MANA NEWS LETTER

CONVERGENCE

No.25 | 2017 | February

国際ナノアーキテクトニクス研究拠点
International Center for Materials Nanoarchitectonics (MANA)

MANAの代表的な研究成果

原子スイッチ／ナノシート／MSS

青野正和 拠点長にきく

―MANA10年の節目に立って―

―MANA10周年の節目に立って―

PROFILE

現在MANA拠点長およびNIMSフェローである青野博士は、1972年に東京大学から博士号を取得し、研究員として当時の無機材料研究所（NIRIM）に入所、1978年から80年まで、米国ウィスコンシン大学マディソン校のシンクロトロン放射光センターにて、Visiting ProfessorとしてDean Eastman博士が率いるIBMのグループとともに研究に従事しました。1986年に主任研究員として理化学研究所に移り、表面・界面研究室を立ち上げました。1996年から2005年まで大阪大学教授を兼任し、2002年にナノマテリアル研究所長としてNIMSに転任、2007年に現在の職に任命されました。博士は、表面化学、ナノサイエンス、ナノエレクトロニクス、ナノスケール計測分野の先駆者として、「直衝突イオン散乱分光法」、「アトムクラフト」、「原子スイッチ」、「マルチプローブSPM」、「化学ハンダ」等のキーワードで代表される、多くの研究を行っています。

青野正和拠点長にきく

Dr. Masakazu Aono

── まず、WPI拠点としてのMANAをNIMSの中に発足させようと考えられた動機や狙いを教えていただけますか。

MANAが発足する数年前の2000年に、米国のクリントン大統領が『国家ナノテクノロジー・イニシアティブ』という教書を発表し、「米国はこれからナノテクノロジーの研究に力を注ぐのだ」と宣言しました。このニュースは世界中を駆け巡り、世界的なナノテクノロジーのフィーバーを起こしました。私は、それ以前からナノテクノロジーのパイオニアであることを自負していましたので（笑）、それを冷静に眺めていました。実際、私はすでに1989～1994年にJRDC（現在のJST）のERATO事業の「青野アトムクラフト・プロジェクト」を組織し、これは国の政府が関与した世界最初のナノテクノロジーに関する研究プロジェクトとされています。ですから、私はナノテクノロジーの世界的なフィーバーの意味を逆に誰よりもよく理解していました ── 日本はナノテクノロジーにおいて世界のトップに立たなければならないと。折しも、文部科学省が2007年から「世界トップレベル研究拠点プログラム」（WPI）を発足するというニュースが流れてきました。当時のNIMSの岸輝雄理事長と相談し合って、NIMSの中に世界トップレベルのナノテクノロジーの研究拠点を創ろうと、そのグランドデザインを描いてWPI事業に応募し、採択されました。

── MANAの骨格である「ナノアーキトクトニクス」という概念や研究方向は、どのようにして生まれたのですか。

当時、トランジスタなどを微細化して集積回路を作るマイクロテクノロジーがすでに非常に発展していました。それによって情報通信の世界に革新がもたらされたことはご存知の通りです。そのため、ナノテクノロジーはマイクロテクノロジーの延長、すなわちマイクロテクノロジーをさらに精緻化したものがナノテクノロジーであると捉えられていました。今でもそう考えている人が多いようです。それはまったくの誤解で、ナノテクノロジーはマイクロテクノロジーの単なる延長ではなく、質的に異なるものであること、そしてこの点をよく認識しておくことがナノテクノロジーの真の発展にとって重要であることを、私は強く感じていました。この事実を従来からあることばの組み合わせで表現することは可能ですが、私は何か新しい一語で表現したいと思い、「ナノアーキテクトニクス」(nanoarchitectonics) の語を用いることにしました。この語が包含する内容はいくつかありますが、最も重要な内容は、「不確実性を許容した信頼性」です。ナノテクノロジーが扱う10億分の1メートルの極微の世界では、熱的あるいは統計的な揺らぎが顕わになるために、設計図どおりに構造を構築できるとは限りません。その制限の中でも信頼のおける機能をもつ材料やシステムを構築するための科学と技術を創造しよう ── これがナノアーキテクトニクスの一つの重要な意味です。

── MANAからは多くの優れた研究成果が生み出されましたが、その中で特筆すべきものを挙げていただけますか。

沢山あるので迷いますが・・（笑）、いくつか挙げてみましょう。

私たちが発明し、MANAにおいて研究を続けてきた、日本発の独創的なナノエレクトロニクス・デバイス「原子スイッチ」が、NECとの共同研究を通して、NECからAtomSW-FPGAとして実用化されました。ロボットや人工衛星に有効に使われ始めました。※

また、「ナノシート」と呼ばれる単原子層レベルの厚さのさまざまな2次元物質を作製する技術と、それらを任意の意図した順序で積み上げる技術を開発し、それによって多様な人工新物質を創製しました。これによって、たとえば、10 nm 程度の厚さの領域で従来物質より20倍も大きい誘電率をもつ新物質を創製しました。※

この他にも、詳細は省略しますが、「固体表面の巨視的な超伝導電流」を初めて観測した、「高効率の光触媒」を開発した、「単分子レベルのメモリー」を実現した、などが挙げられます。

独創的な新しい測定方法も開発しました。「高感度の新しい臭いセンサー」※、「透過型電子顕微鏡の観察下での物性測定法」、「多探針走査プローブ顕微鏡によるナノスケールでの電気測定法」などです。

── WPI拠点のミッションとして、1）世界最高レベルの研究、2）融合研究領域の創出、3）国際的な研究環境、4）研究組織の改革、の4つが設定されています。これらについてはどのように取り組まれましたか?

実は、それらの4つは互いに密接に関係していることを徐々に認識しました。たとえば、世界最高レベルの研究のためには、国際的な研究環境を作って優れた研究者を内外から集め、融合研究を促進して新分野を開拓することが重要なのです。MANAでは、国際的な研究環境を実現するために、外国からの研究者にもフレンドリーな事務部門と技術支援部門を充実することに多大の努力をしてきました。公用語はもちろん英語です。また、融合研究を促進するために、ブレイン・ストーミングのための“グランドチャレンジ・ミーティング”を温泉地で開催して、翌朝まで夢を語り合う機会を何度か設けました。さらに、優れた融合研究の提案に資金的援助をする“グランドチャレンジ・ファンド”なども設けました。

※これらの研究成果については、本誌p. 8からの特集もあわせてご覧ください。

青野正和拠点長にきく
—MANA10周年の節目に立って—

このような努力の結果は、客観的な数値、たとえば論文の数（3,480報）、その平均インパクト・ファクター（2015年は6.25）、国際共著論文の割合（2015年は58%）、被引用数が世界トップ1%の論文の数（143報）、世界の各研究機関から発表される論文の質を評価するためのFWCI指標（2008～2015年は2.41）※※に、如実に現れていると思います。

── MANAの10年間は、日本の基礎研究のあり方についても指針を与えたと感じられます。

優れた基礎研究は必ず応用に結び付く、この方針でやってきました。しかし、「優れた基礎研究をしよう!」と叫ぶだけでは、モチベーションは上がりません。何か目標を設定することが必要だと思いました。そこで、MANAの中に3つのグランドチャレンジ研究テーマを設定しました。それらは、「ナノアーキテクトニクスによる人工脳の創製」、「室温超伝導の実現」、「実用的な人工光合成の実現」です。 3つのノーベル賞を獲ろうという計画です（笑）。これらの目標を設定したとき、「青野さん、大丈夫ですか、できなかったらどうするんですか」と心配してくれる人がいました。「始めからできることが分かっていたらチャレンジじゃないよ」と私は答えました。10年後の現在、どれもまだ完成していませんが、着実に近づいています。それ以上に、MANAの研究者に夢を与えていると思います。

── MANAは、WPI拠点の中でも最も国際的な拠点であると高く評価されています。

NIMSが2003年から5年間にわたって運営した「若手国際研究拠点（ICYS）」での経験が大変プラスになりました。とくに外国人研究者の世話を適切かつ親切に行う経験を積んだ事務職員が、うまくMANAに引き継がれました。英語に堪能であればよいというわけではなく、さまざまなケースを経験してノウハウを身に付けた事務職員が大切なのです。また、技術支援のスタッフを充実したことも成功の鍵でした。こうした事務部門や技術支援部門の充実が、研究組織の活動にとってきわめて重要であることを、私はMANAの運営を通して強く認識しました。

── MANAのサテライトラボの役割についてもお聞かせください。

WPIがスタートしたとき、サテライトラボを作ったのはMANAだけだったのです。当初は、海外のサテライトラボに資金を費やすのは無駄であるという批判がありました。しかし、私たちは、国際的に活動するためには、外国にサテライトラボを置いて協力し合うことも重要だと考えたのです。結果は成功でした。現在、6つのサテライトラボと実りのある共同研究が活発になされており、MANAの研究活動に一つの特徴を与えています。サテライトラボのPIも頻繁にMANAに滞在し、こちらの研究者を積極的に指導してくれていますが、彼らはそれを楽しんでおります。そういうことでサテライトは成功でした。

── これまでの10年間、MANAを育ててこられた青野拠点長として、これからのMANAに対するご希望は何ですか。

MANAおよび2007年に同時に発足した他の3つのWPI拠点へのWPI補助金は2016年度をもって終了しますが、これらのWPI拠点はいずれもWPI Academy という新組織の傘下に入りますので、WPI-MANAの名称は残り、NIMSにおいてもWPI-MANAはパーマネントな組織として存続します。NIMSの橋本理事長から、WPI-MANAへの積極的なご支援の心強いお約束をいただいています。MANAの拠点長は、現在の副拠点長である佐々木高義さんに交代します。事務部門長は中山知信さんです。佐々木拠点長と中山事務部門長の指導力によって、MANAが益々の発展を遂げることを祈っています。私および板東COOはエグゼクティブ・アドバイザーとして残りますので、佐々木拠点長と中山事務部門長を陰から支えたいと思います。

佐々木さんは、ナノアーキテクトニクスの概念をこれからも育てていきたいと言われていますので、MANAの方向性は余り変わらず、これからも挑戦的な道を歩んで行くことでしょう。

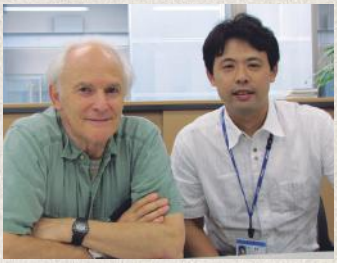
※※本誌p.7およびp.11の「Progress of MANA」コラムもあわせてご覧ください。

The Brief History of MANA

2007

・NIMSの「国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（MANA）」が文部科学省の世界トップレベル研究拠点プログラム（WPI）の拠点の1つとして採択される
・独立研究者制度の導入

MANA発足当時の青野正和拠点長



故 Harold W. Kroto博士と若手研究者

2009

・第2回MANA国際シンポジウム
・Harold W. Kroto博士来構
・広報誌「CONVERGENCE」発刊

2010

・第3回MANA国際シンポジウム
・MANAサイエンスカフェ "Melting Pot Club" 開催
・青野正和拠点長がファインマン賞受賞
・アウトリーチチーム設立
・IBM-NIMS/MANAジョイントシンポジウム "Characterization and manipulation at the atomic scale"開催

2013

・第6回 MANA国際シンポジウム
・国際シンポジウムMASA 2013 "Material Architectonics for Sustainable Action" 開催

2014

・第7回MANA国際シンポジウム
・TNT Japan (Trends in Nanotechnology) にて"MANA Day"を開催
・The MANA/ICYS リユニオンワークショップ
・国際シンポジウム MANA 2014 "Material Architectonics for Sustainable Action" 開催
・国際シンポジウムFON'14 "Functionality of Organized Nanostructures" 開催

FON'14

2015

・第4回グランドチャレンジミーティング 開催
・第8回MANA国際シンポジウム
・第5回グランドチャレンジミーティング

2008

・第1回MANAセミナー Heinrich Rohrer博士（1986年ノーベル物理学賞受賞）による "Nanotechnology, a Key to Sustainability" 開催
・第1回 MANA国際シンポジウム
・ICYS-MANAプログラムの開始
・短期招聘制度導入
・MANAサテライトラボ開設
　–カリフォルニア大学ロサンゼルス校 (UCLA)
　–ジョージア工科大学 (GIT)
　–フランス国立科学研究センター (CNRS)
　–ケンブリッジ大学
　–筑波大学
　–東京理科大学
　–北海道大学
・組織改編

MANA国際シンポジウムで講演を行う故Heinrich Rohrer博士

2011

・第1回グランドチャレンジミーティング
・第4回MANA国際シンポジウム
・Heinrich Rohrer博士による科学イベント"Prof. Rohrer's Science Class" 開催
・Harold W. Kroto博士による科学イベント "Prof. Kroto's Science Class 2011" 開催
・モントリオール大学にサテライトラボ開設
・第200回記念MANAセミナー
・オンラインニュース "Research Highlights" 配信開始
・学術雑誌『STAM』MANA特集号 発刊

2012

・学術雑誌『Advanced Materials』MANA特集号 発刊
・第5回MANA国際シンポジウム
・第2回グランドチャレンジミーティング 開催
・NanoGREEN/WPI-MANA棟竣工記念式典
・MANA設立5周年記念シンポジウム
・第3回グランドチャレンジミーティング 開催
・第2回WPI合同シンポジウム "Inspiring Insights into Pioneering Scientific Research" 開催
・MANA第2期スタート

WPI-MANA棟

G7大臣によるMANA視察

2016

・第6回グランドチャレンジミーティングを東京理科大学と共催
・第9回MANA国際シンポジウム
・ナノセオリー分野 新設
・先進7カ国 (G7) の科学技術大臣による視察

齋藤軍治 PO INTERVIEW

WPIプログラム委員会のプログラム・オフィサーとしてMANAの研究活動を評価・指導くださった齋藤軍治先生に、これまでの十年間を振り返っていただきました。

インタビュワー：科学ジャーナリスト 餌取章男

PROFILE

1972年北海道大学理学研究科化学専攻修了、岡崎国立共同研究機構、東京大学、仏レンヌ第一大学客員教授、京都大学低温物質科学研究センターセンター長、などを経て、2012年より名城大学農学部教授。仁科記念賞、紫綬褒章など受賞歴多数。

── MANAの活動を総体的に評価されるといかがでしょうか？

非常に素晴らしいです。全体として見た場合は、そのように言って差し支えありません。3つのグランドチャレンジ※という目標を掲げて、大変な進歩を遂げました。

── MANAはWPI拠点の中で唯一大学以外の拠点です。国の研究所であるがゆえのMANAの特色をどのようにとらえていらっしゃいますか？

WPI拠点を持つ大学は、法人全体のファカルティの人数が4500から7500位であるのに対し、MANAのホスト機関であるNIMSの定年制研究者は400人程度しかいません。年間の予算もNIMSは他の大学の1/5から1/9程度です。ですから、WPI年間予算の十数億円がNIMSにとっては大変な重みで、MANAの人たちは本当に真面目になってこれに対応しなくてはなりませんでした。

また大学には母体が大き過ぎて各部局の力が強過ぎるところがあります。しかしNIMSは規模が小さいので、反対意見を持つ人を説得するのにもさほどは時間がかからず、組織運営の能力が強かった。ただ、国立研究所の科学者は、短期間に優れた道筋を立てて求められる結果を出すことには長けているのですが、大胆で「クレージーな」研究に取り組むことには慣れていません。真にイノベーティブな発想に基づく研究を活性化することが課題でした。

── WPI拠点としてのミッション：1）世界最高レベルの研究水準、2）融合研究領域の創出、3）国際的な研究環境の実現、4）研究組織の改革については、MANAはいかがでしたか？

MANAの採択時に「優秀な人は多いのですが、それを凌駕するようなスーパーマンを育ててください」とお話ししたのです。そうしましたら、MANAは最初に外国人のものすごく優秀な研究者を集めました。次に、外国人の優れた若手研究者たちも。その結果、彼らの様子を見ながら日本人研究者たちが頑張って、今では、日本人研究者が、非常によい成果を出すまでに成長しました。こうして、MANAは国際的なナノテクノロジー研究のハブとして機能するようになったのです。

また、MANAの組織づくりの能力は大変優れていて、管理運営も、拠点長・COO・事務部門長から成る「トロイカシステム」のおかげで、色々な仕事を処理することができました。このことは、外国人に親切な研究環境づくりを含め、MANAの目的達成に有効に働きましたし、母体であるNIMSの組織改革にも大いにつながったと思います。

ノーベル賞級の先生方をアドバイザーに選んだのもよかったですね。それに太刀打ちしようとMANAを評価する評価委員会の側のレベルも上げまして、拠点の向上に向けて非常に活発な議論を交わすうちにMANAの評価も上がってきました。

融合研究領域の創出については色々なパターンがありますが、MANAでは青野さんの提唱する「ナノアーキテクトニクス」というコンセプトが根底にあり、そこから生まれる新たなパラダイムの中で、異分野融合が進んだと思います。2016年度にナノセオリー分野が新設されて理論家が加わりましたので、実験家と理論家（理論家に先導、船頭、扇動の働きを期待します）とが大いに喧嘩しながらいっそう切磋琢磨してほしいです。

── MANAは若手人材の育成にも力を入れました。

WPI各拠点の中でも、MANAの人材育成のよさは最高レベルです。WPI採択時に理事長だった岸先生はMANA発足前から若手国際人材育成に力を入れていました。MANAではさらに青野さんや板東さんらが、「上から目線」ではなくて、ボトムアップ型の研究プロジェクトを推進しました。前理事長の潮田先生を含めトップの人たちの柔らかな考え方、対応の仕方がとてもよかったと思います。目覚ましい成長を遂げた若手研究者が何人もいて、本当に感心しています。

── MANAは2017年4月から拠点長が青野から佐々木に交代します。佐々木新拠点長に何を期待されますか？

「ナノアーキテクトニクス」という言葉は本当に素晴らしいと思っているのですが、原子・分子を操作する装置の開発や、ライフサイエンス領域での独創的研究の追求など、このコンセプトを物質科学の視点で深めるには、まだまだやることが山積みです。新しいコンセプトは、新たな分野を創造するはずで、これからが面白いところでしょう。ですから佐々木さんには新しい分野を積極的に開拓し、「ナノアーキテクトニクス」をもっと発展させて行ってほしいです。

※3つのグランドチャレンジ：革新的な研究成果の実現に向けて、MANAが掲げた「ナノアーキテクトニクスによる脳型ネットワーク」「室温超伝導」「実用的人工光合成」を実現するという3つの目標。

MANA 10周年に寄せて

MANA研究者の皆様、10年にわたるWPI-MANAの活動ご苦労でした。個々の研究者の、ナノテク分野での高いレベルの結果とその融合の成果、本当に“おめでとう”です。この素晴らしい果実は、各研究者と支援事務員はもちろん、青野拠点長（CEO）の卓越したリーダーシップ、そして、板東運営責任者（COO）、藤田事務部長（CAO）そして小林事務主任の集団運営の結果と理解しています。

10年前の採用の評価委員会を思い出しています。すべて、英語での書面審査と面接。青野拠点長とともに四苦八苦したものです。しかし、青野拠点長が、ナノマテリアル、ナノシステム、ナノバイオ、そしてナノグリーンを前面に押し出し、一方、異分野、異文化、多国籍からなる‘メルティングポット’環境の構築を提案して、採決につながりました。

最後に、NIMS内の方々、国際アドバイザーの皆様、黒木先生、斉藤先生の励ましには特に謝意を表したいです。この活動の精神と研究システムが末永くNIMSに生き残ることを祈っています。

NIMS 元理事長
岸 輝雄

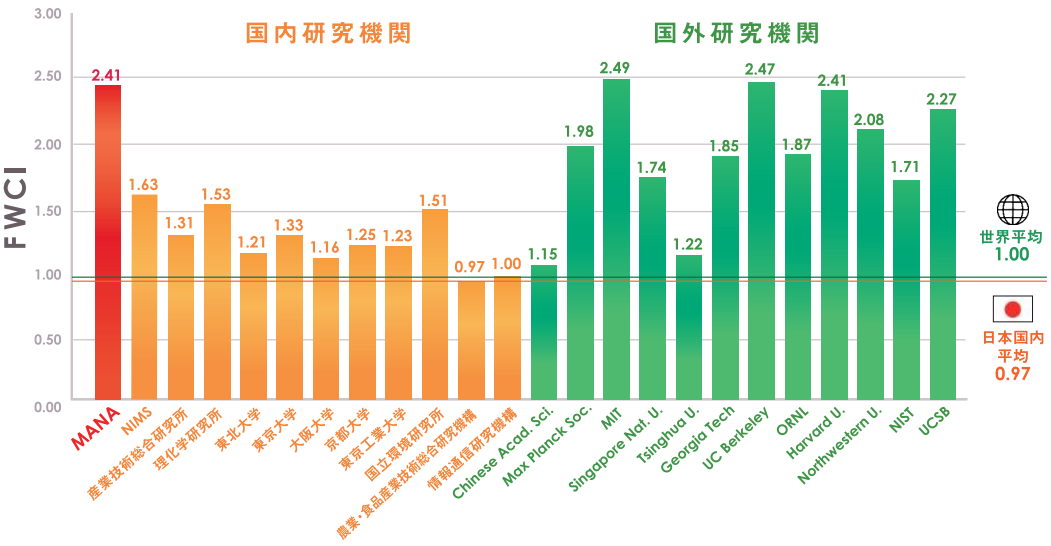
この10年のMANAを振り返ってみて私にとって最も印象的なことは、それが真に国際的な研究の場を作ることに成功してきたことです。その結果多数の海外からの研究者と日本人研究者が隔てなく交流し異なる思考プロセスと文化が互いに刺激しあって新たな高いレベルの成果を出せたことです。特にインフラ言語を英語に統一したことは恐らく国内では初めての英断だと思いますし、プロジェクトの成功の大きな要因と思います。今後も是非このような形態を継続し、世界のトップクラスの研究所としての永続的な評価が定まるよう祈ります。

スタンフォード大学工学部名誉教授、
MANA 評価委員
西 義雄

日本の画期的な施策であるWPIプログラムの一環として2007年にMANAが設立されたことをきっかけに、NIMSは従来の材料研究所から、MANAというナノサイエンスの一流センターを持つ材料研究機関へと成長しました。私はこのMANAの外部評価委員会の委員長に選ばれましたことを心より光栄に思っています。青野拠点長、板東COOらの優れたリーダーシップにより、とても円滑に議長としての任務を全うすることができました。ただ一つ悔やまれることは、文部科学省がMANAに対して2期目のプログラム更新をしなかったことです。しかし、MANAという財産は、並木地区にある拠点の建物を通してこれからも受け継がれ、NIMS全体に感謝されて行くことでしょう。

ケンブリッジ大学 教授、MANA 評価委員長
Anthony K. Cheetham

PROGRESS OF MANA



MANAと他機関のFWCI（2008-2015）

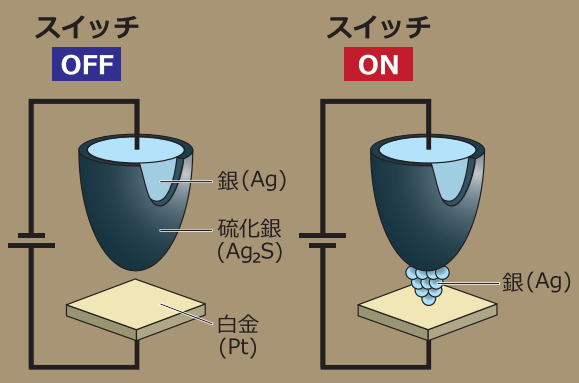
FWCI

FWCI（Field-Weighted Citation Impact）とは論文のインパクトを数値化するためにエルゼビア社が提案している指標で、1文献あたりの被引用数を、同じ出版年・同じ分野・同じ文献タイプの文献の世界平均で割ったものです。MANAのFWCIは2.42と非常に高く、世界の名だたる研究機関と肩を並べています。

MANAの代表的な研究成果

原子スイッチ

原子スイッチとは、電圧をかけた時に生じる酸化還元プロセスによって金属原子（イオン）が移動することで動作する極小のスイッチング素子です。ごく微量の消費電力で起動でき、原子数個が電極同士の隙間にあるかないかでオンオフを実現する特性を活かして、原子スイッチを利用した様々な次世代の高性能デバイスの開発が進められています。さらにMANAでは、この原子スイッチが、脳の神経活動の特徴である「必要な情報の記憶」と「不要な情報の忘却」を自律的に再現する“シナプス素子”として動作することも発見しました。



銀原子が硫化銀の先端から出てくるとスイッチがオンになるギャップ型原子スイッチの模式図

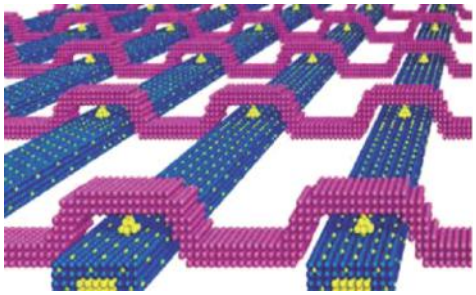
身の回りにあるスマートフォンやパソコンなどの電子機器には半導体内の電子移動を利用するエレクトロニクスデバイスが使われてきました。エレクトロニクスデバイスは半導体の微細化・集積化の技術開発によって目覚ましい発展を遂げましたが、現在はその進歩が鈍化しつつあり、次世代の高度情報化社会へと発展するために全く新たな原理で動作するデバイスの開発が求められています。MANAはこれまでの電子移動ではなく、原子（イオン）の移動を利用したイオニクスデバイスである「原子スイッチ」を世界に先駆けて発明し、その研究開発を進めてきました。

ポスドク研究員時代に原子スイッチの現象を発見した寺部一弥MANA主任研究者（PI）によると、実は原子スイッチは、その動作原理を机上で予測して発明に至ったものではありません。当初は、走査型トンネル顕微鏡の探針にイオン伝導物質を使用し、その針先端に高い電界を発生させることによって針先から金属原子を一個ずつ滴下して、原子が並んだ線を基板上に描画する実験を進めていました。その中で思いがけず、探針にかける電圧を制御すれば、探針の先端に数個の金属原子の突起を伸ばしたり縮めたりできることを見出したのです。このセレンディピティによって得られた基盤技術が原子スイッチの発明に繋がりました。

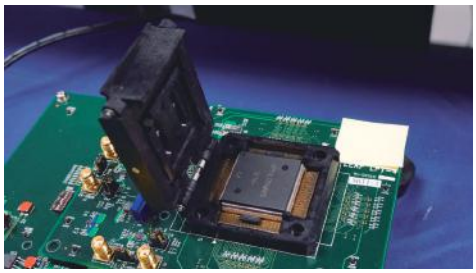
寺部一弥
主任研究者

今では原子スイッチは、電源を切っても情報記録が残る不揮発性メモリや、最も進んだ半導体集積回路の一つであるFPGA（Field Programmable Gate Array）、ニューロモルフィック回路などの高性能化に向けた素子の最有力候補と目されています。寺部PIは「使われてこそ材料」という理念の下、原子スイッチの価値を十分に発揮させるべく、実用化に向けて世界をリードする研究開発を進めています。材料の製品化には非常に高い信頼性と安定性が求められる中、共同研究先のNECの大変な努力のおかげで、チップサイズが従来の1/4・消費電力が従来の1/3でしかも低コストな、原子スイッチを利用した新しいFPGAが2011年に実現しました。ロボットの可動部の近くにおける電気ノイズや人工衛星における宇宙線による誤動作がほとんどなく、AIやIoTの発展において活躍することが期待されています。

また、電気信号の入力の頻度や大きさに応じて伝導経路が形成されたり消滅したりする原子スイッチの動作は、生物の脳内における神経細胞間の結合強度の変化とよく一致しています。このことは、ソフトウェアではなくハードウェアである素子自体が変化して判断を行うデバイスの実現可能性を示唆しており、MANAは原子スイッチを用いた「脳型コンピューティング」の研究開発にも取り組み始めています。



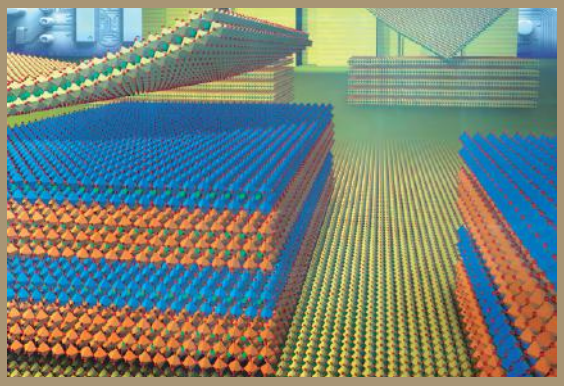
集積したギャップ型原子スイッチの模式図



原子スイッチを利用した新しいFPGA（出典：株式会社インプレス PC Watch）

ナノシート

分子レベルの厚み(約1nm)に対して横方向にはその数百倍以上のサイズ(μmレベル)をもつ、2次元ナノスケール物質を「ナノシート」とよびます。次世代の電子デバイスに適用可能な新しいナノ材料の開発が求められている中、MANAでは「機能の宝庫」である酸化物に注目し、誘電性や光触媒性、レドックス性など多様な機能を示す酸化物ナノシートの合成を達成しました。さらに、ナノシートを積み木細工のように配列、累積することで、誘電体極薄膜などの機能性材料を開発し、広範な応用展開を目指しています。



ボトムアップ方式での素子作製のイメージ図。様々な機能をもつナノシートを積み重ねて優れた性能を持つ素子が作製できる

2004年にグラフェンの剥離が報告されて以降、世界中で2次元ナノスケール物質（ナノシート）に関してホットな研究が展開されています。最近では、合言葉「beyond graphene」の下、カルコゲナイドや酸化物等の様々な2次元物質の探索も盛んです。

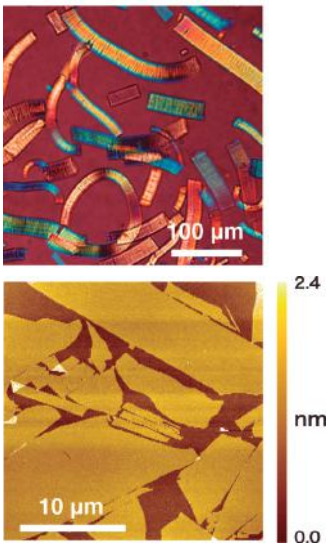
このブームの前、1990年代から「ナノシート」研究に取り組んできたのが、MANAの佐々木高義副拠点長。酸化チタンナノシートを手始めに、多くのナノシートの合成、その特性の解明、応用開発を進めてきており、ナノシート研究においてはMANAが世界トップ集団の一翼を担っています。その研究の基本方針は、”well-defined”な”true nano” の材料を取り扱うこと。ナノマテリアルは組成・構造・形状がしっかり制御されたサンプルを使わなければ、その先の研究にどんどん曖昧さが増してしまうため、原子・分子レベルで材料を正確に理解することが重要と考えています。

MANAが開発した酸化物ナノシートは、層状の化合物を化学反応により大きく水和膨潤させ、結晶構造の基本最小単位である層1枚にまでバラバラに剥離するというユニークな方法によって得られます。この方法を確立できたのも、膨潤した層状化合物がどのように剥離されていくのか、本当に単一層になっているのか、を明らかにしようとしたことが出発点でした。膨潤剥離プロセスを深く理解することで他の層状化合物への適用が可能となり、今では酸化チタンをはじめとする多くのナノシートの合成を達成しています。さらに、これら合成したナノシートを様々に配列・集積することにより、ナノ薄膜・ナノ複合体・ゲルなどの材料開発を進めています。

ナノシートは原子、分子レベルの薄さと究極の2次元性というそれまでの材料にない特徴を持っているため、その特性や構造を調べる途上では、コバルト酸化物の超伝導性など、予期せぬ機能や現象が見つかることもありました。様々な経験・専門を持つ人々がMANAに集まって色々な知恵を出し合うことで、新しい展開が多く生まれました。

「ナノシート」は一大ジャンルを成す基本材料で幅広い多様性を有しているだけに、電子デバイスから光触媒、機能性コーティングなど、広範な応用展開が期待できます。現在、MANAは様々な企業と共同研究を実施していますが、中でも酸化物ナノシートを用いた高性能の薄膜コンデンサについては大手電子デバイス企業と協力し、早期の実用化を狙っています。また、ナノシートを集積化する手法をさらに進化させて人工格子構築技術に匹敵するレベルの精細なナノ構造制御を実現し、機能性材料開発技術として完成させることも今後のチャレンジングな目標です。

ナノシートが分散したコロイド溶液

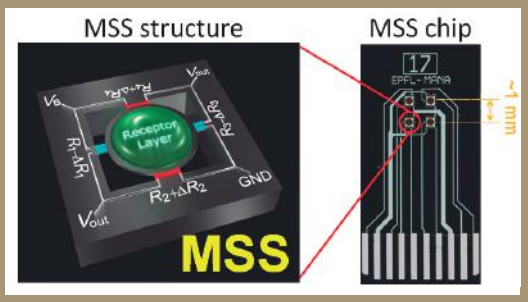


大きく水和膨潤した結晶（上）から得られる酸化チタンナノシート（下）

佐々木高義
副拠点長

MSS

MANAが国際共同研究で開発した「MSS（Membrane-type Surface stress Sensor、膜型表面応力センサ）」とは、構造力学・材料科学・結晶学・電気回路という四つの基礎科学を融合して開発された、全く新しい超高性能ナノメカニカルセンサ素子のことです。従来型ナノメカニカルセンサの100倍以上の感度を有し、かつ1 cm²あたり100個以上の素子を集積可能であり、超高感度化と超小型化を両立しています。ガス分子からDNA、タンパク質などの生体分子に至るまで幅広い物質を検出でき、人工嗅覚センサとしての応用も進められています。



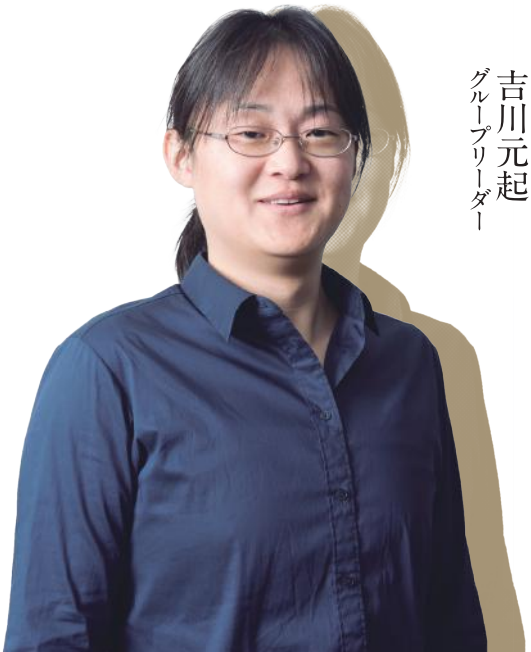
（左）MSSの模式図。中央の感応膜に検体分子が吸着する際に生じる表面応力を、周囲の4個のブリッジに埋め込まれたピエゾ抵抗によって効率よく電気的に検出する。（右）MSSチップの拡大写真

多様な分子を検出・同定する化学センサについては多くの研究報告がなされていますが、実際の製品に結実させるのは容易ではありません。ガス漏れセンサなど特定の分子検出に特化した従来型のセンサは改良が重ねられていますが、新しい原理に基づくセンサはほとんど実用化に至っていないのが現状です。これは、センサの感度・選択性・再現性・応答速度・サイズ・コストなど、上市に求められる条件を総合的に満たすセンサ素子の具体的な設計が困難であることも一つの要因となっています。またセンサ素子だけではなく、読み取り回路やサンプル流路の設計、データ解析法の確立やライブラリ化など、ハード・ソフト両面の周辺技術も併せて開発し、実際に利用可能なセンサシステムとして完成させなければ社会に普及させることはできません。

MANAの吉川元起グループリーダー（GL）は2007年にスイス・バーゼル大学に客員研究員として赴任した折からナノメカニカルセンサの研究に取り組みはじめ、故ハインリッヒ・ローラー博士およびスイス連邦工科大学ローザンヌ校との共同研究を経て、2011年に超高性能ナノメカニカルセンサMSSを発表しました。MSSの強みは、超高感度化と超小型化を両立し、かつセンサに求められる諸条件を総合的に満たしている点にあります。

吉川GLによると、特に嗅覚センサへの応用に関して、いくつものブレークスルーがあって今に至るとのこと。まず一つ目は、MSSの構造が「ひらめいた」ことです。上記の基礎科学に基づく国際共同研究を経て、最終的に吉川GLが、標的分子の吸着に伴う力の検出に最適なMSS構造を思いついたことが飛躍的な感度向上をもたらしました。二つ目は、感応膜に塗布する材料の幅が広がったこと。当初、感応膜材料は、ナノメカニカルセンサで報告例の多いポリマーを前提としていましたが、共同研究を続けているNIMS柴弘太研究員が無機系のナノ粒子を思い切ってセンサ表面に塗布してみたところ、高感度と高耐久性を両立する画期的な感応膜となる事が確認されました。これをきっかけに、MANA／NIMSが開発している様々な材料が感応膜として利用できることが確認され、多様な分析に対応できる感応膜材料の開発が一気に進展しました。

さらに、2015年9月に、NIMS・京セラ・大阪大学・NEC・住友精化・NanoWorldの6機関が共同で『MSSアライアンス』を発足させたことが三つ目のブレークスルーとなりました。このアライアンスはMSSを用いたニオイ分析センサシステムの実用化・普及を加速させ、業界標準化を目指すオールジャパンの産学官連携体制です。そして画竜点睛となる四つ目が、情報科学とセンサ技術の融合です。MSSアライアンスでの大阪大学・鷲尾隆教授やNECとの緊密な連携および今村岳ICYS-MANA研究員の活躍により、情報科学に基づく新たな解析法を適用することで革新的な嗅覚センサシステムを提案できる見込みであり、今後の展開に期待がかかります。



吉川元起
グループリーダー

いつでも・どこでも・だれでも様々なニオイを検知・識別できるようにして安心・安全・健康な社会の実現に貢献し、新たな価値観を創造するモバイル／IoT嗅覚センサとしての応用が期待されます。

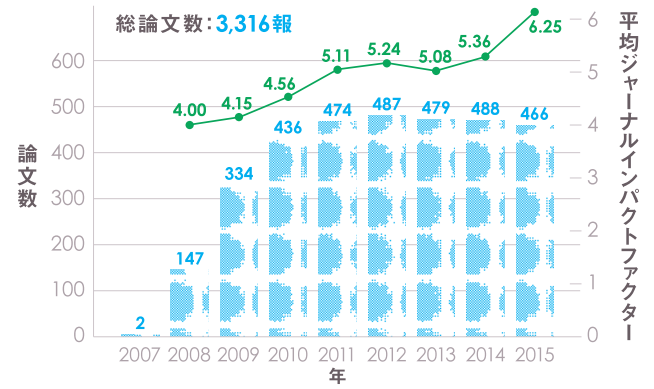
発表論文と国際協力

論文数

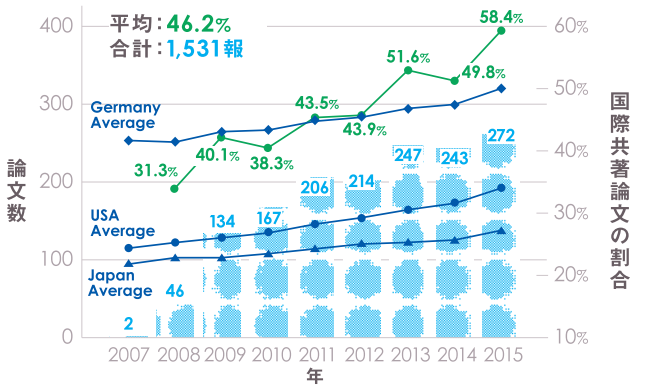
2015年、MANAに在籍する研究者が発表した論文数は466報でした。それらの論文が掲載された学術雑誌の平均インパクトファクター※は2015年において6.25であり、MANAの研究成果の質の高さが顕れています。

国際共著論文

MANAから発表される国際共著論文は年々増加傾向にあります。2013年以降、論文総数の半分以上が国際共著論文となっており、2015年における国際共著論文の割合は58.4%に達しました。



MANA論文（Oct 2007 – Dec 2015）



MANA国際共著論文（Oct 2007 – Dec 2015）

※インパクトファクター：掲載論文の引用頻度から学術雑誌の影響度を数値化した指標

Message from a Satellite PI

2000年に当時のビル・クリントン大統領は、ナノテクノロジーの開発を支援する国家ナノテクノロジー・イニシアティブ（US National Nanotechnology Initiative：NNI）を立ち上げたが、青野正和博士のリーダーシップの下、1989年に5年計画でスタートした戦略的創造研究推進事業（ERATO）の「青野アトムクラフト・プロジェクト」が、まさに最初の国家資金でのナノテクノロジーのプログラムだった。走査型トンネル顕微鏡の発明とフラーレンの発見は、80年代に科学の大きな変革をもたらした。ナノテクノロジーはEric Drexlerにより確率論的なものではなく決定論的なエンジニアリングの課題と捉えられていたが、それとは異なり、非決定論的な観点からナノスケールでの相互作用を利用することを青野は2000年までには考え始めていた。青野により学問上のパラダイムとしての「ナノアーキテクトニクス」という新たな言葉が提案されたが、これは熱統計的な揺らぎを用いてナノコンポーネントの組み合わせから新しい特性を持った機能的なシステムを組み立てることができるという考えから生まれたものである。

この後、「International Symposium on Nanoarchitectonics Using Suprainteractions」の第一回が2000年につくば市で、これに続いて第二回が2002年にUCLAで開かれた。今では「ナノアーキテクトニクス」を検索すると85,000件がヒットするが、2000年には全く何も見つからなかったものである。そして2007年8月30日、私はSir Mark Welland 氏とともに、WPIの選考会でNIMSの岸元理事長と青野博士の20分間のプレゼンテーションを支援するための3分間のスピーチをすべく、一日だけ来日した。ロスアンジェルス国際空港に帰着した時に、私のブラックベリーに青野からMANAがWPI拠点に選ばれ、その年の後半につくば市でオープニングセレモニーが行われることを知らせるメッセージが届いた。その時に、MANAは概念の段階から実際の組織へと進んだのである。ほぼ10年が経過した今日では、MANAは、2012年に建てられた専用の建物を含め、全ての基準において世界をリードするナノテクノロジー研究組織となった。

2016年までには、ナノスケールの相互作用から世界の天気パターンに至るまで、システムにおける複雑性とそれにより新たに現れる挙動の問題が、広く認識されようになった。今日ではムーアの法則が減速したことにより、それに代わるコンピューテーションの探索が展開され、オバマ前大統領の「ブレイン・イニシアティブ（Brain Initiative：2014）」で取り組まれている。複雑な環境リスクを扱うために、ニューロアーキテクトニクス（Neuroarchitectonic）のアプローチに国際的な関心が高まってきた。MANAとUCLAは、その応用の1つとして、大脳新皮質にヒントを得た原子スイッチネットワークを立証している。

クリントン大統領は2000年にカリフォルニア工科大学で、NNIについて**「この研究目標のいくつかは達成するのに20年あるいはそれ以上かかるかもしれないが、それは連邦政府が担う重要性をまさに示している」**と言った。

MANAがその目標達成を達成し隆盛をきわめるためには、少なくともあと10年が必要で、これからも成功の道をたどり続けなければならない。MANAの誕生からこの10年間、その存在がいつも私にとって喜ばしいものであったことを誇りに思っている。

ジェームズ K. ジムゼウスキー
James K. Gimzewski
MANA サテライトディレクター/主任研究者
UCLA 化学部門
ディスティングイッシュトプロフェッサー

次期拠点長にきく

インタビュワー：科学ジャーナリスト 餌取 章男

佐々木 高義

Takayoshi Sasaki

PROFILE

1980年東京大学大学院理学系研究科修士課程修了、無機材質研究所（NIMSの前身）に入所、現在に至る。1985年、理学博士（東京大学）。1986-1987年カリフォルニア大学バークレー校訪問研究員。2003年より筑波大学大学院数理物質科学研究科物質・材料工学専攻教授を兼任。2007年よりMANA主任研究者、2009年フェロー、2016年MANA副拠点長。2017年4月より拠点長に就任予定。

── 2017年4月のMANA新拠点長就任に向けた抱負をお聞かせください。

この10年間でのMANAの目覚ましい成長は、青野拠点長をはじめ、色々な立場からMANAに関わった多くの皆さんの努力の賜物ですが、WPI予算の終了する時期にこれを引き継ぐということは、大変な重責であるというのが実感です。名実ともにナノテク分野の世界トップ拠点になったMANAを維持発展させていくというのが最重要課題です。

ナノアーキテクトニクスによる研究はまだまだ道半ばで、かつ成果が出始めているところです。今後も世界中から研究者や新しいアイデア・材料が集まり、また次の材料科学を牽引するような革新的な材料を生み出していける場所にしたいです。

── MANAの研究組織が変革されるとのことですね。

研究グループの数自体はあまり変わりませんが、従来の5分野がナノマテリアル・ナノシステム・ナノセオリーの3分野に集約されます。この狙いは、NIMSの中でもミッションオリエンテッドと言うよりは、自由な発想でボトムアップ型の基礎研究を担う拠点という位置づけをより明確にすることです。1を100にする研究ももちろん大切ですが、MANAではゼロから1を生み出すという意識をもってやっていきます。

── 今後MANAが重点的に取り組む研究テーマはどのようなものでしょうか？

あくまで例ですが、ナノアーキテクトニクスとライフサイエンスの融合領域の研究は、まだまだ発展の余地があります。また、ナノシートだけではなく、表面伝導とか界面とか、広く2次元系物質もコアになっていくのではと思います。

物質科学の世界では、生体の機能や触媒の機能など、複雑な機能を人間が再現してコントロールするのはまだまだ難しいので、ナノアーキテクトニクスをベースにしてその辺りに挑戦していきたいです。

── 今後はMANAの国際性をどのように発展させていこうとお考えですか？

従来の海外サテライトラボを、MANAだけではなくNIMS全体との協力組織として位置づけ、NIMSの支援を受けながら継続発展させていく予定です。また、NIMSでは「マテリアルズグローバルセンター（MGC）」を新たに立ち上げて優秀な若手研究者の活動の場とする予定ですが、これにMANAも参画し、若手人材育成に積極的に取り組んでゆきます。今後ともMANAへの応援をお願いします。

MANA NEWS LETTER

CONVERGENCE

No.25 2017年 2月発行

発　行　国際ナノアーキテクトニクス研究拠点（MANA）
アウトリーチチーム
〒305-0044　茨城県つくば市並木 1-1
国立研究開発法人物質・材料研究機構内
電　話　029-860-4710（代）
ＦＡＸ　029-860-4706
Eメール　mana-pr@ml.nims.go.jp
ウェブ　http://www.nims.go.jp/mana/jp

CONVERGENCE：
世界の優秀な研究者をMANAのメルティングポット研究環境に集結・収斂させ、新材料の創製・イノベーションに向けて、ナノアーキテクトニクスのキーテクノロジーを統合（CONVERGENCE）していくというMANA全体を表すキーワードです。

表紙・・・青野正和MANA拠点長

©掲載記事・図版の無断引用・掲載はご遠慮ください。

CONTENTS

2　青野正和拠点長にきく　―MANA10年の節目に立って―
5　The Brief History of MANA
6　齋藤軍治PO　Interview
7　MANA10周年に寄せて
Progress of MANA：FWCI
8　MANAの代表的な研究成果：原子スイッチ／ナノシート／MSS
11　Progress of MANA：発表論文と国際協力
Message from a Satellite PI / James K. Gimzewski
12　次期拠点長にきく　佐々木 高義