

## 戎崎計算宇宙物理研究室 Computational Astrophysics Laboratory

主任研究員 戎崎 俊一（理博）  
EBISUZAKI, Toshikazu (Ph.D)



### キーセンテンス：

1. 超高エネルギー - 宇宙線の起源の謎に迫る
2. 宇宙と地球環境の関連を調べる
3. 量子論で地球を理解する
4. 超高速カメラで生体分子の動きを捉える
5. 新しい科学可視化手法を開発する

### キーワード：

宇宙線、極限エネルギー、国際宇宙ステーション、ブラックホール、ダークマター、雲核、地球環境、量子シミュレーション、中性子散乱、J-PARC、地球深部物質、生体分子高速撮像、Geiger mode Avalanche Photo Diode (G-APD)、G-APDカメラ、分子シミュレーション、科学可視化、学校教育

### 研究概要

当研究室では、極限エネルギー宇宙線（ $10^{20}$ 電子ボルト）を検出し、その起源天体を同定するためのJEM-EUSO（Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module）を開発している。JEM-EUSOは地球大気を検出器として利用し、宇宙起因の地球大気圏内での瞬間発光現象を観測する口径約2.5m、約60度の視野を持つ超広視野望遠鏡である。高度約400kmの軌道を周回している国際宇宙ステーション（ISS）の日本実験棟「きぼう」（JEM）の船外実験プラットフォームに装着され、直径約400kmの領域の地球大気を一度に観測する。日米欧の三軸のほぼ対等な協力のもとで建設される予定で、2016年頃の打上げを予定している。

その他に、銀河中心ブラックホールの形成過程や暗黒物質による構造形成の研究、地球や惑星内部の高温高圧下における水素（水）の物質科学を探究する量子シミュレーション、生体機能の発現機構を解明するためのG-APD 検出器による高速高感度カメラの開発、データのリアルタイム可視化技術の研究やシステム構築、研究成果を研究者が共有しやすいアプリケーションソフトReKOSの開発、計算機の教育利用などを行っている。

#### 1. 超高エネルギー宇宙線研究（戎崎，滝澤，川崎，篠崎，真瀬）

JEM-EUSO は、宇宙から地球を観て宇宙を知るといった新しい概念の観測装置“地文台”である。高度約400 km の軌道上を約 90 分で周回している国際宇宙ステーション（ISS）の日本実験棟「きぼう」（JEM）の船外実験プラットフォームに装着され、超広視野望遠鏡で地球大気を観測し、 $10^{20}$  電子ボルト（eV）を超える極限エネルギー宇宙線が作る微弱な光を捉える。

極限エネルギー宇宙線は地球の大気の原子核と衝突して主に電子・陽電子・ガンマ線などの二次荷電粒子からできた空気シャワーを形成する。空気シャワー中の高エネルギー荷電粒子は大気中の窒素分子を励起して紫外線を放射させる。JEM-EUSO はこのとき励起された窒素分子から放射される蛍光紫外線を 2.5 マイクロ秒の時間間隔で撮像し、空気シャワーの発達を約 0.5 km × 0.5 km（角度分解能 0.07 度）の空間分解能で三次元的に再構築する。これにより、極限エネルギー宇宙線のエネルギーと到来方向を決定することができる。これらは、100 平方キロメートルあたり 1 年に 1 個程度しか飛来しないので、より多くの事例を得て高統計の議論を可能にすることが何よりも肝要である。JEM-EUSO は、宇宙から観測することにより飛躍的に観測領域を拡大し、3 年間の運用で約 500 個を超える超 GZK（ $E > 5 \times 10^{19}$ eV）粒子事例を観測できるよう設計されている。 $10^{20}$ eV 以上のエネルギーを持つ粒子は、銀河磁場で一度程度しか曲がらず（陽子の場合）ほぼまっすぐ地球に飛来するので、到来方向を遡れば起源天体を同定することができる。

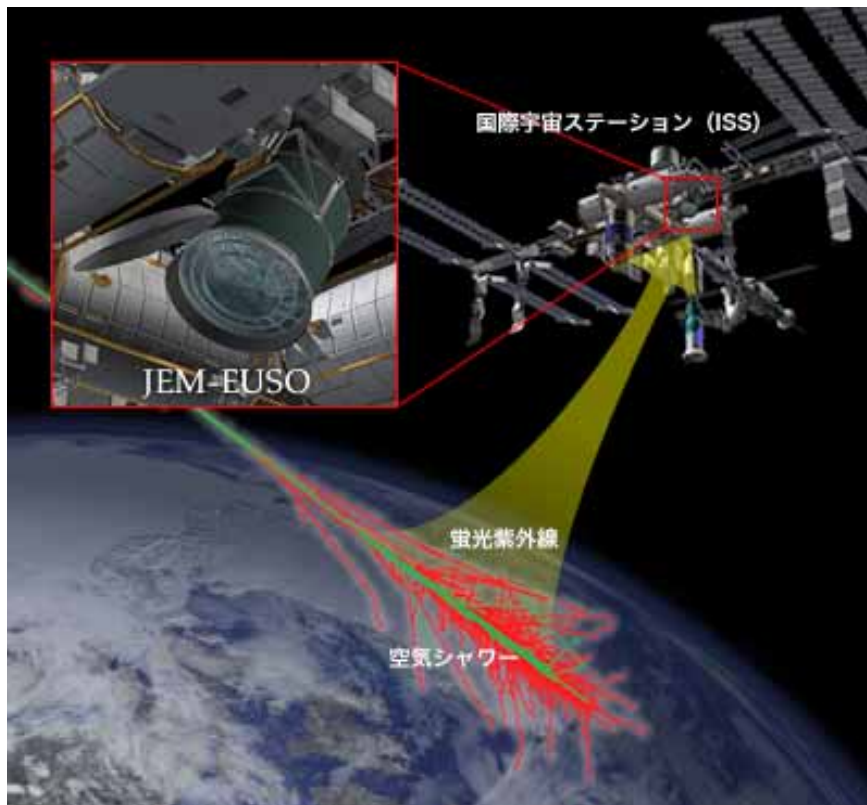
JEM-EUSO はその他にも、超高エネルギーニュートリノによる空気シャワーや雷、夜光、流星などの大気圏内の発光現象なども全球的・網羅的に観測する。

当研究室は、JEM-EUSO を推進する中核的存在として、13ヶ国（日本、米国、イタリア、フランス、ド

イツ、スペイン、ポーランド、スロバキア、ブルガリア、ロシア、メキシコ、韓国)、74 研究施設の研究者 (2010 年 12 月現在) と協力しながら、JEM-EUSO の製作準備を進めている。JEM-EUSO は、日本の H II B ロケットで打ち上げられ、HTV (H-II Transfer Vehicle) で ISS に運ばれる予定である。2016 年度の打ち上げを目指して準備を進めている。

JEM-EUSO 望遠鏡は口径約 2.5m で史上最大の屈折望遠鏡である。屈折望遠鏡は、1897 年にヤーキス天文台の 102cm 屈折望遠鏡が建設されて以来、レンズの重量と色収差のために 100 年以上にわたって、より大きな物は作られてこなかった。これらの問題は、超軽量フレネルレンズおよび回折光学レンズの製作を可能にした大型超高精度加工技術のブレークスルーで解決し、2010 年 10 月には、大森素形材工学研究室と共同で製作している両面フレネル曲面レンズの試作品 (口径 1.5m) 3 枚が完成した。

<http://jemeuso.riken.jp/>



極限エネルギー宇宙線が作る空気シャワーを ISS から観測する JEM-EUSO (想像図)



完成した両面フレネル曲面レンズの試作品（口径 1.5m）

## 2. 宇宙地球環境シミュレーション（戎崎）

宇宙からは、宇宙線や太陽紫外線などさまざまなものが降り注いでおり、その影響を地球環境は受けている。特に銀河宇宙線は、対流圏においてイオンを形成し、それが硫酸エアロゾル形成の核になって雲核を作る可能性が示唆されている。この結果地球のアルベドが上昇し、地球は寒冷化する。さらに地球の対流圏は、その上の成層圏、中層圏、熱圏、電離圏と相互作用しているようすが、衛星による全球観測から明らかになりつつある。天の川銀河の周りを公転する大小マゼラン銀河、いて座矮小銀河の動きを、観測された視線速度、固有運動から数値シミュレーションで再現し、約 25 億年前と約 7 億年前における天の川銀河円盤内でのスターバーストの原因として位置づけた。この時期は地球が全球凍結するなど地球史上の大イベントが起こった時期と一致していた。さらには、この時期に真核生物の誕生や、多細胞生物が生まれるなど生物も大きく進化した。これらの生物大進化と宇宙線増加の関連を調べる。

## 3. 量子シミュレーションによる地球と惑星の物質科学（飯高）

水素は宇宙最多の元素であるが、地球大気中の水素分子は宇宙へ拡散してしまい、現在の地球では水素は水(H<sub>2</sub>O)や含水鉱物などの化合物あるいは鉱物やマグマ中の不純物として存在する。この水素は地表から地球最深部の高温高圧領域までのマグマ・鉱物の構造や物性に劇的な影響を与え、原始地球形成、地球深部や火山噴火のダイナミクスなどに関わる重要元素である。また「宇宙の塵から地球がどのように物質進化して生命を育む水の惑星となったか、そしてどうなるか。」という、宇宙生物学の根本問題にも関連する。平成 20 年度採択の新学術領域研究「高温高圧中性子実験で拓く地球の物質科学」(領域代表：八木健彦)では、J-PARC における世界トップレベルの中性子ビームと日本で開発された最先端の実験技術を用いて、地殻から下部マントル最上部相当の高温高圧下におけるマグマ、鉱物中における水素（水）の物質科学を探究する。その計画研究の一つとして我々は世界トップレベルのスーパーコンピュータと最先端の量子シミュレーションを駆使して、地球・惑星内部の高圧下での物質の性質を理解することを目指す。すでに高圧力下での固体メタンの結晶構造の発見、シラン水素複合体の新型化学結合の解明などの成果を挙げつつある。

(<http://www.iitaka.org/~neutron/>)

#### 4. G-APD 検出器による高速高感度カメラの開発と生体分子科学への応用 (滝澤、川崎、宮本)

生体分子の撮像としては、未踏の領域である sub- $\mu$ sec という高速撮像で、生命を司る生体分子の素過程を理解することを目指し、G-APD カメラによる高速撮像システムの開発をおこなっている。このカメラは、CCD や CMOS の代わる次世代検出素子 Geiger mode APD (G-APD)を用いている。G-APD 検出素子は、SiPM、MPPC としても知られ、従来の光電子増倍管に換わる新しい半導体素子である。G-APD は、CCD 等に比べて格段に微弱で高速な発光現象を捉える。潜在的には < 1 ns の時間分解能で 1 光子検出ができる。平成 20 年度採択の理事長ファンド (連携)「G-APD 検出器による高速高感度カメラの開発と生体分子科学への応用」(代表: ASI 滝澤慶之、共同研究者 ASI 丑田公規、BSI 武藤悦子、ASI 佐甲靖志)では、16 x 16 画素、読み出し時間 6 ns の G-APD 撮像カメラを試作し、細胞内分子、モーター蛋白質、膜蛋白質などの動態や反応を実時間で捉え、その性能の実証を行う。滝澤と川崎は、JEM-EUSO の検出システムの応用し、本カメラの開発を行っている。本研究で開発する超高感度・超高速撮像システムは、生体機能の発現機構を解明するために必須のイメージング装置となることを目指している

#### 5. 高度情報技術を使ったヒューマンインターフェースの研究 (戎崎、金子)

シミュレーション結果についての人間の直感的な理解を助けるため、データのリアルタイム可視化技術の研究とシステム構築を行っている。科学技術館ユニバースホールが改修されて立体全天シアター「シンラドーム」が完成した。その運営とコンテンツの製作に協力している。

また、研究成果を研究者が共有しやすいアプリケーションソフト ReKOS の開発を推進した。このソフトウェアを用いることにより、研究成果を広く学校教育、社会教育の教育現場で活用できるようにもなる。フリーソフトとして配布を行っている。同ソフトウェアを基礎から完全に再構築し直した Ver.2.0 をリリースした。これは既存バージョンとの互換性を残しながら、飛躍的な機能の向上と、より多機能で親和性の高いシステムとの連携を可能にするものである。Ver.2.0 ベータ版は、使用期限を設けて、2009 年 4 月、2009 年 9 月、2010 年 1 月の 3 回にわたって WEB 公開した。

#### Key Sentence :

1. Explore the origin of the extreme energy cosmic-rays
2. Investigation of the relationship between cosmic and terrestrial environment
3. Understand the Earth quantum mechanically.
4. Imaging bio molecular dynamics by using an ultra high-speed camera.
5. Create a new method of scientific visualization

#### Key Word :

cosmic-rays, extreme energy, International space station, black hole, dark matter, cloud nuclei, terrestrial environment, quantum simulation, neutron scattering, J-PARC, mantle, magma, Bio molecular high-speed imaging, Geiger mode Avalanche Photo Diode (G-APD), G-APD camera, molecular simulation, scientific visualization, formal education

#### Outline

We promote in JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory onboard Japanese Experiment Module) mission to explore the origin of extreme energy particles above  $10^{20}$ eV. It observes giant-air showers by extreme energy cosmic-ray from the orbit. JEM-EUSO is a super wide-field (60 degrees) telescope with a diameter of 2.5 meters planned to be installed in International Space Station. The feasibility study and conceptual design has continual for past three years under the collaboration with JAXA, RIKEN, and the JEM-EUSO international collaboration of thirteen countries (Japan, USA, Italy, France, Germany, Spain, Switzerland, Poland, Slovakia, Bulgaria, Russia, Mexico, Korea) JEM-ESO is planned to be launched in JFY 2016 by the Japanese heavy lift rocket - the H II B, and then conveyed to ISS by HTV (H-II transfer Vehicle)

Other active studies are running in parallel for the development of super-high speed special purpose

computers and the large scale simulations of bio-molecules and formation process of super massive black-holes and its relation to hypernova/gamma-ray burst, materials science of Earth and planets explored by quantum simulation, development of a G-APD camera with sub- $\mu$ sec sampling and its application to bio molecular science, development of ReKOS which is a friendly application software for sharing the results among researchers, and education with computers.

**1. Investigation of Extreme Energy Cosmic-Rays ( Ebisuzaki, Takizawa, Kawasaki, Shinozaki, Mase )**  
JEM-EUSO is a new type of observatory that uses the earth's atmosphere as a detector. JEM-EUSO will be on orbit on the International Space Station (ISS). It observes transient luminous phenomena taking place in the earth's atmosphere caused by particles coming from space. The sensor is a super wide-field telescope that detects extreme energy cosmic-rays with energy above  $10^{19}$  eV. This remote-sensing instrument orbits around the earth every 90 minutes on board of the International Space Station at the altitude of approximately 400km.

The JEM-EUSO telescope has a super-wide Field-of-View ( $\pm 30^\circ$ ) with two double sided curved Fresnel lenses and records the track of an EAS with a time resolution of 2.5 microseconds and a spatial resolution of about 0.5 km (corresponding to 0.07 degrees). These time-segmented images allow the determination of the energies and directions of the primary particles.

JEM-EUSO instrument can reconstruct the incoming direction of the extreme energy particles with accuracy better than several degrees. Its observational aperture of the ground area is a circle with 250 km radius and its atmospheric volume above it with a 60-degree field-of-view is about 1 tera-ton or more.

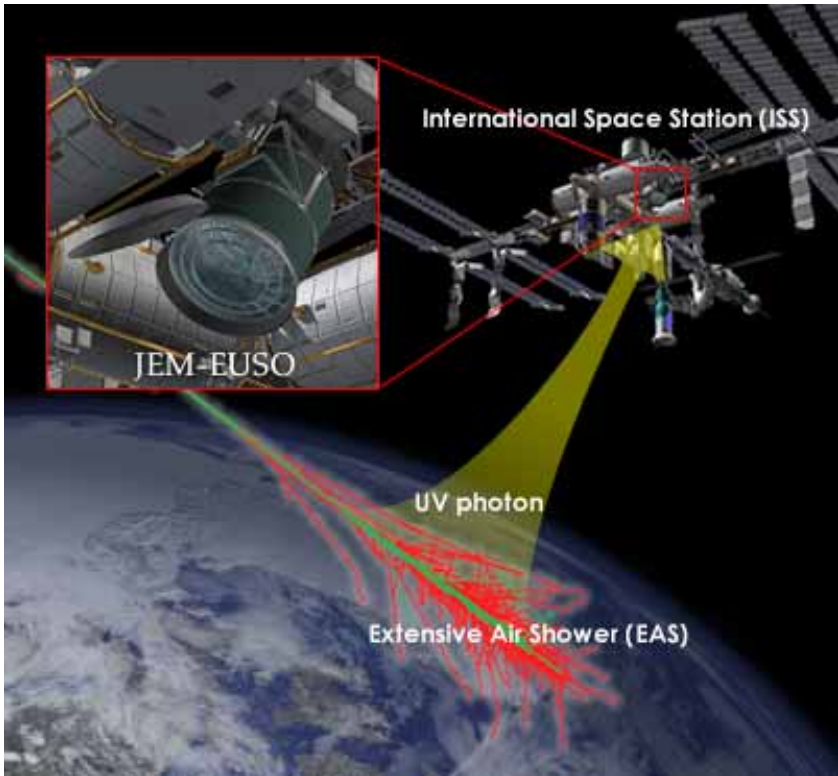
The extreme energy particles can be traced back to their origin by their measured arrival direction with accuracy better than a few degrees. JEM-EUSO will also observe atmospheric luminous phenomena such as lightning, nightglow, and meteors.

JEM-EUSO has been selected as the candidate mission of the second utilization of JEM/EF. A two-year-long Phase-A/B study has started. JEM-EUSO is planned to be launched in JFY 2016 by the Japanese heavy lift rocket - the H II B, and then conveyed to ISS by HTV (H-II transfer Vehicle).

The JEM-EUSO telescope is the ever largest refractive telescope with a diameter of 2.5m. Nano precision fabrication technology allows to make highly transparent lens for JEM-EUSO. It uses the Fresnel lens to reduce mass of the lens and eliminate color aberration of the optics.

We succeeded to produce a set of three Fresnel lenses with diameter of 1.5m experimentally with Materials Fabrication Laboratory in December, 2010.

<http://jemeuso.riken.jp/>



Artist's conception of the JEM-EUSO telescope observing air shower.



Experimental Fresnel lens with diameter of 1.5m

## **2. Astrophysical Simulations (Ebisuzaki)**

Our terrestrial environment is affected by a large variety of influences from outer space, such as cosmic and solar ultraviolet rays. It has been suggested that galactic cosmic rays cause the generation of ions in the troposphere that form the nuclei around which cloud droplets coalesce, which in turn may increase terrestrial albedo, which cools the earth. Satellites have permitted the observation of the earth from above, revealing much about interaction between the troposphere and other layers of the atmosphere such as the stratosphere, mesosphere, thermosphere, including the ionosphere, which is directly affected by many influences from the surrounding space environment. Outside of the immediate global space environment as well, we have reproduced by numerical simulation the revolution of the Large and Small Magellanic Clouds and the Sagittarius Dwarf Irregular Galaxy around the Milky Way, based on line-of-sight velocity and proper motion, and found evidence to associate their motion with star burst events in the disk of the Milky Way 700 million and 2.5 billion years ago. These star burst events coincide with Snowball Earth episodes and many other important paleogeographical events such as the emergence and evolution of eukaryotes and metazoa. We are studying relationships between cosmic ray increase and macroevolution..

## **3. Materials science of Earth and planets explored by quantum simulation (Iitaka)**

The most abundant element in the universe is hydrogen. However, most of molecular hydrogen in the Earth's atmosphere escaped into space long time ago. Today hydrogen exists as chemical compound such as water (H<sub>2</sub>O) and hydrous minerals, or as impurities in minerals and magma. Hydrogen is believed to have dramatic impacts on the structure and physical properties of magma and minerals from the surface to the innermost region of the Earth under high pressures and high temperatures. Hydrogen is an important element related to formation of the primitive Earth, eruption of volcanoes and dynamics of the deep Earth. Hydrogen also refers to fundamental questions of Astrobiology: "How the Earth has evolved from space dusts to a water planet filled with life?" and "What is its future?". The MEXT fund for New Research Area "Materials Science of the Earth by Neutron Experiments under High Temperatures and High Pressures" (PI: Takehiko Yagi) was approved in 2008, where the materials science of hydrogen (water) in mantle and magma are explored by the one of the most advanced neutron beam at J-PARC and experimental techniques developed by Japanese high-pressure community. As a part of this project we exploit the state of art supercomputers and quantum simulations to understand the properties of materials under high pressure inside Earth and planets. We have discovered new crystal structures of solid methane and new chemical bonds between silane and hydrogen molecules.

(<http://www.iitaka.org/~neutron/>)

## **4. Development of a G-APD camera with sub-µsec sampling and its application to bio molecular science (Takizawa, Kawasaki, Miyamoto)**

Fundamental processes of bio-molecular activity compose a life. Timescale of its bio-molecular activity is almost µsec. However, imaging technology cannot resolve its activity enough in this timescale. Its main reason is that there are not good detector with both ultra high-speed response and high detection efficiency. So, we are developing a new camera system by using a Geiger mode Avalanche Photo Diode (G-APD). G-APD is the next generation detector in place of CCD or CMOS detector. G-APD is known as SiPM or MPPC and functions as silicon-base photo-multiplier tube. G-APD can detect a photon with good time resolution like < 1 ns. The Strategic Programs for R&D (President's Discretionary Fund), Collaboration Research, "Development of a G-APD camera with sub-µsec sampling and its application to bio molecular science" (PI: ASI Y. Takizawa, Co-Researcher: ASI K. Ushida, BSI E. Muto, ASI Y. Sako) was approved in 2008, where G-APD camera system, with 16x16 pixels and 6 nsec sampling, is being developed and we will attempt to take images of 3 kinds of targets in 2010-2011. These observations are molecular motor measurement, protein dynamics measurement and 2-dimensional

molecular diffusion coefficients measurement. As a part of this project, Takizawa, Kawasaki and Miyamoto are developing an imaging system as the application of the JEM-EUSO detector system to bio molecular science.

#### **5. Developing molecular simulation libraries for GRAPE-DR (Ebisuzaki)**

The GRAPE-DR is a massively parallel processor designed for scientific computation which dramatically accelerates the processing of simulation data of merely by inserting the GRAPE-DR extension board into a regular PC. We are developing program libraries specifically designed to exploit the enhanced processing speed of this system for molecular dynamic, quantum chemistry and structural analysis simulations.

#### **6. Studies of human interface with advanced information technology (Ebisuzaki, Kaneko)**

We are developing a real-time visualization system to assist intuitive understanding of simulation results. For example, we contributed to develop the contents "Shinra Dome" in the Science and Technology Museum. "Shinra Dome" is the renewal version of "Universe Hall", and we are collaborating to operate the system. We developed ReKOS, a friendly application software for sharing the results among researchers. ReKOS is distributed as a free software, enabling researchers to widely distribute their results for education in various kinds of schools. This year we rebuilt ReKOS from scratch to improve the functionalities, keeping the compatibility with previous version. The software was released as the new version (ver. 2.0) of ReKOS. Period limited 2.0 beta version was distributed on a web site three times of April and September, 2009 and January, 2010.



***Principal Investigator***

戒崎 俊一 Toshikazu Ebisuzaki

***Research Staff***

飯高 敏晃 Toshiaki Iitaka

滝澤 慶之 Yoshiyuki Takizawa

松山 知樹 Tomoki Matsuyama

藤本 桂三 Keizo Fujimoto

塩田 大幸 Daiko Shiota

川崎 賀也 Yoshiya Kawasaki

篠崎 健児 Kenji Shinozaki

李 志 Zhi Li

宮本 寛子 Hiroko Miyamoto

津野 克彦 Katsuhiko Tsuno

金子 委利子 Iriko Kaneko

David Chapmon

谷田貝 文夫 Fumio Yatagai

田島 典夫 Norio Tajima

***Students***

東出 一洋 Kazuhiro Higashide

宮澤 克英 Katsuhide Miyazawa

Saez Cano Guadalupe

Morales Alberto Jose

***Assistant and Part-timer***

大畑 智子 Tomoko Oohata

佐藤 茂 Shigeru Sato

真瀬 洋 Hiroshi Mase

***Visiting Members***

John Sak Tse

富田 勝 Masaru Tomita

中村 振一郎 Shin-ichiro Nakamura

井田 茂 Shigeru Ida

木舟 正 Tadasi Kifune

Gustavo Adolfo Medina Tanco

Kholmirzo Tagoikulovich Kholmurodov

榊 直人 Naoto Sakaki

佐藤 光輝 Mitsuteru Sato

肖 鋒 Feng Xiao

真貝 寿明 Hisaaki Shinkai

高橋 徹 Toru Takahashi

高橋 幸弘 Yukihiro Takahashi

田島 文子 Fumiko Tajima

立川 仁典 Masanori Tachikawa

Dmitry Vadimovich Naumov

西堀 英治 Eiji Nishibori

Holger Baumgardt

Michael Paul Stopa

眞榮平 孝裕 Takahiro Maehira

牧野 淳一郎 Junichiro Makino

丸山 茂徳 Shigenori Maruyama

三浦 均 Hitoshi Miura

泰岡 顕治 Kenji Yasuoka

安田 耕二 Koji Yasuda

八柳 祐一 Yuichi Yatsuyanagi

矢部 孝 Takashi Yabe

山口 嘉夫 Yoshio Yamaguchi

Alan Aspuru-Guzik

荒井 規允 Noriyoshi Arai

池田 隆司 Takashi Ikeda

石井 晃 Akira Ishii

伊藤 智義 Tomoyoshi Ito

植田 毅 Takeshi Ueta

今井 智仁 Tomohito Imai

海老塚 昇 Noboru Ebizuka

大島 修 Osamu Oshima

岡崎 進 Susumu Okazaki

尾久土 正己 Masami Okyudo

奥野 光 Hikaru Okuno

面高 俊宏 Toshihiro Omodaka

|                           |                   |                    |                  |
|---------------------------|-------------------|--------------------|------------------|
| 片岡 龍峰                     | Ryuho Kataoka     | 鷲見 治一              | Haruichi Washimi |
| Kim Eunja                 |                   | Mark Adrian Watson |                  |
| Nguyen Hai Chau           |                   | 本間 正充              | Masamitsu Honma  |
| Kyo Je-Lai                |                   | 中里 直人              | Naohito Nakasato |
| 小久保英一郎                    | Kokubo Eiichiro   | 重田 育照              | Yasuteru Shigeta |
| 五島 正光                     | Masamitsu Goshima | 石岡 憲昭              | Noriaki Ishioka  |
| Alessandro Marchi Zuccaro |                   | 千秋 博紀              | Hiroki Sensyu    |
| 高幣 俊之                     | Toshiyuki Takahei |                    |                  |
| 田中 宏志                     | Hiroshi Tanaka    |                    |                  |
| 千頭 一郎                     | Chikami Ichiro    |                    |                  |
| 土屋 旬                      | Jun Tsuchiya      |                    |                  |
| 長嶋 雲兵                     | Umpei Nagashima   |                    |                  |
| 永野 元彦                     | Motohiko Nagano   |                    |                  |
| 西堀 英治                     | Eiji Nishibori    |                    |                  |
| 額谷 宙彦                     | Sorahiko Nukatani |                    |                  |
| 野村 晋太郎                    | Shintaro Nomura   |                    |                  |
| 畠 浩二                      | Koji Hata         |                    |                  |
| Fabio Pichierri           |                   |                    |                  |
| Klaus Bastian Bittermann  |                   |                    |                  |
| 平井 尊士                     | Takashi Hirai     |                    |                  |
| Francesco Fenu            |                   |                    |                  |
| Mario Edoardo Bertaina    |                   |                    |                  |
| Veniamin Berezinsky       |                   |                    |                  |
| 星 健夫                      | Takeo Hoshi       |                    |                  |
| 本郷 研太                     | Kenta Hongo       |                    |                  |
| Yanming Ma                |                   |                    |                  |
| 町田 学                      | Manabu Machida    |                    |                  |
| 松原 裕樹                     | Hiroki Matsubara  |                    |                  |
| 松本 直記                     | Naoki Matsumoto   |                    |                  |
| 宮崎 剛                      | Tsuyoshi Miyazaki |                    |                  |
| 宮崎 芳郎                     | Yoshiro Miyazaki  |                    |                  |
| 宮原 ひろ子                    | Hiroko Miyahara   |                    |                  |
| Thomas Mernik             |                   |                    |                  |
| 八木 清                      | Kiyoshi Yagi      |                    |                  |
| 横島 智                      | Satoshi Yokojima  |                    |                  |
| 吉田 滋                      | Shigeru Yoshida   |                    |                  |