

NATIONAL
INSTITUTE FOR
MATERIALS
SCIENCE

NIMS NOW

No. 1

2012 January-February

NANO-SYSTEM ナノシステム

ナノテクノロジーを超える新しい視点、
ナノアーキテククスでデバイスをつくる

新年あいなせう



あけましておめでとうございます。

昨年、2011年は東日本大震災のあった年として、後世の記憶に残る年となりました。被災した方々には、改めてお見舞いを申し上げます。

この震災を例に挙げるまでもなく、日本、そして世界では、自然界でも経済界でも劇的な変化が起こり、研究機関に求められるミッションも刻々と変わってきています。そうした中、NIMSは第三期中期計画をスタートさせ、プロジェクトや研究組織の再編をはじめ、様々な取り組みをはじめました。

一例を挙げますと、TIA-nano(つくばイノベーションアリーナ)を筑波大学、産業技術総合研究所とともに構築しました。こうしたフレームワークは今まで国内ではあまりみられなかった新しいものです。産学官が結集するオープンイノベーションの場として、日本でのロールモデルになると確信しています。

国際ナノアーキテクニクス研究拠点、MANAも今年で6年目を迎えます。今期から、MANAをNIMSにおけるひとつの研究部門に位置づけました。MANAの研究活動がNIMS全体により意味でインテグレートされてきていると感じます。

世界におけるNIMSのブランドは非常に向上しており、海外研究者の受け入れにとどまらず、研究機関との連携もますます多くなりました。昨年度は中国・天津大学との連携センターの



新設やNIMS-サンゴバン先端材料研究センターの設置などをはじめ、数多くのMOUを締結した年でもありました。

国内においては震災後、安全・安心対策が新たに求められています。

これは構造材料の問題として重要課題のひとつとなりました。また国内外の研究機関支援の観点から、施設共用の強化も課題です。

さらに、元素戦略、環境・エネルギー問題は日本だけにとどまらず、世界的に喫緊な課題であり、より成果を上げることが求められています。

このような国際社会からの要請、国のミッションにスピーディに対応するためには、なにより研究者をはじめとする人材がいちばん重要と考えます。NIMSには優秀な研究者が大勢います。この人材の持てる力を最大限に引き出し、日本、そして国際社会の要望に応じていく所存です。

本年も、NIMSをよろしく願っています。

独立行政法人 物質・材料研究機構 理事長
潮田資勝

ナノシステム

Nano-system by Nanoarchitectonics

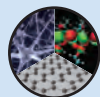
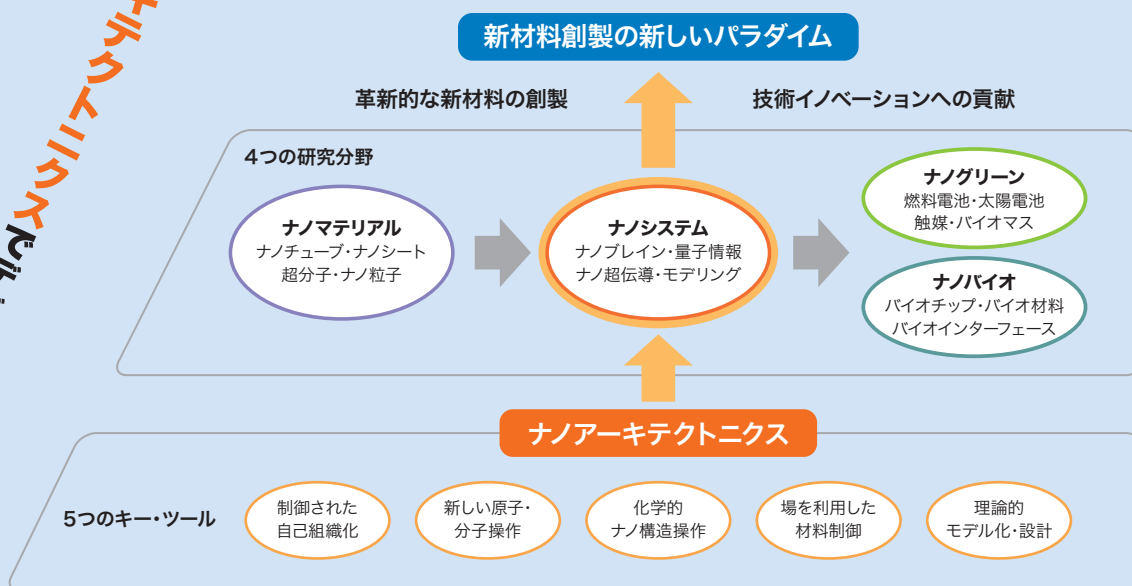


ナノアーキテククスによる新しいナノシステム

たとえばシリコン、たとえばカーボン。どちらも、ナノサイズの世界ではまったく新しい機能をもつ物質になります。量子ドット、ナノチューブやグラフェン、ほかにも例はいくらでもあります。

物質はナノサイズで新機能を発現することが、これまでのナノテクノロジーによって明らかにされました。そのような新機能を発現するナノサイズの物質を互いに連携させ、それらの相互作用を利用し、より革新的な新機能を生み出そうとする新しい技術体系が、私たちの「ナノアーキテククス」です。

MANAのナノシステム分野では、ナノアーキテククスを用いて次世代のエレクトロニクスデバイスを作成します。原子スイッチ、原子トランジスター、グラフェンデバイス、単原子層デバイス、超伝導ナノデバイス、分子デバイス、脳型コンピューターに向けてのシナプス機能をもつデバイスなどなど。私たちの夢は大きく広がっています。



ナノ構造を組織化し、新しい機能をひきだす

MANA ナノシステム分野コーディネーター
ナノシステム構築ユニット
ナノシステム構築グループ
MANA 拠点長
青野正和

MANA ナノシステム分野
ナノシステム構築ユニット
ナノシステム構築グループ
大川祐司

MANA ナノシステム分野
ナノシステム構築ユニット
ナノシステム構築グループ
櫻井 亮

MANA ナノシステム分野
ナノシステム構築ユニット
ナノシステム計算科学グループ
グループリーダー
館山佳尚

MANA ナノシステム分野
ナノシステム構築ユニット
ナノシステム光学グループ
グループリーダー
長尾忠昭

特異で有用な性質を示すさまざまなナノ構造は、それらを組織化してナノシステムを構築することにより、さらに興味深く革新的な機能を全体として発現することが期待されます。そのようなナノシステムを実現し、かつ利用するために、どのようなナノ構造を用いるべきか、それをどう組み合わせるか、それはどのような革新的機能を発現するか、の3つの側面において研究をすすめています。

ナノシステムの光応用技術： プラズモニクス

光は、金属材料のナノ形状を制御することで、原子レベルの狭い空間にも閉じ込めることができ、その性質を柔軟に変化させることができます。私たちは、ナノレベルの光学現象を解明し、新しい材料機能の創発につなげるべく研究をすすめています。そして、そのための材料・アーキテクチャ創製技術と評価手法の開発をし、赤外光・太陽光のスペクトル資源・エネルギー利用につながる革新的なナノ材料やデバイスを作り出すことを目指しています。例えば、金属ナノ構造の

構造制御により共鳴周波数のチューニングや電場増強を設計し、これを利用した微量のタンパク質の検出、さらには、光による化学反応の促進や高効率なエネルギー変換材料やデバイス開発をすすめています。

ナノシステムの機能探索と評価技術： 光検出STM

ユニークなナノワイヤ、ナノ構造をつくりだし、その新しい機能を探索しながらそれらを組み合わせ、各部分が有機的に連携して新しい機能を生み出すメカニズムを研究しています。このようなナノシステムの局所的な応答特性を評価する方法として、光検出走査型トンネル顕微鏡を用いています。この装置では、局所的な光学・電子特性やスピン偏極度が検出できます。

また、トンネル電子の非弾性散乱によって生成された光が、ナノ連携システムで構成されたナノアンテナによって伝播・増幅する過程を調べるとともに、新しい光操作手法を探索しています。このような知見に基づき、光や磁気に関わる新しい機能を持つナノ材

料やナノデバイスの開発をすすめています。

ナノシステム用インターコネクト： 単一高分子鎖による単分子配線

シリコンテクノロジーが微細化の限界を迎えつつある今、その限界を大きく超えると期待される、単分子デバイスの実現を目指しています。私たちは特に、単分子配線による分子ナノシステムの構築という観点から、その開発に取り組んでいます。

最近、化学的ハンダづけと名付けた新しい単分子配線技術を開発しました。それは、有用な機能を持った単分子を狙って単一の導電性高分子鎖を連鎖重合反応によって成長させて配線する方法です。連鎖重合反応が進行する先端は、化学的に極めて活性な状態にあるので、それが狙った単分子に出会うと、自発的に共有結合が形成されるのです。また、第一原理計算を用いて接合部のミクロな性質の研究をおこなっています。これは、単分子デバイス回路の実現に向けて、鍵となる技術となるでしょう。

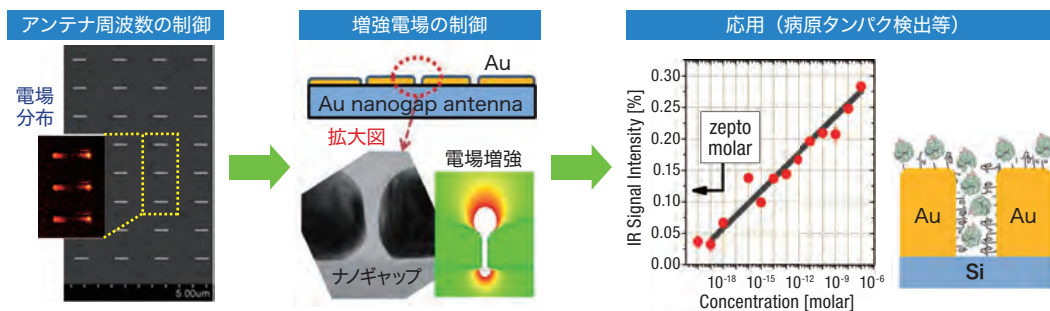


図1 金属ナノアンテナによる光制御と応用例

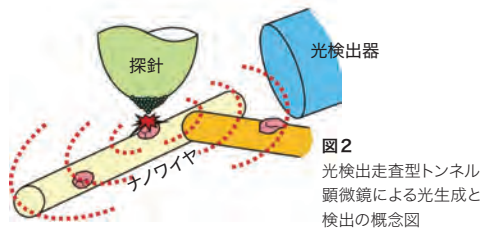


図2 光検出走査型トンネル顕微鏡による光生成と検出の概念図

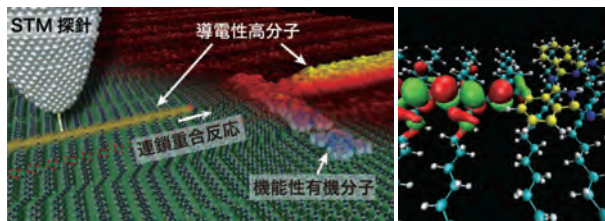


図3 化学的ハンダづけ(左)。第一原理計算による接合部の電子最高占有準位(右)

あおの まさかず P.10を参照。／ おおかわ ゆうじ 博士(理学)。1992年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。2008年から現職。／ さくらい まこと 博士(理学)。1989年慶應義塾大学理工学研究所修士課程修了。2008年から現職。／ たてやま よしたか 博士(理学)。1998年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。2011年より現職。／ ながお ただあき 1994年早稲田大学大学院理工学研究所博士後期課程中退。1995年博士(理学、早稲田大学)。2011年から現職。

4探針原子間力顕微鏡と膜型表面応力センサーの開発 新機能ナノシステムの創成に向けて

MANA ナノシステム分野
ナノ機能集積ユニット
ユニット長
中山知信

MANA ナノシステム分野
ナノ機能集積ユニット
ナノ機能集積グループ
久保 理

MANA ナノシステム分野
ナノ機能集積ユニット
ナノ機能集積グループ
新ヶ谷 義隆

MANA 独立研究者
吉川元起

MANA ナノシステム分野コーディネーター
MANA 拠点長
青野正和

ナノシステムの要素機能や 全体機能を検証するナノ計測ツール

興味深い物性や機能をもつナノ材料やナノ構造を組み合わせて構築するナノシステムを情報処理回路に利用すれば、さらに興味深い機能の実現が期待できます。その端的な例が、人間の脳のように情報処理プロセスを学習していく脳型情報処理システムです。このようなナノシステムの構築に向けて、私たちはナノシステムの要素機能や全体機能を検証するための各種ナノ計測ツールを開発しています。

開発したナノ計測ツールのひとつに、4本の探針を原子・分子の位置分解能でナノ材料やナノシステム上に配置して、その物性や機能を直接計測する4探針走査プローブ顕微鏡があります。この顕微鏡は、まず各々の探針がそれぞれ独立に、ナノシステムを高い空間分解能で観察します。続いて、各探針をひとつのナノシステム上の異なる位置へ接触させ、それらの探針を信号の入出力プローブとして用います。こうすることでナノシステムの機能を計測しているのです。

原子レベルの空間分解能を持つ 4探針原子間力顕微鏡を開発

私たちは、この顕微鏡の各探針を、走査トンネル顕微鏡 (STM) 探針として駆動するタイプの装置からさらに発展させ、原子間力顕微鏡 (AFM) としても動作する4探針原子間力顕微鏡 (Quadruple-probe AFM: QPAFM) を開発しました。その空間分解能は原子レベルに到達しています。

QPAFMが稼働したことで、ナノシステムが導電性の材料だけから構築されている必要はなくなりました。また、QPAFM計測で重要となる「探針間の距離を自動的に計測する機能」も実現しました。

これらの開発によって、ナノシステムで利用できる材料は、金属や半導体のみならず、絶縁体や有機分子、さらに生体材料までひろがりました。

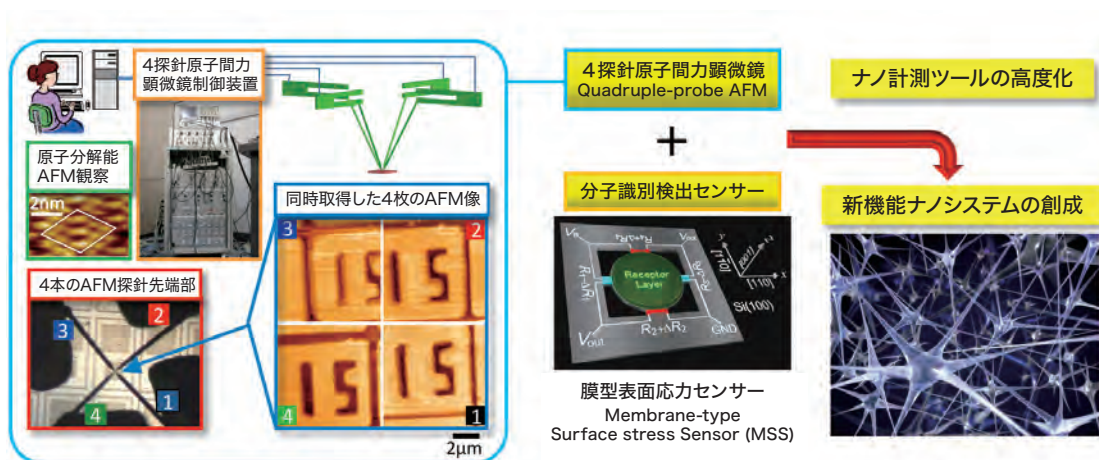
分子信号の入出力を高感度に識別・ 検出する膜型表面応力センサー

ナノシステムの機能は電気的な信号処理だけではありません。原子や分子の移動、分子の形態などを信号として利用するナノシステムは、複雑な情報を並列処理するために自然が創り上げた脳の信号処理機能に類似

した機能を発現しうるでしょう。そのようなナノシステムを駆動し検証するためには、分子信号の入出力を高感度に識別・検出するナノ計測センサーの開発も必要不可欠です。

最近注目を集めている膜型表面応力センサー (Membrane-type Surface stress Sensor (MSS)) はその代表的なものです。この新しいセンサーは、予め想定した分子だけが吸着する薄膜をセンサー部に被覆し、目的の分子が吸着することによって誘起される極僅かな歪みを、超高感度で検出する構造を提案・実証したものです。このセンサーは半導体加工技術を駆使してアレイ化することにより、多種多様な成分を精密に判別するセンサーシステムへと高度化することが可能であり、測定対象は液体・気体を問わないため、医療、食品、環境、セキュリティなどの様々な分野での応用が期待されます。一例ですが、肉の種類や産地を“嗅ぎ分ける”能力を持つセンサーとして機能することが確認されています。

私たちは、これらのナノ計測ツールの高度化と複合化を推進して、ナノアーキテククス研究と密接に連携することで、新しいナノシステムの創成に貢献します。



なかやま ともふ 博士(理学)。MANAナノシステム分野主任研究者、筑波大学連携大学院准教授。走査プローブ顕微鏡技術を活用するナノシステム研究に従事。／くぼ おさむ 博士(工学)。MANAナノシステム分野、ナノ機能集積ユニットMANA研究者。マルチプローブSPMを用いたナノシステム研究に従事。／しんがや よしたか 博士(理学)。MANAナノシステム分野、ナノ機能集積ユニットMANA研究者。マルチプローブSPMの開発と分子センシング研究に従事。／よしかわ げんき 博士(理学)。MANA独立研究者、膜型表面応力センサーの開発と応用研究に従事。／あおの まさかず P.10を参照。

たった数個の原子が動くだけで動作するデバイスをつくる

MANA ナノシステム分野
原子エレクトロニクスユニット
ユニット長
長谷川 剛

MANA ナノシステム分野
原子エレクトロニクスユニット
原子エレクトロニクスグループ
鶴岡 徹

MANA ナノシステム分野
原子エレクトロニクスユニット
ナノイオンデバイスグループ グループリーダー
寺部一弥

MANA ナノシステム分野コーディネーター
MANA 拠点長
青野正和

新しい概念で動作するデバイス開発

物質や材料の特性は、原子やイオンの並び方、混ざり方ひとつで大きく変化します。原子エレクトロニクスユニットでは、わずかに数個の原子やイオンが移動したり、反応したりするだけで、物質や材料の特性が大きく変化することを利用した新しいデバイスの研究・開発をおこなっています。

従来に無い電子情報デバイスやエネルギーデバイスを創成するためには、その基礎となる原子やイオンの移動、それらの物理・化学反応メカニズムの詳細を明らかにする必要があります。これらの実現には、基礎研究と応用開発のより一層の相互連携が不可欠です。私たちは、他機関との共同研究も含めて、これを積極的に推進していきます。

超省エネの実現を目指して

20世紀最大の発明とも言える半導体トランジスタによって、今日の高度情報化社会が実現されてきました。しかし、その高集積化が極限まで進んだ結果、発熱など消費電力に起因する問題が大きくなりつつあります。これは、半導体トランジスタが状態の保持に電圧を印加し続ける必要がある「揮発性」素子であるためですが、オンオフの状態切り替えのときだけ電圧を印加すればよい「不揮

発性」のトランジスタが開発できれば、この問題を解決できます。さらには電源投入と同時に使用可能になる「起動時間ゼロ」のパソコンなども開発可能になります。

私たちは、わずかな金属原子を絶縁体中で移動させることでオンオフ動作する不揮発性素子「アトムトランジスタ」の開発に成功しました(図1)¹⁾。絶縁体でオフ状態を、金属でオン状態を実現することで、半導体トランジスタを超える高いオンオフ比(8桁)と低消費電力動作を達成しました。今後、実用化を目指して、信頼性や安定性に関する研究をすすめていく予定です。

新しいコンピュータの開発

人間の脳は、記憶と忘却を繰り返すことで重要な情報を経験として蓄積し、その後の判断に利用しています。実は、忘れることこそが今のコンピュータには真似のできない人間の脳の特徴のひとつなのです。例えば、「頻繁に学習するほど早く覚える」という脳の特徴(図2)は、シナプスという神経細胞によって実現されています。私たちは、カリフォルニア大学のジムゼウスキー教授らと共同で、このシナプスと全く同じ動作をする脳型素子の開発に最近成功しました²⁾。

開発した脳型素子は、学習頻度に応じて

いずれは忘却する短期記憶と一生忘れない長期記憶の両方をたったひとつの素子で実現します。この動作は、金属イオンを内包する固体電解質と呼ばれる材料を用いて、その表面上で、わずかに10個ほどの金属原子の出し入れを制御することで実現されています(図3)。今後、脳型素子の集積化など、脳型コンピュータ開発を目指した研究をすすめていく予定です。

参考文献

1. Hasegawa et al., APEX 4, (2011) 015204.
2. Ohno et al., Nature Mater. 10, (2011) 591.

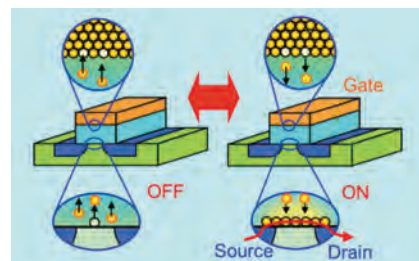


図1 アトムトランジスタの動作模式図

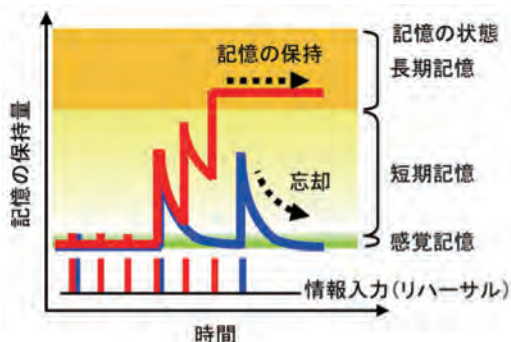


図2 繰り返し学習による記憶モデル

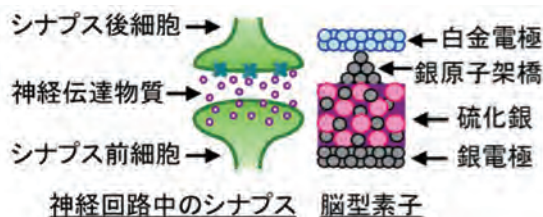


図3 神経回路中におけるシナプスと開発した脳型素子

はせがわ つよし 博士(理学)。1987年東京工業大学大学院修士課程修了。日立製作所中央研究所(1987-1999)、理化学研究所(1999-2002)勤務を経て、2002年よりNIMS。/
つるおか とおる 博士(工学)。1995年東北大学大学院博士課程修了。東北大学電気通信研究所助手(1995-2004)を経て、2004年よりNIMS。/
てらべ かずや 博士(工学)。1992年名古屋工業大学大学院博士課程修了。名古屋大学助手、理化学研究所基礎科学特別研究員等を経て、2000年よりNIMS。/
あおの まさかず P.10を参照。

原子膜エレクトロニクスへの試み

MANA ナノシステム分野
パイ電子エレクトロニクスユニット ユニット長
塚越一仁

MANA ナノシステム分野
パイ電子エレクトロニクスユニット
パイ電子エレクトロニクスグループ
宮崎久生

ICYS-MANA
黎 松林

グラフェンはエレクトロニクス材料になるのか？

“グラフェンはエレクトロニクス材料に成り得るの？”との質問を、大変頻繁に頂きます。グラフェン特有のディラック電子系に起因して、伝導特性が多材料を大きく凌駕し、次世代半導体素子のチャネル材料、IC内の配線材料、透明電極材料などとしての応用可能性が期待されています。ですので、答えとしては「YES」です。ノーベル賞対象となった物質であることもグラフェンへの注目度を嵩上げし、広く注目される要因となりました。原理的には擦り付けた鉛筆筆跡にもグラフェンが含まれているとの紹介に触発され、ありふれた身近な材料に未発見材料が隠れていた驚きも、より注目度を高める一因です。

しかしその一方、グラフェンの持つ基本特性の正確な材料情報が強く求められています。この基礎知見無くして、応用への絞り込みはできません。

グラフェンの特性を解明していく

グラフェンは、そもそもバルクグラファイトを構成する炭素6員環でできた原子シートです。当初、バルクグラファイトを基板上に押し付けて引きはがすと単層シートが作れ、量子ホール効果さえ観測され、さらに移動

度 $200,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ が計測され、次世代素子材料としての期待が急騰しました。膜厚が原子レベルであるために電界を印加すると、電界は簡単に透過し内部まで電子状態を変化させることができ、電子密度が変わりますが、元来グラフェンはバンドギャップが無く、金属的材料です。

私たちは、独自開発した世界で最も効率的に電界印加を可能とする「ゲート絶縁膜自己形成法」を用いて、2層グラフェンに垂直電界を印加し、素子の温度特性から、電界誘起半導体の伝導特性を見出すことに成功しました(筑波大学 神田晶申准教授との共同研究)。

さらに、半導体的特性を阻害する要因も見出し、原子膜内欠陥や原子膜周辺の不純物によって伝導系が散乱されていることが判明しました。電界誘起半導体においては、グラフェンロジック素子の試作と動作検証をおこない、2個のグラフェントランジスタを連ねたアンパイポラ素子を用いて、基礎的なロジック動作であるインバータ特性を示すことにも成功しました。

また、評価技術を用いることで、SiC上に形成されるグラフェン(九州大学 田中悟教授との共同研究)やCVDにて形成されるグラフェン(産業技術総合研究所 横山直樹研

究グループとの共同研究)の散乱機構を見出し、基板上的原子レベルの格子ステップ上のグラフェンが受ける散乱やグラフェン粒界での散乱を精密に評価することができるようになり、グラフェン作製技術へのフィードバックをおこないながら、特性制御を見出すことを目指しております。これらの知見は、グラフェンのIC配線展開へも広がります。

世界中でグラフェンの特性把握と制御研究がすすむ

現在、世界各国にて数十億円単位の巨大プロジェクトが企画され、関連研究が強力に推進されています。たとえばアメリカでは、数百GHz級超高速応答素子、韓国ではタッチパネルを中心とした透明電極、シンガポールでは化学/バイオ関連、英国では基礎特性解明などがすすめられています。しかし、これらも基本は材料の特性把握と制御です。

私たちは要所を狙った重点研究をすすめ、さらに他の原子膜を含めた研究への発展も目指して、原子膜伝導特性の制御に取り組んでいます。また、グラフェンの本当のおもしろさ=原子膜であるが故の“バルクと異なる原子膜特有の特性”を引き出せるよう試みています。

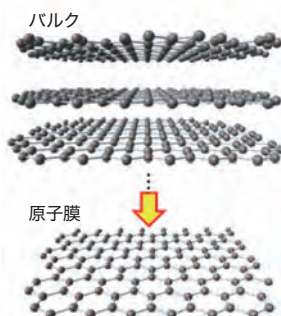


図1 バルクグラファイトの構成ユニット“グラフェン”の模式図

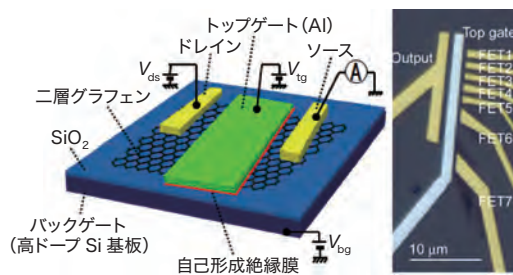


図2 試作した2層グラフェンの模式図とロジック素子光学顕微鏡写真

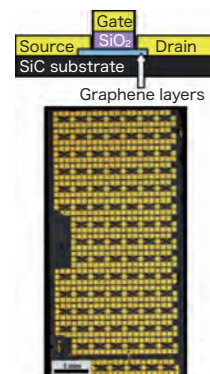


図3 SiC上グラフェンに作製した素子アレイ

つかごし かずひと 博士(理学)。1995年大阪大学大学院修了。2009年NIMS(MANA主任研究者)入所。パイ電子系デバイスの研究に従事。/ みやざき ひさお 博士(理学)。2005年筑波大学大学院修了。ポスドク研究員として、微細加工を駆使してナノ材料を用いた電子素子の開発と評価を推進中。/ りそんぐりん PhD。中国科学院物理研究所修了。2011年よりMANA ICYS研究員。グラフェンやカルコゲナイト系原子膜の基礎伝導解明を推進中。

超伝導と電子の量子絡み合い

MANA ナノシステム分野
ナノ物性理論ユニット
王 志

MANA ナノシステム分野
ナノ物性理論ユニット ユニット長
古月 暁

解析手法と高精度シミュレーションで理論を構築、新機能探索に寄与する

私たちは、主にナノスケールで繰り広げられる新奇な量子現象の理論研究をおこなっています。特に電子の電荷・スピン・軌道が強く相関した系の磁性現象や超伝導現象に焦点を当てています。

そうした磁性・超伝導現象を、高度な理論解析手法と大規模で高精度なシミュレーションを駆使して、実験結果の説明や理論予言、物質設計とデバイス提案をおこない、新機能探索に役立てようとしています。

超伝導と電子対の量子絡み合い

最近の研究成果の一つとして、超伝導を利用した電子対の非局所的量子絡み合い^{注1)}に関する理論を提案しました。

量子絡み合いは、量子力学の根幹に係る特異な現象で、量子テレポーション^{注2)}に使われ、量子情報の操作や量子計算^{注3)}にも不可欠です。図1にスピン重項状態になっている二つの電子が示されています。これは典型的な量子絡み合い状態で、その集合体は超伝導となっています。

今回、私たちが考案した量子絡み合いをつくりだす「ナノ超伝導デバイス」(図2)は以下の通りです。

超伝導体から電子対を取り出して二つの電子を別々の場所に運ぶため、数十ナノメートルの超伝導体先端に二つの経路を付けます。それぞれの経路に量子ドットという罫を設けることで、電子間に働くクーロン斥力を利用し、電子対が同じ経路を辿るのを妨げるようにします。

二つの電子が相手との量子絡み合い状態を保持しながら、異なる経路を通過して終点の超伝導体で再結合すれば、超伝導ジョセフソン電流に寄与しますが、途中で量子絡み合いを失えば、抵抗を伴う正常電流になってしまいます。

二つの異なる経路を辿った電子対からの超伝導電流への寄与と、一つの経路を通過したものの寄与を区別するため、二つの経路が囲む区域に通る磁束の変化に伴う最大超伝導電流の振動を調べます。図3のように、両者の比率が1:1の場合の振動周期は、0:1の場合の振動周期の2倍になりますので、二つの寄与の比率が定量的に測れます。

さらに二つの量子ドットに掛かっている電

圧を調整して、それぞれに1個の電子をトラップすることができます。超伝導ジョセフソン電流を利用してこの二つの電子の量子絡み合いを制御することができることも判明しました。

今後の展望

現在使われている計算機の計算能力を遙かに凌ぐ量子計算機を実現するためには、量子コヒーレンスを保ちながら、多数の量子ビットを操作しなければいけません。現在、私たちのグループでは有望な量子計算の実装方法及びその土台になっている量子スピン系やエキゾチック超伝導状態を研究しています。

注1)量子絡み合い:二つの部分系からなる複合系が、それぞれの部分系の純粋な量子波動関数の直積で表わせない場合のことを量子絡み合い状態という。二つの部分系が空間的に離れて直接的な相互作用がなくても、一つの部分系の測定結果が分かれば、もう一つの部分系の波動関数が瞬時に収縮する。この非局所的な相関が量子絡み合いの本質である。

注2)量子テレポーション:量子絡み合いとごく簡単な古典情報の通信を用いて離れた場所に古典情報と比べて膨大な情報を持つ量子状態を転送すること。

注3)量子計算:従来の計算機は1ビットにつき、0か1の何れかの値しか持ち得ないのに対して、量子計算では、1ビットにつき0と1の値を任意の割合で重ね合わせて保持することが可能である(量子ビットという)。このため、量子計算は古典計算機では実現し得ない超並列処理が実現する。



図1 電子対のスピン重項状態

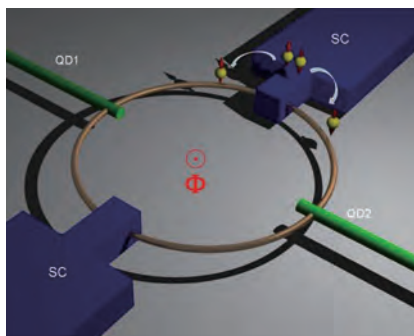


図2 超伝導体と量子ドットを含む量子デバイスの模式図

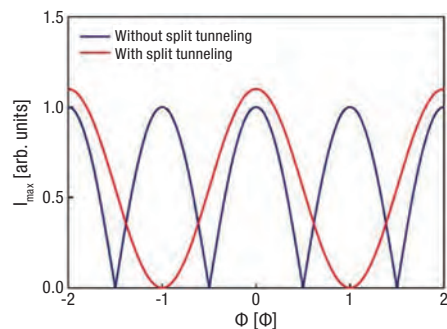


図3 異なる経路から来る二つの電子と同じ経路を辿る二つの電子の超伝導電流への寄与の比率(青は0:1、赤は1:1)によって、最大超伝導電流の磁束に伴う振動周期が変化する様子

わんち 博士(理学)。2010年NIMS入所。MANAリサーチアソシエイト。専門は超伝導現象の理論研究、最近では超伝導が作り出すエキゾチックなマジョラナ状態とその応用の研究に没頭。／ふるつきぎょう 博士(理学)。1994年NIMS入所。MANA主任研究者、ナノ物性理論ユニット長、筑波大連携大学院教授。専門は物性理論、スピントロニクス物質と超伝導現象の研究に取り組む。

ナノ超伝導デバイス

MANA サテライト主任研究者
東京理科大学
高柳英明

私たちは、メソスコピック超伝導(メソスコピックあるいはナノスケールな超伝導素子の物理)^{注1)}を研究しています。以下に、その3つの例をあげます。

超伝導LED¹⁾

通常のp-n接合発光ダイオード(LED)では、活性層において電子とホール(再結合)による発光が occurs ますが、電子を注入する電極を超伝導体にしてみると、発光はどうなるでしょうか。図1は私たちの作製した超伝導発光LEDの模式図で、図2はその発光特性です。超伝導電極であるNb(ニオブ)の転移温度 T_c 以下で、急激な発光の増加が観測されました。

これは次のように解釈されます。 T_c 以上ではNbは単なる金属で、電子を注入するのですが、 T_c 以下になると、超伝導近接効果によって、クーパー対^{注2)}を注入するようになります。この注入されたクーパー対が、p-InP基板のバックゲートから注入されたホールとInGaAs(インジウムガリウムヒ素)活性層で、再結合して発光したと考えられるのです。発光強度の増大は、クーパー対のコヒーレンス性^{注3)}のせいです。私たちは理論的にこのことを確認しました²⁾。

また、 T_c 以下で2つのNb超伝導電極間に超伝導電流が流れることや、さらにその大

きさは、バックゲート電圧によって変わること(観測し、近接効果によって、クーパー対が十分に活性層にまで届いていることも確認しました)。

この発光光子は、将来量子絡み合い状態となった双子の光子対として使われる可能性があります。また、この研究の副産物として、アンドレーエフ反射^{注4)}された電子やホールが、フォノンの雲を着る、アンドレーエフ・ポーラロン^{注5)}も発見しました³⁾。

InAs量子ドットで結合したSQUID⁴⁾

光系量子ビットと超伝導量子ビット間の量子インターフェースとして、InAs(インジウムヒ素)量子ドットで結合したSQUID(超伝導磁束量子干渉計)の研究をおこなっています。構造は、通常のトンネル接合の代わりに、超伝導体 - InAs 量子ドット - 超伝導体接合を用いています。私たちはこの接合に超伝導電流を流すことに成功し、SQUID動作も確認できました。

この素子には、量子ドット近傍とバックゲートを設けてあります。近傍のゲートは超伝導体とドットの結合度を制御する働きがあり、バックゲートは、ドット中の電子数を制御する働きがあります。ドット中の電子数が奇数個の時、クーパー対のトンネリングが π ずれた現象が起こります。これは超伝導

電流の流れが逆転する興味深い現象です。この両方のゲートをうまく使うことによって、私たちは位相が π ずれた接合の動作に成功しました。

グラフェンSQUID

カーボンの2次元ネットワーク構造であるグラフェンは、その特異なバンド構造から、近年注目をあつめています。私たちはこのグラフェンを用いたSQUID動作にも成功しました。超伝導体 - グラフェン - 超伝導体接合に超伝導電流を流すには、超伝導体とグラフェンのコンタクト抵抗^{注6)}がキープポイントとなります。このコンタクト抵抗の制御に成功することにより、超伝導電流を得ることができました。

参考文献

1. H. Sasakura et al., Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 157403.
2. Y. Asano et al., Phys. Rev. Lett., 103 (2009) 187001
3. R. Inoue et al., Phys. Rev. Lett., 106 (2011) 157002.
4. S. Kim et al., Appl. Phys. Lett., 98 (2011) 063106.

注1: メソスコピック超伝導: マイクロメートル単位の大きさの超伝導物質。ナノ単位やバルクなどとは異なる性質を持つ。

注2: クーパー対: 超伝導状態を引き起こす“2つの電子がお互いに束縛しあっている状態”。

注3: コヒーレンス: 可干渉性。

注4: アンドレーエフ反射: 超伝導体と金属の結合界面における電子の反射。

注5: アンドレーエフ・ポーラロン: アンドレーエフ反射によって生じるポーラロン(励起子)

注6: コンタクト抵抗: 異種界面における接触抵抗のこと。 Ω 型抵抗と非 Ω 型がある。

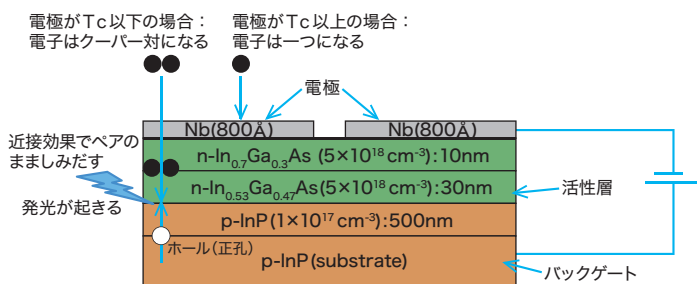


図1 模式的断面図

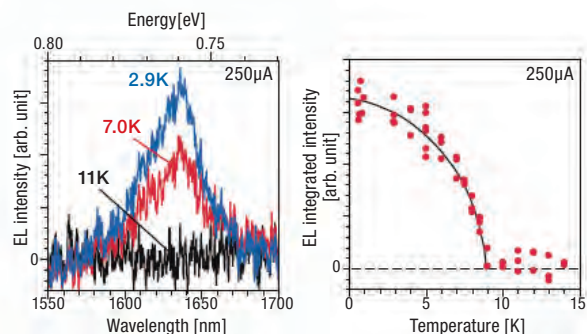


図2 発光特性

たかやなぎ ひであき 博士(理学)。1977年東京大学理学系研究科修士課程を修了後、NTT電気通信研究所に入社。2006年NTT物性科学基礎研究所長を経て、東京理科大学教授となる。現在、同大学理事。2007年MANA・サテライトPIを兼務。現在に至る。

Interview

ナノアーキテクトニクスによって、ナノシステムを創る。 実現したい3つの夢に向けて。

MAMA ナノシステム分野 MANA コーディネーター
MANA 拠点長
青野正和

5年目を迎えたMANA (国際ナノアーキテクトニクス研究拠点)。

青野正和氏はその拠点長としてMANAの全体を牽引するとともに、ナノシステム分野のコーディネーターとして、研究にも情熱を燃やしています。ナノアーキテクトニクスとは何か、その目指すところなどについてお聞きしました。

—— MANAのナノシステム分野のコーディネーターでいらっしゃいますが、ナノテクノロジーというものをどうとらえていらっしゃいますか。

青野: 私は、この四半世紀に目覚ましい発展を遂げたナノサイエンスとナノテクノロジーの開拓に携わってきました。そこでは、物質を小さくしていくとき、マイクロメートルまでは特に変化はないのですが、ナノメートルに近づくと、多様な新しい性質が現れるということが明らかにされました。シリコンが光りだす、半導体が「量子ドット」として特異な性質を示す、炭素がカーボンナノチューブになると電気抵抗が極端に下がる、また最近では、ありふれた黒鉛の炭素の一層をべらっと剥がすと、その中の電子は質量を失うなど、

私たちが驚かせる多くの発見がありました。リチャード・ファインマンが1959年に予言的に言ったように、小さい世界には我々が知らなかった新しい世界があったのです。私たちは物質のそのような新しい性質を利用して実際に役に立つ材料を創りたいと考えますが、そのためには、特異な性質をもつ個々のナノメートル寸法の物質を機能的に組み合わせることで巨視的に優れた機能を発現させなければなりません。そのためには、従来のナノテクノロジーを超える新しい技術体系が必要です。私たちはそれをナノアーキテクトニクスの語で表しています。わかりやすく言えば、従来のナノテクノロジーが「分析的」であったのに対し、ナノアーキテクトニクスは「総合化」の重要性を主張しています。

—— それがナノシステム分野の目指す方向なのですね。

青野: そうです。たとえばトランジスターは1個では大したことはできませんが、集積されてICになりLSIになってコンピューターに革命を起こしました。ここで注意すべき重要なことがあります。マイクロメートル寸法のデバイスによって構成されている現在のコンピューターは、まず設計図を描き、その通りに正確に微細加工によって作ります。もし加工に欠陥が含まれると、それは機能の欠陥につながります。しかし、圧倒的に小さいナノメートル寸法の世界の加工においては、欠陥をなくすることは技術的にも原理的にもできません。ですからナノアーキテクトニクスの「総合化」には構造の欠陥とか曖昧さを容認する視点が不可欠で、理論との連携が重要になります。

—— ナノシステム分野は将来の社会にどう貢献できるでしょうか。

青野: 私には3つの夢があります。それらの夢は大風呂敷だと思う人もいるようですが、私は大真面目です。面白いことに、私が言い続けていると、若い人がその気になって、新しいアイデアを思いついて教えてくれるようになりました。第1の夢は、プログラムなしに自ら機能する脳型のコンピューターの原型を世界に先駆けて実現することです。それを無機材料のナノアーキテクトニクスによって実現したいです。第2の夢は、室温超伝導の実現です。室温超伝導を3次元のバルク物質で実現することは難しいかも知れませんが、ナノシステムをうまく利用するとそれが実現できそうな気がしています。第3の夢は、人工光合成です。水から水素原子をつくり、炭酸ガスから炭素原子をつくり、それらから炭化水素を創ることができるとナノシステムを実現したいです。これら3つの夢のどれについても、そのきっかけとなりうる技術を私たちはもっています。

—— 素晴らしい夢ですね。MANAの10年目以降は？

青野: MANAは5年目を迎えて研究の目標がはっきりしてきました。これからその目標に向かってすすんでいきます。これから5年後、すなわちMANAの10年目に、上の3つの夢が夢ではなくなっていることを期待します。そのために全力で頑張りますので、皆様のご支援を心からお願いいたします。N

あおの まさかず 工学博士。1972年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。無機材質研究所研究員、同主任研究員、理化学研究所主任研究員、大阪大学教授、NIMSナノマテリアル研究所長などを経て、2007年から現職。



超高速で形成する有機導電材料 次世代積層デバイスにおける3次元立体配線も低コストで可能

MANA ナノマテリアル分野
ナノエレクトロニクス材料ユニット
半導体デバイス材料グループ
川喜多 仁

MANA ナノマテリアル分野
ナノエレクトロニクス材料ユニット
ユニット長
知京豊裕

3次元デバイス積層の必要性

エレクトロニクス分野、特に集積回路では高集積化と省電力化を同時に達成する手段として3次的にデバイスを積層する取り組み(図1)が始まっていて、多層配線と縦方向の配線をいかに作製するかが課題になっています。縦方向の配線、すなわち積層したシリコンチップ間をつなぐ配線として、チップ間を垂直に貫通する電極(シリコン貫通電極:以下TSV、図1)を作製する技術が重要です。TSVの技術課題の一つは、細く深い孔(例えば、直径5 μm 、深さ50 μm)を導電性の高い材料で速く充填することです。現在は主に化学気相成長(CVD)法やめっきなどの技術を駆使することでタンゲステンや銅などの金属を用いた配線が行われていますが、複雑な準備工程が必要なことや形成速度が低いことなどの理由のため、形成に長時間を要することがあって、エレクトロニクス構成部品の生産コストが高くなる要因になっていました。

液体から導電性固体を高速で析出し、3次元デバイスの配線に応用

本研究では、細孔への注入が容易な液体から導電性固体を高速で析出させることをコンセプトとしました。候補材料の一つとして導電性有機ポリマー(高分子)がありますが、多くは導電率($\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$)が 10^2 オーダーとなっています。そこで、導電性ポリマーと金属を複合化することで、導電率のさらなる向上を狙いました。具体的には、導電性ポリマーの原料となるピロールなどのモノマー(低分子)、ポリマーに導電性を付与するためのドーピングアニオン(マイナスイオン)としての硝酸イオン等、および銀等の金属のカチオン(プラスイオン)をアセトニトリルなどの溶媒に溶解した溶液に、紫外光等の光を照射しました(図2)。光により、導電性ポリマーの重合(酸化反応)と金属の析出(還元反応)が同時に促進されるため、既存のめっきやCVDと比べて10倍以上の成長速度で導電性ポリマーと金属から構成される導電材料を析出させることができました。

さらに、金属が導電性ポリマーの表面に析出した微細構造(図3)のため、導電率は $2.0 \times 10^4 \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ となり、一般的な金属と同程度の良導体とすることができました。

低コストな多層配線デバイスを実現へ

今回の成果により、液体状態での原料の高速注入とその後の導電材料の高速形成が可能となることから、従来は数時間かかっていたTSVへの導電材料の充填時間が数分間にまで短縮され、次世代のエレクトロニクス機器を安価に生産できることが期待されます。また、フレキシブルデバイスでも高集積化に伴う多層配線の必要性が高まっており、大気中で高速に形成可能な高導電性配線材料としての利用が期待されます。

注:フレキシブルデバイス:折り曲げ可能な電子機器や装置。従来のデバイスに比べて形状デザインの自由度が高く、長いフィルム基板を用いた連続的な製造が可能になる。

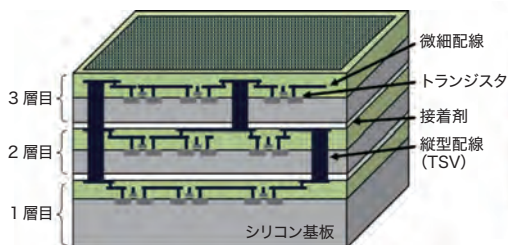


図1 3次元半導体の構造例

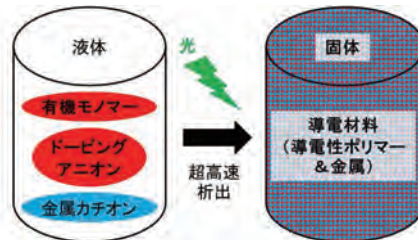


図2 導電性有機ポリマーと金属からなる導電材料の形成過程

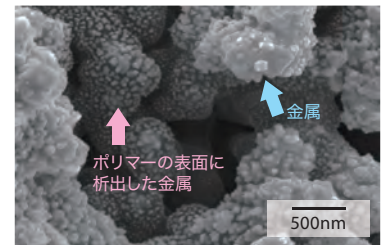
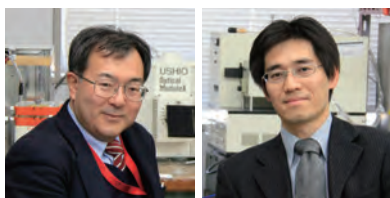


図3 導電性有機ポリマー(ポリピロール)と金属(銀)からなる導電材料の電子顕微鏡写真



かわきた じん(右) 博士(工学)。慶應義塾大学大学院後期博士課程短縮修了。1997年 慶應義塾大学理工学部助手。2000年金属材料技術研究所研究員。2011年より現職。2004年~2005年文部科学省原子力関係在外研究員(ドイツ・マックス-プランク研究所)。2009年 文部科学省科学技術政策研究所客員研究員。2010年~千葉工業大学連携大学院教授(兼任)。/ ちきょう とよひろ(左) 博士(工学)。早稲田大学大学院博士課程後期修了。1989年金属材料技術研究所 入所。1999年~2006年: 先導研究「コンピナトリアル材料科学の創世と先端産業への展開」に参加。2006年より現職。1993年~1994年ノースカロライナ州立大学 客員研究員。1995年~ワシントン大学材料工学科客員教授。2009年~早稲田大学連携大学院教授(兼任)。

1 科学・技術フェスタ in 京都 2011に出展

平成23年12月17日(土)と18日(日)の2日間、NIMSは「科学・技術フェスタin京都2011」(主催:内閣府、文部科学省などの関係省庁、関係独立行政法人など 於:国立京都国際会館)に、主に高校生や一般の方を対象とした出展をおこないました。

ポスター展示による環境・エネルギー材料や放射性物質処理に関する研究成果などの紹介をしたほか、真ちゅう板に刻印で作るオリジナルの「キーホルダー作り」、金属の色や重さと物理的な性質のヒントから10種類の金属材料の名前を当てる「材料の名前当てクイズ」、超伝導材料や磁性

材料などの実験教室をそれぞれおこないました。

17日には、中川正春文部科学大臣、古川元久科学技術政策担当大臣がご視察され、期間中には多くの方がNIMSブースへ来られました。



超伝導実験に挑戦される中川大臣



材料の名前当てクイズをご覧になる古川大臣



実験教室の様子

一方、世界トップレベル研究拠点合同のブースでは、NIMSの国際ナノアーキテクトニクス研究拠点(MANA)も出展し、高感度薄膜センサーを用いたデモンストレーションをおこないました。

2 クリープデータシートプロジェクトチームが「ナイスステップな研究者 2011」に選定

文部科学省科学技術政策研究所では2005年より、科学技術の発展への貢献をした注目すべき人物を「科学技術への顕著な貢献 ナイスステップな研究者」として選定しています。その【プロジェクト部門】に、NIMSのクリープデータシートプロジェクトチーム(プロジェクトリーダー:木村一弘 環境・エネルギー材料部門 材料信頼性評価

ユニット長)が選定されました。

“世界一の規模と信頼性を誇るクリープ試験の継続と発電プラント等の信頼性向上への貢献”がその選定理由で、金属材料技術研究所時代から続く長時間クリープ試験の世界最長記録更新(356,463時間/試験開始は1969年)、ならびに2001年からの独立行政法人化後における、

産業界との連携強化による試験データの更なる活用、データの信頼性向上などへの取り組みが高く評価されました。

木村 一弘
プロジェクトリーダー



3 ベトナム科学技術アカデミー材料科学研究所と包括研究協力協定を締結

平成23年12月1日、NIMSはベトナム科学技術アカデミー材料科学研究所(IMS-VAST)と包括研究協力協定を締結しました。

IMS-VASTは材料科学技術研究、同分野における国際的な交流、ならびに大学院教育を目的と

して、ベトナム政府により1993年に設立されました。ベトナムの中核的な材料科学の研究機関として、ナノ材料から鉱物精錬までの幅広い研究開発を進めています。IMS-VASTとNIMSはこれまでにも多くの共同研究ならびに人的交流をす

ずめてきましたが、本協定締結により協力のさらなる深化と拡大が期待されます。



ベトナム科学技術アカデミー材料科学研究所

4 ペンシルバニア大学物質構造研究所と包括研究協力協定を締結

平成23年12月21日、NIMSは米国ペンシルバニア大学物質構造研究所(LRSM-UPenn)との包括研究協力協定を締結しました。

LRSM-UPennは、1960年に米国国防高等研究局(DARPA)によって創設された五つの先駆的な材料科学研究所のひとつで、その長い歴史を通じて世界の材料科学の礎を確立する上で

多大な貢献をしてきました。ペンシルバニア大学は世界的にもトップクラスの大学で、これまでに26名ものノーベル賞受賞者を輩出しています。調印式に引き続き、第1回目の「LRSM-NIMS Materials Workshop」が開催され、お互いの最新の研究成果を発表するとともに、今後の研究協力の可能性についてグループディスカッション

をおこないました。NIMSとLRSMとは共通する研究分野が非常に多く、本協定の締結により今後活発な研究と人材の交流が期待されます。



調印式にて、NIMS潮田理事長(左)とLRSM-UPennのYodh所長

5 The 11th Asian Bio Ceramics Symposium (ABC2011) を開催

平成23年11月30日~12月2日の三日間、NIMS千現地区において“The 11th Asian Bio Ceramics Symposium (ABC2011) in conjunction with the 15th Symposium on Ceramics in Medicine, Biology and Biomimetics and the 22nd Symposium on Apatite”が開催されました(NIMS生体機能材料ユニットバイオセラミックスグループ主催、産業技術総合研究所共催)。

ABCは日本の呼びかけでアジア環太平洋地区のバイオセラミックス研究者を集めて2001年から日本とアジア各国が交互に開催している会議です。会議には日本をはじめ、インド、インドネシア、オーストラリア、韓国、台湾、中国、マレーシアからの100名を超える研究者が参加。優れた発表と討論がおこなわれました。

“Symposium on Ceramics in Medicine, Biology and

Biomimetics(生体関連セラミックス討論会 主催:日本セラミックス協会生体関連材料部会)、“Symposium on Apatite(アパタイト研究会主催:日本アパタイト研究会)”も併せておこなわれました。

会議の最後には若手研究者へのABC Awardが表彰され、NIMSや産総研で研究を進めたポスドク・学生も受賞。つくばの研究のレベルの高さがうかがわれました。