

第10章

ナノサイエンス・テクノロジー

～原子レベルから切り込む～

2000年に米国クリントン政権が打ち出したナノテクノロジー国家戦略「NNI」より7年も早く、理研は、ナノテク勃興を具体的に先取りする研究に着手している。ナノサイエンスとナノテクノロジーを融合した「原子スケール・サイエンジニアリング」というコンセプトのもとに、原子レベルでの表面構造の決定、表面分析、半導体リソグラフィ、走査型トンネル顕微鏡（STM）など主要なナノサイエンスに関する学術的な研究とナノテクノロジーをリンクさせて、相次いで新たな提案を行うなど、フロントティアの役割を果たしてきた。

ナノサイエンス・ナノテクノロジーは、IT（情報技術）、ライフサイエンス、医療、環境などに飛躍的な革新をもたらすと期待される。わが国は、世界的にリードしているナノサイエンス・ナノテクノロジーの優位性をさらに維持するために、新たなナノテク国家戦略を打ち出した。理研は、全所を挙げて分野横断的な新研究体制を構築し、独自の視点から研究を進めるとともに、国家戦略遂行に欠かせない科学的な知見とテクノロジーを提供すべく、21もの多彩なプログラムを推進している。

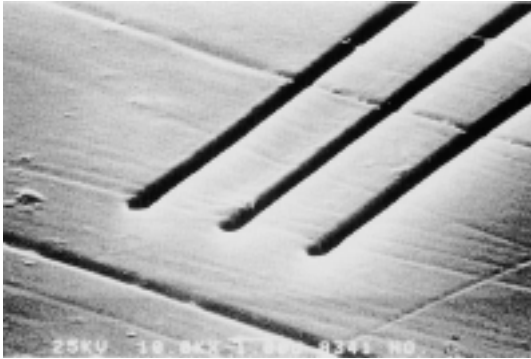
第1節 1970年代半ばにはナノの先駆け研究

大型放射光建設にインパクト

ナノテクノロジーの中で最も重要なのは微細加工である。この歴史に関して、難波進（現理研名誉研究員）が「ナノテクノロジーハンドブック」（オーム社発行）にまとめている。理研との関係を述べれば、1976年（昭和51年）ごろ、難波が理研半導体研究室の主任研究員当時に始めた、シンクロトロン放射光によるリソグラフィの実験（東大核研の1.1GeVを利用）で成し遂げた、幅 $0.2\mu\text{m}$ 、高さ $2.2\mu\text{m}$ 、ピッチ $0.7\mu\text{m}$ の典型的な高アスペクトのシンクロトロン放射光（SR）リソグラフィの成果が、1977年（昭和52年）の国際会議で発表され、当時のチャンピオンデータとして注目を集めた。この実験成果は、その

後の高エネルギー物理学研究所のフォトン・ファクトリー（放射光実験施設。2.5GeV・SR）や大型放射光「SPring-8」の建設にかなり貢献した。

また、理研が展開した初めての大型プロジェクト研究「レーザー科学研究」で、1980年（昭和55年）にグループの河村良行研究員が電子ビーム励起KrFレーザー（波長249nm）の発振に成功、ただちにリソグラフィに応用し、 $0.5\mu\text{m}$ の転写に成功している。これは“エキシマレーザーによるポリメチルメタクリレート（PMMA）のフォトエッチング”として論文発表され、エキシマレーザー・アブレーションの最初の論文として評価されている。



エキシマレーザーでサブミクロン加工

しかし、これについての特許出願は残念ながら行わなかった。このエキシマレーザーによるリソグラフィーは、現在、半導体デバイスの主要なリソグラフィー手法となっているが、外国から日本にエキシマレーザーによるリソグラフィーの特許出願があったとき、この論文が重要な防波堤となった。

1982年から1984年にかけて、文部省の特定研究「極微構造エレクトロニクス」(Nanometer Structure Electronics)が難波らによって進められ、日本全国でのナノ研究の拠点づくりが進んだ。

これに対抗する形で1985年ごろから、米国で“メゾスコピック”という言葉が使われ始め、この言葉がまたたく間に日本を席卷し、日本では「ナノはもう古い。ナノでは研究費が出ない」という期間が15年ほど続いた。これは、当時の制御できるサイズが物理的にはマクロスコピックとミクロスコピックの狭間のメゾスコピック領域であり、そのために種々のおもしろい現象がその領域で観測されたという事実に基づくものである。技術の方向は明らかにナノメーター領域の制御に進ん

でおり、現在はまさにナノメーターの領域での科学と技術の時代に入ったと言えよう。

原子層制御に着目

理研がナノサイエンス・ナノテクノロジーに関係した研究を始めたのはずいぶん古い。それぞれの研究室が連携して研究グループとして表に出るのは、1986年(昭和61年)10月からスタートした国際フロンティア研究システムのフロンティア・マテリアル研究プログラムが初めてであろう。それ以前は、難波らの極微構造エレクトロニクスの研究が単独で行われた。難波は1976年(昭和51年)から始まった理研の「レーザー科学研究グループ(当初はレーザー誘起化学反応の研究)」のグループヘッドに1982年に就き、1985年のレーザー科学研究第Ⅱ期の発足に伴って4つのグループを立ち上げた。その1つ「レーザー分子加工グループ」(グループリーダー：青柳克信。後にレーザー科学研究グループ主任研究員)では、すでに原子層制御結晶成長の研究を行っていた。

難波を中心に始めていた理研の特別研究プロジェクト「マスクフリーLSIプロセス」と、この分子加工グループの研究費を原資の一部とし、国際フロンティア研究システムにフロンティア・マテリアル研究プログラムを誕生させたが、他の研究室でもナノの先駆けとなる研究がなされていた。

当時の表面界面工学研究室(青野正和主任研究員)では、「カイシス：CAICISS」(Coaxial Impact Collision Ion Scattering Spectroscopy)による表面構造の原子レベル

での決定、そして、STMの導入がなされつつあった。また当時の生体高分子物理研究室（雀部博之主任研究員）では、非線形効果を大きく誘起する分子レベルの材料設計がなされつつあった。後になるが、表面化学研究室（川合真紀主任研究員）では、表面反射赤外分光法により吸着分子の基板での原子配置の決定を可能にしていたし、素形材工学研究室（牧野内昭武主任研究員）では、ナノメートルの精度で固体表面を研磨する技術を開発していた。

もちろん、他の研究室でも同様のナノサイエンス・ナノテクノロジー研究の動きは古くからあった。



カイス (同軸型直衝突イオン散乱分光装置)

国際フロンティア研究からグループ研究に

国際フロンティア研究システムは、すべての研究員を契約制で雇用する新しい試みと、当時としては大変長いスパンの研究、最長3期15年を期間とし、システム長に久保亮五を迎え、また外国人を3分の1以上入れることを念頭におき、理研本体ではできない探索的な研究を、期限を設けて理研本体との協力関

係のもとで行おうとするものであった。フロンティア研究棟も建設され、フロンティア・マテリアル研究プログラムの発足により、理研のナノサイエンス・ナノテクノロジー研究の基盤が築かれた。

フロンティア・マテリアル研究プログラムは、第1期（1986年10月1日～1991年9月30日）の研究期間を5年間とし、グループディレクター：難波主任研究員（阪大教授本務）のもとに下記のチームで構成された。

1. 量子化素子研究チーム（チームリーダー：難波、リエゾンマネージャー：青柳）
2. 分子素子研究チーム（チームリーダー：アンソニー・F・ガリト、リエゾンマネージャー：雀部）
3. 生物素子研究チーム（チームリーダー：ケルビン・M・アルマー、リエゾンマネージャー：雀部）

また、第2期（1991年10月1日～1999年9月30日）は、研究体制を大幅に変え、研究期間が5年ではその研究室の立ち上げも考えると短いとの考えから、研究期間を8年とし、久保の後任の伊藤正男システム長のもと、グループディレクターとして菅野卓雄東大教授を迎え、以下のチームで取り組むことにした。

1. ナノ電子材料研究チーム（チームリーダー：菅野、リエゾンマネージャー：青柳）
2. ナノ有機フォトンクス材料研究チーム（チームリーダー：雀部、リエゾンマネージャー：青柳）

ナノサイエンス研究プログラムの特徴 The Framework of the Program



3. エキゾチック・ナノ材料研究チーム
(チームリーダー：ヴォルフガング・クノール、リエゾンマネージャー：青柳)

(チームリーダー：川合)

3. 原子スケールプロセッシング研究チーム
(チームリーダー：青柳)

が組織された。

これとは独立に、理研本体の中で「原子スケール・サイエンジニアリング研究」の第1期(1993年4月1日～1998年3月31日)が始まり、青野主任研究員をグループリーダーとし

1. 原子スケールメカニズム研究チーム
(チームリーダー：青野)
2. 原子スケールマテリアル研究チーム

第2期(1998年4月1日～2002年3月31日)は、川合主任研究員をグループリーダーとし

1. 原子スケール電子運動応答研究チーム
(チームリーダー：青野)
2. 原子スケール分子状態認識研究チーム
(チームリーダー：川合)
3. 原子スケール電子状態制御研究チーム
(チームリーダー：青柳)

4. ナノデバイスビルディング研究チーム
(チームリーダー：河野公俊。平成13
年度のみ)

の4チームで活動した。

その後、2002年度から「次世代ナノサイエ
ンス・テクノロジー研究」が始まり、現在に
至っている。この研究グループは川合主任研
究員をグループリーダーに

1. ナノ計測／制御基盤技術研究チーム
(チームリーダー：河田聡)
2. ナノケミカル機能基盤技術研究チーム
(チームリーダー：川合)
3. ナノ極限物性基盤技術研究チーム (チ



非線形光学効果の測定システム

ームリーダー：河野)

4. ナノデバイス基盤技術研究チーム (チ
ームリーダー：石橋幸治)
- の4チームで研究が行われている。

Episode

ナノテク勃興を先取り

「原子スケール・サイエンジニアリング」

「1990年代の初め。これからは、サイエ
ンスとテクノロジーが一体となって進展する“原
子スケール”の時代」―。理研の研究室で青野
正和、青柳克信、川合真紀3主任研究員の、今
で言うナノ研究トリオが侃侃諤諤の議論の末に、
ある結論を導き出した。それを「原子スケ
ール・サイエンジニアリング」とネーミングした。

サイエンス (科学) とテクノロジー (工学＝
エンジニアリング) は、当時はまだ独立した研
究領域として進んでいたが、原子スケールとい
う切り口なら、科学と工学は切っても切れない
一体化したものになり、新しい科学技術の世界
を創造できると考えた。原子スケール・サイエ

ンジニアリングの発想はこうして生まれたもの
で、このコンセプトは現在、世界的に展開され
ているナノサイエンス&テクノロジーの原点と
なる視点であり、理研はナノテクの世界でも先
べんをつけた。

しかし、青柳は悔しがらる。原子スケール・サ
イエエンジニアリングを立ち上げるとき、バイオ
分野の研究も一緒に取り込むことを考えたが、
実現しなかった。「もし、一緒に展開できていれ
ば、盛り上がりを見せている“ナノバイオ”ま
でも理研から発信できたし、さらに、その先見
性を誇ることができた」と。



ナノサイエンス実験棟（上）と
内部に設置したクリーンルーム（下）

米国のナノテク戦略に多大な影響

2000年1月、米国のビル・クリントン大統領がナノテクノロジー推進に関する教書「National Nanotechnology Initiative」(NNI)を発表して以降、ナノテクが21世紀初頭の有力な技術分野として急浮上し、世界的に研究が展開される大きな契機となった。

この教書発表の前年度に、米国のナノサイエンス・テクノロジー研究世界動向調査団（エベリン・L・フーら）が、理研でのナノサ

イエンス・ナノテクノロジー研究の調査のために訪れた。理研を日本のナノサイエンス・ナノテクノロジー研究の有力な拠点として認識し、理研のナノテクノロジーに関する研究活動をつぶさに調べていった。

その調査結果は「WETC Panel Report on : Nanostructure Science and Technology」という1冊の本（Kluwer Academic Publishersから発行）にまとめられており、理研の当時の研究活動もその本の中で紹介されている。クリントン教書は、これらの調査団の調査結果に基づいて出された米国の戦略である。

前述のように、理研は1970年代から総合研究機関としての特徴を生かした学際的研究環境と最先端の大型インフラ設備、技術の蓄積により、他に先駆けて原子スイッチや原子ダイオード、原子層マニピュレーションの新方法、放射光を利用した物質・生体材料の構造解析など、ナノサイエンス・ナノテクノロジー分野で新しい研究領域の創出と次世代の牽引役となる革新的かつ基盤となる研究開発を行ってきた。原子層の制御という半導体の研究分野から、原子スケールに焦点を当てた原子スケール・サイエンジニアリングというコンセプトを打ち立て、ナノスケールでの操作、物質計測、観察技術など各種の新技术を明らかにしてきた。こうした成果は、他の研究機関や大学のナノサイエンス研究の立ち上げに多大な影響を与えた。

このような歴史的背景から、理研はわが国の特徴あるナノ研究拠点の1つに上げられて



クリーンルーム内で展開されるナノ研究

いる。

理研の原子スケール・サイエンジニアリング研究が注目されるのは、今日の世界的なナノテク勃興を先取りしたものだからである。それはクリントン教書発表に先立つこと7年前のことで、ナノのもっと先をいく、原子スケールを標榜したことにある。

原子スケールを今風にナノと置き換えてみると、「ナノサイエンジニアリング研究」となり、これは今日よく言われる、ナノサイエンスとナノテクノロジーの融合の重要性を世界に先んじて理研が十分に認識していたことを示していた。

この原子スケール・サイエンジニアリング研究の仕掛け人が青野と青柳で、原子スケールでの機能発現を目指すことを主眼に置いた。1990年代の初めは、まだ原子スケールの物質の中に機能を付加するという研究は初歩的段階にあったが、他に先駆けてこの研究領域に踏み込み、ここに川合が加わり、原子スケールのメカニズムやマテリアル、プロセス研究を推進した。

これらの研究を展開するには広範な領域の研究者が必要で、原子スケール・サイエンジニアリング研究第1期のパンフレットの冒頭に「このようなナノ研究には“物理”、“化学”、“工学”の研究者の相互協力が重要である」と明記されている。これも今日よく言われている、ナノによるこれらの分野融合を先取りしたものである。

主任・研究室とフロンティア研究が融合

ナノサイエンスとナノテクノロジーは、高度な研究蓄積に立脚した総合科学技術分野である。しかも、ライフサイエンスや医療など極めて広範な分野に飛躍的な革新をもたらすと期待されているだけに、米、欧を中心に研究に拍車をかけている。

ナノテクノロジーの研究開発では、もともとわが国が世界をリードしており、さらに、世界に先駆けて新たな未踏領域を開拓するとともに、材料技術や製造技術などわが国のモノづくり技術を飛躍的に発展させるため、政府は産学官の英知を結集して戦略的かつ重点的に推進していくことを目標に、2000年（平成12年）9月、科学技術会議政策委員会の下に「ナノテクノロジーの戦略的推進に関する懇談会」が設けられた。この懇談会などの議論を通して具体的な戦略策定が行われ、2001年から政府によるナノテクノロジー研究が展開された。

それを受ける形で、理研は新たに2002年12月、ナノサイエンス・ナノテクノロジー研究を分野横断的に進めるための新体制を作ることを決めた。その具体策が後述するように

「ナノサイエンス研究プログラム推進本部」の設置であり、革新的なナノサイエンス研究を進める環境整備の一環として建設（2003年2月1日竣工）した「ナノサイエンス実験棟」である。

実験棟の建設は、2000年度補正予算でナノテクノロジー研究のための極微細構造実験棟の施設整備およびそのための土地購入が認められたことによるもので、予算規模38億円で、理研サイエンスタウンに隣接する土地1ヘクタールを購入（分割購入）して建設した。原子レベルの操作を行う場合、通常の生活では不都合と感じないようなノイズや振動さえも、実験データに影響を及ぼす可能性があり、実験棟はそうした外部環境要因に左右されない独特の構造を取り入れている。

研究を推進するに当たり、和光の主任研究員研究室が推進している「次世代ナノサイエンス・テクノロジー研究」の4グループに、フロンティア研究システムで展開中の「時空間機能材料研究グループ」（グループディレクター**国武豊喜**）、「単量子操作研究グループ」（グループディレクター**外村彰**）および「生体超分子システム研究グループ」（グループディレクター**鈴木明身**）の一部を融合させることにより、分野横断的な基礎研究と基盤技術の開発を長期的かつ体系的に取り組む体制を構築した。つまり、理研は所内に分散していたナノサイエンス・ナノテクノロジーの研究を中央研究所およびフロンティア研究システムを母体として「ナノ」の名のもとに統合した。

推進体制は、当時の**小林俊一**理事長の発案



第1回理研ナノサイエンス・シンポジウムで講演するローラー博士（2003年5月）



「理研におけるナノサイエンスの展開」でも講演（2002年5月、科学技術館）

で、**丸山瑛一**フロンティア研究システム長を委員長とするナノサイエンスプログラム準備委員会を設置して検討された。同委員会には、フロンティア研究システム側から丸山、局所時空間機能研究チームリーダーの**原正彦**、中央研究所側から川合と河野が委員（オブザーバーとして**井上頼直**理事が参加）となり、2002年（平成14年）1月から月1回、10月まで具体案を検討した。

また、1986年のノーベル物理学賞を受賞した**ハインリッヒ・ローラー**を研究顧問に招聘するなど内部固めを行い、井上を推進本部長

に2002年12月に「ナノサイエンス研究プログラム推進本部」を設置し、新設する実験棟で研究を流動的かつ効率的に推進する体制を整え、ナノサイエンスおよびナノテクノロジーの新たな可能性を追究する拠点とした。

2003年10月1日に「独立行政法人理化学研究所」に変わるとともに、推進本部の名称を「ナノサイエンス研究プログラム」と改め、準備委員会も推進委員会に変えて検討したドラフトを実行に移した。

「開発」と「利用」の2チーム体制

ナノサイエンス研究プログラムは、最先端ナノの研究開発およびそれを用いた技術支援を行う「研究技術開発・支援チーム」と、20のサブチーム「利用研究チーム」で構成されている。

「研究技術開発・支援チーム」は、文字どおり研究技術開発と支援という2つの側面を持っている。研究技術開発チームが追究するテーマとしては、「極微小電極の形成技術の開発」、「高アスペクトナノインプリント技術の開発」、「難加工性材料のナノ加工技術の開発」、「ナノ制御先端機能結晶成長技術の開発」、「超低温・ナノ融合技術の探求」の5つである。

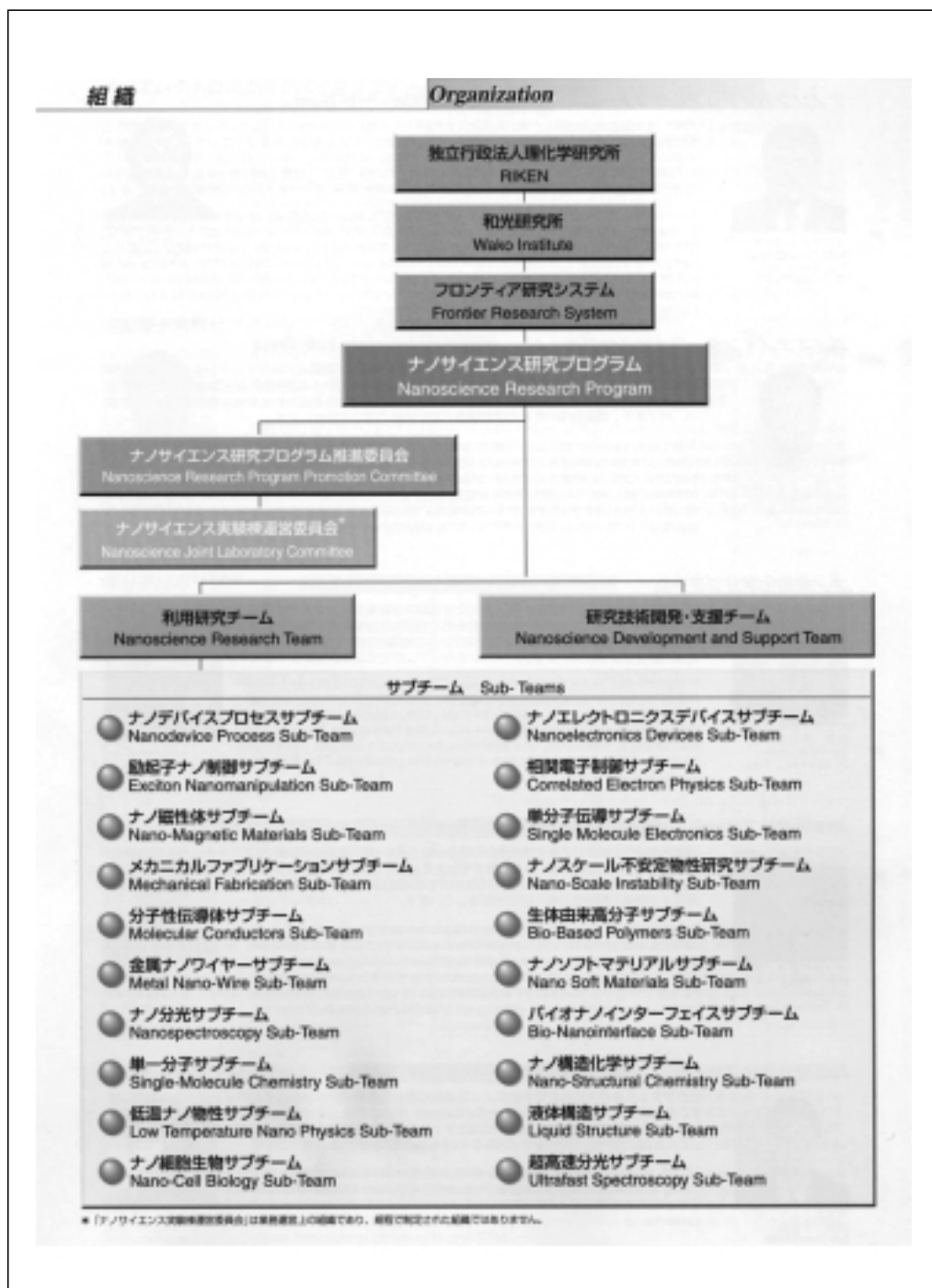
これらを成功させることにより、分子1つひとつの電気伝導計測が可能となり、将来のオプトエレクトロニクスに必要なナノインプリント非線形フォトニック結晶を実現できる。また、ナノデバイス応用などに極めて有用なGaN材料など難加工性材料のナノ加工技術が可能になるほか、超高移動度GaAs

系のヘテロ材料、高品質GaAlN系ヘテロ材料の開発が進み、極低温とナノ構造の融合の可能性を開くことにもなる。これらを通してナノテクノロジーを生かした実デバイスへの展開、ナノ材料、ナノ構造に対する原理探求という最先端研究を推進することが可能になる。この研究技術開発を担うスタッフとして基礎科学特別研究員や学生のほか、理研の研究員をそろえている。

同時に、既存の装置ではできないナノ加工やナノ計測が可能な新装置の開発も進めている。理研がかつてSTMの世界を多探針STMで開いたように、超高真空の走査型電子顕微鏡（SEM）なども視野に入れて、ナノ領域で優れた成果を発掘できるような新装置開発に乗り出すとともに、既存の装置のランニングやメンテナンスなどを行うテクニシャンも常駐させ、利用研究チームに対するサポート体制を充実させている。このテクニシャンがいれば支援を担う部隊で、先陣争いが激しいナノサイエンス・ナノテクノロジー分野をリードするために、開発と支援を相補的に行える仕組みを作っている。

ナノの主流研究領域をターゲットに

一方、利用研究チームは計算ナノサイエンス分野が追加され（2005年2月）、21のサブチームから成る。次ページの〈組織図〉に示すように、低温ナノ物性、ナノ分光、メカニカルファブ리케이션、ナノデバイスプロセス、バイオナノインターフェイス、ナノエレクトロニクスデバイス、ナノ磁性体といったように、極めて広範な領域のテーマが取り



ナノサイエンス研究プログラムの組織図

上げられた。これらのテーマは、ナノサイエンス研究プログラム推進委員会が理研内から応募された30近い候補の中から選んだもので、そのテーマごとにサブチームとして編成しているのが特徴である。

利用研究チームのリーダーは、ナノサイエンス研究プログラムのプログラムディレクターとして全体を管理、運営している丸山が兼務している。丸山は日立製作所基礎研究所長などを歴任した後、旧工業技術院の「アトムテクノロジー・プロジェクト」をまとめ上げた実績があり、理研が攻めるナノサイエンス・ナノテクノロジー研究の柱を21のテーマに集約した。

この21のサブチームには、ナノサイエンス研究プログラムとしての研究予算は付いていない。研究予算と運営は研究室単位で持つようにしているところが、理研の他のプロジェクトと大きく異なる点である。しかし、サブチームとして加わった研究室は、ナノサイエンス実験棟内に研究スペースを確保できるほか、通常の研究では利用できない装置やクリーンルームなどを使って先端的な研究を実施できる利点がある。しかも、通常研究以外にも、新しくチャレンジする研究を先の研究技術開発チームと連携し、共同で研究開発できるメリットも大きい。

すでに、「研究技術開発チーム」といくつかの「利用チーム」が共同研究を展開している。この連携は、開発チームと利用チームがそれぞれ最先端の研究をしながら、その成果を共有する仕組みで、「これは世界に例を見ないシステム」と青柳は強調する。ここに理

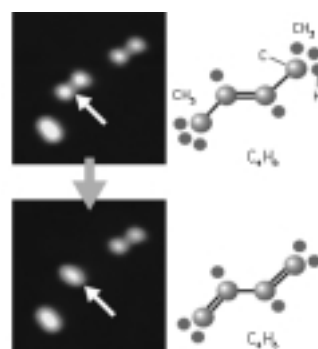


図2 単一分子の化学反応
 STMの探針を特定の位置に合わせ、電子を注入した（右上）。トランス-2,3-ブタジエンが1,3-ブタジエンに変化した（左下）。トランス-2,3-ブタジエンの2枚層のC-Cから1層ずつ水素が離れ、1,3-ブタジエンへと変化したと考えられる（右）。

STMの探針から電子を注入すると、分子の形が変化した

研のナノテク研究の最大の特徴がある。

利用研究チームは3年の時制限である。挑戦的な新しいテーマが出てくれば、審査の結果、サブチームとして採用されるようになっており、理研の研究システムの特徴である研究体制の流動性、柔軟性がここでも生かされている。

一方、次世代ナノサイエンス・テクノロジー研究推進グループの場合は、目的を明確にしたプロジェクト研究で、ここで走っている4つの研究チームのリーダー、河田、川合、河野、石橋（いずれも主任研究員）も、「利用チーム」のサブチームリーダーとして、理研のナノサイエンス研究の牽引役を果たしている。

単一分子を操る世界に挑戦

次世代ナノサイエンス・テクノロジー研究推進グループは、2002年度から5年計画で活動を開始した。川合グループリーダーは「物

質の性質や機能は、ナノスケールの分子の電子状態で決まる。そこで、分子をどのように設計して欲しい機能を引き出し、応用するか。この2つが本研究の最大の目標」と位置付けている。その手段となるのが、分子1個を操ることができる新しいSTMの開発とその使い方である。4つのチームがこうした具体的な目標を掲げて取り組んでいるところが、ナノサイエンス研究プログラムと違う点である。

まず、ナノ計測／制御基盤技術研究チームは、電気を通しにくい生体や有機材料に対して、光（フォトン）を使って計測・制御することを目指している。これが可能になれば、従来のSTMのような電子を使った技術に新たな手法が加わり、分子の設計などに大きく寄与する。

ナノケミカル機能基盤技術研究チームは、分子1個1個を計測・制御したり、巨大分子の必要な個所に新たな機能を加えたりする研究を推進している。ナノ極限物性基盤技術研究チームは、物質の性質を捉える研究にトライしている。ナノスケールの物質の性質を正確に測る場合、温度の揺らぎが少しでもあると大きな影響を受ける。そこで、絶対零度に近い極限状態のヘリウム表面などを使って、物質の性質を高精度に捉える研究を加速している。

さらに、ナノデバイス基盤技術研究チームは、半導体やカーボンナノチューブなどの材料を原子・分子レベルで加工し、デバイスを作り上げる技術を目指している。

第2節 ナノ領域を拓いた理研の主要な成果

原子層1層ずつを扱う

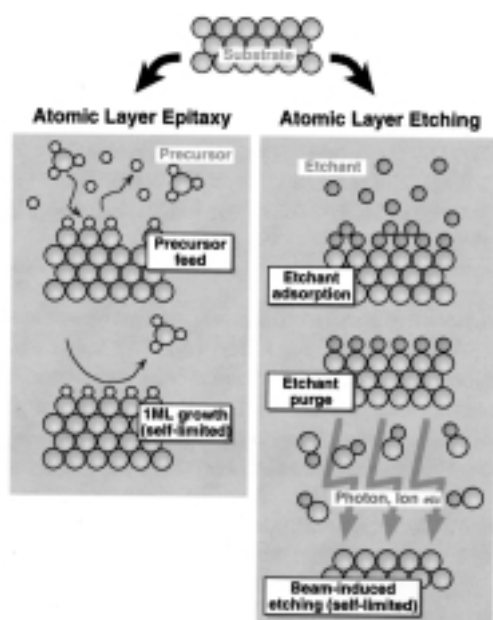
理研がこれまでのナノサイエンス・ナノテクノロジー研究で上げたいくつかの成果について触れておこう。

レーザー科学研究のレーザー分子加工グループ（青柳グループリーダー）では、選択的光表面反応を利用し、原子層を1層ずつ正確に制御して積み重ねるレーザー原子層制御エピタキシーの技術を開発し、またその逆過程として、原子層を1層ずつ剥がしていく原子層エッチング技術を開発した。ここで原子層を真に1層ずつ制御して付けたり剥いだりする原子層マニピュレーション技術〈図1〉

が可能になってきた。

これは結晶成長の専門家とレーザーの専門家がいろいろ議論する中で生まれたものである。GaとAsの原料を交互に供給しながらGaAsの結晶成長を行う際に、レーザーをGa供給時のみに当ててやることにより、表面原子がAsの場合だけGaの分解が促進され、Ga上では促進されないという原子種選択光化学反応が起こり、1原子層で結晶成長がきれいに自己停止することを見いだした。これは当時、大きな反響を得た。

表面界面工学研究室（青野主任研究員）では、1988年ごろ、「カイシス」を発明、これ



〈図1〉原子層マニピュレーションの概念図

を用いた表面原子の位置配列を詳細に調べることに成功していた。それと同時に、科学技術振興事業団（現独立行政法人科学技術振興機構）の創造科学技術推進事業「青野原子制御表面プロジェクト」（1989年～1994年）が発足した。

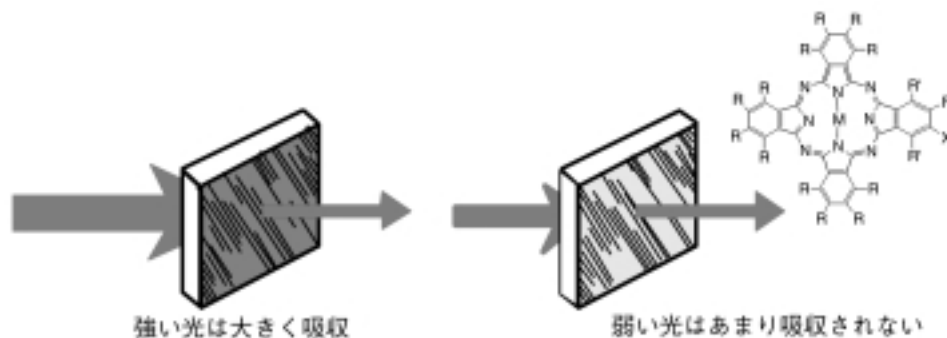
この研究により、STMを用いて、表面原子

の移動、制御等、特にシリコン原子を1個ずつ原子スケールの位置精度で表面から引き抜く、付与する、移動することが可能なことを実証し、原子レベルでの材料加工に先鞭を付けた。上述した「カシス」は、現在でも表面原子配列を決める有効な手段として装置が売り出されている。

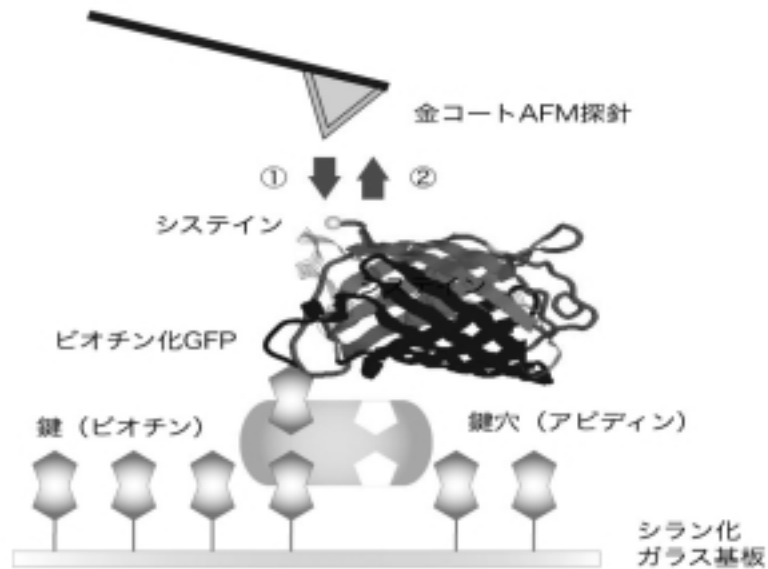
タンパク質の立体構造解明にも迫る

フロンティア・マテリアル研究グループにおいては、雀部チームリーダーの研究室が、〈図2〉に示すように、フタロシアニン誘導体の励起状態を分子設計により制御し、光の透過を材料レベルで自動的に自己調光する自己調光材料の開発に成功した。すなわち、分子設計により弱い光はよく透過し、強い光は吸収が大きくなる光の透過を自己調整する機能を材料に持たせることに成功している。

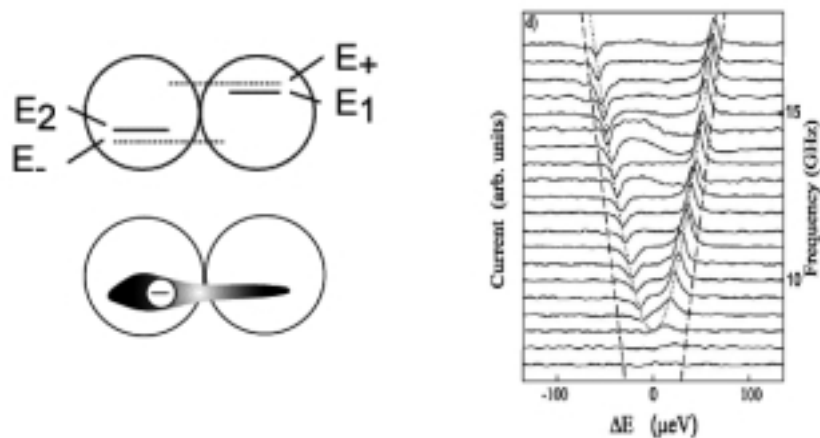
また、〈図3〉に示すように、原子間力顕微鏡（AFM）探針を用いて単一分子延伸操作（ナノフィッシング）にも成功している。これによって、タンパク質1分子を引き上げ、ほどこいていくことができ、タンパク質がどの



〈図2〉自己調光素子の概念図と、そのために分子設計されたフタロシアニン誘導体



〈図3〉 STMによるタンパク質のナノフィッシング



〈図4〉 人工分子の概念図。非結合準位と結合準位ができている

ような立体構造を作り、またどのように壊れていくかを明らかにした。

難波チームリーダーのグループでは、分子線エピタキシー (MBE) を用い、電子の量子化が起こる超格子よりは、はるかに大きい、光の干渉が起こるには狭い量子井戸構造を

GaAs/AIGaAs超格子で作製し、それを用いて励起子ポラリトンの量子化現象を初めて観測することに成功した。通常、この現象が見える波長領域では不純物由来の発光が重なっており、励起子ポラリトンの量子化が仮に起こっていても観測することが不可能であっ

Memo

■ナノ研究者の議論の場「桃源会」

ナノサイエンスの研究者が、俗世間のしがらみから解放された場所で議論し合う場がある。「桃源会」と名づけられたこの会は、1993年（平成5年）に原子スケール・サイエンジニアリング研究をスタートさせた翌年から始まった。年1回、1泊2日のスケジュールで開催し、10年を経た今日も継続中。現在は同研究を引き継いだ次世代ナノサイエンス・テクノロジー研究推進グループのメンバーが中心だが、2004年10月に静岡県伊東で開いた会には70名も集まった。

ナノサイエンスは、未知の世界の研究領域であるため、研究者同士のディスカッションが不可欠として始まった。参加者はチームに分かれ、専門外の人にもわかるようにプレゼンをし、徹底的に議論し合う。先輩後輩、専門の垣根を越え、対等に語り合える和やかなムードが新しい研究の芽を育み、共同研究に発展したケースもある。自費参

加ながら、理研以外の研究機関や大学の研究者も参加している。

「桃源郷」と言えば、俗世間を離れた平和なユートピアのイメージ。「桃源会」も研究のユートピアを目指して名づけられたのかというと、そうではなく、最初に開いた水上のホテルで宿泊した部屋の名が「桃源の間」だったそうだ。名づけはいたって平凡だが、懇親の場を越えた活動ぶりは非凡で、大いに盛り上がっている。



た。

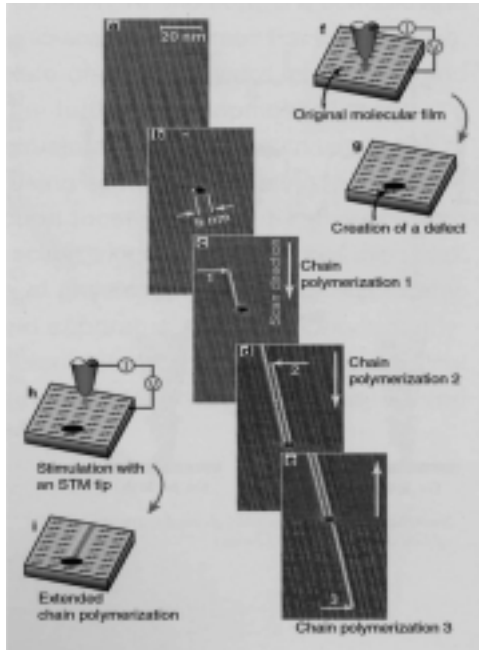
そこで、MBEを用いて半年以上高温でベーキング処理し、不純物を極力取り除いた超高純度の結晶成長を行い、さらに結晶成長条件を最適化することにより、極限的に高品質のGaAs結晶を作ること成功した。不純物由来の発光がまったく観測されない良質の結晶を作ることができたことによって、この実験は成功した。

また、菅野チームリーダーの時代には、〈図4〉に示すように、GaAs/AlGaAsを用いた結合量子ドットを作製し、明らかに結合軌道と非結合軌道を持つ人工分子の作製に成

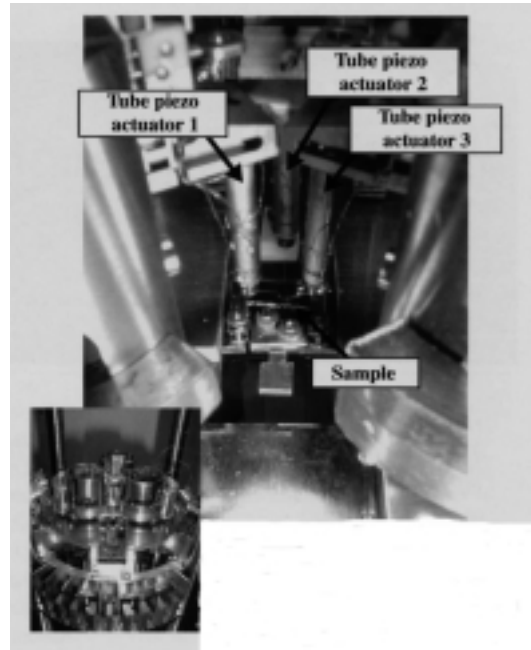
功した。これは、理研とNTT、デルフト大学との共同研究に基づくもので、この分野ではいろいろな専門家の共同研究が実っている。

常識を覆す量子ドットの形成法

原子スケール・サイエンジニアリングという言葉は、理研の造語であるが、これはナノサイエンス・テクノロジーの領域では、サイエンスとエンジニアリングはもはや分離できず、一体のものとなるとの考えから付けられたものである。この原子スケール・サイエンジニアリング研究の原子スケールプロセス研究チーム（第2期：原子スケール電子状



〈図5〉吸着分子のSTM刺激による分子細線の形成



〈図6〉多端子STM

態制御研究チーム)では、格子整合系でも量子ドットを形成する新たな方法を見いだした。

すなわち、通常、量子ドットの自然形成には結晶格子の歪みエネルギーを利用する、いわゆるStranovskii-Krastanov結晶成長モードが使われていた。また、結晶格子整合系では、量子ドットは形成されないと考えられていたが、本チームでは表面エネルギーに着目し、完全な格子整合系でもアンチサーファクタントを用いることにより、表面エネルギーを外部から制御することで量子ドットが形成されることを示した。この結果は今までの常識を覆すものであり、多くの他の系への応用が期待されている。

原子スケールメカニズム研究チーム(第2期:原子スケール電子運動応答研究チーム)

では、表面吸着分子が規則正しく並ぶことを見つけたが、それにSTMを用いて、ある場所にある刺激を与えてやると、ドミノ的に1次元的に高分子化が進行することを発見した(図5)ほか、電界をかけたSTMと基板の間に原子がやりとりされることも発見した。それは必ずしも基板とSTMの間である必要はなく、配線間においても同様のことが起こり、いわゆる原子スイッチができることを実証した。この研究は広い応用の可能性が出てきており、青野が移った独立行政法人物質・材料研究機構と民間企業との共同開発研究に発展している。

また本チームでは、(図6)に示すように、従来1端子であったSTMを多端子化することを初めて提唱し、その実現にも成功している。これによって、表面の原子配列の電気伝導な

どが直接測れるようになりつつある。

原子スケールマテリアル研究チーム（第2期：原子スケール分子状態認識研究チーム）では、パラジウム（Pd）（110）表面に吸着したベンゼン分子の電子軌道と、金属のd電子との配位結合に由来する吸着分子軌道の研究から、〈図7〉に示すように、ベンゼンのフロンティア軌道は6員環全体に非局在しているが（上図）、d電子との混成軌道を形成すると縮体が解け、分子を2分割するような軌道となる（下図）ことを実空間で明瞭に観察することに成功した。

また、STMから分子に電子を注入すると、分子は一瞬、負イオン状態になり、次の瞬間、基底状態に戻ると考えられるが、この間、分子に幾何学的な変位が加わり、その結果、振動状態が励起される。Pd（110）表面上に吸着したCO分子に電子を注入すると、この分子は吸着位置を飛び移っていくホッピング運動をすることを見いだした。これは電子の注入により励起された分子の伸縮振動モードの緩和過程に、より低いエネルギー状態である束縛並進モードを介しての緩和が関与している。

原子スケール・サイエンジニアリング研究における研究成果のいくつかを述べたが、2002年度に新たに発足した、「次世代ナノサイエンス・テクノロジー研究推進グループ」では、原子スケール・サイエンジニアリング研究で培った無機化合物の原子操作や、ナノ構造物の機能研究を進展させ、電子をプローブとした観察手法に加え、光をプローブとし



〈図7〉Pd(110)表面上のベンゼン分子のフロンティア軌道（上図）と、d電子との混合軌道（下図）のSTM像

たナノメートルサイズの機能開発を開始した。

ナノフォトニクスは1つの中心となる課題である。対象とする材料も無機材料から、よりソフトな炭素材料、生体材料へと発展させている。カーボンナノチューブなど、これらの材料をデバイスに結びつけるための研究も行っている。一例としてDNA鎖の電気伝導機構に関して、すでに興味深い新たな知見が得られている。

これらの歴史と成果を踏まえ、現在、理研ではナノサイエンス研究プログラムが21もの研究チームの参加を得て進行しており、近い将来、大きな成果が出てくることが期待される。