

No.10  
Feb. 2012



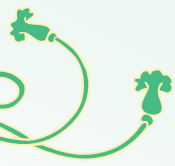
## 幅広い思考力で多様な研究を — 飯島 澄男

## 未来の夢につながる原子スイッチ — 長谷川 剛

## MOUを締結し、国際共同研究を推進

MANA の研究成果

- InAs量子ドットで結合したSQUID — 高柳 英明
- グラフェンのナノスケール・エッジ効果を  
理論的に解明する — 若林 克法
- 自己形成コアシェル構造による  
全固体リチウム電池の高出力化 — 高田 和典
- 構造情報が保持され、かつ磁場により  
再構成可能なソフトマテリアル — ハジャジ ファティン



国際ナノアーキテククス研究拠点

International Center for Materials Nanoarchitectonics (MANA)



MANA JOURNAL



## 飯島 澄男 IIJIMA Sumio

1963年電気通信大学卒業。1968年東北大学大学院博士課程修了。引き続き東北大学科学計測研究所助手を経て渡米アリゾナ州立大学、英国ケンブリッジ大学などで12年間研究活動を続け、1982年に帰国。新技術事業団（現科学技術振興機構）を経て、1988年NEC基礎研究所に移る。現在、名城大学教授、NEC特別首席研究員、産業技術総合研究所・ナノチューブ応用研究センター長、名古屋大学特別招へい教授を兼務。その間、NEDOやJSTの国家研究プロジェクトの研究代表をも務める。1970年代の米国滞在中に、世界に先駆けて「高分解能電子顕微鏡技術」を開発し、電子顕微鏡による材料科学、結晶学、鉱物学等の発展に貢献する。帰国後の1986年、「少数原子集団の動的観察」の研究で仁科記念賞を受章。1991年、電子顕微鏡を駆使した研究でカーボンナノチューブを発見、世界に大きな衝撃を与え、ナノサイエンス・ナノテクノロジー研究の先駆者の一人となる。これらの研究に対して国内外から多数の褒賞を得ている。国内では、朝日賞、学士院賞・恩賜賞、文化功労者顕彰、藤原賞、文化勲章、また外国からは、パートラム・ワーレン賞（米国結晶学会）、フランクリン物理学賞（米国）、バルザン賞（イタリアスイス）、カブリ賞（ノルウェー）、アストゥリアス皇太子賞（スペイン）等多数。また、日本学士院会員を始め、アメリカ、ノルウェー、中国の科学アカデミーの外国人会員にも選ばれている。

### カーボンナノチューブの応用製品 がついに市場に

—先生がカーボンナノチューブを発見されたのが1991年で、もうちょうど20年ですか？

はい、成人式を迎えました。いったいつ製品が出るのだとずいぶん言われましたが、ついにスマートフォンのタッチパネルに製品化されました。しかし、残念なことに日本ではないのです。中国系のある会社がスマートフォンへの実用化に10年ぐらいたっかして、やっと完成しました。スマートフォンのタッチパネルにITO（酸化インジウムスズ）導電性の透明の膜がありますが、その代替としてフレキシブルで透明なナノチューブが使われるのです。

日本でも、やっと一昨年あたりから国も本腰を入れ始めました。レアメタルが世界的に無くなって大変だということで、日本の企業が代替案としてグラフェンの応用研究を始めたのです。逆に、レアメタルのほとんどを持っている中国でITOを使わず、しかもカーボンナノチューブで最終プロダクト—タッチパネルを作るというのはとても皮肉ですね。

日本人はそういうところに疎く、現状の世界の進行具合をしっかり把握していない。だから中国や韓国には、ナノチューブでは完全に上をいかれていますよ。このスマートフォンは、その典型的な例というか警鐘と言えますね。

新興国の科学・技術のレベルが非常に上がってきて、ある部分では既に追いつかれているということ、トップの人間が全く認識できていない。だからまず現状をよく見て、競争相手がどこか認識して研究をしないとだめだと思います。既に競争時代に入っているのに、互いを尊敬しつつ本式の試合を挑まないと、日本は本当に危ないですよ。現状認識が重要だと思いますね。

—日本は、材料科学の分野では世界の中でも割とレベルが高いと言われていたと思うのですが、それほどでもないということでしょうか？

日本はアイデアでは負けていますよね。最初のもは出たのですが、創造力というかものを造り出す力、いろいろなアプローチを考えるという意味では力不足だと思います。もっと研究者が思考を幅広く広げないといけない。

例えば、カーボンナノチューブははじめ簡単な方法でできましたが、次に製品に結びつく作り方はけっこうユニークなんです。そのユニークさ故に最初の論文はNatureに通ったという、そのくらいアイデアがすばらしかったのです。そういう研究者を何人かつかまえると、研究がうまくいくのかもしれない。

### サイエンスとテクノロジー両面 からのアプローチを意識する

—必ずしもサイエンス、科学的発見というのは、そのように原理を発見したり、しくみが発見したりすることだけでは無いのですか？

そうです。私は、研究には原理を発見する純粋なサイエンス

# 幅広い思考力で多様な研究を

他に、その原理／アイデアを元にサイエンスとテクノロジーで製品にするという研究開発があると考えます。個人的な考えですが、サイエンスとテクノロジーではアプローチが異なるのです。今は効率10%だけ、光を集めると20%になる。10%の原理をみんな分かっている、それにいろいろなものを積み重ねて最後に到達するわけですね。このようなピラミッド式の研究開発のアプローチというのは、まさにテクノロジー的です。どんどん外堀内堀と攻めて、やがて本丸に達するという方法です。逆にサイエンスは、全く違う次元で突然ぽんとできる。しかし物を作るにはどちらの人も必要です。まずアイデアがあり、そのフォローアップとして、マンパワーをつぎ込みテクノロジーで製品化しないといけないのだと思います。さらに、出来上がった既存の製品やいろいろなものと戦わなくては行けないのですから、熾烈なサバイバルゲームです。最終プロダクトまで持っていくのは、なかなか大変だと思います。

技術開発を自らしないとしても、少なくとも研究者は頭の中に意識しなければなりません。そうでないと自己満足だけの難しい研究になってしまいます。特に材料関係の研究者であるなら、将来的な見通しを持ち、社会にどうやって評価されるか、何らかの社会的貢献ができる可能性を意識する必要があると思いますね。

## 目指すものは社会貢献か文化貢献か？

——今 MANA は、WPI の一員として、世界的な研究拠点をつくるという使命を担っています。世界中の人材を集め、社会への貢献も考えつつ基礎研究を進めています。さらに一歩進めるにはこれから何を目標として行けばいいか、アドバイスをいただけますか？

先ほど言ったのとは別に、我々の研究には2つの側面があると思います。

一つは、その成果が直接世の中に役に立つ、実際の製品に直結している研究です。たとえば、カーボンナノチューブのタッチパネルへの応用はその一例で、製品化のように、ほとんどの場合結果が目に見える形になります。

もう一つは、文化面での貢献となるような研究で、その典型的な例はノーベル賞です。国の文化として後世に残る発見や技術など、それを持っていることで自国を誇りに思える文化活動の最たるものです。

このどちらを目指すか、はっきり最終目標を定めることを、忘れてはならないと思います。

MANA の場合は国の税金で研究をさせてもらっている、割とゴールを高めに設定してチャレンジするという事は当然あると思います。ただし、世界に通用する一流の仕事

ばかりできる訳ではありません。狙ったものを全て100%達成できるわけではないので、10のうち1つくらい本当に良いものが出れば、それでよしとするのです。

## 材料科学に求められるセレンディピティ

これは個人的な考えですが、一般的に物理や科学の分野では、世界中の凄い人の中から、特に卓絶した頭脳を持つ研究者が出てきて、大発見をすることが多いと思っています。小林先生や益川先生がそうですよ。しかし、少なくとも材料科学の分野では、そういうことはあまりないと思います。頭の中で考えて新しい物質をデザインするのは、たかが知れている、人間一人の考えることには限界があると思うのです。むしろ、何かやっているうちに経験的にセレンディピティで新しいものに出くわす可能性に私は賭けるのですよ。

——そうすると、先生ご自身のカーボンナノチューブの発見もセレンディピティですか？

もちろんそうです。頭の中だけではあの考えには到底及ばないですよ。重要なのは研究の多様性です。いろいろなアプローチをする人がいて、様々なものを見つけるということが面白いと思うのです。一つの方向に走るのではなく、例えばコンピュータで見つけるのも一つの方法だけど、他の方法でも最終的に同じようなものを見つけることもある。研究にはいろいろなタイプがあってよいのです。

科学史の偉大な発見・発明には、始めからデザインされてつくられたようなものはないですよ？歴史に残るような発見は、専門分野の研究に取り組んでいて、偶然すぐ近くにもっとすばらしいものがあつたのに気づいた、というものがほとんどだと思います。そう考えると、優秀な人が頭の中で考えてする研究も大切ですが、それだけではなく、絶対別の道もとっておく必要があると私は思いますね。

——その場合、研究者の数が多いか少ないかは関係がありますか？

数ではないと思います。それよりも、優秀な研究者一すなわち1分野しか見えないような研究者ではなく、フレキシブルで何をやっても対応できて、しかも最終的には芯の強いおもしろい本物をいかに集めるかですね。そういう研究者が何人かいればうまく行くと思います。

では、そのような研究者を集めるにはどうしたらよいか？あの研究所は設備が整っているなどと言いますが、これは条件の一つであって本質ではないと思います。まず、自分のところから発信しなければ人は集まりませ

ん。発信というのは、少々時間がかかるけれども、連続的に Science や Nature などの評価の高い雑誌に研究成果を発表していく。そうすると、あそこはなかなか面白そうな仕事をやっているね、ということで芋づる式に良い研究者が集まってくる。ここが重要で“良い研究者がそれに刺激されて集まってくる”ということです。私の専門は電子顕微鏡ですが、結構世界的に見て評価され、知られているので、世界中から若い研究者が志願して来ます。そこから一番優秀な人を採用すれば良いのです。欧米での確固たる地位が認められた大学などには、昔からそうやって、世界中から良い人材が集まって来ているのです。このような仕組みが MANA にもできれば、とりわけ宣伝しなくても人材が集まって来るかもしれません。また、どれだけ発信できるかというのも、中に居る人のポテンシャルが非常に高く、かつ自分が一番上にいないとダメなのです。ですから、まずはじめが大事だと思います。少し時間がかかるかもしれませんが、今 MANA は着々とやられているので良いのではないのでしょうか？

## 様々な文化に触れ、多面的な思考力を養うべし

——最後に、MANA は若手研究者の育成も使命としておりまして、独立研究者や ICYS-MANA 研究者という研究者育成の制度もあるのですが、若手研究者の育成に必要なもの、また若手研究者へメッセージをいただけないでしょうか？

若い時は物怖じせず、失敗を恐れずに新しいことに挑戦できる時期だと思います。どんどん試した方が良いですね。また若い人は特に多めに動くべきです。良い恩師に巡り会うチャンスは、自ら動かないと得られないのです。できれば海外ですが、日本国内でも構いません。動いた先の相性が悪かったらさっさと離れてしまえばいい。なかなか後のポジションが見つからなくて大変かもしれないけれど、若いから出来ることだとも言えます。環境を変えてリセットして、また新たなことをはじめるというのも一つの手だと思いますよ。

私は単視眼的ではなく多角的な考え方ができる多様性というのが好きで、外国の方がいるとその多様性に触れる機会も増えるので良いと思います。MANA は WPI 拠点の中でも外国人研究者の割合が高いということで、特にこのご時世、日本の若者が外に出ないのなら外から連れてくるというのは大いに結構だと思います。刺激もたくさん得られるし、良いアイデアを生むチャンスも増えますからね。

——本日はお忙しいところ、興味深いお話をありがとうございました。

# 未来の夢につながる 原子スイッチ

長谷川 剛

Tsuyoshi HASEGAWA

MANA 主任研究者 (PI)  
ナノシステム分野

## 失敗から始まった原子スイッチの研究

——長谷川 PI という、原子スイッチが思い浮かぶのですが、どういったきっかけで研究をはじめられたのですか？

拠点長の青野がまだ研究室長で私も研究員だったころ、金属は極限まで細くしても電気を良く流す「金属」なのかを調べるために、金属原子をインクとするマイクロ万年筆を作っていました。これを私たちは「ナノペン」と呼んでいました。実際、ナノペンを使って原子スケールの細い線が描けるようにはなったのですが、ときどき全く描けないペンがあり電子顕微鏡で確かめてみると、インクである金属原子が塊となってペン先にくっついたままでした。線を描くときは「筆圧」を制御してナノペンと基板との間にわずかな隙間があるのですが、「制御を止めればペン先と基板がくっついてスイッチになるのでは？」と青野が言ったことから「原子スイッチ」の研究が始まったのです。あのとき青野が「上手くいく条件を探せ！」と言っていたら、この研究は無かったと思います。上手くいかないことを失敗と思わずに、新たな発見だと思ってみることの大切さを青野には教わりました。

スイッチ動作の実証もほどなくして出来たのですが、当初は、現象は面白いけど実用化は無理だね、とデバイスの専門家によく言われました。しかし、ナノペンの実験を実際に行った研究者も含めて私たちにデバイスの専門家が一人もいなかったことが逆に幸いしました。何事もやってみなければ分からないだろう、と思って研究を続けたのです。

——現在、その原子スイッチはある程度デバイスとして確立しているのですか？

実験データを積み上げた結果、ある企業が興味を持ってきて共同研究が始まりました。企業と組むと、集積化とか信頼性とか、私ただけでは手が廻らない部分の研究も進みます。まだ特定の用途向けですが、共同研究のお陰で、技術的には市場に出しても問題の無いレベルにまで達しています。

企業との共同研究においても原子スイッチの特長を活かした製品開発を行ってきましたが、今後は、原子スイッチでなければ出来ない新しい製品の開発を目指していく必要があると思っています。

## アトムトランジスタと脳型コンピュータ

——その新しいデバイス用途として、具体的な目標をお持ちですか？

私のグループには、現在、二つの夢があります。

一つ目は、半導体トランジスタをそっくり置き換えるアトムトランジスタの開発です。半導体トランジスタは電源を切ると全て初期状態に戻ってしまう揮発性素子ですが、アトムトランジスタは状態を保持できる不揮発性素子です。On/Off を切り替えるときだけわずかな電力を使いますが、待機電力はゼロです。アトムトランジスタで起動時間ゼロ、超省エネのコンピュータを作る。これが、近未来の夢です。

もう一つが脳型コンピュータの実現です。今のコンピュータは非常に性能が良いけれども、膨大な電力も使います。一方、同じくらい賢い人間の脳は、熱をほとんど出しません。これはそもそも今の

コンピュータと人間の脳とで計算の仕方が異なっているからです。脳の神経回路はシナプスとニューロンで出来ていますが、私たちは、このシナプスと全く同じ動作をする素子の開発に昨年成功しました。その成果は、英国科学雑誌 Nature Materials に掲載されています。

脳型コンピュータを作るためには、回路において司令塔の役割をするニューロン素子も必要です。原子スイッチの技術を用いてニューロン動作も実現する。そして、事前のプログラミング無しに、自ら賢くなる脳型コンピュータを作る。これが遠い将来の夢です。

——最近では、研究者であっても社会にどう貢献が出来るかを考えなければいけないと、よく言われますが、社会的存在としての科学者のお立場から、なにか夢をお持ちですか？

私たちの技術を、専門家だけでなく一般市民の方々にも分かり易く伝える活動をしたいですね。大学生よりも高校生や小中学生にも理解してもらえよう努めていきたいです。昨年11月に中学生を対象にしたWPIのシンポジウムが福岡で開催されました。MANAからは私が代表して原子スイッチの研究を紹介させて頂きましたが、帰り際に一人の学生から「頑張ってください」と握手を求められました。ちょっとびっくりしましたが、研究のおもしろさを感じ取ってもらえたのかなと思いました。こういった活動は続けていきたいと思っています。

## プロジェクトは次のステージに

——MANA も発足して5年目に入るところです。先日文科省から中間評価でA評価をいただきまして、今後5年また支援いただけることになりましたが、今後のMANAや、ナノシステム分野の展望、抱負についてお聞かせください。

ナノシステム分野、あるいはMANAから新しい大きなプロジェクトが生まれるようなフェーズに入っていくのではないかと思います。また、それを行う義務が私たちにはあると考えています。例えば、先ほどの脳型コンピュータの開発もそういったフェーズに入りつつあると思います。独自の技術で世界を先導することが、技術立国日本が生き残る唯一の道であり、世界に貢献するための道でもあります。その一翼を担えるようにしたいですね。



# MOUを締結し、国際共同研究を推進

ナノテクノロジーに関する国内外のトップレベルの研究者を招へいして実績を積み重ねている MANA ですが、さらに海外の一流の研究所と提携して研究をすすめることにも最大限の努力をはかっています。その一つが合意覚書 (MOU: Memorandum of Understanding) を相手先機関と締結して共同研究を行うというものです。今回はその実績についていくつかご紹介します。

※「MOU: Memorandum of Understanding」とは、海外の研究所と提携して研究を行うために、相手先機関と MANA との間でかわす覚え書きのことで、相互協力の骨子は a) 研究者の交流、b) 研究情報の交換、c) 共同研究のための施設提供、となっています。有効期間は5年間で、両者が必要と考えれば延長することもできます。

研究機関名	国名	MOU 締結年月日
バーゼル大学 ナノスケール科学専門研究センター	スイス	2008年7月22日
カールスルーエ大学 無機化学研究所	ドイツ	2009年1月29日
スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) マイクロエンジニアリング研究所 (IMT)	スイス	2009年7月20日
ハイデルベルグ大学 キルヒホッフ物理学研究所	ドイツ	2009年8月31日
ベトナム国家大学ホーチミン市校 (VUN) ナノテクノロジー研究所 (LNT)	ベトナム	2011年1月24日
フリンダース大学	オーストラリア	2011年7月19日

## バーゼル大学 ナノスケール科学専門研究センター

近年各分野で注目されているカンチレバーアレイセンサーに関して、世界最先端の技術を持つバーゼル大学のグループと共同で、実用化に向けて重要な技術であるピエゾ抵抗型読み取り方式の開発を行いました。読み取り回路やチャンバードesignなど総合的なセンサーシステムの開発を行うことで、ピエゾ抵抗カンチレバーセンサーの高い可能性を実証することに成功しました<sup>1</sup>。



1 G. Yoshikawa, H.-P. Lang, T. Akiyama, L. Aeschmann, U. Staufner, P. Vettiger, M. Aono, T. Sakurai, and C. Gerber, "Sub-ppm detection of vapors using piezoresistive microcantilever array sensors," *Nanotechnology*, **20**, 015501 (2009).

## カールスルーエ大学 無機化学研究所



MOUにサインをする Jonathan Hill MANA 研究者(左)と、カールスルーエ大学の Annie K. Powell 教授(右)

グラフェンを含むナノ物質に関する共同研究が基本になっています。

現在までに一編の重要な研究論文を発表しており、数編の革新的なレビューが行われることになっています。

## スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL) マイクロエンジニアリング研究所 (IMT)

CAPATEC (Cantilever and Probe Array Technology) プロジェクトは、EPFL の IMT で長年培われた世界最高峰のマイクロ、ナノファブリケーション技術と、MANA の最先端ナノ計測技術を融合することによって、新たな汎用センサーやプローブの開発をめざしています。これまでに、医療、環境、セキュリティなどへの広範な応用が期待される超小型・高感度な膜型表面応力センサー (MSS) の開発に成功しています<sup>2</sup>。



2 G. Yoshikawa, T. Akiyama, S. Gautsch, P. Vettiger, and H. Rohrer, "Nanomechanical Membrane-type Surface Stress Sensor", *Nano Letters*, **11**, 1044-1048 (2011).

## ハイデルベルグ大学 キルヒホッフ物理学研究所

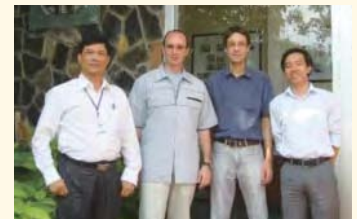


原子スケール・ナノスケール材料中の電子のダイナミクスと、それと相互作用する光ダイナミクスについて、光・電子の両研究手法を用いて解明し、さらに有用な材料機能の探索をすすめました。この研究を通して、相補的な協力関係が築け、日本側からは7編の論文、14件の国際会議発表、10件の招待講演を行いました。

2011年4月にキルヒホッフ物理学研究所で開催されたサマースクール "Plasmonics, Functionalization and Biosensing" に講師として参加したメンバーの写真。左から2番目: 長尾忠昭 MANA 研究者, 5番目: A. Otto 名誉教授 (デュッセルドルフ大学), 6番目: A. Pucci 教授 (ハイデルベルグ大学)。

## ベトナム国家大学ホーチミン市校 (VNU) ナノテクノロジー研究所 (LNT)

光およびバイオエレクトロニックナノデバイスに資するナノテクノロジーの研究開発を骨子としています。そのために VNU ではいくつかの講義が行われ、国際ワークショップも開催されています。



Lionel Vayssieres MANA 独立研究者 (左から2番目) が2010年11月にLNTを訪問。

## フリンダース大学

今後の共同開発研究の可能性調査のため、フリンダース大学の2名の教員が MANA を訪問、研究討論を行うとともに、ナノサイエンス、ナノテクノロジーに関する合同シンポジウムを開催しました。フリンダース大学より2名の博士課程学生の派遣も決定しており、うち1名は MANA で研究を実施しています。



(左から右へ) David Lewis 教授 (フリンダース ナノスケール科学技術センター長)、Michael Barber 教授 (フリンダース大学学長)、青野 正和 博士 (MANA 拠点長)、魚崎 浩平 博士 (MANA 主任研究者)

ここで紹介した他にも、MANA はその発足から現在に至るまでに、世界 10 数カ国の 30 以上の研究機関と MOU を締結しています。こうした様々な手段を通じて、MANA は真の国際化を目指し、研究開発の進展とその成果の充実を図っています。



高柳 英明  
Hideaki TAKAYANAGI

MANA 主任研究者  
ナノシステム分野

近年のナノ作成技術の進歩は、量子ドットと超伝導磁束量子干渉計 (SQUID) との結合を可能にしました (図 1 (a))。これにより、高度に制御可能な電子システムと最も高感度な磁束計とのコンビネーションは、将来のあらたな量子情報デバイスとしての応用を拓くこととなります。現在までのところ、例えばカーボンナノチューブや InAs ナノワイヤーのようなナノ構造 1 次元半導体を用いて研究されています。ここでは、SQUID 中の 2 個の量子ドット中の 1 個の中の個々の電子スピン状態の研究の魅了度が示唆されています。

無磁場の下では、我々の SQUID は明瞭な超伝導電流 (臨界値  $I_c=2.5$  nA) を示しました。外部磁場  $\Phi_{\text{ext}}$  の関数として、 $\Phi_0=$  約 1.5 ガウスの周期で振動しましたが、この値は有効な SQUID の領域に磁束量子  $\Phi_0=h/2e$  が入ることを示しました。この結果は、Al/SAQD/Al (SAQD: self-assembled quantum dot) を含むループが SQUID としてきちんと動作したことを意味

## InAs 量子ドットで結合した SQUID

ています。興味深いことに、我々はサイドゲート電圧  $V_{\text{SG1}}=-0.4$  V のときの  $\pi$  接合の挙動を観測しました。このサイドゲート電圧は、あるバックゲート電圧領域において、 $I_c$  振動の  $\pi$  位相シフトを促す高さになっています (図 1 (b))。このことは、サイドゲート電圧によってループ中に自発的超伝導電流が誘起され、2 つの SAQD のうちひとつが  $\pi$  接合に、もう一つは通常の 0 接合になっていることを意味しています。

SQUID の幾何学的構造によって、我々は電流一位相関係に  $\pi$  位相シフトと負の超伝導電流を直接観測できたこととなります。これらは、バックゲートによる SAQD のエネルギーレベルの制御にだけでなく、サイドゲートによる SAQD と電極との制御にもよるものです (図 1 (c))。我々の結果は、 $\pi$  接合転移はサイドゲートによる SAQD と超伝導電極の間の結合度の変化による InAs SAQD 中のスピンのシングレット-ダブレット転移によって説明されます。SAQD を DC-SQUID に採用することにより、光学、スピントロニクス、超伝導の広い分野で、量子情報処理の新しい可能性が拓かれるでしょう。

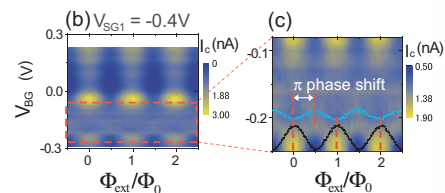
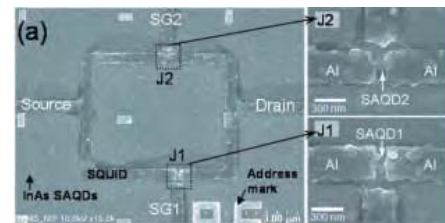


図 1 (a) InAs SAQD で結合した SQUID の SEM 写真。図中のランダムに分布した小さな点々が、InAs SAQD である。(b) 外部磁場とバックゲート電圧を関数とする  $I_c$  の振動。サイドゲート電圧は  $-0.4$  V に固定してある。(c) バックゲート電圧が  $-0.08$  から  $-0.25$  V の間の (b) の拡大図。

参考文献

S. Kim, et al., *Appl. Phys. Lett.*, **98** (2011), 063106



若林 克法  
Katsunori WAKABAYASHI

MANA 独立研究者

## グラフェンのナノスケール・エッジ効果を理論的に解明する

グラフェンとは、炭素原子だけからなる一原子層のシートのことです。2005 年に発見されたこの物質は、新しい 2 次元電子系として、今世界中の物理学者を虜にしています。シートの中では、炭素原子が蜂の巣格子の構造を組んでいます (図 1(a))。半導体界面で形成された従来の 2 次元電子系との違いは、グラフェンの中を運動する電子の基礎方程式が、シュレーディンガー方程式ではなく、質量のないディラック方程式として記述されることにあります。言い換えると、グラフェンの中の電子は、質量がない相対論的粒子として振る舞うのです。この風変わりな電子構造に由来して、グラフェン中の電子は不純物などからの散乱を受けにくく、非常に高い電子移動度を示すことが知られています。また、一原子層であることからほぼ透明な材料となるため、今後タッチパネルや太陽電池への応用が期待されています。

グラフェンの魅力は、一原子層薄膜であることに留まりません。強いナノスケール効

果やエッジ形状効果によって、電子状態が大きく変化し、磁気的性質や電気的性質が大きく変化することを、藤田光孝博士と筆者らが 1990 年代から指摘しています。たとえば、グラフェンを切りとったときできる端の形状を考えると、切り取る角度の違いによって、図 1(b) に示すアームチェア型のエッジと、図 1(c) に示すジグザグ型のエッジという 2 種類あります。とりわけジグザグ端では、電子が端に局在した状態を形成するため、グラフェンの電子状態とは大きく異なったものになります。

ナノスケールグラフェンの電子物性で出現すると期待されるエッジ効果の一つとして、ジグザグ端のエッジ状態に起因する磁気異常があります。電子間相互作用によって、エッジ状態が磁気的不安定を起し、ジグザグエッジ近傍にスピン分極、つまり磁性が発現する可能性があります (図 1(d))。この我々の理論予測は、現在幾つかの実験グループによって確認されつつあります。

ナノカーボン材料の物性の多様性は、実験家から見ると厄介なこともかもしれません。しかし、以前にはまったく実現不可能であると考えられてきたことが、技術の進歩と共に着実に可能になってきています。多種

多様な性質から特定の物性を制御することが、ナノサイエンス・ナノテクノロジーの面白さだともいえるのです。この中で我々の理論屋の役割は、ナノマテリアルの機能と物性に関する設計図を作ることだと考えています。

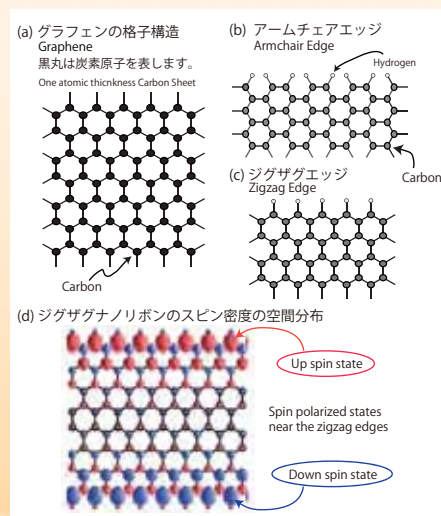


図 1 グラフェンの格子構造と端効果

参考文献

K. Wakabayashi et al., *Sci. Technol. Adv. Mater.*, **11**, 054504 (2010).



高田 和典  
Kazunori TAKADA

MANA 主任研究者  
ナノグリーン分野

リチウムイオン電池は携帯電話やノートパソコンなどに使われてきた電池であり、今後電気自動車やスマートグリッドの電源にも使われようとしています。ところが、リチウムイオン電池の電解質には可燃性の有機溶媒が使われていますから、このように電池が大型化する用途では安全性の確保が大きな問題となってきます。この問題を解決する方策として期待されているものが、不燃性の固体電解質を用いた電池の全固体化です。しかしながら、電池を全固体化すると出力性能が低下するという課題があります。この課題解決のためには高いイオン伝導性を持つ固体電解質が必要であるのは言うまでもありませんが、高いイオン伝導度をもつ硫化物固体電解質を用いた場合においても、正極材料である  $\text{LiCoO}_2$  と固体電解質の界面に高抵抗のリチウムイオン欠乏層が形成され、出力を低下させるという問題が残ります。我々は、 $\text{LiCoO}_2$  粒子表面に厚さ数ナノメートルの酸化物固体電解質層を緩衝層として形成することでこの問題を解

## 自己形成コア-シェル構造による全固体リチウム電池の高出力化

決し、市販電池に匹敵する性能を持つ全固体リチウム電池の開発に成功しました。しかしながら、このような薄い層を粒子表面に形成することは決して簡単なことではなく、量産に向けては簡便で低コストの方法が必要です。今回このような方法として、 $\text{LiCoO}_2$  中の Co の一部を Al で置換することで、表面緩衝層を形成したものと同等の出力性能を達成しました。

$\text{LiCoO}_2$  の合成時に水酸化アルミニウムを加えると、導入された Al のほとんどは Co 席を占め  $\text{LiAl}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}_2$  であらわされる固溶体が形成されますが、同時に表面偏析により粒子表面に Al の濃化した層が形成されます。この濃化層では電子伝導性が低下しますので、この表面自体が酸化物固体電解質として作用し、リチウムイオン欠乏層発生に対する緩衝効果を発揮します。このように界面抵抗が低減される結果、 $\text{LiAl}_{0.08}\text{Co}_{0.92}\text{O}_2$  の組成では 5C (1/5 時間で完全放電する電流値) の高率放電時においても  $80\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$  の容量が得られています。

参考文献

X. X. Xu et al., *Chem. Mater.*, 2011, 23, 3798–3804.

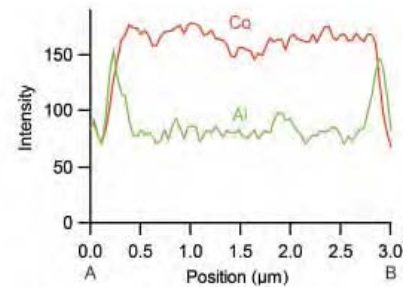


図1  $\text{LiAl}_{0.08}\text{Co}_{0.92}\text{O}_2$  粒子内における Al 分布。ラインプロファイル (上) と 2 次イオン質量分析による 2 次元イメージ (右)。

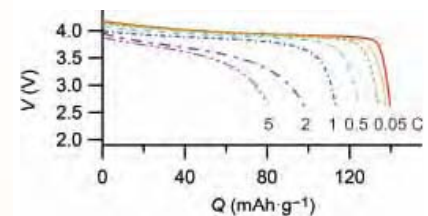
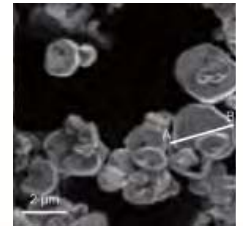


図2  $\text{LiAl}_{0.08}\text{Co}_{0.92}\text{O}_2$  電極の放電特性



ハジヤジ ファティン  
Fatin HAJJAJ

ICYS-MANA 研究者

半導体産業は長い間、高密度かつ高速、低消費電力で動き、電源が途切れた状態でもデータを保持するメモリ機器を追い求めてきました。2013 年以後の不揮発性メモリのコンセプトにおいては、電荷蓄積メモリよりも物質の二つの異なる相がデジタルデータの 0 と 1 を表す相変化メモリが主流となってきます。例えば液晶などのように外的刺激に反応して相変化するソフトマテリアルは、将来の不揮発性データ記憶装置及び再構成可能電子回路のための最も有力な材料の候補としてあげられています。

液晶材料をデバイスに組み込むことへの関心が高まるにつれ、デバイス性能を損なうことなく遠隔操作で材料の相変化を起こすために、非侵襲性の刺激を利用する必要がでてきています。利用可能な外的刺激のうち、磁場は非接触操作が可能であること、即時かつ弊害なく働くこと、電子機器に容易に組み込むことができること、といった長所があります。しかし、その作用の複雑さゆえに、超分子液晶アセンブリの操作に限定的に使われている

## 構造情報が保持され、かつ磁場により再構成可能なソフトマテリアル

に過ぎませんでした。電場の印加を利用することが出来ないイオン性ソフトマテリアルにとって、磁界により誘起される分子スイッチングは最も適した手法です。このように磁場による刺激には魅力的な特性がありますが、今日に至るまで磁場によって誘起される液晶内の不可逆的で大きな格子ひずみに対する実験的証明はされてきませんでした。

この研究では、外部からの磁場の印加によって、斜方晶の相構造を持つイオン性液晶材料が大規模な構造変化を起こすことを証明しました。構造上の特性のため、この斜方晶の相構造 (明るい色で描かれた相、図 1 左) は、磁場の存在下でこの材料の等方性液体を冷却すると、熱力学的により安定した立方晶構造 (暗い色で描かれた相、図 1 右) へと優先的に変化します。この変化は不可逆的で、材料の性質に劇的な変化をもたらす結果このシステムに記憶効果を与えます。以上の観測結果により、磁場で駆動される不可逆的なスイッチングという新しいコンセプトによって、光磁気デバイスの新たな扉が開かれる可能性が示されました。

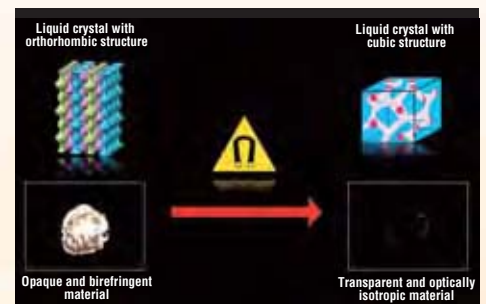


図1 磁界印加前 (斜方晶相、左) および印加後 (立方晶相、右) における 300K での磁気応答性液晶材料の模式図及び偏光光学顕微鏡写真。



図2 5 テスラの磁場下における斜方晶液晶材料の磁気光学応答の時間変化。磁気光学偏光顕微鏡により測定。

参考文献

F. Hajjaj et al., *The 10th International Conference on Materials Chemistry, Manchester, UK, 2011*

## MANA が高評価を受ける

～世界トップレベル研究拠点プログラム中間評価結果～

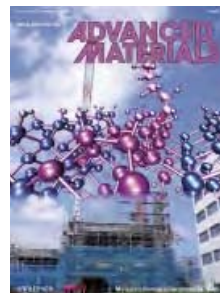
文部科学省より、「世界トップレベル研究拠点プログラム(WPI)」の5拠点に対して行われた中間評価の結果が発表されました。MANAはA評価を受け、カブリIPMU(東京大学)、iCeMS(京都大学)、iReC(大阪大学)とともに、高い評価を受けました。(2011年12月14日)。



WPIプログラム委員会交流会にて。中川正春文部科学大臣(左)と青野正和 MANA 拠点長。

## 「アドバンスト・マテリアルズ」に MANA の特集号を発行

アメリカのワイリー社が発行するアドバンスト・マテリアルズ誌に MANA の特集号が生まれ、2012年1月10日に発行されました。同誌は、材料科学分野では最も影響度の高い雑誌のひとつで、日本の研究機関が同誌に特集を組むのは MANA が初めてです。MANA は拠点発足から4年経って目覚ましい研究成果が輩出してきており、それらをアドバンスト・マテリアルズ誌の特集号としてまとめるに至りました。



Adv. Mater. 2012, 24(2), 141

## 青野正和 MANA 拠点長らが元旦の NHK 番組に出演

2012年1月1日に放送されたNHK BSプレミアム「ナノレボリューション」の第1回放送「“原子”が暮らしを変える」に、青野正和 MANA 拠点長、ジェームズ・ジムゼウスキー MANA サテライト主任研究者、吉川元起 MANA 独立研究者の3人が出演しました。同番組は世界のナノテクノロジー研究の最前線を見ていく内容で、番組内で3人のインタビューとともにそれぞれの最新の研究成果が紹介されました。



原子スイッチの開発について語る青野正和 MANA 拠点長

## つくば医工連携フォーラム 2012 を開催

—医工連携研究から社会還元・産業化へ—

2012年1月18日(水)に、MANAの生体機能材料ユニットは「つくば医工連携フォーラム 2012」を開催しました。総参加者が約180名、県内外からの企業展示が17社、50件を越えるポスター発表があり、活発な議論が行われました。



ポスター賞受賞者と青柳隆夫 MANA 主任研究者 (左から三番目)

## 「科学・技術フェスタ in 京都 2011」に出展

2011年12月17日(土)と18日(日)に、国立京都国際会館において主に高校生や一般の方々を対象に開催された同イベントに、MANA はWPIプログラム枠で出展しました。展示ブースにて、ポスター展示による超高感度センサーの紹介とその実演や、スポーツ飲料を使ったクイズを行いました。センサーの実演には中川文部科学大臣も挑戦されるなど、二日間に渡って参加者との活発な交流が行われました。



高感度センサーの説明を受けられる中川文部科学大臣 (左から3人目)

## 佐々木 高義 MANA 主任研究者、 日本化学会学術賞を受賞

2012年2月8日(木)、日本化学会より平成23年度日本化学会各賞受賞者が発表され、佐々木高義 MANA 主任研究者が第29回学術賞を受賞しました。同賞は、化学の基礎または応用のそれぞれの分野において先導的・開拓的な研究業績を挙げた者に対して授与されるもので、佐々木高義 MANA 主任研究者は、「2次元無機ナノシートの創製と機能開拓」の業績が評価の対象となりました。



佐々木高義 MANA 主任研究者

## MANA 国際シンポジウム 2012

MANA主催の国際シンポジウムが、2012年2月29日から3月2日の3日間にわたり開催されます。2010年ノーベル化学賞受賞の根岸英一教授、1986年ノーベル物理学賞受賞のハインリッヒ・ローラー博士を始め、国内外の著名な研究者による招待講演の他、MANAの研者が最新の研究成果について口頭およびポスター発表を行います。3日間で、11件の招待講演、41件の口頭発表と82件のポスター発表が予定されています。皆様のご参加をお待ちしております(参加費無料)。



詳細はWebサイトをご覧ください。 [http://www.nims.go.jp/mana\\_2012/](http://www.nims.go.jp/mana_2012/)