXIII-047 転写因子の機能異常による免疫疾患の分子病態解明と治療法の創出

Elucidation of molecular pathogenesis and development of therapeutic strategies for the immune-mediated disorders caused by the dysfunction of transcription factors.

研究者氏名：山下 基 Motoi YAMASHITA
受入研究室：生命医科学研究センター
免疫転写制御研究チーム
(所属長 谷内 一郎)

IKZF3遺伝子の生殖細胞系列のヘテロ接合性疾患原性バリエーションによるAIOLOS異常症は、ヘテロ二量体形成を介したIKAROSの機能障害が分子病態であることが知られる。本研究では、スプリット型GFPの系を用いAIOLOS-IKAROSヘテロ二量体の特異的に可視化する系を樹立し、ヘテロ二量体化を特異的に阻害する分子の探索やCRISPR/Cas9スクリーニングを用いたAIOLOS-IKAROSヘテロ二量体化を介する分子(遺伝子)の同定を行う。また、スプリット型近接タンパク質ビオチン標識法を確立し、AIOLOSとIKAROS間でのホモ二量体、ヘテロ二量体特異的に会合する分子を同定し、AIOLOS-IKAROSヘテロ二量体化特異性を制御する機構を明らかにする。また、先天性免疫異常症患者に同定された病原性の不明な転写因子ミスセンスバリエーションの病原性を評価するために疾患モデルマウスを作成して疾患原性の証明および分子病態の解明を行う。

本年度はAIOLOS、IKAROSダブルノックアウトB細胞株を対象として、レンチウイルスを用いたIKAROS-AIOLOS tripartite GFP系の構築を試みた。このレンチウイルスを用いたB細胞株への遺伝子導入後にはGFPの再構成が起きず、他の導入方法を検討している。

また、先天性免疫異常症家系に同定された病原性不明の転写因子ミスセンスバリエーションの病原性解明に関しては、ノックインマウスを用いて成体マウス、加齢マウスの免疫学的表現型解析を継続して行った。その他、マウスモデルを用いた先天性免疫異常症の分子病態解明を目的として、IKAROS異常症の疾患原性ミスセンスバリエーションをノックインしたマウスモデルの造血幹細胞のex vivo培養と表現型解析を行なった。このIKAROS異常症マウスモデルでは培養に伴い造血幹細胞分画が減少することが明らかとなった。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Yamashita M., Ogawa C., Zhang B., Kobayashi T., Nomura A., Barker C., Zou C., Yamanaka S., Hayashi K., Shinkai Y., Moro K., Fargarasan S., Imami K., Seita J., Shirai F., Sawasaki T., Kanemaki MT. and Taniuchi I.: "Cell-type specific, inducible and acute degradation of targeted protein in mice by two degron systems". *Nat Commun.*, 15 10129 (2024)*
2. Yamashita M., Morio T.: "AIOLOS-Associated Inborn Errors of Immunity". *J Clin Immunol.* 44 128 (2024)*

XXIII-048 単層薄膜を利用した低エネルギーアト秒電子ビームの生成と原子運動量分光への応用

Production of Low Energy Attosecond Electron Beams with a Single Layer Material and Its Application for Atomic Momentum Spectroscopy

研究者氏名：立花 佑一 Yuichi TACHIBANA
受入研究室：光量子工学研究センター
超短パルス電子線科学理研白眉研究チーム
(所属長 森本 裕也)

物質の機能性を司る原子や電子の動きを正確に捉えるにはフェムト秒やアト秒という短い時間領域で物質を観察する必要があり、それに向けた様々な技術開発が行われてきた。特に近年では、数十～数百ナノメートル厚の薄膜上で電子線にレーザー光を作用させることでアト秒のパルス幅をもつ電子線の生成が可能となっており、その

応用に期待が高まっている。しかし、現在生成可能なアト秒電子線には、薄膜での散乱や吸収による電子線流束の減少を防ぐために100 keV程度の高エネルギー電子が用いられており、気相試料や単層物質など密度が低い標的に対する実験には適さない。そこで本研究課題では単層薄膜を利用した電子線時間圧縮技術を確立し、電子

線強度を損なうことなく5keV程度の低エネルギーアト秒電子線の生成を実現する。さらにその電子線を原子運動の直接観測法である原子運動量分光と組み合わせることで、化学反応において原子が動きだす瞬間を捉え、アト秒の極限的な時間分解能で物質の反応性・機能性を解明することを目指す。

前年度は上記目的に必要な電子エネルギー分析器の設計を行い、今年度はその立ち上げを行った。具体的には、サイクロトロン運動を利用して電子のエネルギーを分析する磁場プリズム、エネルギー分析後の電子スペクトル像を検出器に拡大投影する八極子レンズ、磁場プリズムへの電子の入射条件を制御する2つのディフレクターからなる分析器を自ら立ち上げた。性能評価実験としてカーボン薄膜に対する電子エネルギー損失分光実験を行い、エネルギー分解能は目標値の1eVより2桁ほど悪いものの理論予想と矛盾のないスペクトルの測定に成功した。目標値よりも実測の分解能が悪い主な原因は、磁場プリズムを動作させるための直流電流の揺らぎと考えられ、安定性の高い電源の導入で分解能が改善する見通しである。また、電子線の収束性を高めることでエネルギー分解能を向上させる八極子収差補正器の設計・製作も終了、次年度の実験のための準備が整いつつある。最終年度である次年度はまず、電子線の時間圧縮実験に取り組

み低エネルギーアト秒電子線の生成を実現する。その後、グラフェン薄膜などに対して、アト秒電子線をプローブとしたポンププローブ実験を行う。反応を開始させるポンプレーザーパルスとプローブ電子線の時間差を掃引しながら散乱電子のエネルギー分析を行うことで反応中に原子運動が高速に変化する様を捉える。

●誌上発表 Publications

1. 立花佑一, 森本裕也: “静磁場型電子エネルギー分析器の設計指針”, しょうとつ, 21, R003 (2024).

●口頭発表 Oral Presentations

1. 立花佑一, 森本裕也: “時間分解電子エネルギー損失分光のための分析器開発” 新領域開拓課題「一分子の科学」合同合宿セミナー, 沼津 10月 (2024).
2. 立花佑一, 原子衝突学会セミナー, 船橋, 3月 (2025).(発表予定)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 立花佑一, 森本裕也: “収差補正器付き電子エネルギー損失分光装置の開発” 原子衝突学会第49回年会, 奈良, 8月 (2024).
2. 立花佑一, 森本裕也: “時間分解電子エネルギー損失分光のための分析装置の開発” 第85回応用物理学会秋季学術講演会, 新潟, 9月 (2024).

XXIII-049 Adaptive Low-rank Tensor Network Decomposition: Theory and Application

Name: Yuning QIU

Host Laboratory: Tensor Learning Team Generic Technology Research Group
RIKEN Center for Advanced Intelligence Project

Laboratory Head: Qibin ZHAO

Adaptive low-rank tensor network decomposition represents a fundamental approach in computational mathematics and machine learning, offering powerful tools for analyzing and processing high-dimensional data structures. This research area spans critical domains including tensor network structure optimization, generalized decomposition methods for complex regression tasks, and practical applications in neural network compression. The field has seen growing interest due to its ability to address fundamental challenges in data representation and processing efficiency. These approaches have demonstrated particular promise in applications ranging from quantum physics simulations to modern machine learning, establishing their versatility and practical importance across scientific disciplines.

In our research, one of the key research achievement is the development of a Bayesian Tensor Network Structure Search framework, which addressed the challenges of parameter tuning and structure optimization in tensor network learning. Unlike traditional methods that rely on manual adjustments, our approach utilized Bayesian modeling and the Generalized Inverse Gaussian (GIG) distribution to dynamically promote low-rank representations. This fully data-driven method enabled the automatic discovery of compact tensor structures, making it particularly effective for noisy or incomplete datasets. To enhance computational efficiency, we designed a Markov Chain Monte Carlo (MCMC) algorithm for posterior sampling, which significantly outperformed existing state-of-the-art methods in tensor completion

tasks. These results showcased the power and adaptability of BayesTNSS in addressing complex data scenarios.

In tackling the combinatorial distribution shift (CDS) problem in multi-output regression, we introduced a novel framework based on Functional Tensor Singular Value Decomposition (Ft-SVD). The Ft-SVD extended classical tensor SVD to continuous and infinite feature domains, providing a robust foundation for analyzing complex multi-output functions. Building on this framework, we developed a Double-Stage Empirical Risk Minimization (ERM-DS) algorithm that leveraged spectral properties to improve generalization to unseen data combinations. By formulating the regression problem as a low-rank tensor estimation task, our approach addressed critical challenges in applications such as healthcare and climate modeling. This work not only advanced theoretical understanding but also provided practical tools for improving the robustness of multi-output regression models under CDS conditions.

Furthermore, we explored the application of tensor decomposition techniques in lightweight convolutional neural networks (CNNs), particularly for lunar impact crater detection. We proposed a tensor train decomposition-based approach to compress convolutional kernels in the TYOLO network, achieving a 39x reduction in parameters while improving detection accuracy. This lightweight model demonstrated its potential for deployment in resource-constrained environments, such as spacecraft with limited computational resources. Our results underscored the practicality of tensor network techniques for addressing real-world challenges.

In summary, our work has advanced both theoretical foundations and practical applications of tensor networks through Bayesian structure optimization, enhanced multi-output regression frameworks, and efficient neural network compression techniques, demonstrating the versatility of tensor methods across machine learning and scientific computing domains.

● Publications

Papers

1. [Qiu Yuning](#), and Liang Yi, Chen Xinqi, Zhang Zhe, Xie Shengli and Zhou Guoxu (2024). Lightweight tensorial convolutional neural network for lunar impact crater detection. *Advances in Space Research*, 74(1), 518-527.

2. Wang Andong, [Qiu Yuning](#), Bai Mingyuan, Jin Zhong, Zhou Guoxu and Zhao Qibin Generalized Tensor Decomposition for Understanding Multi-Output Regression under Combinatorial Shifts. In *The Thirty-eighth Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024)*.
3. Huang Zhenhao, [Qiu Yuning](#), Chen Xinqi, Sun Weijun and Zhou Guoxu (2024). Bayesian Robust Tensor Ring Decomposition for Incomplete Multiway Data. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*.
4. Zeng Junhua, [Qiu Yuning](#), Ma Yumeng, Wang Andong and Zhao Qibin (2024). A Novel Tensor Ring Sparsity Measurement for Image Completion. *Entropy*, 26(2), 105.
5. Zeng Junhua, Zhou Guoxu, [Qiu Yuning](#), Li Chao and Zhao Qibin (2024). Bayesian tensor network structure search and its application to tensor completion. *Neural Networks*, 175, 106290.
6. Huang Haonan, Zhou Guoxu, Zheng Yanghang, [Qiu Yuning](#), Wang Andong and Zhao Qibin (2024). Adversarially Robust Deep Multi-View Clustering: A Novel Attack and Defense Framework. In *Forty-first International Conference on Machine Learning (ICML 2024)*.

● Oral Presentations

Invited Talk

1. Qiu Yuning, Guaranteed Robust Tensor Decomposition and its Applications, Southeast University, Nanjing, June 5, 2024.

● Poster Presentations

Conferences

1. Wang Andong, [Qiu Yuning](#), Bai Mingyuan, Jin Zhong, Zhou Guoxu and Zhao Qibin Generalized Tensor Decomposition for Understanding Multi-Output Regression under Combinatorial Shifts. In *The Thirty-eighth Annual Conference on Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2024)*.
2. Huang Haonan, Zhou Guoxu, Zheng Yanghang, [Qiu Yuning](#), Wang Andong and Zhao Qibin (2024). Adversarially Robust Deep Multi-View Clustering: A Novel Attack and Defense Framework. In *Forty-first International Conference on Machine Learning (ICML 2024)*.

XXIII-050 定理証明支援系を用いた組合せ範疇文法の形式化

Formalization of Combinatory Categorical Grammar Using a Theorem Proving Support System

研究者氏名：谷口 雅弥 Masaya TANIGUCHI
受入研究室：革新知能統合研究センター
目的指向基盤技術研究グループ
自然言語理解チーム
(所属長 乾 健太郎)

日本語や英語などに代表される自然言語の文法規則を生成文法理論及び形式言語理論にもとづき数理論理学上に再現し、その言語の特徴を定理証明支援系によって検証可能なものにするを目的とした。ヒトは自然言語の文の文法的正誤（文法性）を自身の経験にもとづいて直ちに判断することができる。言語学ではこの能力を内省的文法性判断と呼ぶ。本研究は数理論理学上の性質を通じてこの内省的文法性判断の理論的根拠を与える。本研究は組合せ範疇文法という文法理論を用いて数理論理学上で各文法規則に対して分析を行った。たとえば英語では自動詞Vとは名詞句NPを受けて文Sとなると語句として定義することができる。このV、NP、Sの関係をVはNPならばSであるという論理式に還元する。この形式化によって型の繰り上げという現象が内省的文法性判断の障害となっていることが明らかになった。先行研究は型の繰り上げに対して対象言語に依存する制約を加えることで障害を回避していた。しかし、この制約は文法自体の生成能力の推定が困難になる課題がある。

本研究は型の繰り上げ規則に対して制約を加えることなく以下の方法で対応した。シーケント計算とくに部分構造論理という証明論的手法に還元し、部分構造論理上の式の複雑さ、および構造化規則や推論規則の加除によって、体系の証明能力を調整し、形式言語体系とちょうど対応する表現力を持つ証明体系を発見した。とくに、式

の複雑さを調整することで、既存の結果であるランベック計算（部分構造論理の一つ）が文脈自由文法に対応するというに加えて、式の次数を1に制限すると正規文法、そして線形文法に対応することを示した。そしてその論理体系の証明判定の手続が決定可能であることを示すことで、内省的文法性判断の難しさを計算可能性理論として表現する手段を与えた。今後は、さらに繊細な文法体系であるstar-free言語へ深化させ言語と論理の対応関係を順次解明していく。

●口頭発表 Oral Presentations

(国際学会・査読あり)

1. Taniguchi M.: "Substructural Logics Weaker than Commutative Lambek Calculus."
2. Topology, Algebra, and Categories in Logic, July 2024, Balcerona, Spain.

(国内学会・査読なし)

1. Taniguchi M.: "Lambek Calculus and Regular Grammar." 第41回 記号論理と情報科学 研究集会, 8月, 宮城, 日本
2. Taniguchi M.: "ランベック計算と文脈自由文法・線形文法・正規文法." 計算・言語・論理の研究集会2024, 9月, 千葉, 日本
3. Taniguchi M.: "Product-free Lambek 計算より弱い論理." 数学基礎論若手の会, 10月, 福島, 日本

XXIII-051 あらゆる植物種でミトコンドリアゲノム編集を可能とする、植物普遍的なボロン酸輸送体を標的とした革新的メッセンジャー RNA 送達システムの創成
Development of an Innovative Messenger RNA Delivery System for Mitochondrial DNA Editing in Any Plant by Targeting Common Boronic Acid Transporters

研究者氏名：吉永 直人 Naoto YOSHINAGA
受入研究室：環境資源科学研究センター
バイオ高分子研究チーム
(所属長 沼田 圭司)

植物のミトコンドリアゲノムには、呼吸に必要な遺伝子群に加えて、細胞質雄性不稔 (CMS) に関わる遺伝子が含まれている。そのため、ミトコンドリアゲノム編集技術は作物学、生物学において必須な技術であるが、ミトコンドリアへ効率的に生体分子を送達することが困難なため、優れたミトコンドリアゲノム編集技術は確立されていない。そこで本研究では、あらゆる植物に発現しているボロン酸輸送体を標的として、フェニルボロン酸 (PBA) リガンド搭載ナノ粒子を設計することで、様々な植物でのミトコンドリアゲノム編集技術の確立を目指した。

昨年度の解析から、酸解離定数 (pKa) の高い PBA を修飾したナノ粒子がモデル植物シロイヌナズナに対して最も高い遺伝子発現を示し、ボロン酸輸送体が非電荷型 PBA を特異的に認識することが示唆された。この pKa の高い PBA リガンドが様々な植物・藻類へ適用可能か検証するため、単子葉植物のイネおよび海藻類 (褐藻) に対しても核酸送達を試みた。その結果、イネの根ではシロイヌナズナと同様に、pKa の高い PBA リガンドを持つナノ粒子が効率的な遺伝子発現を示した。興味深いことに、褐藻では pKa の低い PBA リガンドを搭載したナノ粒子が効率的に取り込まれることが確認された。これらの結果から、ボロン酸リガンドを利用した送達システムが広範な植物種に適用可能であることが明らかになった。今後、PBA リガンドをミトコンドリア移行性ペプチド末端に修飾し、植物ミトコンドリアへの核酸送達効率を向上させることを目指す。さらに、ミトコンドリアゲノム編集の実証実験として、シロイヌナズナの ATP 合成酵素遺伝子 (atp-6) を標的に TALEN システムを用いた遺伝子編集を試み、変異導入の効率を次世代シーケンシング (NGS) 解析で評価する。

本研究により、PBA リガンドを活用した核酸送達技術

の有効性が示され、ミトコンドリアゲノム編集技術の実現に向けた重要な基盤が確立された。今後は、より多様な植物種への適用を進め、農業や環境分野への応用展開を目指す。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Yoshinaga N.*, Numata K.*: "Poly (A) Tail Length of Messenger RNA Regulates Translational Efficiency of the Mitochondria-Targeting Delivery System.", ACS Biomaterials Science and Engineering, 10, 10, 6344-6351 (2024)

●口頭発表 Oral Presentations

1. 吉永直人, "ミトコンドリア標的遺伝子送達システムの開発", 第1回 Pr²研究会, 京都大学, 2025年3月
2. 吉永直人, 宮本昂明, 小田原真樹, 沼田圭司, "ミトコンドリアでの多重タンパク質発現を可能とするミトコンドリア標的遺伝子送達技術の開発", 第23回日本ミトコンドリア学会年会, 順天堂大学, 2024年11月
3. 吉永直人, 沼田圭司, "ミトコンドリアにおける外因性 mRNA 発現効率の最大化", 第34回バイオ高分子シンポジウム, 東京工業大学, 2024年8月
4. 吉永直人, "フェニルボロン酸を用いた高機能核酸送達システムの開発 - 動物から植物まで -", 第73回高分子学会年次大会, 仙台国際センター, 2024年5月

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Yoshinaga N., Miyamoto T., Odahara M., Toyooka K., Su'etsugu M., Yoshida M., and Numata K., "Multiple Gene Expression in the Mitochondria Using a Membrane Anchoring Peptide to Restore Mitochondrial Functions", 2024 Mitochondria and Chloroplasts Gordon Research Conference, Rey Don Jaime Grand Hotel in Barcelona, Spain, July 2024

XXIII-052 Precisely Controlled Anisotropic Assembly of Colloidal Quantum Dots: Size, Energy Level, and Chemical Composition

Name: Retno MIRANTI

Host Laboratory: Emergent Supramolecular Materials Research Team
RIKEN Center for Emergent Matter Science

Laboratory Head : YongJin PU

Managing energy transfer in complex systems like quantum dots (QDs) is crucial for developing energy harvesting technologies. Creating a QDs assembly with adjustable energy transfer direction is one of key to progress in this area. This study centers on developing anisotropic assemblies in colloidal QDs, with precise control over the size, energy level, and chemical composition of each layer. This year, we have successfully demonstrated a symmetry-broken electronic state and anisotropic properties in cubic perovskite nanocrystals (PeNCs) by depositing them on chemically modified substrates. In the PeNCs monolayer, the four crystal facets perpendicular to the substrate are enclosed by the NC itself, while the remaining two facets are parallel to the substrate, with one facing air and the other facing the substrate. Consequently, the symmetry of cubic PeNCs can be disrupted by chemical interactions with the substrate. The angle-resolved absorption and photoluminescence (PL) spectra of PeNCs on 3-aminopropyltrimethoxysilane (APS)-treated substrates revealed energy shifts with varying detection angles, indicating the presence of anisotropic electronic states in the cubic NCs in both the in-plane and out-of-plane directions of the substrate. Conversely, the silanization of the substrate with long-chain alkyl silane coupling agents, such as octadecyltrimethoxysilane (ODS), showed no angle dependence in the absorption and PL spectra, thus indicating the absence of anisotropy in the PeNCs monolayer. We determined the orientation of the transition dipole moments (TDM) in PeNCs monolayers on various surface-modified substrates through experiments and simulations. Vertical TDMs were identified in the densely packed PeNCs on the APS-treated substrate. The amino groups of the APS-treated substrate selectively altered the facet of the cubic PeNCs facing the substrate. These findings suggest that the symmetry of the electronic states and orientation of the TDMs in cubic PeNCs can be manipulated through surface modification of the substrate. Our study results could advance

the development of high-coverage NC films with controllable TDM orientations for applications in various electronic devices.

We parallelly prepared anisotropic assemblies of perovskite quantum dots (QDs) by precisely controlling their size. Perovskite QDs of various sizes were synthesized using the hot injection method, allowing for the tuning of absorption and emission properties through size variation. A self-assembled monolayer of perovskite nanocrystals (NCs) was fabricated using a dip-coating technique, with packing density optimized for each QD size by adjusting solution concentration and deposition conditions. Optical measurements were conducted on several configurations such as bilayer, multilayer, and mixed of several sizes. Initial findings of mixed sized film indicate a significant enhancement of photoluminescence (PL) intensity in large QDs accompanied by drastic drop of small QDs PL, suggesting energy transfer from small to large QDs. Future work will focus on developing anisotropic assemblies of QDs, alongside extensive analysis of their energy transfer dynamics and photophysical properties as well as their optoelectronic devices.

● Publications

Papers

1. Enomoto K., Miranti R., Liu J., Okano R., Inoue D., Kim D.G., Pu Y.J.: "Anisotropic Electronic Coupling in Three-Dimensional Assembly of CsPbBr₃ Quantum Dots", *Chem. Sci*, 15, 13049 (2024).
2. Miranti R., Komatsu R., Enomoto K., Inoue D., Pu Y.J.: "Symmetry-Broken Electronic State of CsPbBr₃ Cubic Perovskite Nanocrystals", *J. Phys. Chem. Lett*, 15, 10009 (2024).

● Oral Presentations

Conferences

1. Miranti R., Komatsu R., Enomoto K., Inoue D., Pu Y.J.: "Anisotropic Emission of Self-Assembled Cubic Perovskite Nanocrystals", The JSAP Autumn Meeting, Niigata, Japan, September (2024).

基礎科学特別研究員
2024 年度採用者

XXIV-001 局所コンパクト群上の畳み込みに関する不等式と表現論・調和解析の関連

Inequalities about the Convolution on Locally Compact Groups and the Relation with the Representation Theory and Harmonic Analysis

研究者氏名：里見 貴志 Takashi SATOMI

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

局所コンパクト群・Lie群上の調和解析・関数解析・表現論に関する研究を行い、とくに局所コンパクト群上のYoungの畳み込み不等式の精密化の研究を行った。この不等式は関数解析学の基本的な道具であり、この不等式が最適になるような定数(最適定数)は可換群上ではBeckner(1975)により明示的に与えられている。一方、特殊線型群をはじめとする最も基本的なLie群でさえ、最適定数は決定されていない。この最適定数の決定が本研究目標の一つである。この研究は例えば次のような様々な理論と関係があることが知られている：Hausdorff-Youngの不等式(調和解析)・Brascamp-Liebの不等式(実解析)・Brunn-Minkowskiの不等式(幾何)・不確定性原理(量子力学)・エキスパンダーグラフ(グラフ理論)。これらを含む様々な分野へとの関連付けも本研究の目的である。

本年度は、Youngの畳み込み不等式に関する局所コンパクト群とその閉部分群の関係についていくつかの講演を行った。Klein-RussoはYoungの畳み込み不等式の局所コンパクト群 G 上への一般化を与え、この不等式を最適にするような両辺の比を G 上のYoungの畳み込み不等式の最適定数と呼ぶ。このとき、 G の任意の閉部分群 H に対し G の最適定数は H の最適定数以下となることを証明した。この不等式により、連結線型Lie群や連結可解Lie群などの半単純成分の中心が有限群となるような連結Lie群 G に対し、 $r(G)$ を G の極大コンパクト群の次元とすると G の最適定数は $\dim G - r(G)$ 次元のEuclid空間の最適定数以下となることが従う。

他にも、Youngの不等式に関連する次の結果を与えた：

(1) Youngの不等式の一般化であるBrascamp-Liebの不等式の等号成立条件はKac-Bernsteinの定理と関連している。このKac-Bernsteinの定理について、1次元連結Lie群の場合に確率測度から複素測度へ拡張した。

(2) 上述のYoungの畳み込み不等式に関する局所コンパクト群とその閉部分群の関係は、Youngの不等式の等質空間上への一般化と解釈できると考えている。このことを確かめるため、等質空間上の押し出し測度とモジュラー関数に関する性質を調べ、論文としてまとめた。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Satomi T.: "Pushforward measures on homogeneous spaces of non-unimodular groups and properties of modular functions", Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, 印刷中*

(総説)

1. 里見貴志：“Youngの畳み込み不等式の最適定数に関する局所コンパクト群とその閉部分群の関係”，京都大学数理解析研究所講究録, 2297, 印刷中

●口頭発表 Oral Presentations

1. 里見貴志：“局所コンパクト群上のYoungの畳み込み不等式の最適定数と連結Lie群上の非コンパクト次元を用いた不等式の精密化”，RIMS共同研究(公開型)「表現論と調和解析のひろがり」, 京都, 6月(2024)
2. 里見貴志：“FeldmanによるKac-Bernsteinの定理の局所コンパクト可換群への一般化”，Workshop on “Actions of Reductive Groups and Global Analysis”, オンライン, 8月(2024)
3. Satomi T.: “Mathematical aspects of the entropic uncertainty relation”, iTHEMS Coffee Meeting, Wako, October (2024)
4. Satomi T.: “Young's convolution inequality on locally compact groups”, iTHEMS Math Seminar, Wako, October (2024)
5. 里見貴志：“局所コンパクト群上のYoungの畳み込み不等式の最適定数”，表現論ワークショップ, 鳥取, 1月(2025)
6. 里見貴志：“局所コンパクト群とその閉部分群に関するYoungの畳み込み不等式の最適定数の関係”，日本数学会年会, 新宿区, 3月(2025)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Satomi T.: “Inequality on Young's convolution inequality on locally compact groups”, iTHEMS NOW & NEXT 2024, Wako, July (2024)

XXIV-002 モチーフ理論の拡張とその数論幾何学への応用

Generalization of the Theory of Motives and Its Applications to Arithmetic Geometry

研究者氏名：小泉 淳之介 Junnosuke KOIZUMI

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

トポロジーは図形の細部を捨象し、本質的な形を抽出する幾何学の一分野である。一方、代数幾何学は代数方程式で定まる図形、すなわち代数多様体を研究する分野である。本研究のテーマである「モチーフ理論」は、代数多様体の「本質的な形」を取り出す試み、すなわち代数幾何学への代数トポロジーの輸入といえる。一般の滑らかな代数多様体に対するモチーフの理論は1990年ごろに Voevodsky らによって創始され、Milnor 予想の解決をはじめとして、代数幾何学の広範囲に大きな影響を与えてきた。しかしながら、従来のモチーフ理論には直線 A^1 と一点が本質的に同じであるとみなされてしまうという「 A^1 不変性」があるため、微分形式やエタール層の暴分岐といった A^1 不変でない対象を扱う数論幾何学の視点からは不満足なものである。本研究の目的は、代数多様体とその上の因子(余次元1の部分多様体の線形結合)の組を対象とする「モジュラス付きモチーフ理論」を構築し発展させることにより、従来のモチーフ理論の欠点を克服し、数論幾何学への応用を与えることである。

本年度はモジュラス付きモチーフ理論における近年の進展、特に因子の代わりに有理因子を用いる新たなアプローチや、昨年度に証明したモジュラス付きコホモロジーのブローアップ不変性定理を踏まえ、斎藤秀司氏(東京大学) および宮崎弘安氏(NTT 基礎数学研究センタ) と

共同で、Morel-Voevodsky のモチーフ的ホモトピー論をモジュラス付きに拡張する研究を行った。モチーフ的ホモトピー論はホモトピー論の代数幾何学への輸入であり、我々の開発したのはそこから A^1 不変性を排した精密版である。特に、モチーフ的ホモトピー論の基本的な結果である Gysin 完全列や射影束公式をモジュラス付きの枠組みに拡張することができた。また、類似の理論である「対数的モチーフ」の理論との比較定理を確立するとともに、「相互層」と呼ばれる近年注目されている不変量のクラスについて、そのコホモロジーが我々の枠組みで表現できることを証明した。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Koizumi J.: "Blow-up invariance of cohomology theories with modulus", *Advances in Mathematics*, 458 Part B 10997 (2024)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Koizumi J.: "Blow-up invariance of cohomology theories with modulus", *L-functions and Motives in Niseko*, Niseko Residents Center, Sep. (2024)

XXIV-003 計算資源制限下でも実現可能な脳の学習原理の解明

Learning Principle of Brain under Limitations of Computational Resources

研究者氏名：鳥取 岳広 Takehiro TOTTORI

受入研究室：脳神経科学研究センター

数理脳科学研究チーム

(所属長 豊泉 太郎)

我々の脳は、新たな知識や行動を学習することで、環境に柔軟に適応してきた。脳がどのように学習を実現しているのかについては、バイズ脳仮説や自由エネルギー原理に代表されるように、機械学習や最適化などの数理工学理論の観点から盛んに研究されてきた。しかし、数理工学理論では我々の命令した通りに情報を処理できる理想的なコンピュータの使用を想定するのに対して、実際の脳が利用可能な計算資源は極めて限定されている。脳が限

られた計算資源で完全な合理性を実現することは困難であり、この問題は古くから「限定合理性」として認識されてきた。従来の数理工学理論に基づく計算論的神経科学の研究では、人工計算機と脳の情報処理の共通性に焦点を置く一方で、脳固有の問題である限定合理性を十分に取り扱うことはできていない。そこで本研究課題では、脳をはじめとする生体システムの計算資源制限を考慮した新しい数理工学理論を構築し、それを応用することで、

生物独自の適応戦略を解明することを目指す。

私はこれまで、無限次元の事後確率のベイズ更新を有限次元の内部状態の最適制御に置き換えることで、計算資源制限下でも実現可能な最適推定制御理論を構築してきた。また本理論をシンプルな生物の数理モデルに応用することで、計算資源制限が非連続な最適戦略の相転移を引き起こすことも明らかにしてきた。本年度は、これらの解析をさらに深化させ、論文としてまとめて投稿した。特に、本年度の成果として、以下の3点が挙げられる。

1. 計算資源制限下の最適推定制御戦略が、状態や観測の不確実性を表すパラメータに対して、非単調に相転移することを明らかにした。加えて、状態推定誤差・記憶制御費用・記憶不確実性などのパラメータの間でスケール関係が成り立つことも明らかにした。
2. 計算資源制限下の最適推定制御戦略で現れる相転移の非連続性、非単調性、スケール関係を統一的に説明する新しい理論的枠組みを構築した。
3. 計算資源制限を緩和した極限において、提案理論が従来の最適推定理論であるベイズフィルタリング理論と

整合的になることを明らかにした。

来年度は、計算資源制限下における数理工学理論の理解をさらに深めるとともに、生物システムへの応用をより一層促進していきたいと考えている。

●口頭発表 Oral Presentations

1. 鳥取岳広, 小林徹也：“計算資源制限下でも実現可能な最適推定制御理論の構築とその生体情報処理への応用”, 制御理論と生物学の境界, 東京, 6月(2024)
2. 鳥取岳広, 小林徹也：“計算能力が限定的な生物の推定戦略の理論構築”, 脳科学における理論と実験の融合に向けた若手研究者セミナー2024, 福岡, 7月(2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 鳥取岳広, 小林徹也：“Theory for Optimal Estimation and Control with Resource Limitations in Biological Information Processing”, 21st IUPAB & 62nd BSJ Joint Congress 2024, 京都, 6月(2024)
2. 鳥取岳広, 小林徹也：“計算制限を伴う生物でも実行可能な最適フィルタリング制御戦略”, 日本神経回路学会第34回大会, 北海道, 9月(2024)

XXIV-004 多階層進化学理論による社会構造の構成的記述

Constructive Description of Social Structures Using Multi-level Evolutionary Theory

研究者氏名：板尾 健司 Kenji ITAO

受入研究室：脳神経科学研究センター

理研CBS-トヨタ連携センター

計算論的集団力学連携ユニット

(所属長 豊川 航)

森林・水産・灌漑等に用いられる資源は共同管理されることが多い。共有資源の管理には許容可能な行動と不可能な行動を判定するための規範と、違反者への罰則を伴う制度が不可欠である。これまでに各地の社会で中央政府の統制にも、財産の私有化にもよらずに、持続可能な資源管理を実現する制度が観察されている。経済学者らは成功する制度の基準を帰納的に提案しているが、果たしてそうした制度がいかんして生まれるかは不明である。そこで、本研究ではそうした制度の自己組織化のメカニズムを探るべく、力学系ゲームという新しいゲーム理論の枠組みを提案する。力学系ゲームにおいては、各人が意思決定関数を持っており、環境や他者の状態を観察して、各時点で資源を利用するか否かを決める。意思決定関数の進化を考えることで、制度の進化を実演することがその要点である。

本年度は、共有資源の管理についてのミニマルなモデルを構築した。そこでは二者が一資源を共有する。進化

の初期においては、皆が目先の利益を求めて過剰に資源を利用し、共有地の悲劇が起きてしまう。しかし、進化シミュレーションの結果、自発的に協力的な資源利用と裏切りを区別する基準が生まれ、違反者への罰則が進化することがわかった。それにより、環境中の資源量も各プレイヤーの利得も同時に高められる持続可能な状態に至った。

また、このモデルでは一般的な進化ゲームと違い、行動ではなく、行動のための意思決定関数の進化を考えているために、従来の基礎概念（例えば戦略の進化的安定性）などをそのまま当てはめることはできなかった。そこで、意思決定関数の進化を考える場合にいつでも成り立つような新しいゲーム理論の概念を提案し、力学系ゲームの理論を一般的な枠組みのもとで提示するように務めた。

加えて、以前から取り組んでいる氏族社会における親族構造の進化に関する研究と、競争的な贈与による社会

組織の遷移に関する研究について論文を発表した。また、近代の人口転換に関する研究についても、学会発表を行うとともに、論文を執筆・投稿した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Itao K., Kaneko K.: "Formation of human kinship structures depending on population size and cultural mutation rate". Proceedings of the National Academy of Sciences 121.33 (2024)*.
2. Itao K., Kaneko K.: "Emergence of economic and social disparities through competitive gift-giving". PLOS Complex Systems 1.1 (2024)*.

(その他)

1. 板尾健司：“なぜ異なる地域で似た文化が生まれるのか…数理モデルが解明する「人間社会」の普遍性” 講談社現代ビジネス(2024)
2. 板尾健司：“結婚をめぐる「つながり」と「反発」の力は社会構造に影響していた…数理モデルでレヴィ=ストロースの謎を解く” 講談社現代ビジネス(2024)
3. 板尾健司：“一夫多妻婚”にはルールがあった…物理学で考える「親族の構造」 講談社現代ビジネス(2024)
4. 板尾健司：“古代エジプトで行われた「兄妹婚」を数学的に説明する…特殊な「結婚規則」も本質的には同じと言える理由” 講談社現代ビジネス(2024)
5. 板尾健司：“プレゼント交換には想像以上の価値があった…文化人類学から読み解く「贈り物の法則」” 講談社現代ビジネス(2024)

6. 板尾健司：“失敗したら「ゴミ人間」と見なされる…パプア・ニューギニアで行われた「過激なプレゼント交換」 講談社現代ビジネス(2025)
7. 板尾健司：“贈与によって「社会の格差」が作り出されていた…数学が明らかにした「驚きの研究結果」 講談社現代ビジネス(2025)

●口頭発表 Oral Presentations

1. 板尾健司：“人間社会の多様な構造の生成原理”，文化進化と知能の理論セミナー，オンライン，5月(2024)
2. 板尾健司：“人口転換における二つの普遍的経路”，国立社会保障・人口問題研究所，東京，5月(2024)
3. Itao K.: "Evolution of kinship structures driven by marital interactions" 日本進化学会，神奈川，8月(2024)
4. Itao K.: "Two Universal Pathways in Demographic Transition" Cultural Evolution Society, Durham, UK, Sep. (2024).
5. Itao K.: "Principles of the Evolution of Diverse Human Social Structures: Kinship and Gift-giving" Asian Cultural Evolution Seminar, Online, Nov. (2024).
6. 板尾健司：“人口転換における二つの普遍的経路”，日本人間行動進化学会，広島，12月(2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Itao K.: "Two Universal Pathways in Demographic Transition" Population Association of America, Ohio, USA, Apr. (2024).

XXIV-005 A Canonical Task for Modeling Naturalistic Motor Learning

Name: Matthew Stuart FARRELL

Host Laboratory: Laboratory for Neural Computation and Adaptation
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head: Taro TOYOIZUMI

During the first month of FY2024 I finished responding to reviewers for a paper and finalized publication of this paper. This paper explores aspects of the storage of motor memories in neural circuits.

The main research deliverable made in FY2024 was the development of a task for naturalistic motor learning. This task consists of a high-level framework, a simulation environment, and data files. In FY2024 I developed a high-level framework with a seven-phase task structure. This structure captures the challenges faced by animals over multiple phases of motor learning, from the first few trials engaging with a new task, to mastery of multiple tasks learned in tandem. I developed a simulation environment in the simulation

framework mujoco, including the calibration of simulation environment variables to allow for smooth optimization in this framework. I created data files by using trajectory optimization techniques. These optimization techniques find control signals that direct a humanoid agent in the mujoco simulation framework to perform various actions. The optimization involved generating simple target trajectories for the hands of the agent, then using gradient descent to find control signals that allowed the agent's hand to follow these target trajectories. A custom adhesion-based actuator was also developed to allow the agent to grab and securely hold objects. The demonstration trajectories I generated cover the

following scenarios: moving arms around randomly, picking up objects, picking up and throwing a ball at a target, and picking up a ball and tennis racket and performing a tennis serve to hit a target. I am currently generating more demonstration trajectories and extending these demonstrations to the SMPL humanoid model that is often used in reinforcement learning.

I am currently developing a baseline model to solve the naturalistic motor learning task by using the generated data files. This involves training an agent to imitate the demonstrator. The agent subsequently refines its solution beyond the mimicked demonstration trajectory using trial and error reward-modulated reinforcement learning. The agent then engages in a new activity and must later return to the old activity and remember its learned solution. These criteria ensure the agent learns motor actions under conditions like those faced by animals. In the future, the models will be compared to neuroscience experiments, such as experiments that show that an animal can continue to perform learned motor tasks even after motor cortex is removed.

● Publications

Papers

1. Farrell M. and Pehlevan C.: Recall tempo of Hebbian sequences depends on the interplay of Hebbian kernel with tutor signal timing, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121 e2309876121 (2024), published*

● Oral Presentations

Conferences

1. Farrell M.: Recall tempo of Hebbian sequences depends on the interplay of Hebbian kernel with tutor signal timing, Bernstein Conference Workshop: The neurobiological mechanisms of sequence processing, Frankfurt Germany, October (2024).

Internal

1. Farrell M.: Imitate, refine, remember: a task for naturalistic motor learning, RIKEN Center for Brain Science Young Investigator's Seminar, Wako Japan, December (2024).

XXIV-006 量子群の非可換トポロジーの探求とその応用

Noncommutative topology of quantum groups and its applications

研究者氏名：北村 侃 Kan KITAMURA

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

空間の対称性は通常、群を用いて記述される。一方で、(数理) 物理や低次元トポロジーなどの分野では、群をこえた“量子対称性”というべき現象が生じることが知られている。報告者はこの量子対称性を、作用素環という数学的な対象を通じて研究している。

作用素環とは、線形作用素のなす代数系のことである。これは、空間の概念を適切な意味で含んでいることが知られている。一方で、作用素同士の積はしばしば非可換である。この非可換性は我々の直観をこえた様々な現象の源泉となっており、作用素環そのものや、それに付随する非可換な構造の分類は作用素環論のメジャーなテーマとなっている。作用素環論における分類問題では、従順性と単純性とよばれる2つの性質が重要である。従順性は、ワイルドすぎて人間の手に余る例を除外するための条件である。また、単純な作用素環は、ある意味で一般の作用素環の構成ブロックのような立ち位置にある。

単純な作用素環は、因子環というクラスと単純C*環というクラスの2つに大別される。Jonesによる因子環

の包含についての一連の研究により、作用素環がもつ対称性として自然に量子対称性が現れることがわかっており、代数的場の理論や結び目理論との関連から盛んに研究されてきた。報告者は単純な作用素環のもう一方のクラスである単純C*環のもつ量子対称性に興味を持っており、本年度はこれについて2つのプレプリントをプレプリントサーバーのarXivに公開した。

[1]報告者の研究 (arXiv:2405.18429) では、単純性を強めた純無限性という条件を満たすC*環が持つ量子対称性の新規かつ統一的な構成法を確立した。Jonesが因子環の包含の理論を創始して以来の問題として、4以上のどの実数が従順因子環の既約な包含の拡大次数として実現できるか、というものがある。報告者の研究の帰結の一つとして、その問題の(純無限な)従順単純C*環への類似ならば、全ての4以上の実数に対して肯定的な解答を持つことがわかった。

[2]このような純無限な従順単純C*環がもつ量子対称性の分類を目指して、Leuven大学のSergio

Girón Pacheco氏とRobert Neagu氏との共同研究 (arXiv:2410:23935) では、同変KK理論というコホモロジー的な理論の情報からより作用素環的な量子対称性の情報を取り出す技術を整備した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Yuki Arano, Kan Kitamura, Yosuke Kubota: "Tensor category equivariant KK-theory", *Adv. Math.*, 453 (2024), 109848.
2. Eusebio Gardella, Kan Kitamura, Hannes Thiel: "Semiprime ideals in C^* -algebras", *J. Eur. Math. Soc.*, accepted.
3. Mao Hoshino, Kan Kitamura: "A note on quantum subgroups of free quantum groups", *C. R. Math. Acad. Sci. Paris.*, 362 (2024), 1327–1330.

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Kan Kitamura: "Discrete quantum subgroups of complex semisimple quantum groups", *Expansion in Representation Theory and Harmonic Analysis*, Kyoto University, June (2024).
2. Kan Kitamura: "Actions of tensor categories on Kirchberg algebras", *China-Japan-Korea Conference*

on Functional Analysis, Harbin Institute of Technology, China, August (2024).

3. Kan Kitamura: "Simplicity of Pimsner algebras with application to quantum symmetries", *Recent Developments in Operator Algebras*, Kyoto University, September (2024).
4. Kan Kitamura: "Actions of tensor categories on Kirchberg algebras" (contributed talk), *Quantum groups, tensor categories and quantum field theory*, University of Oslo, Norway, January (2025).

(セミナー)

1. Kan Kitamura: "Quantum symmetries on simple C^* -algebras", *CREST Seminar*, Online, June (2024).
2. Kan Kitamura: "Actions of tensor categories on Kirchberg algebras", *Operator Algebra Seminar*, University of Tokyo, July (2024).
3. Kan Kitamura: "Tensor categories and their realizations with C^* -algebras", *Operator Algebra Seminar*, Seoul National University, October (2024).
4. Kan Kitamura: "Actions of tensor categories on Kirchberg algebras", *Operator Algebra Seminar*, Kyoto University, October (2024).
5. Kan Kitamura: "Actions of tensor categories on Kirchberg algebras", *Quantum Analysis Seminar*, Nagoya University, November (2024).

XXIV-007 不確実性を考慮した深層学習向けの専用ハードウェアアーキテクチャ

Dedicated hardware architecture for deep learning with uncertainty

研究者氏名：西田 圭吾 Keigo NISHIDA
受入研究室：生命機能科学研究センター
計算分子設計研究チーム
(所属長 泰地 真弘人)

半導体の集積化技術や高度な並列化技術の進展により、計算機の性能は半世紀にわたり向上してきた。この性能向上は画像認識や音声認識、自然言語処理など多くの分野で大きな成果を上げている深層学習の発展を支えている。しかし、深層学習を実社会に展開するにつれて計算需要が急増し、従来の計算機性能の向上速度では追いつかなくなっている。この問題に対応するため、現代の深層学習向け計算機では従来の32ビット浮動小数点に代わり、8ビット浮動小数点などビット幅の狭いデータフォーマットを採用する専用アーキテクチャが導入されている。これによりメモリコストが削減され、演算器を高密度に配置することで演算性能が強化されている。今後、深層学習のモデルを不確実性の高い実社会で応用するケースが増加すると考えられる。同時に、低ビット化によ

る数値表現能力の低下がもたらす不確実性にも対応する必要がある。これらの課題を解決するには、深層学習の実用化としての特性とハードウェアとしての特性を考慮した新しいアルゴリズムの開発が求められる。

本研究では、データ分布や演算精度に対する不確実性に適応するベイズ深層学習手法を開発し、新しい専用ハードウェアアーキテクチャの探索を行う。本年度は(1)ベイズ深層学習の最適化開発、(2)ベイズ深層学習による実アプリケーションに向けた探索を行った。

(1) ハードウェアの演算システムと相性の良い乗法を軸としたベイズ深層学習の最適化の開発を行った。本手法を用いて、現時点において画像認識タスクにおけるImageNetデータセットを用いた畳み込みニューラルネットワークの学習および、言語処理タス

クにおけるWikiText-2データセットを用いた小規模なTransformerでの学習に成功している。また、次世代のデータフォーマットであるMX Formatを利用した低精度学習についても同様の実験を行い、優れた性能を達成している。

(2) 既存のベイズ深層学習用オプティマイザを用いて化合物生成モデルを構築し、それを創薬に応用する可能性を検討した。この結果、生成モデルの潜在空間が改善され、化合物空間の探索効率が向上することが確認された。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Hosoda K., Keigo Nishida, Shigeto Seno, Tomohiro Mashita, Hideki Kashioka, Izumi Ohzawa: "A single fast Hebbian-like process enabling one-shot class

addition in deep neural networks without backbone modification", *Frontiers in Neuroscience*, Volume 18(2024)

●口頭発表 Oral Presentations

(招待講演)

1. 西田圭吾 : "乱舞(LUMB) : Lie-Group Update via Multiplicative Bayes for Deep Learning", 第6回理研AIP 数学系合同セミナー, 神奈川, 2月(2025)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Nishida K.: "Exploring Bayesian Deep Learning for Hardware Accelerator Design", *Deep Learning: Theory, Applications, and Implications*, Tokyo, Japan, Mar.(2024)

XXIV-008 Tracing the journey of molecular complexity in star forming regions via Deuterium Fractionation

Name: Judit FERRER_I_ASENSIO

Host Laboratory: Star and Planet Formation Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head: Nami SAKAI

Star formation is a complex process that encompasses the evolution of material from diffuse clouds to planets. Even on the earliest stages of star formation, complex organic molecules (COMs) are detected. COMs serve as crucial tools for characterizing sources and these constitute the organic budget that will ultimately be available for the formation of planets and even for the onset of life. The formation mechanisms of COMs, as well as their journey throughout the star formation process is yet not known. Is the organic budget integrated into planets been inherited from the early star formation stages, or is this budget reset throughout the system's evolution? In order to answer this question isotopic fractionation, and particularly deuterium fractionation, is used. Deuterium, formed during the Big Bang and consumed in stellar interiors, has a constant abundance relative to hydrogen at fixed distances from the Galactic Centre. Deuterium fractionation, the enrichment of molecules with deuterium, is more efficient at lower temperatures, such as those in prestellar cores, where temperatures can drop below 10 K. Deuterated molecules observed in later star formation stages are believed to be inherited from prestellar cores, trapped in icy dust

grain mantles, and released into the gas phase by the heating of the central protostar. This process allows tracing molecules back to their formation sites. Deuterium fractionation has linked the formation of water on Earth and other solar system bodies to the prestellar core stage. The observed water D/H ratios on Earth and comets are higher than the solar value but similar to those in protoplanetary disks and protostellar cores. Deuterium fractionation of COMs can also be used, similarly to the case of water. In recent years, really high deuterated and even doubly deuterated COMs abundances have been observed towards some pre-stellar and protostellar cores suggesting that COMs, like water, may be formed in the pre-stellar core stage and inherited to later stages to the formation of planets. Nevertheless, so far not may deuterated over main isotopologue (D/H) and even less doubly deuterated over singly deuterated (D₂/D) have been derived towards the ISM. This is partly due to the lack of accurate spectroscopic catalogues of these isotopologues which are imperative to detect these molecules towards the ISM.

My research aims to explore the journey of COMs during the early stages of star formation using

deuterium fractionation. By combining observations, modeling, and laboratory work various COMs, the study I provide insights into the observed deuterium abundance ratios of COMs and their connection to early star formation conditions. To fill in for the gap of the spectroscopic catalogues, I measured the spectra of doubly deuterated ethanol ($\text{CH}_3\text{CD}_2\text{OH}$) in the SUMIRE setup in RIKEN as well as in the Atlas setup in the University of Toyama. Currently I am analyzing the spectrum alongside one of the world experts on internal rotor spectroscopy, Laurent Coudert. Furthermore, I have measured the spectra of main isotopologue ethanol and singly deuterated methyl formate to test the accuracy of the already existing catalogues. In order to understand the origin and transfer of COMs through the star formation process I started projects that look into the D/H and D₂/D ratios different molecules towards pre-stellar and protostellar cores. I am studying the deuteration of c-C₃H₂ and methanol on 14 pre stellar sources in Perseus. I also wrote a proposal which has been partially observed which maps COMs and some deuterated smaller molecules towards the IRAS16293E prestellar core with the Yebes 40m telescope. Moreover, I have joined the ALMA Large Program Collaboration COMPASS where I am currently analyzing data to derive D/H and D₂/D ratios of COMs in the HOPS373 protostellar core and compare these to other sources. Moreover, to understand the initial conditions that greatly constrain the star formation process I submitted a paper where I study the structure of the L1544 pre-stellar core with radiative transfer software coupled to MCMC and I partially completed HCO⁺ and HC₁₈O⁺ (1-0)

transitions observations towards 5 other pre-stellar cores to further understand the evolution of pre-stellar cores.

● Publications

Papers

1. "A deep search for large complex organic species towards IRAS16293-2422 B at 3 mm with ALMA" - P. Nazari, J. S. Y. Cheung, J. Ferrer Asensio, et al., A&A, 2024
2. "Fractionation in young cores: Direct determinations of nitrogen and carbon fractionation in HCN" - S. S. Jensen, S. Spezzano, P. Caselli, O. Sipilä, E. Redaelli, K. Giers, J. Ferrer Asensio, A&A, 2024
3. "High sensitivity molecular line observations towards the L1544 pre-stellar core challenge current models" - J. Ferrer Asensio et al., ApJ, submitted

● Oral Presentations

Conferences

1. "Tracing the Journey of Molecular Complexity in Star Forming Regions via Deuterium Fractionation" - Astrochemistry Workshop / April 2024 / Tokyo, Japan
2. "Doubly deuterated ethanol: Spectroscopy and Interstellar Search" - Fractionation of isotopes in space II / November 2024 / Florence, Italy

● Poster Presentations

Conferences

1. "A laboratory study for rotational spectroscopy of doubly deuterated methanol (CH_2DOD) by SUMIRE" / November 2024 / Tokyo, Japan

XXIV-009 原子核の多様なクラスター構造研究：アイソスピン回転を用いた新展開

Study of Various Cluster Structures in Nuclei : New Perspective by Using Isospin Rotation

研究者氏名：小山 俊平 Shumpei KOYAMA
受入研究室：仁科加速器科学研究センター
核反応研究部
(所属長 上坂 友洋)

原子核は、陽子と中性子（合わせて核子）からなる有限量子多体系である。原子核では、束縛状態のほかに、粒子放出閾値を超えた励起エネルギーに共鳴状態が現れる。共鳴状態からの粒子崩壊には、核子を一つ以上放出する過程に加えて、⁴Heや²Hといったより軽い原子核を放出過程も存在する。こうした粒子（クラスター）の放出の崩壊分岐比は、崩壊前の状態のクラスター構造に直結している。本研究では、ある励起エネルギーにおいて放

出されるクラスターの分岐比を測定していくことで、原子核の励起エネルギー（温度）を変えていった際にどのようなクラスターが発達していくのかを調べていく。また、核力のアイソスピン対称性を利用して、アイソスピン回転させた状態（アイソバリックアナログ状態、IAS）からの粒子崩壊分岐比を測定していくことで、IASに対応するよりゼロ温度（基底状態）に近い状態のクラスター構造に関する情報を得ることを期待している。測定は、理研RIBF

の不安定核ビームを用いた逆運動学実験として、欠損質量法から励起エネルギーをまず決定し、大立体角スペクトロメータSAMURAIで粒子崩壊分岐比を測定していく。

本年度は、逆運動学における欠損質量分光実験を行う上で必要な検出器であるTOGAXSIの建造を進めた。欠損質量法では反応標的から生じる反跳粒子の運動量を測定する必要がある。TOGAXSIは、粒子の軌跡検出器であるシリコントラッカーと運動エネルギー測定のための無機シンチレータから成る。シリコントラッカーの線源を用いたテストや、実装テスト、真空チェンバー内でのASICチップから生じる熱の測定・対処などを進めた。また、実験は液体水素標的と組み合わせて行う予定であるため、検出器と標的を共存させるための実験セットアップの実現を進めた。2025年春に行われる可能性のあるSAMURAIとTOGAXSIを組み合わせた実験に向けて、建造は最終段階に近づいている。また、本研究の実験プロポーザルについて、以前に行った実験の解析やより良い実験セットアップの実現に向けて、提出に向けた準備を進めている。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. J. Kahlbow et al., “Magicity versus Superfluidity around ^{28}O viewed from the Study of ^{30}F ”, Phys. Rev. Lett 133, 082501 (2024)
2. P. André et al., “Evolution of the two-neutron configuration from ^{11}Li to ^{13}Li ”, Phys. Lett. B 857, 138977 (2024)
3. S. Koyama et al., “Mirror symmetry at far edges of stability: The cases of ^8C and ^8He ”, RIKEN, Accel. Prog. Rep. 57, 26 (2024)

●口頭発表 Oral Presentations

1. S. Koyama, “Charged particle decay from a highly excited state”, SAMURAI international collaboration workshop 2024, Deajeon, Korea, Jul. (2024)
2. S. Koyama, “Particle decay from IAS to investigate the internal structure in nuclear system”, SAMURAI international collaboration workshop 2024, Deajeon, Korea, Jul. (2024)
3. S. Koyama, “Quenching of spectroscopic factors in proton-rich p-shell nuclei”, advancing physics at next RI Beam Factory 2025, Wako, Japan, Jan. (2025)

XXIV-010 非平衡量子ダイナミクスによるホログラフィーの解明

Non-Equilibrium Quantum Dynamics Approach to Holography

研究者氏名：福島 理 Osamu FUKUSHIMA

受入研究室：数理創造プログラム

(所属長 初田 哲男)

本研究の目的は、ブラックホールの熱力学的な側面を微視的な立場から理解し、重力の量子論的記述を定式化することである。Hawking 輻射によるブラックホールの蒸発過程を半古典的に考察すると、宇宙がユニタリ時間発展をしていないかのように見えるという問題が浮上する。この問題は「ブラックホール情報喪失問題」として知られ、現在では超弦理論などから導かれるホログラフィーの概念を用いて活発に研究が進められている。ホログラフィーとは、ある重力理論と、重力のない低次元場の理論との等価性を示すものである。このアプローチは特に2次元ブラックホールにおいて成功を収めている一方で、高次元ブラックホールの理解は依然として十分ではない。この課題の背景には、大規模な Hilbert 空間を持つ場の量子論における動力学の取り扱いが含まれており、その解決には非平衡量子ダイナミクスの理解が不可欠である。

本研究では、近年の冷却原子実験の進展により注目を

集めている固有値熱化仮説 (ETH) を活用し、ホログラフィーを用いてブラックホールの量子的ダイナミクスを解明することを目指す。さらに、ホログラフィーの枠組みにおいては、エンタングルメント・エントロピーといった量子系の非局所的な情報が重要な役割を果たすため、非局所的観測量を体系的に扱える高次対称性にも注目し、研究を進める。

本年度はこれらの研究目的の足がかりとして、可積分な場の理論やカオスの研究を行った。

第一に、可積分な場の理論の統一理論である4次元 Chern-Simons 理論の研究を行った。近年補助場シグマ模型 (auxiliary field sigma model) と呼ばれる、ある種の可積分変形 (可積分性を保った変形) の無限個の族と見做せる模型が提案された。我々はこれを統一的な4次元 Chern-Simons 理論の立場から導出することに成功し、境界条件などを調整することによりさらに新たなクラスの可積分変形を導出した。

第二にBFSS行列と呼ばれる量子重力の模型に現れる過渡的カオスの研究である。特に、適切な解のアンザツをおくことによりメンブレン不安定性は過渡的(古典)カオスと見做せ、数値解析によりその特徴的な量である寿命のスケーリング則を見出した。

これらの研究に加え、特に対称性とETHの関係の精緻化にも取り組んでいる。

以上の研究は場の量子論の非平衡ダイナミクスを理解する上で重要なステップになると期待される。

●口頭発表 Oral Presentations

1. "Higher-form symmetry and eigenstate thermalization hypothesis," 2024 East Asia Joint Workshop on Fields and Strings, National Sun Yat-sen University, Nov. 2024.
2. "Auxiliary field sigma models from 4D Chern-Simons

theory," 2024 NTU-Kanto Joint High Energy Physics Workshop, National Taiwan University, Nov. 2024.

3. "Higher-form symmetry and eigenstate thermalization hypothesis," NCTS-iTHEMS Joint Workshop on Matters to Spacetime: Symmetries and Geometry, NCTS, National Taiwan University, Aug. 2024.
4. "補助場を含む可積分変形と4次元Chern-Simons理論," 日本物理学会第79回年次大会, 北海道大学, Sep. 2024.
5. "射影表現と固有状態熱化仮説," 熱場の量子論とその応用, 基礎物理学研究所, 京都, Sep. 2024.

●ポスター発表 Poster Presentations

1. "Higher-form symmetry and eigenstate thermalization hypothesis," Symmetries 2024, Mathematical Institute, University of Oxford, Aug. 2024

XXIV-011 強結合の場の理論の真空構造の解明

Research for the Vacuum Structure of Strongly Coupled Quantum Field Theory

研究者氏名：菅野 颯人 Hayato KANNO
受入研究室：仁科加速器科学研究センター
理研BNL研究センター
理論研究グループ
(所属長 八田 佳孝)

4次元QCDを含む場の理論の一部の模型では、 θ 項と呼ばれるトポロジカル項を持ち、 θ と呼ばれる 2π 周期性を持つパラメータで特徴付けられる。 θ 項は場の理論の非摂動効果に対して重要な寄与を持ち、その解明には数値計算が有用である。しかし、 θ 項を持つ場の理論は従来広く用いられてきたモンテカルロ法では符号問題により計算が難しく、代替的な計算手法が求められる。

今年度は、QCDのToy模型として2次元のQEDであるSchwinger模型に注目し、 θ 項に関する数値計算を行った。先行研究ではflavor数が1の場合に多くの研究が行われているが、 θ 項を含む場合はflavor数が2以上の場合に相構造が異なるため、現実のQCDに近い、2 flavorの場合に着目した。符号問題を回避するためにテンソルネットワーク法を用いた。特に、テンソル繰り込み群(TRG)と呼ばれる手法を用いることで、熱力学極限の自由エネルギーの θ 依存性を計算した。数値計算の結果、幅広いパラメータ領域に対する計算を実現することが出来た。理論的に計算できるパラメータ領域では理論値と、先行研究が存在する領域では先行研究との比較をそれぞれ行った。更に、 θ の 2π 周期性を保つ計算が実現でき

たため、 $\theta = \pi$ の点で予想される非自明な真空の縮退度を見出すなど、興味深い結果が得られた。これらの結果は論文にまとめ、既にarXiv上で公開されている。現在は雑誌に投稿中である。この結果は本研究課題の重要な部分であり、結果を論文にまとめることが出来たのは今年度の大きな成果である。この結果を踏まえて新たな研究課題も見出すことが出来たため、来年度以降の課題として更に深化させて行きたい。

この研究成果を国内外の多くの研究会等で発表した。これらの研究会では、発表を行うことで参加者と議論を行うことが出来た。これらの研究会への参加を通して、我々の研究結果やその応用に対する理解が深まった。

この他にも、トポロジカル項が寄与する低次元の場の理論に関する研究など、解析的な手法を用いた研究も進めている。

●口頭発表 Oral Presentations

(国際会議)

1. Hayato Kanno, Shinichiro Akiyama, Kotaro Murakami, Shinji Takeda, "Grassmann Tensor Renormalization Group for two-flavor Schwinger

model with a theta term", PCTS-Simons Collaboration Confinement and QCD Strings, PCTS (Princeton Center for Theoretical Science, Princeton University), Nov. (2024)

- Hayato Kanno, Shinichiro Akiyama, Kotaro Murakami, Shinji Takeda, "Grassmann Tensor Renormalization Group for two-flavor Schwinger model with a theta term", Lattice 2024, The University of Liverpool, Jul. (2024)

(国内の研究会)

- 菅野颯人, 秋山進一郎, 村上耕太郎, 武田真滋, "Grassmann Tensor Renormalization Group for two-flavor Schwinger model with a theta term", 日本物理学会 2024年年次大会, 北海道大学, 9月(2024)
- 菅野颯人, 秋山進一郎, 村上耕太郎, 武田真滋, "Grassmann Tensor Renormalization Group for two-flavor Schwinger model with a theta term", 素粒子物理学の進展2024 (PPP2024), 京都大学基礎物理学研究所, 8月(2024)
- 菅野颯人, 秋山進一郎, 村上耕太郎, 武田真滋, "Grassmann Tensor Renormalization Group for two-flavor Schwinger model with a theta term", 場の理

論と弦理論2024, 京都大学基礎物理学研究所, 8月(2024)

(セミナー)

- Hayato Kanno, Shinichiro Akiyama, Kotaro Murakami, Shinji Takeda, "Grassmann Tensor Renormalization Group for two-flavor Schwinger model with a theta term", RBRC Seminar, BNL, Dec. (2024)
- Hayato Kanno, Shinichiro Akiyama, Kotaro Murakami, Shinji Takeda, "Grassmann Tensor Renormalization Group for two-flavor Schwinger model with a theta term", Physics Seminar, RIKEN iTHEMS, RIKEN, Jun. (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

- Hayato Kanno, Shinichiro Akiyama, Kotaro Murakami, Shinji Takeda, "Grassmann Tensor Renormalization Group for two-flavor Schwinger model with a theta term", YITP workshop Generalized symmetries in QFT 2024, Kyoto University, Sep. (2024)

XXIV-012 一般化された対称性の格子ゲージ理論の観点からの厳密な定式化

Rigorous formulation of the generalized symmetries from the viewpoint of lattice gauge theory

研究者氏名：森川 億人 Okuto MORIKAWA
受入研究室：数理創造プログラム
(所属長 初田 哲男)

本研究課題は、この宇宙の最小の構成要素である素粒子を記述する場の量子論における対称性について、その近年の拡張と様々な発展を数理的・構成論的に理解する試みである。場の量子論はその発見以来、理論自体に多様な問題を抱えており、数学的に厳密に定義することが困難である。これに対する一つの確立されたアプローチは格子ゲージ理論と呼ばれる構成論的立場での有限に正則化された非摂動論的定式化である。一方で、物理における対称性を用いた相構造などの解析は、場の量子論の非摂動効果の理解(クォーク・ハドロン相転移やカラー超伝導相)に多大な寄与を及ぼすと信じられる。近年の一般化対称性による新たなパラダイムは非常に広範な物理現象に適用され、物性理論でも多くの成功をおさめている。場の量子論における一般化対称性の議論と発展は極めて複雑で、完全に正則化された曖昧さのない構成論的アプローチを与え、さらなる今後の応用を考えることが肝要である。

これまでの私の研究では、高次形式ゲージ対称性の格子ゲージ理論での実現とトーフット・アノマリーの構成論的証明を与えた。本年発表した論文では、他の種類の一般化対称性である高次群対称性をインスタントン数制限法のもとで議論した。従来の軸性 $U(1)$ アノマリーに非可逆対称性が存在することを格子カイラル・ゲージ理論の構成によって実現し、その特徴的な構造を示す融合則を計算可能にした。ここでカイラル・ゲージ理論の厳密な定式化は半世紀に渡る重要な問題であり、別の研究として2次元系でのボソン化法を用いた格子定式化を行った。また、格子ゲージ理論によって可能となった非摂動論的ダイナミクスの数値計算について、本年度はそのコード開発と実際の計算を行っている。まず近年進展しているJulia言語の格子ゲージ理論パッケージJuliaQCDの開発に関わり、高次形式ゲージ場に対応する大幅な改良を行った。その上で、(i) 九大のグループと共にトーフット・フラックス、(ii) 京大などのグループと共にトーフット・ルー

プを実装し、現在計算が進行中である。また、これらで使われているグラディエント・フロー法について、そのウィルソン流線り込み群固定点との関係や、巻き付き数の数値的安定化などの解析を行った。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Honda Y., Morikawa O., Onoda S., and Suzuki H.: "Lattice realization of the axial U(1) non-invertible symmetry," *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2024, no.4, 043B04 (2024)
2. Morikawa O., Onoda S., and Suzuki H.: "Yet another lattice formulation of 2D U(1) chiral gauge theory via bosonization," *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2024, no.6, 063B01 (2024)
3. Abe M., Morikawa O., Onoda S., Suzuki H., and Tanizaki Y.: "Lattice construction of mixed 't Hooft anomaly with higher-form symmetry," *Proc. Sci. LATTICE2023*, 361 (2024)
4. Abe M., Kan N., Morikawa O., Nagoya Y., Onoda S., and Wada H.: "Higher-group symmetry in lattice gauge theories with restricted topological sectors," *Proc. Sci. LATTICE2023*, 365 (2024)
5. Morikawa O., Tanaka M., Kitazawa M., and Suzuki H.: "Lattice study of RG fixed point based on gradient flow in 3D O(N) sigma model," *Proc. Sci. LATTICE2024*, 349 (2025)

(その他)

1. Morikawa O., and Suzuki H.: "Winding number on 3D lattice," submitted, arXiv:2412.03888 [hep-lat]
2. Abe M., Morikawa O., and Suzuki H.: "Monte Carlo simulation of the SU(2)/Z₂ Yang-Mills theory," submitted
3. Abe M., and Morikawa O.: "Numerical simulation of fractional topological charge in SU(N) gauge theory coupled with Z_N 2-form gauge fields," submitted
4. Morikawa O., Onoda S., and Suzuki H.: "Novel Lattice Formulation of 2D Chiral Gauge Theory via Bosonization," submitted

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. Morikawa O.: "'Towards computational foundations of generalized symmetries,'" Seminar at Field Theory Research Team in RIKEN R-CCS, RIKEN, Kobe, Apr. (2024)
2. Tanaka M., Kitazawa M., Morikawa O., and Suzuki H.: "Lattice study of RG fixed point based on gradient flow in 3D O(N) sigma model," the 41st International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2024), The University of Liverpool, July(2024)
3. Morikawa O.: "Lattice implementation of generalized symmetry and 't Hooft anomaly," NCTS-iTHEMS Joint Workshop on Matters to Spacetime: Symmetries and Geometry, National Taiwan University, Aug.(2024)
4. 森川億人: "Complete implementation of generalized symmetries on the lattice," 離散的手法による場と時空のダイナミクス2024、東京工業大学、9月(2024)
5. 森川億人、小川翔也: "完全WKB解析による準安定共鳴状態の非摂動定式化," 日本物理学会第79回年次大会、北海道大学、9月(2024)
6. Morikawa O.: "Lattice non-perturbative foundation of generalized symmetry and applications," Seminar at Theoretical Particle Physics Group in Shinshu University, Online, Nov.(2024)
7. Morikawa O.: "Computational lattice foundation of generalized symmetry and its applications," Seminar at Theoretical Particle Physics Group in University of Tsukuba, University of Tsukuba, Nov.(2024)
8. 森川億人: "Lattice non-perturbative understanding of generalized symmetries and applications," 日本物理学会2025年春季大会、オンライン開催、3月(2025)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Morikawa O.: "Symmetry and anomaly in lattice gauge theory," iTHEMS NOW&NEXT 2024, RIKEN, Wako, July(2024)

XXIV-013 Finding the Missing Sulfur in the “Hot Disks” of Massive Protostars

Name : Ziwei ZHANG

Host Laboratory : Star and Planet Formation Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head : Nami SAKAI

In this project, we aim to solve the challenging topic in the star formation process - the detectable sulfur abundance in star forming regions is significantly lower than that in the interstellar medium (ISM), namely the "missing sulfur" problem. Such topic is studied through analyzing sulfur-species in both low- and high-mass protostars. For low-mass sources (e.g., L1527), we focus on volatile species (e.g., SO and SO₂) and probe the heated regions with sulfur-bearing molecules. While in high-mass sources (e.g., Orion Source I), which is more preferable with the dust grains are being evaporated in the “hot disks”, we could detect both volatile and refractory species (e.g., SiS). A strong international collaboration, Astromineralogy of REfractory and Salt species (ARES Program), for the observation and analysis of the molecules in massive protostars is formed for this purpose. We are capturing the majority of the sulfur abundance in massive protostars by carrying out an observational survey of massive protostars with a multiwavelength approach. Atomic sulfur and other related atomic species (e.g., Fe and Si) are observed at ground-based and space infrared observatories. While molecular sulfur is observed with sub-mm observatories, such as ALMA. The comprehensive theoretical analyses are conducted with both molecular excitation models and photoionization models. Molecular excitation analysis with sub-mm data would be performed with radiative transfer models, which are efficient tools to analyze molecular emissions. In particular, new collisional data for SO is generated. As for infrared observation data, photoionization models with extensive physico-chemical networks are prepared. The novel strategy could blaze the trail of sulfur budget constraints in not only star-forming regions but also in the dense ISM in general. As the project also takes solid evaporation into account, we extend the research to many other disciplines, such as the silicate experiment ins Spring-8 and the analysis of asteroid samples (e.g., Hayabusa 2).

● Publications

1. Zhang Z. E.; Stancil P. C., et al., : NLTE Analysis of SO in Star-Forming Regions. *ApJ*. submitted*
2. Zhang, Z E.; Sakai, Nami, et al., : FAUST. XIV. Probing the Flared Disk in L1527 with Sulfur-bearing Molecules. *ApJ*. 966, 2, 207. published*
3. Podio, L.; Ceccarelli, C.; et al., : FAUST. XVII. Super deuteration in the planet-forming system IRS 63 where the streamer strikes the disk. *A&A*. 688, L22. published*
4. Hoffman, Daniel; Taylor, Josiah; et al., : Rovibrational Transitions in HCl due to Collisions with H₂: Spin-free and Hyperfine-resolved Transitions. *ApJ*. 969, 1, 7. published*
5. Fuente, Asunción; Roueff, Evelyne; et al., : PDRs4All. IX. Sulfur elemental abundance in the Orion Bar. *A&A*. 687, A87. published*
6. Van De Putte, Dries; Meshaka, Raphael; et al., : PDRs4All. VIII. Mid-infrared emission line inventory of the Orion Bar. *A&A*. 687, A86. published*
7. Chahine, Layal; Ceccarelli, Cecilia; et al., : Multiple chemical tracers finally unveil the intricate NGC 1333 IRAS 4A outflow system, FAUST XVI. *MNRAS*. 531, 2. published*
8. De Simone, M.; Podio, L.; et al., : FAUST. XV. A disc wind mapped by CH₃OH and SiO in the inner 300 au of the NGC 1333 IRAS 4A2 protostar. *A&A*. 686, L13. published*
9. Chown, Ryan; Sidhu, Ameer; et al., PDRs4All. IV. An embarrassment of riches: Aromatic infrared bands in the Orion Bar. *A&A*. 685, A75. published*
10. Peeters, Els; Habart, Emilie; et al., : PDRs4All: III. JWST's NIR spectroscopic view of the Orion Bar. *A&A*. 685, A74. published*
11. Habart, Emilie; Peeters, Els; et al., : PDRs4All. II. JWST's NIR and MIR imaging view of the Orion Nebula. *A&A*. 685, A73. published*
12. Sabatini, G.; Podio, L.; et al., : FAUST. XIII. Dusty cavity and molecular shock driven by IRS7B in the Corona Australis cluster. *A&A*. 684, L12. published*

● Oral Presentations

1. Zhang, Z E. : “Probing Star Forming Regions with Sulfur-bearing Species” SJTU Seminar, Shanghai China, 2024 Oct.
2. Zhang, Z E.; Stancil P. C., et al., : “NLTE Analysis of SO in Star-forming Regions” COSPAR, Busan South Korea, 2024 Jul.
3. Zhang, Z E.; Sakai, Nami, et al., : “Gaseous Dust in Massive Protostars” REMU, Saitama Japan, 2024 Jun.
4. Zhang, Z E.; Sakai, Nami, et al., : “Probing the Flared Disk of L1527 with Sulfur-bearing Molecules” Next Generation Astrochemistry Meeting, Tokyo Japan,

2024 March.

5. Zhang, Z E.; Sakai, Nami, et al., : “Probing the Massive Hot Disks with SiS”, Laboratory Astrophysics Workshop (ICE 2024), Hawaii USA ,

2024 Feb.

6. Zhang, Z E.; Sakai, Nami, et al., : “Probing the Flared Disk of L1527 with Sulfur-bearing Molecules”, FAUST Meeting, Firenze Italy, 2024 Feb.

XXIV-014 重いクォーク測定による小さな衝突系における QGP 研究

Measurement of heavy quark to study property of QGP in small system

研究者氏名：関口 裕子 Yuko SEKIGUCHI

受入研究室：仁科加速器科学研究センター

RHIC 物理研究室

(所属長 秋葉 康之)

陽子+陽子衝突や陽子+鉛衝突を用いた長距離2粒子相関測定によって小さな衝突系におけるQGP (小さなQGP) の存在が示唆され、欧州原子核研究所 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) やブルックヘブン国立研究所 (BNL) の相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC) を用いて方位角異方性の横運動依存性測定や、擬ラピディティ依存性測定を通して小さなQGPの性質解明のための測定が行われてきた。小さなQGPにおいても、重イオン衝突における大きなQGPの場合と同様に相対論的流体モデルで結果をよく記述できている。しかし、小さなQGPがどのように生成されるのかというメカニズムはわかっていない。小さなQGPのより詳細な描像を理解するためには、チャームやボトムといった重クォークの測定が有用である。報告者は、2024年度に取得した陽子+陽子衝突データを用いて、重いクォークの測定に取り組んでいる。報告者は、2024年9月の着任直後にBNLへ渡航し、陽子+陽子衝突データの取得および2025年に予定されている金+金衝突実験の試験運転に参加した。重いクォークの測定では、崩壊点の特定や飛跡再構成の精度向上を実現するために、Intermediate Silicon Tracker (INTT) が鍵となる役割を果たす。このINTTは理研がデータ取得において運用を司っており、報告者も2025年の金+金衝突データ取得において同検出器の運用責任者を務めるための実践的な経験を積んだ。報告者は、現在、取得した陽子+陽子衝突データを用いて、より衝突点に近いMAPS Silicon Detector (MVTX) を含むシリコン検出器を活用した荷電粒子の飛跡再構成のパフォーマンスを調査し、モンテカルロシミュレーションによる検出効率の評価を進めている。しかし、シリコン検出器のみで再構成した飛跡の運動量分解能は10%程度と精度が悪く、高い運動量分解能を実現するためには、シリコン検出器群の外層に位置するTime Projection Chamber (TPC) が重要である。ところが、2024年前

半のデータ取得期間中は検出器の問題によりTPCが機能していない状況であったため、報告者はTPCのさらに外側に位置するElectromagnetic Calorimeter (EMCAL) とシリコン飛跡を結びつける飛跡再構成アルゴリズムを開発しており、これにより運動量分解能を数%の精度にまで向上させることを目指している。この途中経過として、再構成したシリコン飛跡を用いた荷電粒子の2粒子相関測定を行い、結果を2025年4月に開催されるクォークマター会議でポスター発表する予定である。来年度は、飛跡再構成アルゴリズムの構築をさらに進め、陽子+陽子衝突における重いクォークの測定を推進するとともに、3月から12月にかけて予定されている金+金衝突実験において、理研が運用を司るINTTの運用責任者の一人としてブルックヘブン国立研究所に長期間滞在し、検出器の安定した運用とデータ取得に従事する計画である。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. ALICE collaboration, “Measurement of beauty production via non-prompt charm hadrons in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV”, JHEP 11 (2024) 148
2. ALICE collaboration, “Rapidity dependence of antideuteron coalescence in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with ALICE”, Phys.Lett.B 860 (2025) 139191
3. ALICE collaboration, “Measurement of the production and elliptic flow of (anti)nuclei in Xe-Xe collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.44$ TeV”, Phys.Rev.C 110 (2024) 6, 064901
4. ALICE collaboration, “Probing Strangeness Hadronization with Event-by-Event Production of Multistrange Hadrons”, Phys.Rev.Lett. 134 (2025) 2, 022303
5. ALICE collaboration, “Investigating Λ baryon production in p-Pb collisions in jets and the underlying event using angular correlations”, Phys.

- Rev. C 111 (2025) 1, 015201
- ALICE collaboration, "Charm fragmentation fractions and $c\bar{c}$ cross section in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV", Eur.Phys.J.C 84 (2024) 12, 1286
 - ALICE collaboration, "Investigating strangeness enhancement with multiplicity in pp collisions using angular correlations", JHEP 09 (2024) 204
 - ALICE collaboration, "Investigating strangeness

- enhancement in jet and medium via $\phi(1020)$ production in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV", Phys. Rev.C 110 (2024) 6, 064912
- ALICE collaboration, "Measurement of beauty-quark production in pp collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV via non-prompt D mesons", JHEP 10 (2024) 110, JHEP 10 (2024) 110

XXIV-015 Achieving Robust Single-Photon Blockade with a Single Nanotip

Name: Ran HUANG

Host Laboratory: Quantum Information Physics Theory Research Team
RIKEN Center for Quantum Computing

Laboratory Head: Franco NORI

Description of research: In the present study, a purely quantum effect, i.e., single-photon blockade (SPB), is achieved in a nonlinear whispering-gallery-mode microresonator with the presence of strong backscattering losses by introducing an additional nanotip. Backscattering losses, due to intrinsic imperfections or external perturbations that are unavoidable in optical resonators, can severely affect the performance of practical photonic devices. In particular, for quantum single-photon devices, robust quantum correlations against backscattering losses, which are highly desirable for diverse applications, have remained largely unexplored. Although, backscattering losses can lead to the breakdown of SPB in conventional systems, we find robust SPB can be revived with an efficiency of up to 99.7% by precisely tuning its position. This SPB is robust against different strengths of backscattering losses. Moreover, different

from the behavior of classical mean photon number, SPB can emerge when the mean photon number is still suppressed, because our findings do not merely rely on the nanotip-induced destructive interference, but on the *interplay* of the resonator nonlinearity and the nanotip-induced optical coupling. Instead of analyzing light amplitudes, we focus on quantum correlations and the transitions between quantum states, which hold the potential for implementations in quantum information technologies. Our findings drive the field of backscattering suppression into the quantum regime, hence making it possible to realize a variety of quantum backscattering-immune effects, such as multi-photon blockade against backscattering losses or one-way single-photon transmission, for potential applications of nanoscale engineering in robust quantum devices and the protection of fragile quantum resources.

XXIV-016 精密宇宙観測を実現するサブミリ波分光撮像技術の開拓

Development of Submillimeter Imaging Spectroscopy for Precision Cosmology

研究者氏名: 宇野 慎介 Shinsuke UNO

受入研究室: 光量子工学研究センター

テラヘルツイメージング研究チーム

(所属長 大谷 知行)

宇宙最大の天体である銀河団同士の衝突合体は、まさに進行している宇宙の構造形成の現場である。この衝突合体に伴う銀河団内部のプラズマ運動を測定する手段として、ミリ波サブミリ波帯の広帯域にわたる分光撮像観測が有力である。本研究では、銀河団のプラズマ運動測定をはじめとする遠方宇宙観測の実現を目指して、超伝

導集積回路および直接光子検出器アレイを用いたミリ波サブミリ波帯の広視野広帯域分光撮像技術を開発する。

本年度は、試作したミリ波150GHz帯検出器の光学評価試験を実施した。この検出器はシリコンチップ上に集積化した超伝導回路であり、平面アンテナで受けた入射光子をマイクロ波力学インダクタンス検出器(MKID;

microwave kinetic inductance detector) に吸収させて測光する。このMKIDの前段にオンチップのバンドパスフィルターを複数配置して周波数を弁別することにより、1ピクセルでの多色同時測光が可能な多色検出器ができる。また検出器回路全体を統一的にコプレーナ線路と呼ばれる単層構造で設計する工夫をし、複雑な多層構造を使わず大規模な検出器アレイを作製しやすくしている。他方、意図せぬ経路からの迷光が系統的な測光誤差を生む要因となる。特に今回用いた検出器の初期デザインでは、各ピクセルのMKIDが示す応答のうち迷光の寄与がアンテナ結合光の寄与に比べて優勢であることが判明した。そこで迷光を抑制するために、極低温でミリ波の吸収体として機能する β 相タンタル薄膜を用いた開口絞り層を検出器チップの入射面に追加導入した。そして黒体放射に対するMKIDの応答振幅を測定した結果、実際に開口絞り層によって迷光の寄与が低減されることが確認できた。また150GHz帯バンドパスフィルターをアンテナ-MKID間に挿入したピクセルでMKIDの応答振幅が小さくなる傾向も見られ、アンテナ結合光に対して周波数弁別が作用していることが示唆された。

更にフィルター単体の性能をより直接的に検証するため、150GHz帯バンドパスフィルターの20倍スケールモデルを試作し、その周波数応答を測定した。透過特性の実測値と電磁界シミュレーションからの計算値とを比較したところ、両者の一致が取れた。このシミュレーションモデルを基にして等倍スケールのフィルターの性能も精度良く予想できると期待される。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Inoue S., Chin K. W., Uno S., Kohno K., Niwa Y., Naganuma T., Yamamura R., Watanabe K., Takekoshi T., and Oshima T.: "A Design Method of an Ultra-Wideband and Easy-to-Array Magic-T: A 6-14 GHz Scaled Model for a mm/submm Camera", *J. Low Temp. Phys.*, 216, 378 (2024)*

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 宇野慎介, 陳家偉, 井上修平, 河野孝太郎, 大島泰, 小野哲, 酒井剛, 長沼桐葉, 山村亮介, 遠藤光, 唐津謙一, Jochem J. A. Baselmans, 竹腰達哉, 丹羽佑果, 渡邊一輝: "ミリ波多色MKIDの小型化に向けたオンチップフィルター回路の設計改良", 日本天文学会2024年秋季年会, 関西学院大学, 9月 (2024)
2. 渡邊一輝, 宇野慎介, 井上修平, 河野孝太郎, 大島泰, 小野哲, 酒井剛, 竹腰達哉: "ミリ波多色カメラに向けたオンチップ準集中定数フィルターのスケールモデルの評価", 日本天文学会2024年秋季年会, 関西学院大学, 9月 (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Watanabe K., Uno S., Inoue S., Takekoshi T., and Oshima T.: "GLTCAM: Evaluation of a Scaled Model of On-Chip Bandpass Filters for Millimeter-Wave multi-color camera", 25th East Asia Submillimeter-wave Receiver Technology Workshop, Daejeon, Korea, Dec. (2024)

XXIV-017 Implementation of a Cold Strontium Atomic Interferometer for Gravitational Acceleration Sensing on an Optical Lattice Clock Apparatus

Name: Quentin D'ARMAGNAC DE CASTANET

Host Laboratory: Quantum Metrology Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head: Hidetoshi KATORI

In his formulation of General Relativity, Albert Einstein predicted an energy loss of electromagnetic waves travelling out of a gravitational well. Therefore, by definition of the gravitational potential, a clock at a higher altitude will measure a higher frequency than an identical clock at a lower altitude. The ability to resolve a height difference through frequency measurements is known as chronometric leveling, or relativistic geodesy. In the past decade, optical lattice

clocks have taken frequency measurements to an unprecedented level of performance, enabling a large variety of so far impossible measurements including centimeter-scale chronometric leveling. Many short-term practical applications are closely related to geophysics, such as a global height reference definition through an accurate geoid mapping or monitoring of slow slip events and dynamic gravitational potential differences induced by volcanic activities or crustal

motion.

Nevertheless, the gravitational potential is related to the difference in altitude through the local gravitational acceleration, the accuracy and stability of which will ultimately determine the absolute performance of the chronometric leveling measurement. Among quantum instruments, cold atom inertial sensors stand out as one of the most mature technologies and quantum gravimeters have already proven very efficient on-field. Additionally, optical lattice clocks and matter-wave interferometers are based on similar apparatuses and involve several identical processes, making it an ambitious yet natural prospect to realize a high end, versatile quantum sensor that could measure both the gravitational field and the corresponding potential with interleaved measurements of acceleration and frequency.

A preliminary estimation of the required performances for this quantum gravimeter led to the dimensioning of a measurement sequence

and appropriate apparatus, bearing in mind the compatibility with the state-of-the-art optical lattice clocks developed in our group. Before realizing a field demonstration of such versatile sensor, the atom interferometer yielding the acceleration measurement alone must be carefully examined, which is why it was decided to build a dedicated apparatus providing an ideal platform for refining the experimental parameters and subsequently duplicating the procedure on the transportable device. After these first few months, the vacuum chamber was sealed and lasers were assembled, leading to the first observation of a slowed strontium atomic beam. Subsequent cooling in a two-stage magneto-optical trap and quantum purity enhancement through spin-state selection will then provide a well-defined atomic source, making the realization of a quantum gravimeter based on clock atom interferometry within reach.

XXIV-018 2色励起発光による THz 応答測定法の開拓

Development of Terahertz Response Measurement Technique Using Two-color Excitation Photoluminescence

研究者氏名：西留 比呂幸 Hiroyuki NISHIDOME
受入研究室：量子工学研究センター
量子オプトエレクトロニクス研究チーム
(所属長 加藤 雄一郎)

テラヘルツ (THz) 光は、その周波数が従来狙えなかった微小なエネルギー準位差、分子や結晶が持つ固有の振動の周波数帯と一致するため、物性評価や物質検出などへ応用可能な光として注目されている。

この微小なエネルギー差を持つ物質の一つが半導体型の単層カーボンナノチューブ (SWCNT) である。SWCNT は、近赤外レーザーの照射により、室温で励起子発光を示す。しかし、SWCNT は発光可能な明励起子よりも発光禁制な暗励起子の方が安定なため、SWCNT の励起子発光効率は低い。この暗励起子と明励起子準位のエネルギー差は、数 THz 程度であるため、励起した SWCNT が THz 光を吸収することが報告されている。この結果は、近赤外光と THz 光の 2 色で励起することにより、暗励起子が明励起子へ変化し、励起子発光効率が上昇することを示唆するが、発光の増加は報告されていない。これは、SWCNT が他の SWCNT や測定基板との接触すると発光が抑制され、その検出ができなくなるためだと考えられる。

しかし私たちは、溝の上に架橋した SWCNT の合成に

よりこの抑制を回避し、独自の高精度発光測定系を使うことで SWCNT の発光を研究してきた。そのため、この発光測定系と THz 光を組み合わせることで、2 色励起による発光変化が観測できると考える。そこで今年度は、①使用する THz 光源の作製、②2 色励起発光測定系の構築、③それを用いた SWCNT における発光変化の観測の 3 つを目標に研究を行った。

① THz 光源の作製：理研のテラヘルツ光源研究チームの協力のもと、申請者自ら波長可変 THz パルス光源製作を行った。完成した THz 光源は、当研究室への運搬も完了している。

② 2 色励起発光測定系の構築：既存の発光測定系では THz 光源の導入が不可能であったため、申請者は、1 から再設計し、その発光測定系の再構築と調整も行った。現在、THz 光源の導入も完了しており、近赤外光と THz 光を同時に照射可能な 2 色励起発光系の構築の構築が完了している。

③ THz 光による発光変化の観測：測定を行ったが、有意な発光の変化を観測することはできていない。この結

果は、THzパルス光の照射時間が測定時間に比べて短すぎるため、変化が埋もれたためだと考えられる。これは、想定していた問題の一つであり、測定時間の短縮が可能な時間分解測定を行うことで解決できる。そのため、新たに時間分解測定系を追加で構築しており、今後は、これを用いて発光変化を評価する。

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Nishidome H., Omoto M., Nagai K., Uchida K.,

Murakami Y., Eda J., Okubo H., Ueji K., Yomogida Y., Tanaka K., Yanagi K., Kato Y. K.: "Control of terahertz high-harmonic generation in single-walled carbon nanotubes by tuning Fermi level", *ASPIRE-EXAR Kick-off Workshop*, Sweden, May (2024).

2. Nishidome H., Takida Y., Minamide H., Kato Y. K.,: "Construction of a THz-induced photoluminescence measurement system", 理研シンポジウム：第12回「光量子工学研究」, 和光, 12月 (2024).

XXIV-019 拡張多極子をもたらす新奇な量子多体物理

Development of Novel Quantum Many-body Physics Based on Augmented Multipole

研究者氏名：野垣 康介 Kosuke NOGAKI
受入研究室：創発物性科学研究センター
計算物質科学研究チーム
(所属長 有田 亮太郎)

2021年に報告された新奇重い電子系超伝導体 CeRh_2As_2 は相図中に2つの超伝導相を持ち、奇パリティ超伝導状態の実現が期待されている。奇パリティ超伝導体はトポロジカル超伝導実現の良い舞台であり、量子コンピュータへの応用などが強く期待される。この奇パリティ超伝導相の起源は局所的に空間反転対称性を破る結晶構造にあると理解されているが、詳細な超伝導状態の決定には当該物質の電子状態に基づく考察が必要不可欠である。また、核磁気共鳴 (NMR) 実験によると、奇パリティ多極子の一種である磁気単極子秩序が報告されており、超伝導発現機構との関連性も興味深い。このような状況の下、角度分解光電子分光 (ARPES) 測定が行われ、電子状態計算との比較がされている。ARPES 測定の結果により、X点近傍に van Hove 特異点が存在していること、M点近傍に重い Dirac 点が存在していることが指摘された。これら特徴的な電子状態の下に安定化する磁気構造や超伝導状態について考察した。

重い電子系の電子状態は極めて複雑であり、素朴に作成した大規模多軌道模型に対して量子多体計算を適用することは現実的でない。そこで、 CeRh_2As_2 の電子状態計算を再現するような簡略化された周期 Anderson 模型を構築した。得られた模型に対して乱雑位相近似を適用し磁気揺らぎと超伝導状態を調べた。

磁気揺らぎに関しては、強的な磁気単極子揺らぎに対応する磁化率が発達し NMR 測定と整合するデータが得られた。フェルミ準位近傍に Dirac 点が位置する場合には、量子幾何と呼ばれる波動関数の幾何学的性質が強的な磁気揺らぎを引き起こすことが知られている。本研

究の模型においても M 点の重い Dirac 点がフェルミ準位近傍に位置しており、量子幾何に由来する強的な磁気単極子揺らぎが得られたと考えている。

得られた強的な磁気単極子揺らぎにより媒介された超伝導について考察してみると、重い Dirac 点に由来する小さなフェルミ面に強く局在するような超伝導秩序変数が得られた。 CeRh_2As_2 の圧力下相図と比較し、低磁場相が B_{2g} 状態、高磁場相が B_{1u} 状態であることを提案した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. X. Chen, L. Wang, J. Ishizuka, R. Zhang, K. Nogaki, Y. Cheng, F. Yang, Z. Chen, F. Zhu, Z. Liu, J. Mei, Y. Yanase, B. Lv, and Y. Huang: "Coexistence of near- E_F Flat Band and Van Hove Singularity in a Two-Phase Superconductor", *Phys. Rev. X* **14**, 021048 (2024)
2. J. Ishizuka, K. Nogaki, M. Sigrist, and Y. Yanase: "Correlation-induced Fermi surface evolution and topological crystalline superconductivity in CeRh_2As_2 ", *Phys. Rev. B* **110**, L140505 (2024)
3. K. Nogaki and Y. Yanase: "Field-induced superconductivity mediated by odd-parity multipole fluctuation", *Phys. Rev. B* **110**, 184501 (2024)

●口頭発表 Oral Presentations

1. 野垣康介、柳瀬陽一：“ CeRh_2As_2 の電子状態に基づく超伝導状態の考察”、日本物理学会 第79回年次大会 (2024年)、札幌、9月
2. 野垣康介：“ CeRh_2As_2 の電子状態から見た超伝導”、超伝導研究の新潮流、京都、12月

XXIV-020 局所および準局所保存量に基づく孤立量子系の熱平衡化の時間スケールの解明

Studies on the Timescale of Thermalization in an Isolated Quantum System in Light of Local and Quasilocal Conserved Quantities

研究者氏名：千葉 侑哉 Yuuya CHIBA

受入研究室：開拓研究本部

濱崎非平衡量子統計力学理研白眉研究チーム

(所属長 濱崎 立資)

孤立量子系の熱平衡化(熱化)は、量子非可積分系、すなわち“解けない”量子多体系で見られる現象である。そのような個々の“解けない”モデルでの熱化を理論的に厳密に解析するのは難しく、これまでの研究は数値計算に頼る部分が大きかった。しかし、厳密対角化のような数値計算手法では、スピン1/2系でもスピン数20程度までしか扱えず、様々な量のシステムサイズ依存性を調べることが難しい。なかでも、熱化の時間スケールのシステムサイズ依存性は、最大の未解決問題の1つとして残されている。このような状況を打開するためには、やはり厳密な理論解析によるアプローチが望ましいと考えられる。

近年、N. Shiraishi, EPL **128** (2019) 17002により、ある1次元スピン1/2系において、局所保存量の不在が証明された。局所保存量の不在は、量子非可積分性とほとんど等価だと考えられているため、これは特定のモデルが“解けない”ことの厳密な証明が、理論物理のターゲットとなり得ることが明らかにされたと言ってもよい。本研究では、Shiraishi (2019) の手法をはじめとする、厳密な手法を使って、種々の熱化の問題に取り組み、ひいては熱化の時間スケールの解明に貢献することを目的とする。

本年度は、まず非可積分系の熱的固有状態の構成の問題に取り組んだ。量子系のエネルギー固有状態は、時間発展のあらゆる情報を担い、特に十分長い時間領域での熱化現象は、固有状態が熱的かどうかによって左右される。非可積分系は“解けない”ため、すべての固有状態を構成することは難しいが、熱的な固有状態については、その一部すら具体的に構成した例はなかった。今回、あるモデルの、無限温度に相当するエネルギーをもついくつかのエネルギー固有状態を解析的に構成し、それが熱であることを証明した。さらに、そのモデルが非可積分であることをShiraishi (2019) の手法を使って示した。

さらに、Shiraishi (2019) の手法の拡張にも取り組んだ。具体的には、高次元格子への拡張として、2次元

の斜め磁場イジングモデルの非可積分性証明を行った。また、高次スピンへの拡張として、スピン1のbilinear biquadraticモデルの非可積分性証明を行った。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Chiba Y. and Yoneta Y.: “Exact Thermal Eigenstates of Nonintegrable Spin Chains at Infinite Temperature”, Phys. Rev. Lett., **133**, 170404 (2024)*
2. Yamaguchi M., Chiba Y. and Shiraishi N.: “Complete Classification of Integrability and Non-integrability for Spin-1/2 Chain with Symmetric Nearest-Neighbor Interaction”, arXiv:2411.02162 (2024)
3. Yamaguchi M., Chiba Y. and Shiraishi N.: “Proof of the absence of local conserved quantities in general spin-1/2 chains with symmetric nearest-neighbor interaction”, arXiv:2411.02163 (2024)
4. Hokkyo A., Yamaguchi M. and Chiba Y.: “Proof of the absence of local conserved quantities in the spin-1 bilinear-biquadratic chain and its anisotropic extensions”, arXiv:2411.04945 (2024)
5. Chiba Y.: “Proof of absence of local conserved quantities in two- and higher-dimensional quantum Ising models”, arXiv:2412.18903 (2024)

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 千葉侑哉, 米田靖史: “非可積分スピン系の無限温度にある熱的なエネルギー固有状態の厳密な構成”, 日本物理学会第79回年次大会, 札幌, 9月(2024年)
2. Chiba Y. and Yoneta Y.: “Exact thermal energy eigenstates of nonintegrable 1D spin systems”, APS Global Physics Summit 2025, Anaheim, March (2025)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. 千葉侑哉: “量子イジングモデルの非可積分性証明”, ERATO・学術変革B合同合宿会議, 郡山, 3月(2025年)

XXIV-021 高次 Berry 位相を用いたトポロジカル相の理論的研究

Theoretical study of the higher Berry phase and its application to topological phases

研究者氏名：大山 修平 Shuhei OHYAMA
受入研究室：創発物性科学研究センター
量子物性理論研究グループ
(所属長 古崎 昭)

トポロジカル相とはトポロジカル不変量と呼ばれる幾何学的な量によって特徴づけられる量子相の総称である。トポロジカル不変量はその幾何学的な背景に起因して離散的な値を取るため、トポロジカル相は高い安定性をもち、量子計算の基本素子としての応用などが盛んに議論されてきた。

高次 Berry 位相とは多体系における幾何学的位相の一般化である。多体系におけるトポロジカル不変量の構成において高次 Berry 位相が基本的な役割を果たすことはこれまでの研究で明らかとなってきた。しかしながら格子系における基礎づけはあまりなされていないのが現状であった。そこで本研究では高次 Berry 位相の基礎づけ及びそのトポロジカル相への応用を行った。

まず基礎づけとして「 $2+1$ 次元系における高次 Berry 位相の定式化」及び「 $1+1$ 次元系における高次 Berry 曲率の定式化」というテーマで研究を行なった。前者の研究では $2+1$ 次元系の量子状態について、semi-injective PEPS と呼ばれるクラスのテンソルネットワークを用いることで、4つの状態の内積 (四重内積) という量を定義し、これが高次 Berry 位相と見做せることを示した。後者の研究では行列積状態を用いることによって Berry 接続の直接の一般化である高次 Berry 接続が定義できることを示した。これらの研究は高次 Berry 位相に対するテンソルネットワークを用いたアプローチの有用性や妥当性を示す研究ということができる。

また応用としては「圏論的対称性に守られた対称性保

護トポロジカル相に対する応用」というテーマでの研究も行なった。圏論的対称性とは従来の対称性の概念を一般化した一般化対称性の一つである。通常の対称性は群によって記述されるため、特にある操作が系の対称性であればその逆元に対応する操作が存在する。一方圏論的対称性は圏と呼ばれる数学的対称性によって記述される対称性で、一般には逆元を持たないことが特徴である。そのため圏論的対称性は非可逆的対称性とも呼ばれる。この研究では圏論的な対称性に守られたトポロジカル相について、その分類を与えるトポロジカル不変量の構成を行った。その過程で特にトポロジカル不変量は高次 Berry 位相として理解できることがわかった。この研究は高次 Berry 位相の応用として位置付けられるものであり、高次 Berry 位相の重要性や有用性を示す研究ということができる。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Shuhei Ohyama, Shinsei Ryu, “Higher Berry Phase from Projected Entangled Pair States in $(2+1)$ dimensions” arXiv:2405.05325
2. Shuhei Ohyama, Shinsei Ryu, “Higher Berry Connection for Matrix Product States” PRB アクセプト済み
3. Kansei Inamura, Shuhei Ohyama, “ $1+1$ d SPT phases with fusion category symmetry: interface modes and non-abelian Thouless pump” arXiv:2408.15960

XXIV-022 第一原理計算に基づいたトポロジカル磁気構造における非平衡ダイナミクスと量子輸送現象の開拓

Theoretical Study on Non-equilibrium Dynamics and Quantum Transport Phenomena in Topological Spin Textures Based on the First Principle Calculation

研究者氏名：清水 宏太郎 Kotaro SHIMIZU

受入研究室：創発物性科学研究センター

計算物質科学研究チーム

(所属長 有田 亮太郎)

近年、磁氣的・電氣的な機能性に優れ、強磁性体とは異なる特徴を持つ磁性体が注目されている。その一例として、トポロジカルに非自明な磁気構造が挙げられる。このトポロジカル磁気構造は、不揮発な情報担体として、次世代スピントロニクスデバイスのシーズとなり得ることが指摘されている。さらに近年、時間反転対称性を破る反強磁性体が磁気デバイス応用の観点から新たな脚光を浴びている。この種の磁性体は、磁気状態の電氣的な読み出しが可能で、漏れ磁場が少なく、高速動作が期待されるうえ、候補物質が多いことから、シンプルかつ広範な研究の舞台として新たな潮流を作り出している。本研究では、こうしたトポロジカル磁性体と反強磁性体を対象に、その応用を見据えた磁気状態の駆動・制御に関する理論研究を行った。

まず本研究では、ある種のカイラル磁性体で現れる「ヘッジホッグ」と呼ばれる三次元的なトポロジカル磁気構造に着目した。この構造は、電子にとって有効磁場の湧き出しや吸い込みを形成し、固体中で実現する磁気モノポールという側面からも注目を集めている。本研究では、こうした磁気構造を情報担体として駆動するうえで重要となる電流応答特性を明らかにするため、磁化ダイナミクスを記述するLandau-Lifshitz-Gilbert (LLG)方程式に基づく数値シミュレーションを行った。その結果、ヘッジホッグの駆動方向が電流に対して0度から90度の範囲で変化し、さらに磁場や電流密度によってその角度を制御できることを明らかにした。また、この柔軟な制御性が、ヘッジホッグ特有のトポロジカルな磁気状態とその短周期性に起因していることを見出した。

次に、近年精力的な物質開拓がなされている室温で動作する反強磁性体に着目し、とりわけその磁気メモリへの応用で重要となるスピン軌道トルクによる磁気状態の反転特性を調べた。熱で揺らぐ反強磁性秩序の時間発展を記述する有効的なFokker-Planck方程式に基づく解析計算と、LLG方程式に基づく数値計算を相補的に駆使することで、包括的な解析を行った。その結果、これまで強磁性体に対して構築されてきた理論体系を反強磁性体に拡張することに成功しただけでなく、反強磁性体の磁

気状態反転に要する時間スケールが、強磁性体に比べて1~2桁程度小さくなりうることを明らかにした。また、こうした高速な反転が、反強磁性体ではその磁気構造に由来して普遍的に起こりうることを見出した。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Shimizu K., Okumura S., Kato Y., and Motome Y.: "Current-induced motion of nanoscale magnetic torons over the wide range of the Hall angle", *Commun. Phys.*, to be published (arXiv:2407.02983)*
2. Shimizu K., Okumura S., Kato Y., and Motome Y.: "Soliton penetration from edges in a monoaxial chiral magnet", *Phys. Rev. B* 111, 024411 (2025)*
3. Okubo V.-Y., Shimizu K., Shivaram B. S., and Kim H.-Y.: "Characterization of Magnetic Labyrinthine Structures Through Junctions and Terminals Detection Using Template Matching and CNN", *IEEE Access* 12, 92419 (2024)*
4. Kasai S., Shimizu K., Okumura S., Kato Y., and Motome Y.: "Three-dimensional Topological Superstructure of Magnetic Hopfions Threaded by Meron Strings in Easy-plane Magnets", submitted (arXiv:2411.00396)

●口頭発表 Oral Presentations

1. Shimizu K., Okumura S., Kato Y., and Motome Y.: "Current-induced dynamics of magnetic hedgehog lattices", *ISSP Theory mini-Workshop Correlated Quantum Materials + beyond*, Kashiwa, Japan, November (2024)
2. Shimizu K., Okumura S., Kato Y., and Motome Y.: "Current-induced dynamics of magnetic hedgehog lattices", *SOL-SKYMAG 2024*, San Sebastian, Spain, June (2024)
3. 清水宏太郎, Chern G.-W.: "金属カイラル磁性体におけるスキルミオン格子の結晶化ダイナミクスに関する理論研究", 日本物理学会第79回年次大会, 18aS101-4, 札幌, 9月(2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Shimizu K., Okumura S., Kato Y., and Motome Y.:

"Monopole Hall effect in a metallic chiral magnet",
New Frontiers in Advanced Magnetism 2024, P-27,
Sapporo, Japan, August (2024)
2. Shimizu K., Okumura S., Kato Y., and Motome Y.:

"Current-induced dynamics of magnetic hedgehog
lattices", International Conference on Magnetism
2024, #ICM2024_3.08_1744, Bologna, Italy, July
(2024) [selected as Best Poster Award]

XXIV-023 ファンデルワールス層状超伝導体を用いた対称性制御と新奇超伝導物性の開拓 Symmetry engineering and novel superconducting properties in van der Waals layered superconductors

研究者氏名：板橋 勇輝 Yuki ITAHASHI
受入研究室：創発物性科学研究センター
創発デバイス研究グループ
(所属長 岩佐 義宏)

空間反転対称性の破れた超伝導体では、電流の方向によって常伝導電流と超伝導電流が切り替わる超伝導ダイオード効果が期待される。半導体ダイオードが電子機器の重要な要素であると同様に、この超伝導ダイオードも超伝導エレクトロニクスの実現に向けた重要な要素の1つである。これまで超伝導ダイオード効果は有限磁場下や磁気秩序を持つ系で主に議論されてきたが、時間反転対称性が保たれている系での報告は限られており、その起源、そして空間反転対称性の破れた結晶構造との関連も未だ不明瞭である。本研究では、空間反転対称性の破れた3回対称ファンデルワールス層状超伝導体であるPbTaSe₂における歪み誘起超伝導ダイオード効果を明らかにした (F. Liu*, Y. M. Itahashi*, S. Aoki, Y. Dong, Z. Wang, N. Ogawa, T. Ideue, and Y. Iwasa "Superconducting diode effect under time reversal symmetry.", Science Advances 10, eado1502 (2024) (Co-first and co-corresponding author)). SDEは、電圧-電流特性を測定した際に、電流が正及び負の場合の臨界電流の差として現れるが、歪みを印加していないデバイスではSDEは見られなかった。そこで1軸歪みを印加することで対称性を低下させたPbTaSe₂デバイスの電圧-電流特性の測定を行った。その結果、有限のSDEが見られた。これは歪みによって誘起された3回回転対称性の破れ、及びそれによる面内分極の出現がSDEの発現に重要な役割を果たしていることを示唆している。さらに、SDEの面直磁場依存性を調べた結果、電流と歪みをarmchair方向に印加した場合は無磁場、そして磁場に対して偶の、zigzag方向に印加した場合は磁場に対して奇の振る舞いを示した。この電流方位及び磁場依存性は、結晶対称性から期待される振る舞いと一致しており、観測されたSDEが結晶対称性に由来する物性であるということの証左である。特に、今回の研究では

磁性体との接合や磁性を示すような振る舞いもなく、また、PbTaSe₂はs波の超伝導体だと実験的に報告されているため、無磁場の時間反転対称下での超伝導ダイオードとなっている。以上のように本研究では、時間反転対称条件下でのSDEの可能性とその結晶対称性との関連について明らかにした。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. F. Liu*, Y. M. Itahashi*, S. Aoki, Y. Dong, Z. Wang, N. Ogawa, T. Ideue, and Y. Iwasa "Superconducting diode effect under time reversal symmetry.", Science Advances 10, eado1502 (2024). (Co-first and co-corresponding author)
2. S. Aoki, Y. Dong, Z. Wang, X. S.-W. Huang, Y. M. Itahashi, N. Ogawa, T. Ideue, and Y. Iwasa. "Giant Modulation of the Second Harmonic Generation by Magnetoelectricity in two Dimensional Multiferroic CuCrP₂S₆.", Advanced Materials 36, 202312781 (2024).

●口頭発表 Oral Presentations

1. Yuki Itahashi, "Superconducting Diode Effect in Strain-controlled Trigonal Superconductor" IAS conference, Geometry and Correlations in Low-dimensional and Topological Materials, Hong Kong, December (2024) (Invited)
2. Yuki Itahashi, Fengshuo Liu, Shunta Aoki, Yu Dong, Ziqian Wang, Naoki Ogawa, Toshiya Ideue, and Yoshihiro Iwasa, "3回対称超伝導体PbTaSe₂における歪み誘起超伝導ダイオード効果" 第30回 渦糸物理ワークショップ, 静岡, 12月 (2024)
3. 板橋勇輝, "空間反転対称性の破れた層状超伝導体における整流効果" 二次元系物質を中心とした超伝導物性の新展開, 名古屋, 11月 (2024) (Invited)
4. Yuki Itahashi, Fengshuo Liu, Shunta Aoki, Yu Dong, Ziqian Wang, Naoki Ogawa, Toshiya Ideue, and

Yoshihiro Iwasa, "Superconducting diode effect in strain-controlled trigonal superconductor" CEMS research camp, Saitama, November (2024)

5. 板橋勇輝, "ファンデルワールス層状超伝導体における整流効果" 創発量子現象のフロンティア: 超伝導接合、エッジ伝導、エニオン, 京都, 5月 (2024) (Invited)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Yuki Itahashi, Fengshuo Liu, Shunta Aoki, Yu Dong, Ziqian Wang, Naoki Ogawa, Toshiya Ideue, and Yoshihiro Iwasa, "Superconducting phase diagram in misfit-layered superconductor" Gordon research conference, Two Dimensional Electronics Beyond Graphene, New Hampshire, June (2024)

XXIV-024 パルス強磁場・高圧力下トンネル分光測定の開発と応用

Development and Applications of Tunneling Spectroscopy under High Pressure in Pulsed High Magnetic Fields

研究者氏名：二本木 克旭 Katsuki NIHONGI
受入研究室：創発物性科学研究センター
創発物性計測研究チーム
(所属長 花栗 哲郎)

強相関電子系物質では、絶対零度に近い低温下で電子のもつ内部自由度が顕著となり、磁場や圧力といった外場により量子相転移を引き起こす。この量子臨界点近傍では、非従来型超伝導や異常金属等の多様な物理現象が発現する。走査型トンネル顕微鏡/分光 (STM/STS) は磁場・低温環境下でフェルミ面近傍の電子状態を直接観測することができるため、量子臨界現象の解明に有効な手法である。現状、STMは振動に敏感なことから市販の超伝導マグネットを用いることが多く、最大磁場は20T程度に限られている。また、STM/STSは探針を走査するため、静水圧下で使用できない。そこで本研究では、強相関電子系物質における新奇量子相の開拓および解明のため、パルス強磁場 (~55T)・高圧力 (~3 GPa) 下における点接合を利用したトンネル分光測定装置の開発を目的とした。点接合分光は探針を試料に固定しているため走査できないが、パルス強磁場発生時に生じる機械振動に対する耐性が高まり、その上圧力下でも導入可能である。

本年度は、受け入れ研究室の有するSTMを用いて、遍歴磁性体 GdRu_2Ge_2 の電子状態を分光イメージングSTMで直接観測して、多彩な磁気相の解明を行うとともにトンネル分光技術のパルス強磁場への課題点を洗い出し、その対策を提案した。

(1) GdRu_2Ge_2 は伝導電子を媒介とした局在スピン間のRKKYおよび多体相互作用により、磁場中でスキルミオン相やメロンアンチメロン相といった多彩な磁気相を示す。STMでGe終端表面のフェルミ面近傍の電子状態密度を直接観測したところ、転移磁場で不連続な変化をすることが確認された。また、分光イメージングによる電

子状態密度の空間分布は、磁気相ごとに異なる変調を示した。この空間分布は各磁気相の隣接する局在スピン間の内積に比例した実空間像と定性的に一致することを明らかにした。

(2) STMにおけるトンネル分光では、pAオーダーのトンネル電流を電流アンプにより増幅して、ロックインアンプで検出するため、1スペクトルの測定に数秒要する。一方、パルス強磁場中では、パルス磁場頂上付近の磁場変化の小さい範囲 (数ミリ秒) で高速で電圧掃引する必要がある。そこでダミー抵抗を用いた疑似的なトンネル分光測定回路を構築して、1kHz以上の高速電圧掃引における電流電圧特性を調べた。今後は、STMを利用して探針-試料間の接触抵抗の変化に伴う測定試料の伝導特性を調べるとともに、ミリ秒オーダーの高速トンネル分光測定を試みる。

●口頭発表 Oral Presentations

(学会)

1. 二本木克旭, Christopher J Butler, 花栗哲郎, 吉持遥人, 高木里奈, Nguyen Duy Khanh, 関真一郎: "GdRu₂Ge₂における多彩な磁気相の分光イメージング", 第79回日本物理学会, 北海道大学, 9月(2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Nihongi K., Christopher J B., Hanaguri T., Yoshimochi H., Takagi R., Nguyen D K. and Seki S.: "Spectroscopic imaging STM on multiple magnetic phases in GdRu₂Ge₂", CEMS Research Camp "Advanced Methods and Materials", November (2024)

XXIV-025 結晶成長におけるトポロジカル相に誘起される非平衡パターン形成の研究 Nonequilibrium Pattern Formation Induced by Topological Phases in Crystal Growth

研究者氏名：田中 悠太郎 Yutaro TANAKA
受入研究室：創発物性科学研究センター
量子物性理論研究グループ
(所属長 古崎 昭)

今までの結晶成長の理論研究は、特定の物質によらない一般の多粒子系を扱うことが多く、物質の持つ固有の性質、特に量子力学的な効果は見過ごされてきた。近年、トポロジーに基づいて分類される新しいタイプの量子相であるトポロジカル絶縁体が注目を集めている。本研究では、トポロジカル絶縁体といった、固体物理におけるユニークな量子物性の効果を結晶成長に導入することで、量子物性に基づく新奇な結晶成長現象の探索を目指す。トポロジカル絶縁体は対称性に保護された特殊な境界状態を持っている。したがって、トポロジカル絶縁体の結晶成長過程において、その境界状態が界面のダイナミクスへ影響を与えることが期待できる。本研究では、トポロジカルな境界状態がどのように結晶成長に影響を与えるのかを明らかにし、トポロジカル物性に基づく新奇な結晶成長とパターン形成の探索を行う。本年度は、多面体の辺や角に局在した状態をもつ高次トポロジカル絶縁体がもたらす結晶成長に着目した。コーナー状態を持つ強束縛模型において、原子が結晶に吸収されるときエネルギー変化を記述する有効理論を構築し、その有効理論のもとで結晶成長のダイナミクスを調べた。その結果、高次トポロジカル相による角状態が存在しているときは、自明な絶縁体に比べて角が優先して成長し、このような結晶成長はフラクタル次元によって特徴づけられることが分かった。

また、上記の研究と並行して結晶対称性に保護された非エルミートトポロジカル相の研究も行った。具体的には、最も基本的な結晶対称性の一つである鏡映対称性を持つ非エルミート系におけるトポロジカル相の分類理論の構築を行った。その分類の中には従来知られてないタイプの非エルミートトポロジカル相が含まれており、その非エルミートトポロジカル相の性質を調べた。その結果、その非エルミートトポロジカル相においては、例外点とい

う対角化不可能点を伴う、多面体の辺の部分に局在した2次の境界状態が現れることが分かった。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Tanaka Y., Nakamura D., Okugawa R., Kawabata K.: "Exceptional Second-Order Topological Insulators", arXiv:2411.06898 (2024), submitted.

●口頭発表 Oral Presentations

(招待講演)

1. Tanaka Y.: "Anomalous crystal shapes of topological materials", Informal Theory Seminar, The Institute for Solid State Physics, Kashiwa, Jul. (2024)

(学会)

1. 田中悠太郎, Shuai Zhang, Tiantian Zhang and 村上修一: "トポロジカル物質の結晶成長におけるトポロジカル角部凝集現象", 日本物理学会第79回年次大会, 札幌, 9月 (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

(学会)

1. Tanaka Y., Zhang S., Zhang T. and Murakami S.: "Selective growth induced by topological phases in crystal growth," APW-RKEIN-Tsinghua-Kavli workshop "Highlights on condensed matter physics", Wako, Nov.(2024)
2. Tanaka Y., Zhang S., Zhang T. and Murakami S.: "Topological aggregation in crystal growth of topological materials", ISNTT2024, Atsugi, Dec. (2024)
3. Tanaka Y., Nakamura D., Okugawa R., Kawabata K.: "Exceptional second-order topological insulators", New Trends in Condensed Matter Theory 2024, Kashiwa, Dec.(2024)

XXIV-026 Rare-Earth Metal Catalysis for Multi-functional Polymer Synthesis

Name: Mengqing CHEN

Host Laboratory: Advanced Catalysis Research Group
RIKEN Center for Sustainable Resource Science
Laboratory Head: Zhaomin HOU

Description of research: Self-healing (SH) polymers are auspicious materials for diverse applications due to their ability to autonomously repair damage, thereby enhancing the durability of structural components and the reliability of electronic devices. Previous research in our group has reported SH phenomena driven by phase separation. The seminal discovery of SH-polymers consist of several types, one of which, we designate as E/EA, where an allylanisol (A) and ethylene (E) selectively form first an EA-unit, which copolymerizes with E. The EA part acts as the elastic part of the polymer, while the polyethylene part forms crystalline nanodomains that crack upon mechanical stress and crystallize again when the stress is removed. Mechanistically, the methoxy group on A plays a key role controlling the coordination chemistry around the rare-earth metal employed as a catalyst in the polymerizations (i.e., heteroatom-assisted olefin polymerization, HOP) hence enabling the selective formation of the EA unit. This study aims to expand SH polymer applications through molecular design and mechanistic study. We incorporated ferrocene, valued for its stability, reversible redox behavior ($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$), and electron-donating properties, which enhance electron mobility in molecular wires and nanoelectronics. To achieve this, I designed the

monomer 2-(4-vinylphenyl)vinylferrocene (PFc) by one step witting reaction. The incorporation of PFc as a third component into E/EA system was achieved by co-polymerization of ethylene, allylanisol and 2-(4-vinylphenyl)vinylferrocene catalyzed by rare-earth-metal complex. Half-sandwich rare-earth di-alkyl complexes (CpMR_2 , $M = \text{Sc}, \text{Y}$) activated by $[\text{Ph}_3\text{C}][\text{B}(\text{C}_6\text{F}_5)_4]$ generated cationic monoalkyl species, serving as efficient single-site catalysts via coordination-insertion mechanism. The resulting polymer exhibits high SH properties within 24 hours after physical damage. Mechanical and photophysical properties were characterized, and partial oxidation/ionization of the E/EA/PFc polymer to Fe^{3+} was performed to study conductivity. Future work will explore the relationship between PFc content, oxidation efficiency ($\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ratio), and conductivity to optimize the material for electronic applications.

● Publications

Papers

1. Chen M., Itabashi Y., Fukuma S., Shang R., and Nakamura E. Iron-Catalyzed 5-Endo-Dig Synthetic Approach to Indenes and Its Bidirectional Extension to Narrow Bandgap π -Systems. *ACS Catal.* 2024, 14, 1375–1383.

XXIV-027 生体内で安定な人工金属触媒の開発と、組織特異的 SQLE 分解誘導剤合成への応用

Development of Artificial Metaloenzyme Stable in-vivo and its Application to Induce Tissue-Specific SQLE Degradation

標的タンパク質 (POI: protein of interest) を分解する化合物が新しいタイプの薬として期待されている。しかし、そのような化合物を全身に投与した際には、正常組織上での POI 分解も引き起こし、副作用につながる可能性がある。そのため、疾患部位特異的に POI 分解を誘導する手法が求められる。そこで、申請者は所属研究室で開発中の人工金属触媒に着目した。これは不活性な薬剤

研究者氏名: 吉岡 広大 Hiromasa YOSHIOKA
受入研究室: 開拓研究本部
田中生体機能合成化学研究室
(所属長 田中 克典)

原料を、標的組織上で薬剤本体に変換するものである。本手法の応用により、組織上でのみ分解誘導剤を合成し、標的的特異的な POI 分解が達成できると考えた。しかし、開発中の触媒は血中での不安定性や反応性の低さが課題であり、生体内で合成可能な薬剤に限られる。そこで、本研究では金属触媒の構造展開を行い、生体中でも安定かつ反応性の高い触媒を創製することを第一目的と

する。さらに開発した触媒の応用として、がんなどの新しい治療標的として期待されるPOIの分解誘導剤を、疾患部位のみで合成する手法を確立する。これまでの研究から、本研究のPOIを標的とした分解誘導剤は副作用の少ない治療薬になることが期待されるが、未だ実現されていない。第一段階で得られた触媒を用いて、組織特異的にPOI分解誘導剤を合成し、その有用性を示すことを最終目的とする。

本年度は昨年度から行なっていた金属触媒の改良が完了した。これにより、既存の触媒を凌駕する、生体適合型の新規触媒を開発することに成功した。この触媒を用いることで、マウス体内で抗がん剤を合成し、副作用のないがん治療が可能であった。この触媒は本研究で目的とする、分解誘導剤の生体内合成にも適用可能なものである。現在はPOIを分解する化合物の探索を行っている。このような化合物は未知であるため、いくつか候補分子を設計し、その合成を行なった。現在は合成した分子のPOI分解活性評価を行い、評価系の構築を進めている段階である。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Kasahara T., Chang T.-C., Yoshioka H., Urano S., Egawa Y., Inoue M., Tahara T., Morimoto K., Pradipta A.R. and Tanaka K.: "Anticancer Approach by Targeted Activation of a Global Inhibitor of Sialyltransferases with Acrolein" *Chem. Sci.* 15 9566–9573 (2024)
2. Nashibullin I., Yoshioka H., Mukaimine A., Nakamura A., Kusakari Y., Chang T.-C. and Tanaka K.: "Catalytic olefin metathesis in blood" *Chem. Sci.* 14 11033–11039 (2023)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Shimura Y., Yoshioka H., Pradipta A.R. and Tanaka K.: "Selective Activation of PROTACs in Cancer Cells via Metathesis Reaction using Artificial Metalloenzymes," 1st Biology and Chemistry Cancer and Aging Research Symposium (BioCARES), Indonesia, 2024.11.28

XXIV-028 局所分子構造を反映する超高速キラル識別法の開拓：光電子ヘリカル二色性の実証

Pioneering Ultrafast Chiral Discrimination Reflecting Local Molecular Structure: Demonstrating Photoelectron Helical Dichroism

研究者氏名：池田 大 Dai IKEDA

受入研究室：光量子工学研究センター

超高速コヒーレント軟X線光学研究チーム
(所属長 高橋 栄治)

高次高調波発生 (HHG) はレーザー光をより短波長に変換することで、アト秒 (10^{-18} 秒) オーダーのパルス光を実現可能であることから、原子分子内の超高速な電子運動観測への応用が期待されている。HHGにより生成したアト秒パルス光を用いて反応途中の分子について観測できれば、反応機構の理解・検証につながる大きな一歩となる。特に、分子のキラリティに注目して追跡できれば、基礎物理学から生化学といった広範な分野への寄与が期待される。そこで、将来的な超高速キラル識別法の開発を目指し、円偏光や光渦、光電子イメージングといったキラル識別に応用可能な実験手法とアト秒パルス光を組み合わせた実験法の開発に取り組んでいる。

今年度は、光電子イメージング装置の開発・立ち上げを行った。近赤外レーザーを用いた立ち上げ実験では超闘イオン化と呼ばれる高強度レーザー場特有の現象に由来した、同心円構造をもった光電子像が得られ、装置

が設計通りに機能していることが確認できた。一方、軟X線アト秒パルス光を用いた光電子イメージング実験では、光源の短波長化と対応して新設した光路に起因すると思われる妨害信号が観測された。また、アト秒パルス光の特性評価の実験を念頭に、二色超闘イオン化のシミュレーションと集光スポットのシミュレーションを行うなど、磁気ボトル型光電子分光の新規実験のデザインを行った。

今後は、光電子分光実験の計測シミュレーションで示された条件で実験を行い、アト秒パルス光の特性評価を行う。光計測だけでなく、この実験を応用することで光電子波束の特性評価につながると期待される。また、同じ実験システムで光電子の量子状態と生成イオンの分子振動量子状態の相関を計測できる。これらの実験から原子分子の光イオン化ダイナミクスについて明らかにする。また、本研究課題で利用予定の光渦を含めた構造光の特

性を効果的に利用するにはレーザー光の集光サイズを小さくすることが有効であることが分かった。そこで、構造光による光イオン化研究に向けて、極限集光可能な新規

の光イオン/光電子イメージング装置について、設計・開発する予定である。

XXIV-029 酵素の基質認識能の曖昧さを活かした CO₂ 固定化技術の創成

Development of a New Technology for CO₂ Fixation by Exploiting Enzyme Promiscuity

研究者氏名：四坂 勇磨 Yuma SHISAKA
受入研究室：環境資源科学研究センター
分子生命制御研究チーム
(所属長 萩原 伸也)

カーボンニュートラル社会の実現に向けて、二酸化炭素を回収または地中へ貯留する技術や、有機金属触媒や微生物の代謝システムを活用して二酸化炭素を有機化合物に変換する技術の開発が積極的に進められている。二酸化炭素から高付加価値な有機化合物を作り出す技術を開発できれば、排気ガス中に含まれる二酸化炭素を資源と捉えて再利用することで、大気中への二酸化炭素の排出を抑制できる。そこで、地球規模の炭素循環において重要な役割を果たす植物や一部の微生物が保有する、炭素固定に関与する酵素群に着目した。本研究課題では、特定の生物が保有する炭素固定システムに着想を得て、天然酵素の基質認識能の曖昧さを活かして二酸化炭素から有用な有機化合物を産出する新たなバイオテクノロジーの開発に挑む。本研究によって自然界の温和な環境で機能する炭素固定酵素を活用した新たな炭素固定技術を構築し、二酸化炭素を使って減らす環境調和型のものづくり技術の創出を目指す。

本年度は、植物や微生物が保有する炭素固定酵素を用いて多様な有機化合物に対する炭素固定反応に取り組んだ。まず、特定の植物または微生物から炭素固定酵素を単離精製する方法を確立し、炭素固定反応の触媒性能を評価するための分析系を構築した。続いて、炭素固定酵素の反応空間に内包される有機化合物に共通する化学的な特徴を調査した。さらに、炭素固定酵素を用いて構造的な特徴が異なる多様な有機化合物への炭素固定反応を実施した。

●ポスター発表 Poster Presentations (学会)

1. 四坂勇磨, 草野修平, 萩原伸也: “植物酵素に学ぶ炭素資源化技術”, 第66回日本植物生理学会年会, 金沢, 3月(2025)
2. 四坂勇磨, 草野修平, 萩原伸也: “炭素資源化に向けたバイオ触媒システムの開発”, 日本化学会 第105春季年会(2025), 吹田, 3月(2025)

XXIV-030 Enzymatic Reaction into a Droplet

Name: Elisa Liliane, Bernadette RIOUAL
Host Laboratory: Theoretical Molecular Science Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head: Yuji SUGITA

The cell is a complex environment, consisting of a mixture of molecules, water, ions, metabolites, gases, and other components. Due to this complexity, the cellular environment has often been overlooked in studies of protein structure and dynamics. Even today, much of the research on proteins is conducted in dilute conditions. However, these conditions do not fully capture the intricacies of biological systems. It is well known that cellular crowding can induce changes in reaction rates and equilibria, as well as

impact protein structure, dynamics, and interactions. By neglecting the complexity of the cytoplasm, we are failing to accurately describe in-cell protein activity. For this reason, my research focuses on investigating protein structure and dynamics in cellular-like environments, using Nuclear Magnetic Resonance (NMR) and Molecular Dynamics (MD) simulations. There are different types of proteins in the cell, one of which is called an enzyme. Enzymes catalyze the conversion of substrates into products. A metabolic

pathway is a series of reactions catalyzed by several enzymes, and these enzymes can interact to enhance their overall efficiency. One type of interaction is called a metabolon, which refers to a spatiotemporal organization of enzymes that facilitates the channeling of intermediate substrates between them. For example, in the Krebs cycle, the enzymes Malate Dehydrogenase (MDH) and Citrate Synthase (CS) are known to form a metabolon in dilute conditions, as demonstrated by experimental studies. However, do the models describing these metabolic pathways in dilute conditions accurately predict cellular behavior? I am currently investigating these enzymes using predictive tools, Molecular Dynamics (MD) simulations, and Nuclear Magnetic Resonance (NMR) to study their activities, structures, and interactions in crowded conditions.

Another interesting protein is Guanine nucleotide-binding protein 1 (GB1), which is a model protein in structural biology and has been extensively studied.

However, some experimental results from our collaborators suggest that its structure changes under crowded conditions. For this reason, I am currently investigating the impact of the crowded environment on the structure of GB1 using Molecular Dynamics (MD) simulations.

In conclusion, while studies in dilute conditions have provided valuable insights, it is becoming increasingly clear that they may not fully capture the dynamics of cellular processes. By simulating crowded environments, this work seeks to provide a more accurate representation of protein behavior in the cell, ultimately advancing our understanding of molecular biology and its applications.

● Poster Presentations

International Conferences

1. Rioual E., Sugita Y. : "MDH-CS enzymes complex : Insight of its structure by simulation", ACS Spring 2025, San Diego USA 2025, March 23-27 (selected)

XXIV-031 細胞および生態系の代謝挙動の一般理論：経済学と物理学からのアプローチ Economics and physics for microbial ecology and metabolism

研究者氏名：山岸 純平 Jumpei YAMAGISHI
受入研究室：生命機能科学研究センター
多階層生命動態研究チーム
(所属長 古澤 力)

本研究課題においては、経済学および熱統計力学の数理を援用し、細胞内代謝系および微生物生態系のふるまい(環境変動や実験的操作への応答・安定性など)について、分子生物学的な詳細に依存しないような予言を与えられる定量的理論を新規に構築することを主眼とする。とくに今年度は、主に3つの研究テーマに取り組んだ。

1.Global Constraint Model for Microbial Growth Law

微生物の増殖率が、栄養源の量に対し単調増加かつ凸な依存性を示すことは、Monod則として広く知られている。しかしその関数形がMichaelis-Menten式と同じであることから、そのような依存性は何かしら1つの生化学反応によるものだと考えられるのが普通である。本研究では、そのような振る舞いが、細胞内代謝系における大域的な資源配分の帰結として普遍的に起きることを数学的に証明し、数値実験による例証も行った。このような結果をまとめた論文を現在投稿中であり、プレプリントは公開済みである(arXiv: 2409.12482)。

2.Thermodynamic constraint on the coupling of currency molecules

細胞の代謝系は、ATPやGTP、NADHやNADPHなど、リンや電子などの供与体として様々な代謝反応に関与する「貨幣分子」によってグローバルに制御されている。これらの貨幣分子はそれぞれ異なる役割を担うとされる一方、 $ATP+GDP \rightleftharpoons ADP+GTP$ のような貨幣分子の「交換反応」によりカップルしている。本研究では、このような貨幣分子カップリングのミニマルな数理モデルを構築し、系の感受性やエントロピー生成率への影響を解析した。また、貨幣分子カップリングが生命現象へ及ぼす影響についても論じている。このような結果をまとめた論文の第1稿は書き上がっており、今年度中の投稿を目指している。

3.Dependence of Microbial Community Assembly on Carbon Sources

近年、試験管でグルコースなどの糖を炭素源として与えながら継代培養された微生物集団が、ある普遍的な菌叢構造へと収束すること、またそれが発酵を主に行う菌種と呼吸を主に行う菌種の間でのクロスフィーディングに帰着できることが報告されている。一方で、そのような「emergent simplicity」が、糖に限らない炭素源を与え

られた際にも現れるような普遍的な性質であるかは未解明である。そこで我々は、メタノールやイソプロパノールを含む様々な炭素源を与えた場合の微生物集団の継代培養実験を行い、微生物生態系の菌叢構造がどのように供給炭素源に依存しているか、またその依存性がどのような原理（とくに代謝物のクロスフィーディングに依るか）を明らかにすべく、データ解析を進めている。

●口頭発表 Oral Presentations

1. Jumpei F Yamagishi: “Microeconomics of

Metabolism”, ELSI-UBI Joint Workshop, ELSI, April (2024)

2. Jumpei F Yamagishi: “Microeconomics of Metabolism”, EPCP Yong Scholar Meeting, Online, November (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 山岸純平: “ミクロ経済学としての代謝制御の理解: ワールブルク効果とギッフェン財を例として”, 第1回ERATO 深津共生進化機構プロジェクト全体会議, すずらん昆虫館, 7月 (2024)

XXIV-032 Exploring the Symmetry Diversification Mechanism via Analyzing the Morphological and Molecular Aspects of *Diadumene Lineata* Segmentation Patterning

Name: Safiye Esra SARPER

Host Laboratory: Laboratory for Developmental Morphogeometry
RIKEN Center for Biosystems Dynamics Research
Laboratory Head: Yoshihiro MORISHITA

Symmetry is a fundamental feature of animal morphology, defined by the number of symmetry axes that divide the body into identical parts. Animals exhibit two main types of symmetry: radial symmetry, characterized by multiple symmetry axes, and bilateral symmetry, defined by a single symmetry axis. However, the mechanisms underlying the diversification of bilateral and radial symmetries remain unknown. The phylum Cnidaria, which includes species exhibiting both radial and bilateral symmetries, offers valuable insights into the mechanisms of symmetry diversification. In particular, *Diadumene lineata* (a cnidarian sea anemone), which displays both symmetry types within a single species, presents a unique opportunity to compare these symmetries and investigate their developmental mechanisms. The symmetry type in *D. lineata* is defined by the segmentation patterns observed in the arrangement of multiple gastric pouches (siphonoglyph pouch, first pouch, and second pouch). This species predominantly reproduces asexually by regenerating body parts after being cut (pedal laceration) into fragments. I established a morphological observation method that enables detailed analysis of the gastric pouch patterning process. Time-lapse imaging techniques were employed to document gastric pouch patterning at various developmental stages, providing a robust dataset for further analysis. As the first developmental step following excision, fragments initially form

a temporary segmental structure, which persists until the fragment's size increases sufficiently, often appearing as multiples. This temporary structure differentiates into gastric pouches, with the first gastric pouch forming directly opposite the center of the excised region. Subsequently, primary and secondary gastric pouches are sequentially formed bilaterally around the oppositely formed gastric pouch. Thus, the oppositely formed gastric pouch plays a role in regulating the individual's gastric pouch patterning and bilaterally symmetrical patterning contributes to the development of both radially and bilaterally symmetrical individuals. Additionally, to identify genes related to segmentation patterning and regeneration, as well as their expression patterns, I extracted RNA from samples at different developmental stages. The RNA will be sequenced using PacBio technology, and a library will be constructed. Analyzing the morphological patterning and gene expression data will provide insights into the developmental mechanisms underlying symmetry diversification in *D. lineata*.

● Publications

Papers

Review articles

1. Sarper S.E., Kitazawa M.S.: 種内多型から考える動物の対称性多様化機構. *Plant Morphology* vol 36: no.1 pp.45-52 (2024). Published.

Other

1. Sarper Kosokabe S.E., Kitazawa M.S. and Fujimoto K.: 体の多様な対称性. 科学・岩波書店2024.11

● Oral Presentations

Conferences

1. Sarper S.E., Kitazawa M., Nakanishi T. and Fujimoto K.: “Size-correlated polymorphisms in phyllotaxis-like periodic and radially symmetric tentacle arrangements in hydrozoan” 日本発生学会年会, Kyoto JAPAN 2024,

June 20.

2. Sarper S.E., Kitazawa M., Nakanishi T. and Fujimoto K.: “Size-correlated polymorphisms in phyllotaxis-like periodic and radially symmetric tentacle organ arrangements in hydrozoan” Euro Evo Devo 2024, Helsinki FINLAND 2024, June 26.
3. Sarper S.E.: “Animal Symmetry Establishment and Diversification” BDR Retreat 2024, Kobe JAPAN 2024, October 24.

XXIV-033 Molecular Controls of Plant Totipotency in Embryogenesis

Name: Ping KAO

Host Laboratory: Cell Function Research Team

RIKEN Center for Sustainable Resource Science

Laboratory Head : Keiko SUGIMOTO

In this study, a transgenic reporter line of AT4G21895 (BSB) was established for future single nucleus RNA-seq to analyze the transcriptional dynamics associating with promoting and inhibiting totipotency in early zygotic embryogenesis. BSB expressed in vegetative nuclei and sperm cells in pollens, in synergid cells and egg cells in pre-fertilized ovules, and in zygotes and endosperms in post-fertilization ovules. This reporter line marks most of the pre- and post-fertilization cells and allow enrichment and collection of these target cells from the whole inflorescence by Fluorescence Activating Nuclei Sorting (FANS). The single nucleus transcriptomes will be made with 10x Genomics 3' V3.1 kit with sorted nuclei to infer the gene regulatory networks involved in acquiring totipotency in developing zygotes.

In addition, re-analysis on published embryonic, callus and meristematic transcriptome datasets identified over twenty candidate genes which may be involved in the establishment or maintenance of pluripotent stem cells. Interestingly, many of the candidates are known to associated with various stresses. For example, ABA-mediated stress response gene AT5G64750 (ABR1) was picked up as a potential upstream regulator in activating up-regulated genes at the beginning of somatic embryogenesis. A list of T-DNA insertion mutant

lines of these candidate genes was selected, and the mutants will be subjected to a set of functional assays to test their roles. Identification of key regulatory genes in pluripotent cells will not only expand the current knowledge but also help decipher the underlying gene regulatory networks.

● Oral Presentations

Conferences

1. Kao Ping and Sugimoto Keiko: “Deciphering the molecular basis of plant totipotency” Heterogeneity of environments and plants, Aizuwakamatsu Japan, November 20-22, 2024

● Poster Presentations

Conferences

1. Kao Ping and Sugimoto Keiko: “Characterizing plant totipotency” 1st ASPIRE Joint Lab Meeting, Yokohama Japan, September 9th, 2024
2. Kao Ping and Sugimoto Keiko: “Deciphering the molecular basis of plant totipotency” Heterogeneity of environments and plants, Aizuwakamatsu Japan, November 20-22, 2024
3. Kao Ping and Sugimoto Keiko: “Deciphering the molecular basis of plant totipotency” 2nd ASPIRE Joint Lab Meeting, Yokohama Japan, December 4th, 2024

XXIV-034 Visualizing the 3D Architecture of Bacterial Photosynthetic Apparatus

Name: Laura BRACUN

Host Laboratory: Laboratory for Protein Functional and Structural Biology
RIKEN Center for Biosystems Dynamics Research

Laboratory Head: Mikako SHIROUZU

We have designed a project to study the bacterial photosynthetic membrane on the molecular level, intended to better our knowledge of the communication and interaction of large protein complexes involved in photosynthesis. While 3-dimensional structures of major bacterial photosynthetic complexes have been previously described and studied individually, open questions remain regarding the structure and functionality of the membrane as a whole.

The photosynthetic machinery of purple non-sulfur bacteria consists of the central reaction center (RC), light-harvesting antennae (LH), cytochrome (Cyt) bc₁ complex and ATP synthase located within the intracytoplasmic membrane invaginations, called chromatophores. The RC is tightly surrounded by a ring of LH antennae forming an RC-LH1 supercomplex in all species of purple bacteria, while some species exhibit additional peripheral antennae comprised of LH complexes without the immediate presence of the RC (LH2). The LH antennae capture the energy of light and transfer it to the RC in a series of light-hopping events. The RC then releases an electron initiating a chain of oxidation-reduction reactions which result in transportation of the electrons to Cyt bc₁ complex, translocation of protons across the chromatophore membrane generating a proton gradient utilized for ATP synthesis and the subsequent return of the electrons to the RC. However, we still have insufficient knowledge of how photosynthetic complexes cooperate with each other in large-scale networks within the chromatophore, how chromatophores form, or the precise locations of Cyt bc₁ and ATP synthase within the photosynthetic membrane, all adding to a functional and highly adaptive photosynthetic system.

The main method for structure determination chosen to carry out this research is cryogenic

electron tomography (cryo-ET). In cryo-ET, whole cell or cellular compartment is frozen in vitreous ice, preserving it in near-native conditions, and subsequently subjected to transmission electron microscopy (TEM) at multiple angles. Imaged area can be reconstructed in three dimensions from these data, leading to determination of organization of cellular systems in situ. Observing the structures and spatial relationships of photosynthetic complexes in their physiological conditions with cryo-ET will help answering complex biological questions that cannot be determined from structural models of individual photosynthetic proteins.

During my first year as an SPDR, I have made successful frozen samples of purified chromatophores and collected images of them on the electron microscope. Ideally, I wanted to image the chromatophore membrane within the cell. To do so, I have tested preparing samples of whole bacterial cells on EM grids by both plunge freezing and high pressure freezing, and milled them by ion beam into thin slices suitable for transmission electron microscopy. I am currently working to expand my dataset.

● Poster presentations

Conferences

1. Bracun L., Yamagata A., Shirouzu M., Liu L.N.: 'Cryo-EM structure of RC-LH1-PufX complexes from species of *Rhodobacter*'. 3rd Meeting of the Photosynthesis Ubiquity Area in Okazaki, Japan. 2024 June 3-4.
2. Bracun L., Yamagata A., Christianson B.M., Shirouzu M., Liu L.N.: 'Cryo-EM structure of a monomeric RC-LH1-PufX supercomplex from *Rhodobacter capsulatus*'. 9th RIKEN Life Science Retreat in Gifu, Japan. 2024 January 29-30.

XXIV-035 Unlocking the Secrets Behind DHLC Biosynthesis: A Groundbreaking Solution to Combat Malaria Spread

Name: Islam Adel Abdelhakim AMIN

Host Laboratory: Natural Product Biosynthesis Research Unit
RIKEN Center for Sustainable Resource Science
Laboratory Head : Shunji TAKAHASHI

My research addresses the growing global threat of antimicrobial drug resistance in life-threatening diseases, including cancer, malaria, and resistant bacterial infections. We employ a multifaceted approach to accelerate the discovery of novel natural products with unique modes of action, elucidate their biosynthetic pathways, and unravel the regulatory mechanisms governing their production.

In our first project, we have successfully identified dihydro-lucilactaene (DHLC), an ultra-potent antimalarial compound active against multidrug-resistant *Plasmodium* strains, suggesting a novel mode of action. To understand DHLC biosynthesis, we disrupted *luc6*, a putative hydrolase, and identified three new DHLC derivatives with opened pyrrolidone ring skeleton. While these derivatives demonstrated the involvement of *luc6* in DHLC ring formation, their significantly lower antimalarial potential confirmed that the intact ring structure is crucial for biological activity.

Our second project focuses on activating dormant biosynthetic gene clusters in *Streptomyces* for novel antibiotic discovery. We have discovered Syo1.56, a non-canonical SARP regulator with unique capabilities in *Streptomyces* sp. RK18-A0406. Expression of this previously uncharacterized regulator resulted in increased production of antimycins and led to the discovery of ten new elasnin derivatives, all showing potent activity against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA). We are currently investigating elasnin biosynthesis and identifying its biosynthetic gene cluster. Notably, unlike typical cluster-specific SARPs, Syo1.56 exhibits a broad regulatory spectrum, influencing the production of structurally diverse bioactive compounds including anti-MRSA elasnins, antifungal antimycins, and anticancer ansatrienins. This finding overturns the conventional understanding of the expression induction mechanisms of biosynthetic gene clusters in actinomycetes and is expected to lead to the discovery of new natural compounds. (Abdelhakim, I.A., et al., *J. Nat. Prod.*, 14, 3533–3542 (2024).)

Looking ahead to the next two fiscal years, our research will focus on elucidating the global regulatory mechanism of Syo1.56 and determining its promoter sequence recognition patterns. We aim

to develop a versatile toolbox of optimized secondary metabolism activators and establish a Syo1.56-driven heterologous expression platform for targeted activation of unique gene clusters. This work will be complemented by continued investigation of DHLC biosynthesis and mode of action, with the ultimate goal of accessing untapped novel bioactive natural product reservoirs for therapeutic applications.

● Publications

Papers

1. [Abdelhakim I.A.](#), Futamura Y., Asami Y., Hanaki H., Kito N., Masuda S., Shibata A., Shirasu K., Osada H., Ishikawa J., and Takahashi S. Expression of Syo_1.56 SARP Regulator Unveils Unprecedented Elasnin Derivatives with Potent Antibacterial Activity. *J. Nat. Prod.*, 87(5): 1459–1470, 2024.

● Poster Presentations

Conferences

1. [Abdelhakim I.A.](#), Futamura Y., Asami Y., Hanaki H., Kito N., Masuda S., Shibata A., Shirasu K., Osada H., Ishikawa J., and Takahashi S. Syo_1.56, Atypical SARP Regulator Drives Multi-metabolite Biosynthesis in *Streptomyces* sp. RK18-A0406. *The 2025 Annual Meeting of Japan Society for Bioscience, Biotechnology, and Agrochemistry (JSBBA)*, Sapporo, Japan, March 4 - 8, 2025.
2. [Abdelhakim I.A.](#), Futamura Y., Asami Y., Hanaki H., Kito N., Masuda S., Shibata A., Shirasu K., Osada H., Ishikawa J., and Takahashi S. Syo_1.56, Atypical SARP Regulator Drives Multi-metabolite Biosynthesis in *Streptomyces* sp. RK18-A0406. *The 5th International Conference on Natural Products Discovery and Development in the Genomic Era*, San Diego, CA, US, January 4 - 9, 2025.
3. [Abdelhakim I.A.](#), Futamura Y., Asami Y., Hanaki H., Kito N., Masuda S., Shibata A., Shirasu K., Osada H., Ishikawa J., and Takahashi S. Syo_1.56, Atypical SARP Regulator Drives Multi-metabolite Biosynthesis in *Streptomyces* sp. RK18-A0406. *The 2024 Annual Meeting of the Society for Actinomycetes Japan (SAJ)*, Tokyo, Japan, September 10 - 11, 2024.
4. [Abdelhakim I.A.](#), Futamura Y., Asami Y., Hanaki H., Kito N., Masuda S., Shibata A., Shirasu K., Osada H., Ishikawa J., and Takahashi S. Syo_1.56,

XXIV-036 アクチン細胞骨格が司るシグナル発生場形成の構成的理解 A Constructive Understanding of Signal Initiation Sites Orchestrated by the Actin Cytoskeleton

研究者氏名：山本 啓 Kei YAMAMOTO
受入研究室：生命機能科学研究センター
構成的細胞生物学研究チーム
(所属長 宮崎 牧人)

動物細胞の細胞表層には網目状のアクチン細胞骨格が存在し、分裂や遊走といった変形に必要な張力を生み出している。網目の孔径は数十nm、厚みは数百nmであり、種々のアクチン結合タンパク質との相互作用により網目の密度や生み出される張力の強さといった特性が調節される。一方、細胞内のタンパク質は単量体(数nm)から多量体(数百nm)まで、様々な大きさで存在する。また、細胞内のオルガネラはより大きな構造体であり、例えば小胞体の管径は50~100nm程度とされる。こうした事実は、アクチンの網目が細胞内の構造体の通行を妨げることで、細胞膜から生じるシグナル伝達系や、細胞膜-オルガネラ間の接触といった現象を調節しうることを示唆する。しかし、生細胞におけるアクチンの網目密度はダイナミックに変動しており、またその薄さも相まってフィルターとしてのアクチンの役割を検証することは困難である。したがって本研究では、*in vitro*再構成系を用いてアクチンの網目密度の生理的意義を直接実証することを目指す。

今年度は、任意の密度を有するアクチンの網目を形成させるため、*in vitro*再構成系と光遺伝学を組み合わせた技術を確認した。本技術では、光照射依存的にアクチン枝分かれ因子を脂質平面膜上へ集積させ、アクチンの網目を形成させる。光照射の強さを変化させれば、同一の脂質平面膜上で複数の密度の網目を形成させることも可能であり、網目とタンパク質の大きさとの関係性を効率的に検証する条件が整った。また光照射パターンにより網目の形や厚みについても制御でき、光遺伝学を用いない従来法に比べ高い柔軟性が示された。

次に本技術を用いて、代表的なアクチン結合タンパク質であるミオシンおよびコフィリンに着目し、これらの網目への透過能力について検証した。様々な密度のアクチンに対しミオシンやコフィリンを混合した結果、ミオシン(数百nm)は低密度の網目構造のみを透過し、コフィリン(数nm)は密度に関わらず透過できることが直接的

に示された。一方、アクチンの切断といったコフィリン特有の機能は、高密度条件で劇的に抑制されることがわかり、網目の密度に応じてアクチン結合タンパク質の機能が調節されうるといった新たな知見も得られた。以上の結果は現在プレプリントとして公開されており、筆頭著者・責任著者として論文投稿中である(*Yamamoto K., *Miyazaki M., *bioRxiv*, 2024)。

●口頭発表 Oral Presentations

1. Yamamoto K., Miyazaki M.: "Optical control of actin polymerization on the supported lipid bilayer", The Biophysical Society Annual Meeting, Los Angeles, USA, 2月 (2025)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Yamamoto K., Miyazaki M.: "Optical control of actin polymerization on the supported lipid bilayer", The Biophysical Society Annual Meeting, Los Angeles, USA, 2月 (2025)
2. Yamamoto K., Miyazaki M.: "Optical control of actin polymerization on the supported lipid bilayer", Mechanical Self- transformation of Living Systems 2024 Team Meeting, Aichi, Japan, 12月 (2024)
3. Yamamoto K., Miyazaki M.: "Optical control of actin polymerization on the supported lipid bilayer", RIKEN BDR Retreat, Hyogo, Japan, 10月 (2024)
4. Yamamoto K., Yamazaki Y., Aoki K., Miyazaki M.: "脂質平面膜上におけるアクチン重合の光操作", The 76th Japan Society for Cell Biology, Ibaraki, Japan, 7月 (2024)
5. Yamamoto K., Miyazaki M.: "Optical control of actin polymerization on the supported lipid bilayer", Gordon Research Conference Cytoskeletal Motors, Portland, USA, 7月 (2024)
6. Yamamoto K., Miyazaki M.: "Optical control of actin polymerization on the supported lipid bilayer", Gordon Research Seminar Cytoskeletal Motors, Portland, USA, 7月 (2024)
7. Yamamoto K., Yamazaki Y., Aoki K., Miyazaki M.:

“Development and application of an optogenetic tool to control the actin polymerization”, IUPAB 2024, Kyoto, Japan, 6月 (2024)

8. Yamamoto K., Yamazaki Y., Aoki K., Miyazaki M.:

“Development and application of an optogenetic tool to control the actin polymerization”, International Symposium on mechanical control of biological self-organization, Kyoto, Japan, 6月 (2024)

XXIV-037 細胞外マトリックスと接着分子のダイナミクスによる毛包幹細胞の運命制御メカニズムの解明

Elucidating the Mechanisms of Hair Follicle Stem Cell Fate Regulation through Extracellular Matrix and Adhesion Molecule Dynamics

研究者氏名：大町 紘平 Kohei OMACHI
受入研究室：生命機能科学研究センター
細胞外環境研究チーム
(所属長 藤原 裕展)

多細胞生物が複雑で秩序ある構造を形成するには、細胞外マトリックス (ECM) が不可欠な役割を果たす。しかし、個々のECM成分やその組み合わせが持つ生化学的および物理的情報が、細胞の振る舞いや組織の形態をどのように制御しているのかについては、十分に解明されていないのが現状である。これまでの研究では、遺伝学的手法を用いてECM遺伝子と発生や疾患に関連する表現型との因果関係が明らかにされてきた。一方で、ECMの時空間的ダイナミクス (分子多様性、アセンブリ、ターンオーバー) が細胞や組織にどのような影響を与えるのかという仕組みの解明は大きく遅れている。この遅れの主因は、ECMの動態を可視化し操作する技術が未だ発展途上にあることに起因する。

本研究では、この課題を克服するため、新たな生体内遺伝子操作法とライブイメージング手法を開発し、ECMの時空間的ダイナミクスが細胞の振る舞いや組織形態に与える因果関係を解明することを目指している。特に皮膚の毛包器官に着目し、その発生と恒常性維持における基底膜と細胞の相互作用を解明することを目的としている。具体的には、基底膜の動態を可視化し操作することで、基底膜分子がどのように細胞の動きや組織の形態を制御しているかを明らかにすることを期待している。

本研究には2つの主要なアプローチがある。(1) ECM分子の組成を操作する技術の開発、(2) 基底膜の動態を可視化するライブイメージング系の構築である。

(1) ECM分子の組成を操作するためには、既存の分子を除去する、新たな分子を発現させる、あるいは既存の分子を新しい分子に置き換えるといった手法が必要となる。この目的のため、CRISPR/Cas9システムを利用したターゲット遺伝子のオン/オフ制御が可能なCRISPRon/offマウスの開発を進めている。

(2) 基底膜の主要因子であるラミニン分子の動態をライブイメージングするため、GFPノックインマウスの作製に取り組んでいる。具体的には、全長cDNAコンストラクトを用いてGFP融合遺伝子を発現させるベクターを作製し、培養細胞で過剰発現させることで、ラミニンタンパク質の産生や分泌に影響を与えないGFP挿入部位のスクリーニングを実施した。このスクリーニングで得られた候補部位を基にノックインマウスを作製し、その機能評価を進めている。

これらの取り組みにより、ECMダイナミクスの時空間的制御が細胞および組織に与える影響を明らかにし、発生や恒常性維持におけるECMの新たな役割の理解が進むことが期待される。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Lona-Durazo F., Omachi K., Fermin D., Eichinger F., Troost JP., Lin MH., Dinsmore IR., Mirshahi T., Chang AR., Miner JH., Paterson AD., Barua M. and Gagliano Taliun SA. : “Association of Genetically Predicted Skipping of COL4A4 Exon 27 with Hematuria and Albuminuria”, *J Am Soc Nephrol*, Jan 1;36(1):48-59 (2025)*
2. Koyama Y., Suico MA., Owaki A., Sato R., Kuwazuru J., Kaseda S., Sannomiya Y., Horizono J., Omachi K., Horinouchi T., Yamamura T., Tshako H., Nozu K., Shuto T. and Kai H. : “Trimerization profile of type IV collagen COL4A5 exon deletion in X-linked Alport syndrome”, *Clin Exp Nephrol*, Sep;28(9):874-881. (2024)*

●口頭発表 Oral Presentations

1. 大町紘平：“細胞外マトリックスが駆動する上皮組織の発生と恒常性” JST ACT-X 生命現象と機能性物質」第

2回勉強会、京都・京都大学 iPS細胞研究所 CiRA、2024年8月5-6日

2. 大町紘平：“細胞外マトリックスが駆動する上皮組織の発生と恒常性”、JST ACT-X生命現象と機能性物質」第3回領域会議、神奈川・湘南国際村センター、2024年12月13-15日
3. 大町紘平：第1回“基底膜ダイナミクスの可視化と操作を目指して”、学術変革AマルチモダルECM第1回若手の会、2025年1月9-10日、大阪・パナソニックリゾート大阪

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 大町紘平、Jeffrey H. Miner、藤原裕展：“Developing Platforms for Simultaneous Manipulation and Visualization of Extracellular Matrices In Vivo”、学

術変革AマルチモダルECM第3回領域会議、北海道・ルスツリゾート、2024年7月24-26日

2. Kohei Omachi, Hironobu Fujiwara：“Generation of Laminin-EGFP Mouse Lines for Visualizing Laminin Dynamics in Tissue Development”, RIKEN BDR リゾート、兵庫・アクリエ姫路、2024年10月23-24日
3. 大町紘平、藤原裕展：“基底膜ダイナミクスが駆動する器官形成制御”、2024年度先進ゲノム支援拡大班会議、パシフィコ横浜、2024年12月26-27日
4. Kohei Omachi, John D. Lueck, Jeffrey H. Miner：“Anticodon-Edited Transfer RNA (ACE-tRNA) Therapy as a Potential Nonsense Mutation Readthrough Strategy in Alport Syndrome”、第130回日本解剖学会/第102回日本生理学会/第98回日本薬理学会合同大会、幕張メッセ、2025年3月19日(予定)

XXIV-038 Uncovering the Specific Roles of Phytohormone Co-Receptors Using Artificial Molecules

Name: Jekson ROBERTLEE

Host Laboratory: Molecular Bioregulation Research Team
RIKEN Center for Sustainable Resource Science
Laboratory Head: Shinya HAGIHARA

The major classes of phytohormone receptors have been progressively identified through decades of research. Many phytohormones act as ligands for protein-protein interaction with their co-receptors. Auxin phytohormone, for example, which plays vital roles in almost all aspects of plant growth and development, is perceived through the dimerization of [TIR1-IAA] co-receptor pairs. However, it is not easy to study and uncover the signaling mechanisms of those receptors due to their genetic redundancy. For instance, the Arabidopsis genome encodes 6 [TIR1/AFB] and 29 [AUX/IAA] co-receptor proteins to perceive auxin. In this research, I aim to identify and develop artificial molecules that can bypass the complex genetic redundancy of phytohormone co-receptors to uncover the roles of each receptor in regulating plant growth and development.

Identifying potential biologically active phytohormone analogues and plant growth regulators by testing thousands of compounds library directly to the plants (phenotype-based) consumed a lot of resources, such as the need for a spacious growing space, time-consuming and laborious. Setting up a standardized growing condition and quantifying the responses in a large-scale experiment is technically challenging. Moreover, phenotype-based screening tends to overlook the specific molecular process of certain signaling pathways of interest, and genetic

redundancy may obscure the effects. To overcome this bottleneck process, I am developing an in vitro technology to evaluate the binding of auxin co-receptor proteins.

In this fiscal year, I have improved my system from analyzing hundreds of samples to thousands daily. Automatization can further boost the system as a high-throughput screening (HTS) assay system. I have been using the system to screen about 4000 small molecules that can act as auxin antagonists, and several potential hit compounds have been found. I am currently checking their reproducibility and their effects on the plant. Besides screening for potential auxin antagonists, my system can also evaluate the binding affinity of auxin-like compounds to the co-receptor proteins. Many compounds exhibiting auxin-like effects in the plant have been reported. However, whether some reported compounds directly bind to the auxin co-receptor proteins is yet to be elucidated. Therefore, I also plan to evaluate the binding affinity of such compounds in my second fiscal year.

● Oral Presentations

Conferences

1. Robertlee J., Nishiyama K., Shimizu S., Hagihara S.: “Development of chemically inducible protein heterodimerization (CID) in the plant: an additional molecular tool to build a synthetic biology platform”、

The 65th Annual Meeting of the Japanese Society of Plant Physiologists, Japan, Kobe, 2024 March 17.

2. Robertlee J., Nishiyama K., Shimizu S., Hagihara S.: "Development of chemically inducible protein

heterodimerization (CID) in the plant", The 41st Annual Meeting of the Japanese Society for Plant Biotechnology, Japan, Sendai, 2024 August 30.

XXIV-039 シストセンチュウ孵化促進物質の植物生理機能の解明

Physiological function analysis of hatching factors for cyst nematodes.

研究者氏名：秋山 遼太 Ryota AKIYAMA

受入研究室：環境資源科学研究センター

代謝システム研究チーム

(所属長 平井 優美)

植物は、様々な生理活性を有する多様な分子を生み出し、生長・発達過程の調節や、環境への適応・応答、周囲の生物とのコミュニケーションに利用している。孵化促進物質 (Hatching Factor: HF) は、作物の根に寄生して大幅な減収を引き起こす最重要害虫であるシストセンチュウの孵化を誘引させてしまう、植物の根で生合成される化合物である。そのためHFはシストセンチュウ防除の鍵として古くから研究が続けられており、1999年にジャガイモからソラノエクレピンA (SEA) がジャガイモシストセンチュウに対するHFとして単離同定された。しかし、それ以降その天然の存在量の微量さからHFの検出例や生合成経路についてなどの報告例は皆無であった。2020年台に入り、新規ジャガイモシストセンチュウ孵化促進物質としてソラノエクレピンB (SEB) を単離構造決定され、トマトから5つの生合成遺伝子が単理同定された。一方で、HFの既知の生理機能は植物にとって不利な“シストセンチュウ孵化させてしまう”ことのみであり、植物にとってどのような役割を果たしているのかは全くの不明である。本課題ではHFの植物にとっての生理機能を明らかにすることを目的としている。これまでに、SEA

とSEBがジャガイモシストセンチュウに対する高活性なHFとして報告されている。本年度は第三のソラノエクレピンとしてソラノエクレピンCの単理構造決定を行った。興味深いことにSECはジャガイモシストセンチュウに対する孵化促進活性がSEBやSEAと比べて一万倍程度低いことを明らかにした。また、本年度はHFの植物における生理機能を明らかにする手がかりを得るためにHFの生産がどのような条件で誘導されるのかを解析した。その結果、窒素およびリン酸の欠乏によってHFの生産が誘導され、特に窒素欠乏条件でその誘導が顕著であることを明らかにした。このことから、HFは窒素やリン酸といった栄養の欠乏条件下で植物にとって有益な役割を果たしているのではないかと予想される。今後は、特に栄養欠乏条件下でのHFの機能に着目して解析を進める予定である。

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 秋山遼太, 河野結, 串田篤彦, 杉本幸裕, 平井優美, 水谷正治 “低孵化促進活性型エクレピン-ソラノエクレピンC-の単離構造決定”, 日本農芸化学会, 札幌, 3月 (2025年)

XXIV-040 マルチオミクス解析を起点とした四肢再生時の発生プログラム再起動機構の 解明

Muti-Omics Analyses Toward Elucidation of Rebooring Mechanisms of Developmental Programs During Limb Regeneration

研究者氏名：浅倉 祥文 Yoshifumi ASAKURA
受入研究室：生命機能科学研究センター
発生幾何研究チーム
(所属長 森下 喜弘)

高い再生能を持つ両生類を用いた研究から四肢再生における機能遺伝子群と発生時の形態形成遺伝子群の類似性が示唆され、これまでに再生において形態形成を再起動する因子として*hoxc12/13*が所属研究室で同定された。これら*hoxc12/13*は転写因子であるため、ゲノム上に点在する形態形成遺伝子群のクロマチン領域のそれぞれに作用し、ゲノムワイドなクロマチン構造変化を伴って標的遺伝子の発現を誘導すると考えられる。しかしこれら*hoxc12/13*の形態形成関連遺伝子の発現制御への関与は未解明であり、クロマチンへの影響も未解明であった。そこで本課題ではマルチオミクスデータ解析を起点に四肢再生における転写因子*hoxc12/13*による遺伝子発現のゲノムワイドな制御機構を解明するため研究を行なった。

今年度は、当初の計画と一部異なるがシングルセルレベルでトランスクリプトーム（遺伝子発現）とATAC-seq（クロマチン開閉）データを取得するscMultiome実験を行った。当初はバルクATAC-seqを計画していた点で計

画とは異なる。これにより各細胞について遺伝子発現情報とクロマチン開閉を互いに紐づけてデータ取得し解析を行うことができるため、当初の計画より詳細にゲノムワイドな遺伝子発現制御機構を解明できる、情報に富んだデータを取得することができた。このデータを用いて、再生において形態形成関連遺伝子群がどのような制御領域を用いて発現誘導されるのか、そしてその原因は何かを細胞種ごとに解明するため解析を行なった。そのために、近傍遺伝子の発現と相関して開閉するノンコーディング領域（ゲノム上で遺伝子をコードしない領域）を抽出した。加えてこの時、開閉という二値的な値と連続的な遺伝子発現量の間の相関を測る新たな統計量を定義し、解析に用いた。ここで得られたノンコーディング領域は各遺伝子に対しての発現制御領域であるエンハンサーの有力な候補である。今後、実験的にこれらの候補領域の機能解析を進めるとともに、共通した配列や性質を調べることで四肢再生における遺伝子発現制御機構の解明を目指す。

XXIV-041 新規ハイスループットリボソームプロファイリング法による概日時計における 翻訳制御メカニズムの解明

Elucidation of Translational Control Mechanisms in the Circadian Clock by Novel High-Throughput Ribosome Profiling Method

研究者氏名：河本 尚大 Naohiro KAWAMOTO
受入研究室：開拓研究本部
岩崎RNAシステム生化学研究室
(所属長 岩崎 信太郎)

地球上の多くの生物は概日時計により昼夜の変化に対して適応している。約24時間周期の遺伝子発現リズムを生み出す「概日時計」のメカニズムはこれまで精力的に研究されてきた。既存の研究では主に転写制御の側面から概日時計メカニズムを司る遺伝子発現の理解が進んでいる。その一方で、転写と同じくセントラルドグマの中核を成す「翻訳」の制御は、転写に随伴するだけのプロセスとして長らく概日時計研究においては無視されてきた。しか

し近年、一部の時計遺伝子の翻訳制御が概日リズム発現やリズムの増幅・安定化に重要である可能性が指摘する報告がされ始めている。ただこれらの研究は個別の因子に限定されており、概日時計にしたがって生じる翻訳制御の全貌を理解するには網羅的なアプローチが必要である。ただし、概日時計と翻訳の関係を理解するためには時系列に沿った大量のサンプルを同時並行的に処理しつつ、網羅的な解析をする必要があるという技術的に大き

な障壁がある。これが原因で、これまで研究が進んでこなかった。近年受け入れ研究室で開発されたハイスループット化された翻訳解析手法 (HT-Thor Ribo-seq) はまさにこの問題を解決することが可能な画期的手法である。申請者は、この新手法をシロイヌナズナに応用し、概日翻訳振動の全容を解明する。本研究により植物概日時計と翻訳の相互関係を明らかにし、翻訳制御による環境適応メカニズムについて理解を目指す。

本年度は、3.5日間2時間刻みのシロイヌナズナ幼苗に対しHT-Thor Ribo-seqおよびRNA-seqを行うことで、翻訳およびmRNA概日リズムの全体像を明らかにした。狙い通り、mRNA量の変動はないが翻訳のみで概日リズムを示すもの、転写と翻訳効率のピークがズレるものなど、翻訳独自の制御を示唆する結果を得た。また、本解析の時間分解能の高さのおかげで、転写産物量が上昇する以前から翻訳活性が上昇するといった、一見、直観に反するような動態も見つけることができた。今後、転写-翻訳の相互関係に注目し、転写に依存しない翻訳リズム生成メカニズムがあるのか、といった問いを含め、転写振動と翻訳振動の相互関係の解明を目指す。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Tomuro K., Mito M., Toh H., Kawamoto N., Miyake T., Chow S.Y. A., Doi M., Ikeuchi Y., Shichino Y. and Iwasaki S.: "Calibrated ribosome profiling assesses the dynamics of ribosomal flux on transcripts", *Nature Communications*, 15(1) (2024)*

2. Kawamoto N., Nakanishi S., Shimakawa G.: "Light Wavelength as a Contributory Factor of Environmental Fitness in the Cyanobacterial Circadian Clock", *Plant And Cell Physiology*, 65, 5, 798-808, (2024)*
3. Fujita T., Wakigawa T., Kawamoto N.; Kurihara Y., Hirose Y., Hirayama T., Toh H., Kuriyama T., Hashimoto A., Matsuura-Suzuki E., Mochida K., Yoshida M., Matsui M., and Iwasaki S.: "Synchronization between chloroplastic and cytosolic protein synthesis for photosynthesis complex assembly", *Mol. Cell*, submitted*

●口頭発表 Oral Presentations

1. Kawamoto N., Mito M., Ohbu S., Iwasaki S.: "Translational landscape of circadian rhythms in plants", 25th Annual Meeting of the RNA Society of Japan, Tokyo, June (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. 河本尚大, 水戸麻里, 大部澄江, 岩崎信太郎: "植物における概日リズム翻訳制御の全体像", 第31回日本時間生物学会学術大会, 富山, 11月(2024)
2. Kawamoto N., Mito M., Ohbu S., Iwasaki S.: "Translational landscape of circadian rhythms in plants", International symposium on Multifaceted Protein Dynamics, Fukuoka, Sep (2024)
3. Kawamoto N., Mito M., Ohbu S., Iwasaki S.: "Translational landscape of circadian rhythms in plants", Ribosome meeting in Japan, Tokyo, November (2024)

XXIV-042 海馬-嗅内皮質回路における空間ナビゲーションの神経機構の解明

Neuronal mechanisms underlying spatial navigation in the hippocampal-entorhinal circuit

研究者氏名: 大内 彩子 Ayako OUCHI

受入研究室: 脳神経科学研究センター

時空間認知神経生理学研究チーム

(所属長 藤澤 茂義)

これまで、現在の自己の位置を認識する仕組みは研究が進んでいたが、これから移動する将来の位置の空間情報を認識する仕組みは不明だった。今年度は、嗅内皮質において、現在の位置ではなく、これから移動する将来の位置に対して空間を格子状に表現する「予測的格子細胞」を発見したことを科学誌に発表した(Ouchi & Fujisawa, *Science*, 2024)。

私たちは、周囲の知覚的な情報を手掛かりに目的地までどのように移動するかを計画することができる。このよ

うな空間認識、ナビゲーション機能は、主に海馬や嗅内皮質などの脳領域の神経活動が関係する。海馬には、「場所細胞」というニューロンが存在し、特定の場所で活動することで空間における自己の位置を認識する。一方、嗅内皮質には、「格子細胞」というニューロンが存在し、六角形の格子点に当たる場所を通過するときに活動することで、空間認知のための座標系を構築する。これらの場所細胞や格子細胞の神経活動により脳内の認知地図が構成され、空間認知を担うと考えられてきた。しかし、自

分が現在、空間内のどこにいるかを把握する仕組みについての解明は進んでいたが、これから自分が移動する将来の位置の空間情報を認識する仕組みは不明だった。

まず、ラットに目標指向的行動課題を学習させた。これは、2.1m四方の環境において、直線上の2カ所に可動式の水ポートを配置し、ラットはその二つの間を往復することで報酬が与えられるという行動課題である。水ポートの位置を少しずつ変更し、各方向へ複数の直線軌道を構成することで、1次元かつ2次元での解析を可能にした。

次に、この行動課題を行っているときのラットの嗅内皮質および海馬における神経活動を、シリコンプローブ電極を用いて記録を行った。その結果、嗅内皮質において、ラットがこれから移動する数十センチ先の将来の空間の位置に対して格子状の表現を持つニューロンを発見し、「予測的格子細胞」と名付けた。この予測的格子細胞は、現在の位置では格子表現を持たず、進行方向に対して格子場をシフトさせることで、将来の空間情報を符号化していることが明らかになった。

今回発見した予測的格子細胞は、これから自分が移動する将来の位置の空間情報を予測・認識するため、目的地までどのように移動するかを計画する上で重要な役割を担うと考えられる。本研究成果は、動物やヒトにおける空間認識やエピソード記憶の神経基盤の理解に貢献すると期待される。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. [Ouchi, A.](#) and Fujisawa, S.: “Predictive grid coding in the medial entorhinal cortex”, *Science*, 385, 776-784,

2024.*

2. [Ouchi, A.](#), [Toyoizumi, T.](#) and [Ikegaya, Y.](#): “Distributed encoding of hippocampal information in mossy cells”, *bioRxiv*, March 2024. *in revision*.

(解説記事)

1. [大内彩子](#)「嗅内皮質における将来の空間座標を示すニューロンの発見」、『神経科学トピックス』、日本神経科学学会、2024年第3号

(図書)

1. [藤澤茂義](#)、[大内彩子](#)“Cutting Edge Research”, CBS Magazine vol.8

●口頭発表 Oral presentations

1. [大内彩子](#)「嗅内皮質における将来の空間情報を予測する格子表現」、生理学研究所研究会 極限環境適応2024、愛知、2024年11月(招待)
2. [大内彩子](#)「将来の経路を予測するニューロンの発見」、高校生のためのキャリアトーク、理化学研究所和光地区、2024年10月(招待)

●ポスター発表 Poster presentations

1. [Ouchi, A.](#), and [Fujisawa, S.](#) “Grid representation for predicting future pathway”, RIKEN CBS Retreat 2024, Shizuoka, November 2024.
2. [大内彩子](#)、[藤澤茂義](#)「嗅内皮質における将来の空間情報に対するグリッド表象」、第47回日本神経科学大会、福岡、2024年7月
3. [Ouchi, A.](#), and [Fujisawa, S.](#) “Grid representation for future spatial information in the medial entorhinal cortex”, FENS Forum 2024, Vienna, Austria. Jun 2024.

XXIV-043 Investigate the therapeutic effect of immune cell therapy in the tumor microenvironment

Name: Yun-Hsuan CHANG

Host Laboratory: Laboratory for Developmental Genetics
RIKEN Center for Integrative Medical Sciences
Laboratory Head: Haruhiko KOSEKI

Solid tumor microenvironment, which consist various types of cells, creating favorable environment for supporting the tumor growth and metastasis. Notably, the tumor heterogeneity attributing to the highly immunosuppressive microenvironment in the tumor microenvironment (TME) is the major cause, leading to the therapeutic failure. Thus, the innovative therapeutic strategy for solid tumor is needed. Recent years, cancer immunotherapy which enhance

the cytotoxicity of antitumor immune cells and modulate the antitumor immune response in the TME, is considered as an advanced approach for alleviating the tumor progress and increasing the overall survival of cancer patient. In particularly, the genetically modified immune cell therapy, which can precisely target and kill the tumor cell, further release the various type of cytokines to promote the antitumor immune response, is approved as the

standard treatment for the patient with hematological tumor. Furthermore, recent studies suggest that the genetically modified immune cell therapy is promise in treating the patient with solid tumor.

However, at present, the alteration of the various tumor associated antigen and immune cell exhaustion in the TME are the major challenges to develop the novel immune cell therapy with high therapeutic efficacy for the patient with solid tumor. In the present study, we aim to develop a revolutionary cancer immunotherapy with the potential to boost antitumor activity of immune cells, and revert immunosuppression in the TME, for treating solid tumors. In detail, the crucial features of TME and tumor associated antigen heterogeneity will be investigated and identified by a multivariate analysis.

According to the outcomes, the genetically engineered T lymphocytes will be designed and constructed, then, applied to the models of solid tumor. The therapeutic potentials in restoring defective tumor immune surveillance and enhancing antitumor immune response, further attenuating the tumor progress of solid tumor, are expected to be observed in this innovative cancer immunotherapy.

● Oral Presentations

1. Yun-Hsuan Chang, "The therapeutic potential of mesenchymal stem cell-derived extracellular vesicles (MSC-EV) in human disease", The 96th Annual Meeting of The Japanese Tissue Culture Association, Tsukuba city, Ibaraki, Japan, June 27-28, 2024

XXIV-044 Mirror Neuron System Underlying Decision-Making in Social Interactions

Name: Binglun LI

Host Laboratory: Brain Functional Dynamics Collaboration Laboratory
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head : Masanori MATSUZAKI

Thirty years have passed since the first description of mirror neurons (MNs) in the macaque monkey premotor area which exhibited the fascinating property of discharging when both performing and observing a goal-directed action. After that, MNs were reported in multiple brain areas in humans and other primates and have been suggested to play important roles in social interaction such as learning by observation, imitation, understanding others' intentions, empathy, and vocal communication. However, after years of debate, their functions, mechanisms, and developmental history in ontogeny and evolution remain unclear, because studies about MNs were mainly conducted in the human with non-invasive but indirect recording, which lack single-cell resolution. Clarifying the identity of MNs would greatly benefit from single-cell level recording in a primate model. In this study, I aim to elucidate the neural mechanism of mirror neuron system (MNS) using calcium imaging in behaving common marmosets.

To achieve this goal, I first designed an observation-execution task, in which head-fixed marmosets were trained to perform and observe the same action in turn. The task setup could be run fully automatically, with a vibration meter sending a feedback signal to a reward system to train the marmoset to minimize its head movement when performing the task, which is essential

for calcium imaging in task-performing marmosets. Three adult marmosets were implanted with headplates for head fixation. Then, they were trained to observe movies shown on a monitor and perform a grasping action to receive a reward between the movies. After training, all three marmosets learned to sit still without head movement while waiting for the reward, and grasp the reward without looking directly. Furthermore, the eye and body movements of the marmosets were tracked during the training. The marmoset's body parts, such as hand, shoulder, elbow, eyelid and pupil, were identified by DeepLabCut. Our preliminary analyses of pupil movements indicate that the training marmosets' eyes tracked the actor marmoset's actions, which suggest that the training marmoset focused on the monitor during the training, and understood the action shown by movies. Moreover, the tracking of the training marmoset's hand behavior suggested that the marmoset could perform the grasping action stably under head fixation.

With the marmosets performing observation-execution in turn under head fixation, we will be able to identify MNS-related brain areas in the marmoset by one-photon calcium imaging and examine the mirror activity at the single-cell level using two-photon calcium imaging.

● Oral Presentations

1. “Exploring the neural basis of mirror neuron system through calcium imaging in marmosets” Young Investigators’ Seminar, RIKEN CBS, Wako Japan, Jan. 10th, 2025.

● Poster Presentations

1. Binglun Li and Matsuzaki Masanori: “Exploring the neural basis of mirror neuron system through calcium imaging in marmosets” the 3rd Joint Poster Presentation for Young Scientists, RIKEN CBS, Wako Japan, Sep. 12th, 2024.

2. Binglun Li and Matsuzaki Masanori: “Exploring the neural basis of mirror neuron system through calcium imaging in marmosets” CBS Retreat 2024, Gotemba-City Japan, Nov. 28-29th, 2024.

3. Binglun Li and Matsuzaki Masanori: “Exploring the neural basis of mirror neuron system through calcium imaging in marmosets” 4th project meeting on “Biology of Behavior Change”: Brain Dynamics x Behavior Change, Atami Japan, Dec. 12-13th, 2024.

XXIV-045 空間トランスクリプトーム解析による統合失調症責任遺伝子群がもたらす共通分子病理の解明

Deciphering Convergent Pathology of Schizophrenia Through Spatial Transcriptome Analysis

研究者氏名：中村 匠 Takumi NAKAMURA
受入研究室：脳神経科学研究センター
分子精神病理研究チーム
(所属長 高田 篤)

本研究の目的は、単一細胞解像度の空間トランスクリプトーム技術によって、現在最も頑健な統合失調症責任遺伝子群の異常による共通病理を明らかにすることである。

統合失調症は、幻覚や妄想といった陽性症状、感情の鈍麻や社会性の低下などの陰性症状、および認知機能障害などを特徴とし、1%程度の高い生涯有病率を示す精神神経疾患である。最新の最も大規模なエクソン領域上のデノボ変異に着目した希少変異解析によって、オッズ比が高く、最も厳しい有意水準を超えるような統合失調症責任遺伝子が複数報告されている一方で、その共通病理像はいまだ不明である。所属研究室にて樹立した統合失調症関連遺伝子の遺伝子改変マウス3系統から、前頭前皮質や側坐核、線条体といった統合失調症と関連が示唆される領域を含む脳 coronal凍結切片を取得し、空間トランスクリプトームを行うこととした。プラットフォームについては、単一細胞の解像度で全転写産物を同定でき、上記脳切片全体をカバーすることができる Stereo-seq を用いた。この技術は2022年に報告された比較的新しい技術であり、実験環境が整っていないことから、本年度ではまず実験系の確立を行った。脳の透過時間の検討

や、顕微鏡の選定、実験機器の用意を完了し、確立した実験系を用いて、各マウス系統において野生型と変異型4ペア、計12ペアの Stereo-seqデータの取得を完了した。得られたデータの品質チェックを行ったところ、単一細胞解像度での下流解析に耐える品質のデータが得られていることを明らかにした。その一方で、Stereo-seqにて通常用いられるツールによる細胞セグメンテーションでは、過剰な細胞セグメンテーションが生じることが明らかとなった。

今後は、細胞セグメンテーションの最適化を行ったのち、空間情報を有したセルクラスタの同定を行い、各セルクラスタにおける野生型と変異型間での発現変動遺伝子の情報を基に、統合失調症の共通病理に関係する細胞群や脳領域を明らかにする必要がある。

●口頭発表 Oral Presentations

1. Takumi Nakamura, Takashi Tsuboi, Tadafumi Kato, and Atsushi Takata. “Functional analyses of genetic risks for autism spectrum disorder identified by rare variant studies”, NEURO2024, Fukuoka, July(2024)

XXIV-046 自己免疫疾患発症を抑制する核内因子 AIRE による新奇遺伝子発現調節機構の同定

Identification of a Novel Gene Expression Regulation Mechanism by AIRE that Suppresses Autoimmune Diseases

研究者氏名：宮尾 貴久 Takahisa MIYAO
受入研究室：生命医科学研究センター
免疫恒常性研究チーム
(所属長 秋山 泰身)

核内因子 AIRE は胸腺髄質上皮細胞 (mTEC) における組織特異的自己抗原 (TSA) 遺伝子の発現を誘導し、自己免疫疾患の発症抑制に重要な役割を果たしている。AIRE は、標的遺伝子の発現を直接誘導する機能のほか、標的遺伝子の遺伝子座のエピジェネティックな修飾を制御する、mTEC の分化を制御するといった機能も有していることが報告されている。さらに AIRE は、分化段階の異なる二種類の mTEC サブセット (TA-TEC：未熟と mTEC II：成熟) で発現し、それぞれにおいて異なった機能を有していることが予測される。それぞれにおける AIRE の機能を区別して解析することは、十分に理化されていない AIRE による遺伝子発現調節機構の解明につながる。そこで本研究は、TA-TEC 特異的 AIRE 欠損マウスおよび、mTEC II 特異的 AIRE 欠損マウスを作製し解析することで、AIRE が TSA 遺伝子の発現を制御し、自己免疫疾患を抑制する機構の解明を目的とする。

本年度は、それぞれの mTEC サブセット 特異的に AIRE を欠損するマウス系統の樹立に取り組み、その表現型の解析にも着手した。具体的には、ゲノム編集技術を用いて 3 種類の遺伝子改変マウスを作出し、交配を進めることで、合計 12 のマウス系統を樹立した。次に、目的の mTEC サブセット 特異的に AIRE が欠損しているかを、抗 AIRE 抗体を用いたフローサイトメーター解析により確認した。さらに表現型の解析に着手し、以下のことを明らかにした。

【1】 mTEC II 特異的 AIRE 欠損マウスにおける mTEC の分化動態をフローサイトメーター解析で評価したところ、TA-TEC と mTEC II は正常に分化しているものの、TA-TEC よりも未熟なサブセットおよび、mTEC II よりも分化が進んだサブセットの割合が低下しているなど、全身性 AIRE 欠損マウスに類似した表現型がみられた。

【2】 全身性 AIRE 欠損マウスでさまざまな臓器で自己免疫性の炎症がみられる 20 週齢においても、mTEC II 特異的 AIRE 欠損マウスは、顕著な炎症がみられない。

mTEC II 特異的 AIRE 欠損マウスが、全身性 AIRE 欠損マウスに類似した mTEC 分化異常を示したものの、自己免疫の発症に大きな差異がみられたことは、TSA 遺伝子の発現制御と mTEC の分化制御を、異なった分化段階の AIRE が担っていることを示唆している。

今後は、TA-TEC 特異的 AIRE 欠損マウスについても同様の解析を行うとともに、これらのマウスの mTEC における TSA 遺伝子の発現解析および、エピジェネティックな修飾の解析を進めることで、AIRE による自己免疫疾患の発症抑制機構の解明を目指す。

●誌上发表 Publications

(原著論文)

1. Mio Hayama, Hiroto Ishii, Maki Miyauchi, Masaki Yoshida, Naho Hagiwara, Wataru Muramatsu, Kano Namiki, Rin Endo, Takahisa Miyao, Nobuko Akiyama and Taishin Akiyama : "Direct and indirect RANK and CD40 signaling regulate the maintenance of thymic epithelial cell frequency and properties in the adult thymus", *Front Immunol.* 2024 Nov 29;15:1500908*
2. Hiroto Ishii[#], Rin Endo[#], Sanae Hamanaka[#], Nobuyuki Hidaka[#], Maki Miyauchi, Naho Hagiwara, Takahisa Miyao, Tohru Yamamori, Tatsuya Aiba, Nobuko Akiyama and Taishin Akiyama : "Establishing a method for the cryopreservation of viable peripheral blood mononuclear cells in the International Space Station", *NPJ Microgravity.* 2024 Aug 9;10(1):84*
3. Yuya Maruyama, Yusuke Ohsawa, Takayuki Suzuki, Yuko Yamauchi, Kohsuke Ohno, Hitoshi Inoue, Akitoshi Yamamoto, Morimichi Hayashi, Yuji Okuhara, Wataru Muramatsu, Kano Namiki, Naho Hagiwara, Maki Miyauchi, Takahisa Miyao, Tatsuya Ishikawa, Kenta Horie, Mio Hayama, Nobuko Akiyama, Takatsugu Hirokawa and Taishin Akiyama : "Pseudoirreversible inhibition elicits persistent efficacy of a sphingosine 1-phosphate receptor 1 antagonist", *Nat Commun.* 2024 Jul 19;15(1):5743*

XXIV-047 Identification of RNA-binding protein regulators of immunogenic non-coding RNAs through CRISPR knockout screening

Name: Ahmad Luqman Bin ABDUL FATAH

Host Laboratory: Laboratory for Retrotransposon Dynamics
RIKEN Center for Integrative Medical Sciences
Laboratory Head : Tomoichiro MIYOSHI

The study of endogenous elements such as human mobile elements, i.e., retrotransposons that trigger innate immunity, is an emerging field that can potentially be manipulated for cancer immunotherapy and autoimmune disease treatments. These include endogenous RNA immunogens, which are inhibited by the host proteins to avoid immune triggers in normal conditions. This project aims to identify both RNA-binding protein regulators and the corresponding RNA immunogens. Firstly, the genes will be identified by a genome-wide CRISPR knockout screening using a fluorescence reporter for immune response (interferon-stimulated response element (ISRE) and Nuclear factor-kappa B (NF- κ B) promoters). In this fiscal year, several cell lines with ISRE-tdTomato, NF- κ B-EGFP, and NF- κ B-tdTomato cell lines have been generated. A monoclonal cell line A549 with ISRE-tdTomato reporter cassette and Cas9 has been optimized for the genome-wide CRISPR knockout screening. The Cas9 shows ~99% knockout efficiency in a control sgRNA experiment against *EGFP* (*sggfp*) in this cell line. Using a genome-wide CRISPR library with ~100k sgRNA targeting all human genes (~4 sgRNA per gene), we find that the positive population is <1%, making analysis difficult; revival screening (repetition of CRISPR KO screening using selected sgRNAs) will be performed to enrich the positive sgRNAs for higher reliability. The enriched sgRNAs will be screened for potential immunogenic RNA regulators. In addition, the NF- κ B reporter cassette will also be optimized for a separate screening experiment.

To screen for immunogenic RNAs, I am developing an identification method by fusing RNA sensor MDA5 with two candidates: RNA tagging (RDE3 from *C. elegans*) or proximity labeling (APEX) proteins. The tagging protein, RDE3 was found to add poly(UG) at the 3' end of RNA, which makes it possible to be combined with single-cell RNA sequencing using poly(UG) primer against the tagged RNA and sgRNA with poly(UG) code (combination of Perturb-seq and RNA tagging). Hypothetically, this method can identify immunogenic RNA to the corresponding

sgRNA in a high throughput manner. I am currently testing the efficiency of poly(UG) addition in human cell lines. Another candidate is APEX, which can biotinylate RNA in close proximity to the fused protein MDA5. Identification of protein regulators and the corresponding immunogenic RNAs will add more target candidates for immunotherapies.

● Publications

Paper

1. Yano N., Chong PF., Kojima KK., Miyoshi T., Luqman-Fatah A., Kimura Y., Kora K., Kayaki T., Maizuru K., Hayashi T., Yokoyama A., Ajiro M., Hagiwara M., Kondo T., Kira R., Takita J., Yoshida T. Long-read sequencing identifies an SVA_D retrotransposon insertion deep within the intron of ATP7A as a novel cause of occipital horn syndrome. *J Med Genet.* 61, 950-958. (2024) doi: 10.1136/jmg-2024-110056. "published"

Review article

1. Luqman-Fatah A., Nishimori K., Amano S. Fumoto Y., and Miyoshi T. Retrotransposon life cycle and its impacts on cellular responses. *RNA Biology.* 21, 11-27. (2024) doi: 10.1080/15476286.2024.2409607. "published"

● Oral Presentations

International conference

1. Luqman-Fatah A., Watanabe Y., Uno K., Ishikawa F., Moran J.V. and Miyoshi T. A network of interferon-stimulated genes regulates human LINE-1 retrotransposition, 19th World Immune Regulation Meeting, Davos, Switzerland 2024, 12th - 15th March.

● Poster Presentations

International conference

1. Luqman-Fatah A., Watanabe Y., Uno K., Ishikawa F., Moran J.V. and Miyoshi T. A network of interferon-stimulated genes regulates human LINE-1 retrotransposition, 19th World Immune Regulation Meeting, Davos, Switzerland 2024, 12th - 15th March.

XXIV-048 極超広視野二光子顕微鏡を用いた知覚生成の神経メカニズム解明

Elucidation of neural mechanisms of perception generation using ultra-wide-field two-photon microscopy

研究者氏名：石津 光太郎 Kotaro ISHIZU

受入研究室：脳神経科学研究センター

触知覚生理学研究チーム

(所属長 村山 正宜)

知覚は、感覚器からの情報をもとに脳が「もっともらしい世界像」を推定した結果として生じる。そのため、ときに脳は歪んだあるいは誤った解釈の知覚(錯覚)を生成する。知覚生成プロセスには神経伝達の流れが重要であるが、かかわる脳領域が広範なため、いまだに未解明な部分が多い。本研究では、極超広視野2光子顕微鏡を用いて錯覚および正常知覚中のマウスから大脳皮質全背側部の神経活動計測をシングルセルレベルで行い、知覚を生起する神経基盤および神経伝達ダイナミクスの解明を目指す。

本研究では錯覚条件としてラバーハンド錯覚を導入した。ラバーハンド錯覚とは、被験者に自身の手(リアルハンド)を隠した状態で偽の手(ラバーハンド)を見せる。この状態でリアルハンドとラバーハンドを同期してなでるとラバーハンドの位置に触覚が生じる。つまり、ラバーハンドが自分の手であるかのように感じられる現象を指す。本年度はマウスにもラバーハンド錯覚が生じるかについてパッシブ刺激条件下の実験により確かめた。マウスの瞳孔径の変動をみると、(1)リアルハンドのみ刺激、

(2)ラバーハンドのみ刺激、(3)リアルハンドとラバーハンドを同時刺激、のそれぞれにおいてパターンが異なることが明らかになった。加えて、事前にリアルハンドとラバーハンドを同期刺激した場合、非同期刺激の場合に比べ、直後のラバーハンド単独の刺激に対する瞳孔径変動パターンがリアルハンドとラバーハンドを同時刺激の変動パターンに似ることが明らかとなった。このことからマウスにもラバーハンド錯覚が生じうる可能性が実証できた。現在は、ラバーハンド錯覚が生じた際にマウス自身に報告させる行動実験プロトコルを開発中である。

また、広域2光子顕微鏡下での観察を行うための技術(P1インジェクション、大規模サイズの観察窓の取り付け)を習得し、マウス大脳皮質の右半球全域において2/3層および5層の神経細胞の活動が同時に記録できることが確かめられた。

今後はラバーハンド錯覚報告課題を実現し、課題中のマウスの大脳皮質から広域神経活動イメージングを行うべく研究を進めていく予定である。

XXIV-049 Cortico-Subcortical Neuronal Circuits Integrating Aversive Emotional States with Decision-Making

Name: Tomoya OHNUKI

Host Laboratory: Laboratory for the Neural Circuitry of Learning and Memory
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head: Joshua Patrick JOHANSEN

Our decisions often vary with our emotional states. For instance, during anxiety or fear, our predictions and choices tend to be more cautious and pessimistic. While it is well established that emotions influence decision-making, the neural mechanisms integrating these processes remain a longstanding mystery.

To address this, we developed a novel cognitive task for rats that induces aversive emotional states while allowing us to assess their impact on various aspects of reward-based decision-making. Behavioral analyses revealed that aversive emotional states led

rats to overestimate decision uncertainty, without significantly affecting sensory discrimination accuracy or task motivation. During this task, we recorded neural activity from the mPFC and identified neurons encoding sustained emotional states over several hours. Additionally, mPFC neurons represented decision-related information that varied on a trial-by-trial basis. Notably, some neurons exhibited activity patterns closely correlated with emotion-driven changes in decision-making behavior. However, population-level analyses revealed that

emotional and decision-related information could still be independently decoded from mPFC activity. These findings suggest that the mPFC represents emotional states, decision-making processes, and their integration through distinct neural coding strategies, employing both specialized subpopulations and distributed population-level activity.

We are currently investigating the neural circuits causally involved in integrating aversive emotional states into decision-making through pathway-specific optogenetic manipulations. Previous studies have demonstrated that stress-induced tonic noradrenaline release from the locus coeruleus (LC) disrupts prefrontal cortex function and

impairs decision-making. To explore this, we have successfully implemented fiber photometry to monitor noradrenaline dynamics in the mPFC of rats engaged in the task. Our ongoing analyses aim to uncover the relationship between noradrenaline release and the maintenance or switching of emotional states, with a focus on identifying critical task epochs for optogenetic interventions. Furthermore, we are working to express a GPCR-based opsin (eOPN3) to selectively inhibit presynaptic transmission from LC neurons projecting to the mPFC. Building on these findings and our first-year progress, we aim to further advance the project in the coming year.

XXIV-050 Elucidating The Circuit Mechanisms of Insight in the Mammalian Brain.

Name: Hongshen HE

Host Laboratory: Laboratory for Circuit and Behavioral Physiology
RIKEN Center for Brain Science

Laboratory Head : Thomas John MCHUGH

Rapid learning and decision-making are essential for survival. Unlike slower trial-and-error learning, insight-based learning involves a rapid transition from poor understanding to full comprehension, yet the underlying neural mechanisms remain elusive. This study investigates the hippocampal CA2 region, focusing on its intrinsic and extrinsic pathways to understand its role in memory processing.

Intrinsically, we recorded neuronal activity from CA2 and its neighboring regions, CA1 and CA3, using a multi-unit drive array during a memory task. To probe CA2's role, we also transiently silenced its pyramidal cells via chemogenetics, revealing distinct contributions of CA2 to hippocampal dynamics. During rest, CA2 inhibition reduced synchronization across regions (CA1, CA2, CA3). During new learning, CA1 place field formation slowed, and CA1 pyramidal cells showed reduced excitability during pauses without CA2 input. At the network level, a convolutional neural network revealed subregion- and state-dependent spatial coding changes that mirrored single-cell observations. These findings highlight CA2's critical role in coordinating hippocampal dynamics across behavioral states. Ongoing work

integrates theoretical models to explore how CA2 enables network flexibility during memory tasks requiring reorganization and updating of retrieved information. Extrinsically, we identified a novel pathway from CA2 to the basal forebrain. Using anatomical, behavioral, and physiological approaches, we uncovered a bidirectional regulation by CA2 that modulates cholinergic tone, influencing memory processes via feed-forward inhibition in the basal forebrain. This pathway enables the retrieval and updating of familiar and novel external information while functioning as a switch between online (encoding/retrieval) and offline (consolidation) memory states. These findings position CA2 as a pivotal regulator of memory processing, capable of dynamically shaping hippocampal activity to adapt to cognitive demands.

Together, these results uncover novel roles for CA2 in memory processing through its intrinsic and extrinsic pathways. By governing hippocampal dynamics and modulating interactions with the basal forebrain, CA2 emerges as a key player in the neural mechanisms underlying rapid learning and decision-making.

XXIV-051 単一細胞発火で駆動する超微小レーザーの開発と全光での電気生理学解析法の創成

Development of micro-laser driven by single cell firing for all-optical electrophysiological analysis

研究者氏名：川崎 大輝 Daiki KAWASAKI
受入研究室：開拓研究本部
田中メタマテリアル研究室
(所属長 田中 拓男)

概ね、研究課題を自律的に遂行できている。研究課題の全体計画に沿って、今年度の目標は、可視～近赤外の波長帯で高 Q 値 ($Q>100$) をもち、かつ波長と吸収強度の制御ができるプラズモニク構造の設計と作製とした。従来のプラズモニク構造は、ナノ円柱構造の周期配列により Q 値を向上するが、その設計方法では共鳴波長における吸収強度を制御できず、また、波長制御性も狭い波長帯に限定されてしまう。そこで、円形構造を楕円系構造に変更し、かつその配置方法を工夫することで、所望の特性を実現できるプラズモニク構造の実現を試みた。数値計算による設計・光学シミュレーションと実験的作製・光学評価から、 Q 値を $10^1\sim 10^2$ オーダーで制御し、かつ共鳴波長と吸収強度を広範囲に制御できるプラズモニク構造を実現できた。さらに、このプラズモニク構造は、可視～近赤外域で、単一の吸収バンドを呈することに着目し、吸収バンドを空間で連続的に変化させたプラズモニク構造の作製に取り組んでいる。自己評価としては、当初の計画からやや方向修正がある一方で、研究の立ち上げとして進捗は相応と考えている。一方で、本研究課題の成果発信に至っておらず、業績の観点では遅れていると考えている。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. D. Kawasaki, T. Endo, "Enzyme-containing-hydrogel/TiO₂ Hybrid Photonic Crystal for Label-free Detection of Small Molecules" *Sci. Rep.* (Submitted)
2. Ryosuke Nishitsuji, Daiki Kawasaki, Kenji Sueyoshi, Hideaki Hisamoto, Tatsuro Endo "Investigation of multivariate analysis of surface-enhanced Raman scattering spectra using simple machine-learning models: Prediction of the composition of mixed self-assembled monolayer on gold surface" *Soft Computing* (Accepted)
3. D. Kawasaki, R. Nishitsuji, T. Endo, "Dealing with plasmonic crystal biosensors: Sensitivity assessment of nanodisks/nanoholes arrayed plasmonic system for label-free DNA detection" *Biosens. Bioelectron.*, 15, 116659 (2024)
4. D. Kawasaki, R. Nishitsuji, T. Endo, "Nanoimprinted Plasmonic Crystals for Cost-Effective SERS Identification of Methylated DNAs" *Sensors*, 24, 12 (2024)

XXIV-052 ナノ流体デバイスが拓く単一酵素分子の自己駆動拡散の直接計測

Direct measurement of self-propulsion driven-diffusion of single enzyme molecule using nanofluidics

研究者氏名：山本 晃毅 Koki YAMAMOTO
受入研究室：生命機能科学研究センター
細胞極性統御研究チーム
(所属長 岡田 康志)

酵素分子は従来、ブラウン運動による拡散で細胞内を受動的に漂っていると考えられてきた。近年、その酵素分子が通常のブラウン運動ではなく、酵素反応の反作用として弾道運動 (ballistic motion) する可能性が提唱されている。その結果として、酵素分子が自律的に基質濃度の高い方へと移動する酵素の走化性が予言され、細胞

内を酵素分子がアクティブに飛び回るといった従来の酵素観を超えた新しい可能性が理論的に示唆されている。すなわち、単一の酵素分子を自らが駆動する力を持つアクティブマターとしてみる必要がある。しかし、弾道運動や酵素の走化性のような自己駆動拡散について、現象の直接的な計測およびメカニズムの理解には至っていない。

本研究では、ナノ流体デバイスを用いて単一酵素分子の自己駆動拡散をはじめて直接観測することを目的とした。

はじめに自己駆動拡散を定量的に議論するため、高い時空間分解能（マイクロ秒・ナノメートルスケール）が必要であるため、ナノ加工技術と1分子イメージング技術の基盤技術を確立し、最適化する必要があった。ゆえに、ナノ加工技術では最先端の電子ビームリソグラフィーとドライエッチング法を駆使し、最小幅50nm程度でガラスの微細パターンを安定的に作製すること成功した。さらに、1分子を決まった場所に、決まったタイミングで輸送し、留める必要があるため圧力駆動式のポンプとガラス製ナノバルブを設計・加工した。結果として、ナノ加工技術の基盤を整備し、次年度では流体操作を含めた検証を進める予定である。

さらに並行して、1分子イメージング技術では、幅・深さ200nmのナノ流路中に量子ドット (Q-dot) を導入し、1ms程度の時間分解能で数10nmの位置決め精度で拡

散の追跡に成功した。一方で、自己駆動拡散はマイクロ秒ナノスケールの瞬間的な事象であるため、より高速かつ精度の高い検出方法を導入する必要がある。この現象を直接捉えるため東大チームと連携し、新しい顕微鏡技術の導入も現在検証を進めている。

●誌上発表 Publications

(原著論文)

1. Yamamoto K., Ito Y., Tanaka N., Tanaka Y. and Ota N.: "High-refractive-index glass device fabricated by room temperature bonding", *J. Micromech. Microeng.* 34 127001 (2024)*

(プレプリント)

1. Inutsuka Y., Yamamoto K., Kuroda M., Okada Y.: "Single-shot label-free nanoscopy for quantitative organelle visualization on standard commercial microscopes", *bioRxiv* 2024.12.31.630894

XXIV-053 Automated Development of Databases of Histological Brain Imaging Data in Alzheimer's Disease

Name: Charissa Ting Amanda POON

Host Laboratory: Brain Image Analysis Unit
Integrative Computational Brain Science Collaboration Division
RIKEN Center for Brain Science
Laboratory Head: Henrik SKIBBE

The present study aims to develop an automated pipeline to create databases of analyzed brain imaging data for Alzheimer's disease (AD) research. Specifically, we aim to create one database to centralize images from transgenic mouse studies by aligning microscopy images to a common reference space, and another for brain images from human AD studies. The significance of this work is two-fold: First, aligning images to a common reference space would allow visualization and analysis of imaging data from different studies, strains, and subjects, greatly facilitating cross-study comparisons. Second, the automated pipeline would improve the reproducibility and robustness of image analysis in AD research because it reduces manual work, and thereby the associated human bias and error.

The plan for FY2024 consisted of acquiring datasets and developing a prototype of the image processing pipeline.

Microscopy brain images from transgenic mouse models of AD have been generously provided by laboratories at RIKEN (Saido, Sasaguri, Miyawaki

labs). Neuropathology images from 83 AD human patients have also been acquired from the Seattle Alzheimer's Disease Brain Cell Atlas (SEA-AD).

The image processing pipeline consists of four steps:

1. Image registration (aligning brain images to a common template space),
2. Image segmentation (classifying voxels depending on whether they show objects-of-interest or background),
3. Classification (segmented objects-of-interest by factors such as shape and location), and
4. Downstream analyses (e.g. colocalization analyses).

We aim to use deep learning techniques to automate and optimize the pipeline, particularly the first three steps.

We developed an automated image processing pipeline that consists of the same four steps as listed above, and tested its feasibility on a large dataset of gene expression images of the marmoset brain (>20,000 images). This work was a collaborative effort that benefitted from the expertise of collaborators within

RIKEN, in Japan, and abroad. We curated the outputs of the pipeline, the processed images, into a database, mirroring the workflow of this project. This work was presented at the Japan Neuroscience Conference. The manuscript is currently under preparation.

Deep learning algorithms were explored for two steps in the pipeline: image segmentation, and image registration. For image registration, a novel 3D method that restricts image deformation to the XY-plane, thereby avoiding undesirable Z-plane deformations, was developed. For image segmentation, we built a meta-learning framework to combine segmentation outputs from multiple deep learning segmentation models to create segmentation maps that are better representations of the images. This is necessary for segmenting images in which it is difficult to separate the signal from noise, which is a common problem in biomedical imaging. This work was presented at the Medical Imaging with Deep Learning conference.

We are also developing strategies specific to the human datasets. For example, the SEA-AD dataset contains layer-specific tissue masks, which can be leveraged for image registration. Preliminary results are shown in Figure 1.

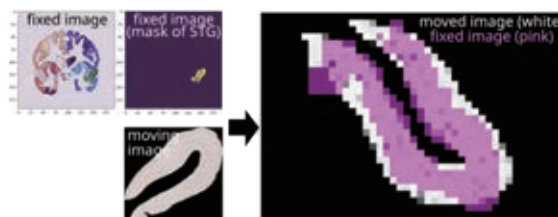


Figure 1. Registration of a brain section from the superior temporal gyrus (moving image) from a human AD subject to the Cerebra brain atlas in the MNI-ICBM2009c template space (fixed image).

● Oral Presentations

Conferences

1. Poon, C., Byra, M., Rachmadi, M.F., Schlachter M., Decroocq, M., Xu, B., Fulcher, B., Shimogori, T. and Skibbe, H.: "A 3D gene expression atlas of the adult marmoset brain". The 47th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Fukuoka Japan 2024, July 24-27.

● Poster Presentations

Conferences

1. Poon, C., Byra, M., Shimogori, T. and Skibbe, H.: "Meta-Learning for Segmentation of In Situ Hybridization Gene Expression Images". Medical Imaging with Deep Learning, Paris France 2024, July 3-5.

XXIV-054 協調ゲーム理論を応用した人間と人工エージェント・ロボットの共創的意思決定メカニズムの解明

Stewardship for cooperation of global human collective behavior using artificial agents and robots

研究者氏名：堀部 和也 Kazuya HORIBE

受入研究室：脳神経科学研究センター

理研CBS-トヨタ連携センター

計算論的集団力学連携ユニット

(所属長 豊川 航)

デジタル技術とソーシャルメディアの発展により、人間の社会ネットワークは拡大し、複雑化している。さらに、大規模言語モデルの開発によって対話相手が人間かどうかの識別が難しくなり、人工システム（人工エージェント・ロボット）が人間集団に日常的に関与し、人間と協力することが現実的になっている。ただし、人工エージェント・ロボットの関与がどのように受け入れられ、集団知性が向上するかはまだ十分に理解されていない。本研究では、人工エージェント・ロボットを人間集団に組み込み、人間とのやり取りや発言内容の操作によってどのような影響があるかを調査する。具体的には、実験室での少人数チームとオンラインの大人数チームを対象に、協調ゲー

ムと影響のない雑談（チープトーク）を行い、人工エージェント・ロボットの発言内容を操作する。この単純なゲームを分析することで、人間集団の意思決定メカニズムについての理解を深めることを目指す。

今年度は「単純な協調ゲームを用いながら、ゲーム結果に直接関与しない対話（チープトーク）を取り入れることで、日常的な状況でありながらゲーム理論的な解析が可能な研究方法を提案する」ために、理論面では、①使用するゲーム・タスク、②使用するエージェントの種類、③集団の動態をどのように特徴づけするかの方法論の検討を行った。①では、公共財ゲームを使用する予定である。またゲーム理論の意味でのゲーム状況では特殊な状

況になることが避けられないことから、より日常に近い状況のタスクを考案する。②では、OpenAIのAPIを使った製品の言語モデルだけでなく、オープンソースの言語モデルをローカルのマシンで用いることも検討する。③では、集団の動態を特徴づける枠組みは執筆予定のオピニオン・レビュー論文を書くことで明確にしていく。

実験面では、人を実験室に呼んで実験を行うために倫理審査書類の準備を豊川ユニットリーダーとともに進めてきた。2023年の6月に審査書類を提出し、修正を重ねることでようやく倫理審査の許可が降りる一歩手前まで話を進めることができた。来年度に向けて実験室実験の具体的な内容を議論していきたい。別の実験フィールドとして現在自身が居住している寮「SHIMOKITA COLLEGE」のコミュニティの受容と変遷を捉えるための試験的な実験を行った。3ヶ月居住する高校生10名程度を対象として、入居後1週間、その後月に一回の頻度で4回の質問紙調査、インタビュー調査を行っている。来年度からはより1年間のより長期かつ調査人数を増やして研究を行うため運営をしているHLABスタッフと協力体制を整えている。

●口頭発表 Oral Presentations

1. 堀井隆斗、堀部和也、鈴木啓介、“大規模・高品質な生

成AI時代における人工生命と人工意識”、日本人工知能学会、熊本、日本、6月(2024)

2. Kazuya Horibe and Michael Crosscombe, “Workshop Organization: Evolution, Criticality and Creativity in Collective Intelligence”, Artificial Life, Copenhagen, Denmark, July (2024)
3. Kazuya Horibe and Naoto Yoshida, “Acquisition of implicit world models via domain adaptation in homeostatic meta-reinforcement learning”, Theoretical and Experimental Approaches to Goal-Directed Behavior, Bilbao, Spain, October (2024)

●ポスター発表 Poster Presentations

1. Kazuya Horibe, Midori Ban and Keisuke Suzuki, “Investigating the effects of chaotic aperiodicity on flicker light-triggered hallucinatory phenomena”, Association for the Scientific Study of Consciousness, Tokyo, Japan, July (2024)
2. Kazuya Horibe, “Toward the Biology of Cognition: Organizing the Relationship between Autopoiesis and Agency”, Aware and Alive (ASSC27 Satellite Symposium), Sapporo, Tokyo, July (2024)
3. Kazuya Horibe and Naoto Yoshida, “Emergence of Implicit World Models from Mortal Agents”, The Intrinsically Motivated Open-ended Learning workshop at NeurIPS 2024, Vancouver, Canada, October (2024)

XXIV-055 Integrating Linguistic and Non-linguistic Information for Narrative Descriptions of Android Robots

Name: Bowen WU

Host Laboratory: Interactive Robot Research Team

Guardian Robot Project

RIKEN Information R&D and Strategy Headquarters

Laboratory Head: Takashi MINATO

In this research, we developed a novel co-speech gesture generation model based on diffusion models to improve the naturalness and synchronization with the speech. The model takes as input audio signal and output a sequence of joint rotation angles corresponding to human skeleton hierarchy, which can be used to control human-shaped agents. Through objective measurements and a user study, we confirmed that the gestures produced by the proposed model are perceived as more natural and synchronized with the speech than previous models. Moreover, for the generation of longer speech, we proposed a strategy to merge two consecutive generated segments, which outperforms traditional merging methods. Furthermore, we included the

facial expression generation along with the gesture generation as facial expression is also closely related to speech. Although the system can be directly applied to virtual human-shaped agent, it is difficult to directly map its output to physical robots due to different joint configuration. To tackle this problem, we developed a data-driven method to realize the retargeting from human data to robot joint command. In the present work, we specifically focus on the retargeting of facial expression due to the difference in the representation between facial expression and human movement. The proposed method utilizes the differentiability of neural network which predicts facial blendshape value from command value to perform gradient descent with respect to the command to find the optimal

value. The experiments show that the proposed method achieved a higher accuracy of retargeting compared to other baseline methods including a trained forward network, proving the effectiveness and necessity of the proposed method. These results would not only contribute to the final goal of realizing an integrated system for android robot multimodal behavior generation, but also deepen our understanding on how human perceives android robots.

● Publications

Papers

1. Wu B., Liu C., Ishi C.T., and Ishiguro H.: Speech-Driven Gesture Generation Using Transformer-Based Denoising Diffusion Probabilistic Models, in IEEE Transactions on Human-Machine Systems, vol. 54, no. 6, pp. 733-742, Dec. 2024
2. Wu B., Liu C., Ishi C.T., Minato T. and Ishiguro H.: Retargeting Human Facial Expression to Human-like Robotic Face through Neural Network Surrogate-based Optimization, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS),

Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2024, pp. 4724-4730

● Oral Presentations

International Conferences

1. Wu B., Liu C., Ishi C.T., Minato T. and Ishiguro H.: Retargeting Human Facial Expression to Human-like Robotic Face through Neural Network Surrogate-based Optimization, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2024, pp. 4724-4730

● Poster Presentations

International Conferences

1. Wu B., Liu C., Ishi C.T., Minato T. and Ishiguro H.: Retargeting Human Facial Expression to Human-like Robotic Face through Neural Network Surrogate-based Optimization, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2024, pp. 4724-4730

XXIV-056 The Development of Tunnel Junction AlGa_N-based 220-230nm LEDs for “Human Safe” Disinfection and Sterilization Applications.

Name: Muhammad Nawaz SHARIF

Host Laboratory: Quantum Optodevice Laboratory
RIKEN Cluster for Pioneering Research
Laboratory Head : Hideki HIRAYAMA

Toxic mercury (Hg) lamp has been used for the applications of deep-ultraviolet (DUV) LEDs including water sterilization, surface disinfection, and pathogen contaminations. The exposure of the living organism to the Hg-based UV lamp may severely damage the living cells and may cause multiple diseases including cancer. AlGa_N-based DUV LEDs are environmentally friendly and have multiple advantages such as low power consumption, compact size, ease of carry, and ease of installation. In the far-UVC region, the 220-230 nm emission range is found to be very effective for the above applications in the manned environment. The external quantum efficiency (EQE) and wall plug efficiency (WPE) of AlGa_N 220-230nm lights are still far behind in their realization and commercialization when compared to UVB LEDs. AlGa_N-based far UVC (220nm-230nm) LEDs face several challenges including higher threading dislocation density, lower hole injection efficiency and light extraction efficiency etc. Herein,

we first studied and identified the main challenges that need to be investigated. Simulations studied have been carried out using the SiLENSe STR tool at the first stage to theoretically optimized a far UVC LED. Multiple parameters are considered for the optimization including the number of quantum wells, the thickness of the quantum barrier and the polarized doped p-AlGa_N layer. The simulations study shows that by using a higher number of quantum wells the carrier injection efficiency (CIE) is increased while the internal quantum efficiency (IQE) is reduced due to a lower radiative recombination rate. These results help in the selection of the number of quantum wells and optimization of active regions. The optimized structure was experienced in the MOCVD reactor and carefully grown over a locally manufactured AlN template. The results show that polarized doped p-AlGa_N layer 1.2 mW light output power at CW condition can be achieved at 232 nm emission wavelength. The highest efficiency reached

0.35 % which can be further improved by working on the n-AlGaIn layer. However, it was identified that the emission was not consistent over the entire sample which can be improved by working on MOCVD reactor conditions. EL spectrum was calculated at 40 mA injection current using electrodes at multiple positions. A strong peak appears at 232 nm emission wavelength. In addition, this structure is going to be utilized by increasing the number of quantum wells. Currently, the performance is improved but still needs to be further optimized for the 220-230nm LED structure.

● Publications

1. Muhammad N. Sharif, Jingshu Yang, Xiaokun Zhang, Ke-Fan Wang, Proposing lead-free Cs₂SnI₆-nBrn for silicon heterojunction-based tandem solar cell, *Solar Energy*, Volume 281, 2024, 112893.
2. M. N. Sharif, J. Yang, X. Zhang, Y. Tang, G. Yang, K.-F. Wang, Tailoring Electronic Properties of 6H-SiC with Different Composition of Silicon by First-Principles Calculations. *Adv. Theory Simul.* 2024, 7, 2400245.
3. Muhammad N. Sharif, Jingshu Yang, Xiaokun Zhang, Yehua Tang, Gui Yang, Ke-Fan Wang, First-principle calculations to investigate electronic and optical properties of carbon-doped silicon, *Vacuum*, Volume 219, Part A, 2024, 112714.
4. Hafeez Ur Rahman, Khalid. Ayub, Nawaz Sharif, M. Ajmal Khan, Fang Wang and Yuhuai. Liu, Advantages of AlGaIn Tunnel Junction in N-Polar 284 nm Ultraviolet-B Light Emitting Diode, *ECS Journal of*

Solid-State Science and Technology, vol 13, 2024.

5. Ayub, Khalid, Banaras Khan, Yuhuai Liu, M. Nawaz Sharif, M. Ajmal Khan, and Hideki Hirayama. "Achieving zero efficiency droop in highly efficient N-polar AlGaIn tunnel junction-based 254 nm DUV LED." *Optics & Laser Technology* 180 (2025): 111567.
6. Taiga Kirihara, M. Ajmal Khan, Yuya Nagata, M. Nawaz Sharif, Yukio Kashima, Hiroyuki Yaguchi, Yasushi Iwaisako, and Hideki Hirayama, "Theoretical and Experimental Investigation of transmittance in 225±1 nm far-UVC LED grown on c-Sapphire." Under preparation.

● Oral Presentations Conferences

1. Sharif Muhammad Nawaz, M. Ajmal Khan, Yuhuai Liu, H. Hirayama, " Achieving Zero Efficiency Droop in Highly Efficient N-Polar AlGaIn Tunnel Junction-based 254 nm DUV LED, 21th China International Forum on Solid State Lighting & the 10th International Forum on Wide Bandgap Semiconductors (SSLCHINA & IFWS 2024), Suzhou, China, November 18-21.

● Poster Presentations Conference

1. Hafeez Ur Rahman, M. Nawaz Sharif, M. Ajmal Khan, Fang. Wang, Yuhuai. Liu, "Optimizing TE/TM-Mode Engineering for Enhanced Performance in AlGaIn UVB LED." 21st China International Forum on Solid State Lighting & the 10th International Forum on Wide Bandgap Semiconductors (SSLCHINA & IFWS 2024), Shenzhen, China, Nov 18-21.

2024-25 基礎科学特別研究員年報

令和7年10月31日 印刷

令和7年10月31日 発行

編集兼
発行者 国立研究開発法人理化学研究所
人事統括本部人材戦略部
研究人材育成課

〒351-0198 埼玉県和光市広沢2番1号

2024 - 2025
基礎科学
特別研究員年報

Special Postdoctoral Researcher Program
2024-2025 Annual Report

