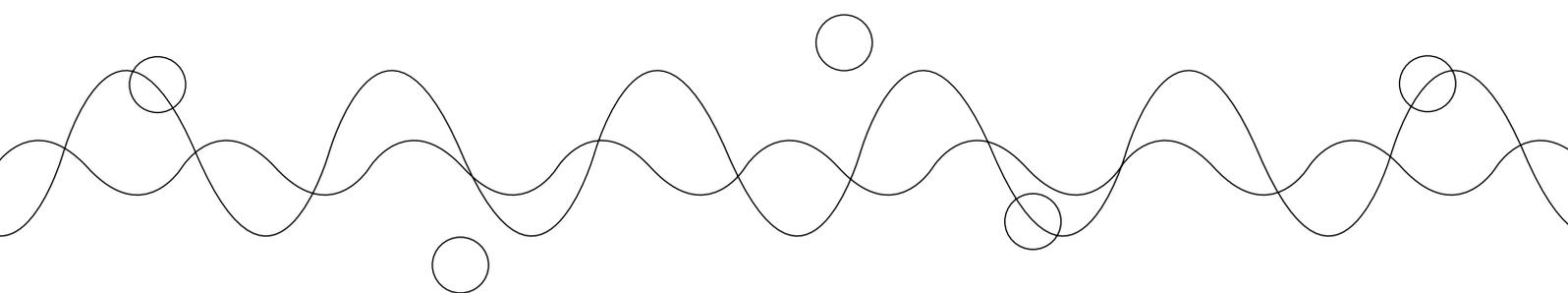


CRDS-FY-2011-WR-12

科学技術未来戦略ワークショップ
「機能性原子薄膜／分子薄膜の創生と展開」
報告書

平成 24 年 2 月 2 日（木）開催



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

目 次

エクゼクティブサマリー

セッション1 ワークショップ開催趣旨	1
1.1 主催者挨拶：田中一宜 (JST/CRDS)	1
1.2 趣旨説明：河村誠一郎 (JST/CRDS)	2
1.3 ワークショップの課題と論点 塚越一仁 (NIMS)	5
セッション2 グラフェン	15
2.1 グラフェンのマテリアルサイエンスと将来展望 吾郷浩樹 (九州大学)	15
2.2 グラフェンのアクティブチャネル応用はあり得るか？ 長汐晃輔 (東京大学)	22
セッション3 無機系機能原子薄膜	28
3.1 無機ナノシート～2次元機能性ナノ物質としての可能性～ 佐々木高義 (NIMS)	28
3.2 原子薄膜機能の電界制御 岩佐義宏 (東京大学)	33
3.3 強磁性超薄膜における磁性の電界制御—磁気メモリの電界書き込み— 小野輝男 (京都大学)	38
セッション4 有機系機能分子薄膜	42
4.1 大環状 π 共役平面分子の平面配位による無機ナノ粒子の機能変換 寺西利治 (京都大学)	42
4.2 二次元物質の合理的デザインへ向けた基盤技術創出 福島孝典 (東工大)	47
4.3 ラダー型環状オリゴマーを基盤とした分子レジスト材料の開発 工藤宏人 (神奈川大学)	52
セッション5 全体討論 (司会：塚越一仁)	
5.1 国際的ファンディング状況について 榎敏明 (東工大)	56
総合討論	59
付録	64
1. ワークショッププログラム	
2. 参加者リスト	

エグゼクティブサマリー

本報告書は、(独) 科学技術振興機構 (JST) 研究開発戦略センター (CRDS) が平成 24 年 2 月 2 日に開催した科学技術未来戦略ワークショップ (WS) 「機能性原子薄膜 / 分子薄膜の創生と展開」に関するものである。

グラフェンを始めとする二次元薄膜が注目を集めている中で、CRDS では広く二次元機能性原子薄膜、さらに機能性分子薄膜まで対象を広げ、現在の最先端の研究開発状況から今後の方向性を考え、その上で重要となる具体的な研究開発課題を抽出することを目的として、上記のワークショップを開催した。

二次元機能性原子薄膜、分子薄膜は、従来の薄膜とは異なる特性・材料・構造によって、新たな機能や従来膜の特性を凌駕する機能を発現することが可能であり、新規デバイスの開発につながることを期待される。以上の共通認識の下、シリコンを中心に進展してきたエレクトロニクスデバイスの微細化、集積化、低消費電力化の限界を突破できる可能性がある技術として、なぜ今原子薄膜、分子薄膜なのか、具体的な研究開発課題、開発手法、予想される成果、社会への波及効果、国外のファンディング状況、などを議論・検討した結果、下記のアウトプットが得られた。

原子薄膜、分子薄膜に注目する理由としては、エレクトロニクス動作に際してのエネルギーロス最小化には、究極的に薄い膜、つまり原子薄膜、分子薄膜が理想的であることが指摘された。特に原子薄膜は薄膜であるが故に電界で外部変調が容易であること、固有エネルギーを有すること、また、異種材料との組み合わせにより新しい機能を発現することも指摘された。分子薄膜は合成可能な自由度の高い系であり、自己組織化、自己形成化する材料である。将来、表面コートや分子レベルの触媒に発展する可能性がある。さらに、様々な産業分野において、元素の希少性や地域偏在に危惧することなく、安価で豊富な元素を用いて従来以上の機能を持つ材料を用いることができれば、産業界にとっても大きな変革をもたらすことも指摘された。

グラフェンに関する具体的な研究開発課題については、層数や形状の制御、ヘテロ化、大面積化、ドーピング技術、転写技術、バンドギャップ制御、界面制御技術などが上げられた。グラフェンの電子デバイスへの応用はかなり難しいが、現在、素子のオン・オフ比や移動度の高さが認識されつつあり、Ge チャンネルや III-V 半導体材料チャンネルと競争できる位置にまで到達していると考えられる。

無機系機能性原子薄膜は様々な種類の膜が研究されているが、2次元性と多様性が両立できる「無機ナノシート」に関しては、いかにオーダーメイドのナノシートを作製できるか、つまりバルク材料では常套手段であるドーピングや元素置換で、機能を極限にまで高める方法の確立が望まれる。また、原子薄膜機能を電界により制御することも重要であることが報告された。原子薄膜は、必然的に上下に異なる物質が存在して初めて機能を発揮する。この新物質を第一原理計算などを利用して機能設計していくことにより、新しい物質科学

や材料工学に繋がる。日本は基本的に材料開発に強く、様々な原子薄膜材料が研究されているが、それらの機能を生かしてデバイスまで持って行くのが不得手であり、このギャップをいかに埋めるかが課題であることも指摘された。強磁性超薄膜の応用として、磁性の電界制御による磁気メモリが提案された。磁気メモリは不揮発で省エネメモリとして期待が高いが、電圧で磁石の向きを変えられることができれば、究極の超低消費電力記憶素子が実現できると期待される。

有機系機能性分子薄膜に関しては、3次元あるいは1次元の系には無いような革新的な2次元性を出せる可能性が指摘された。有機と無機の機能融合による革新的材料を創出するためには電子的なハイブリダイゼーションが必要であること、特に有機と無機のインターフェースの重要性が強調された。一例として、2次元の無機材料に π 電子を挿入することで電子構造を変調し、元素そのものの性質を変える可能性が提案された。この技術を使えば非常に有用なエネルギー関連材料の開発に結びつく可能性がある。有機系材料の特徴の一つは、無機系材料と異なり、分子個々のコンポーネントがデザインできることで、この優れたデザイン性を活用して新機能を発現させることが可能である。例えば高分子系では自己組織化によって構造を形成するが、そのドライビングフォースは、一つの分子の中に親水性の部分と疎水性の部分とを併せ持つ両親媒性である。このような合理的デザインを行うことで、分子レベルの触媒やセンサーなどの開発につながるということが指摘された。有機系薄膜の一つの応用例は極端紫外線 (EUV) 露光に使用する次世代レジストであるが、日本の大学ではレジストの研究者が大幅に減少しつつあることが危惧される。高価なEUV用の露光機がなかなか使用できないことが原因の一つである。

グラフェン関係の海外のファンディング状況については、日本に比べて活発なことが報告された。まず、シンガポールではグラフェンセンターが設立され、US \$ 100M 程度の予算が投じられている。米国は個別研究が中心であり、いろいろなところから出てくる独自の成果が、総体として米国の科学技術を支えている。中国は、「973」というグラフェンの国家プロジェクトがあり、US\$20M - 30M 程度のファンディングが行われている。欧州では個々の国のプロジェクトに加えて、2009年に22カ国のEUグラフェンプロジェクトが開始された。また、FP7の中で検討されている「Graphene Flagship」というプロジェクトが成立すれば、巨額の予算が投じられる可能性がある。

一方、日本のグラフェンに対する投資は低調で、かつてカーボンナノチューブの研究で世界をリードしてきた面影は無く、この分野における国際的な貢献も低いことが指摘された。ただし、日本は材料研究の分野では世界でもトップレベルであり、機能性原子薄膜、分子薄膜の研究は、物理と化学のインタラクションが核心であることを考えると、今後日本の取り組みとして、周辺分野・応用分野との連携を基軸とし、さらに人材育成や国際融合も視野に入れた大きな国家プロジェクトを設立すべきであることが提案された。このようなプロジェクトの下で、原子薄膜・分子薄膜の研究開発が進展することにより、最終的には新規材料を使った超低消費電力エレクトロニクスデバイスが実現し、今後の持続性社会実現に強く求められる、省エネルギー、省資源が達成されることになる。

以上の様に、今回のワークショップのテーマは非常に先進的であり、正に国内外で研究が沸騰し始める状況にある。今後日本がこの分野で先導的な役割を果たすためにも、早めに大きな研究投資を実施することが望まれる。

今回のワークショップでの議論を踏まえ、JST 研究開発戦略センターでは、今後国として重点的に推進すべき研究領域、具体的な研究開発課題を検討し、研究開発の推進方法を含めて、戦略提言として関係府省へ提案する予定である。

セッション1 ワorkshop開催趣旨

1.1 主催者挨拶

田中一宜

(JST/CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット 上席フェロー／WS オーガナイザー)

昨年の東日本大震災・原発事故、最近の31年ぶりの貿易赤字国報道、さらには Scientific Citation でも21位と、日本の低落傾向が数値的に明らかになりつつある。世界的にも多くの難題があり、これを乗り切っていくためには将来への明確な展望を持つ必要がある。このワークショップ(WS)もそういった背景を意識しながら実施したい。

CRDSではこれまでこの種のWSを何十回と開催してきたが、今日のWSでは議論の中心となるメインプレイヤーの年齢が40歳台前半と画期的に若い。これは、将来の重要な問題を解決していくために次世代を背負って立つ若い方々に期待するからである。

したがって、今日は純粋なサイエンスに近い議論をしながらも、社会の中での科学技術の役割を念頭に置き、またグローバルなスケールで物を考えていただきたい。また、このような時代に導いてきた責任のいくばくかを背負っている(私も含めた)シニア世代の参加者の方々には、厳しくも **encouraging** なコメントをお願いしたい。

1.2 趣旨説明

河村誠一郎

(JST/CRDS ナノテクノロジー・材料ユニット フェロー / 二次元物質チームリーダー)

今日のワークショップ（WS）の主催者である研究開発戦略センター“CRDS”の活動内容について、図 1.2.1 に示す。重要な任務の一つが、JST 内の“CREST”や“さきがけ”の実施部門と協力をしながらの、戦略プロポーザルの策定である。CRDS が作った戦略プロポーザルは、文科省、内閣府、関連府省に提示されるが、例えば文科省で認められると、『戦略目標』として定められて JST の方に降りてくる。JST では、この戦略目標を具体化するために、戦略的創造研究推進事業部門で CREST やさきがけ、ERATO といったプロジェクトを設立し、総括を選んで運営していくという仕組みになっている。

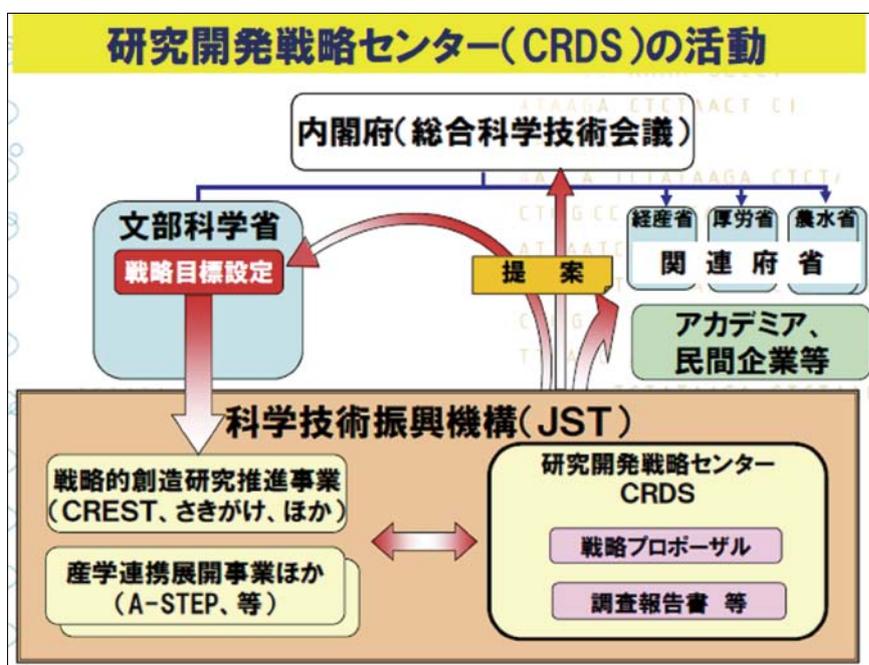


図 1.2.1

私ども二次元物質チームは、田中ユニット長の率いるナノテク・材料ユニットのメンバーが中心となってグループを組み、今年 1 年、本日の参加者のご協力も得て、グラフェンを中心とした 2 次元薄膜に関する調査・検討活動をおこなってきた。このチームで機能性原子薄膜関係の戦略プロポーザルを本年度中に作成して、文科省等に提示する予定であり、本日の WS の最大の目的は、この戦略プロポーザルの策定にあたって有益な情報を提供していただくことにある。

次に、WS のテーマとして、グラフェンを中心とした原子薄膜を選んだ背景を説明する。CRDS の各ユニットは、担当分野を有識者による徹底的な議論によって「俯瞰」しているが、下の図 1.2.2 は、我々のユニットが 3 年前に開催した「ナノテクノロジー・材料分野俯瞰 WS」で抽出された重要課題をまとめたものである。この中のナノエレの中に“カーボンナノエレクトロニクス”が出てきている。さらにノーベル賞受賞によりグラフェンの

注目度が上がったこともあり、CRDS として『二次元物質チーム』を設置し、戦略プロポーザルへ向けて調査、検討活動を進めることになったわけである。



図 1.2.2

例えば、本日の参加者の一部のご協力も得て、昨年の7月から10月にかけて18回ほど、セミナー形式の講演会を行い、主にグラフェン関係の議論をおこなってきた。

このようにチーム活動の対象としてはグラフェンが中心であったが、本日のWSの計画にあたっては、塚越コーディネーターに相談した結果、「グラフェンよりも、もう少し先を見て、広く、機能性原子薄膜、さらには機能性分子薄膜まで含めたWSにしてはどうか」ということで、本日のWSのタイトル・構成に至った。

最後に、本日のWSあるいはこれから作成する戦略プロポーザルの対象と、既存の関連プロジェクトの関係を考察するために、横軸に“微細化・高速化”、縦軸に“低消費電力・多機能化”を取った図を示す(図 1.2.3)。本日の議論の対象領域“機能性原子薄膜・分子薄膜による新デバイスの創成”は右上に位置し、More-Mooreを徹底的に追求しようとするJST CREST 渡辺領域や、どちらかというともMore-than-Mooreを目指したCREST 曾根領域とは重なっていない。



図 1.2.3

1.3 ワークショップの課題と論点

塚越一仁

(NIMS 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 主任研究者／WS コーディネーター)

本日のWSのコーディネーターとして、JSTの担当チームとの議論を踏まえた「ワークショップ(WS)の狙い」を図1.3.1に示す。まず、産業、特に難しい局面に入っているエレクトロニクスに対して、ナノテク／ナノマテリアルからアイデアを見出したい。従来、US主導、改良型のロードマップがエレクトロニクス産業発展を担ってきたが、ロードマップ至上主義に対して、ナノマテリアルからの新たな視点を見つけ出すことが今後の発展には不可欠と思われる。これは、次世代の材料研究に関する物理・化学・工学の各々の発展につながるだけでなく、ナノマテリアルとナノエレクトロニクスの相互発展、ならびにJSTとNEDOの共存共栄にも有益と思われる。極限薄膜厚のグラフェンが、バルクとは異なる移動度、電子状態等の非常に面白い新規特性を示しているが、グラフェンに限らず、原子薄膜や分子薄膜などの発展性や拡張性を含め議論したい。さらに、これらの研究成果の発現タイミングも検討したい。

本日議論する「機能性原子薄膜／分子薄膜」は、極限的なネットワークを作る最も面白いナノマテリアル系と言えるのではないかと思う。

ワークショップ“機能性原子薄膜/分子薄膜”の背景

本ワークショップの狙い

JSTからの期待

「日本の次世代発展に拘わるナノエレクトロニクスに対して、
ナノマテリアル/ナノテクノロジーとしてアイデアを出して欲しい」
飛躍的な先端研究が欲しい。

科学技術研究背景

エレクトロニクス産業を担ってきたロードマップはUS主導であり改良開発型。
新たな視点を見つけ出で欲しい

原子膜ホット領域

- ・グラフェンによって発掘された「極限薄にて、バルクと異なる驚異的特性を有する新材料系」の発展性をまとめて欲しい(含むグラフェン)
- ・関連系からの拡張性を議論して欲しい
- ・どのようなタイミングで何が出来るかを示唆して欲しい

➡ “現在、地上において最も興味深いマテリアル系”
“機能性原子薄膜/分子薄膜”へ大きな期待

・意義、研究内容、産官学連携、国内外協力の議論ができれば、本日の成果。

図 1.3.1

JSTからの挨拶でも触れられたように参加者の若さが、本WSの特徴であり、研究の最前線からお集まりいただいている。大変すばらしい先生方の最新の機能性原子薄膜／分子薄膜をご紹介いただき、その有用性、発展性などについて、熱く忌憚なき議論を期待している。

私は、図1.3.2に示すように、昨年3連地震は筑波で、また博士課程終盤の17年前

には大阪でと、二度の大震災を経験した。これらを通して、非常に大きな両者の差を感じた。前回は電気が途絶えて TV が役に立たず、ラジオを聴いて情報を待ち受ける他は何もできなかった。しかし今回の地震では、twitter やインターネットによって多くの情報が得られ、適切な状況判断と不安解消に大変効果的であった。また、17年前は紙上に印刷してファイルしていた情報が、地震によってすべて散乱し大混乱となったが、今回は17年間で増え続けた全てのデータさえも小さなハードディスクで常時バックアップしていたために失ったデータは全くなかった。これらは17年間のエレクトロニクス発展の恩恵である。このような恩恵は私個人だけでなく、広く社会を支えたと推測出来る。つまり、エレクトロニクス発展と情報化の方向は、更に発展することがあっても止まることはないだろうと思われる。



図 1.3.2

情報化のニーズは今後も質的（機能、接続等）、量的（グローバル化）、共に増え続ける。一方で、省エネルギー・省資源の観点から、我々が短時間での確に情報にアクセスするための“エレクトロニクス”は益々重要になる。つまり、情報の増大が続く限り、エレクトロニクスの発展も必須となる。しかし、適切な制御が必要である。物理量としてエントロピーという概念があり、情報をなぞらえて考えてみる。エントロピーの無秩序増大の抑制には“Negentropy”という概念も取り入れるべきとの指摘（1943年 E.Schrodinger）がある。これに対して情報の無秩序増大に対しては、エレクトロニクスは情報の内容を整理と選択だけでなく、情報の流れの適切化や制御・抑制にも役に立つはずである。つまり、今後の情報増大にはエレクトロニクスの発展が無くてはならない。このような制御によって、結果的に情報処理に伴うエネルギー消費を適切化し、エネルギーロスをも低減できるようになるだろう。このような情報エレクトロニクスの相互発展によって、社会は更に便利になるはずである（図 1.3.3）。

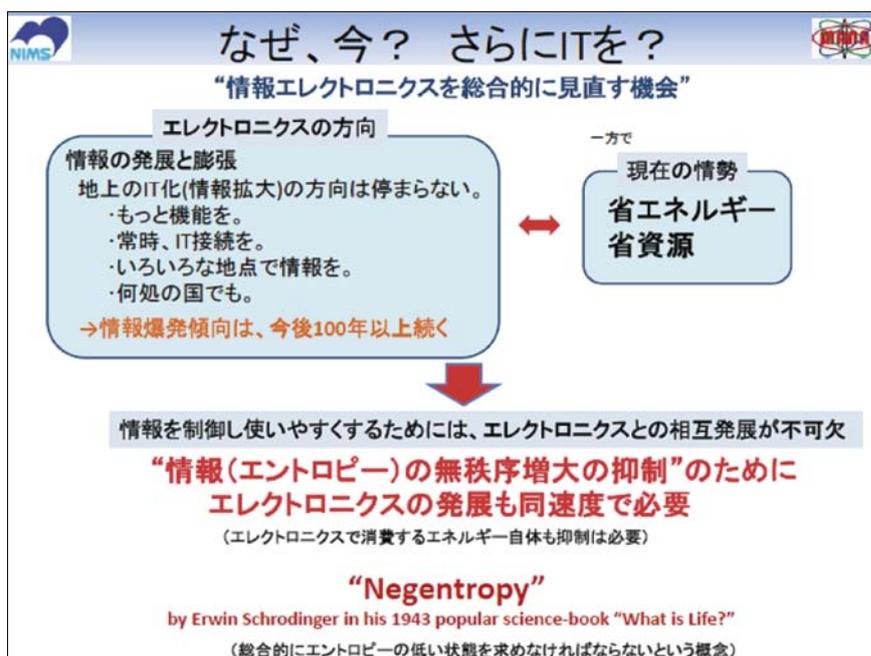


図 1.3.3

エレクトロニクスの発展にはロードマップに即した絶え間ない改良研究・開発が機能していたが、新たな飛躍は困難な領域に達している。この問題を別の視野から取り組むために、本WSでは「究極系への挑戦」について議論したい(図1.3.4)。ロードマップとは異なる視野で、物理的に接することが可能な“最も先端を見てみませんか”という提案である。もちろん結果的にはロードマップ開発に対して研究方向を共有することができるアイデア・技術・材料の萌芽となるはずである。

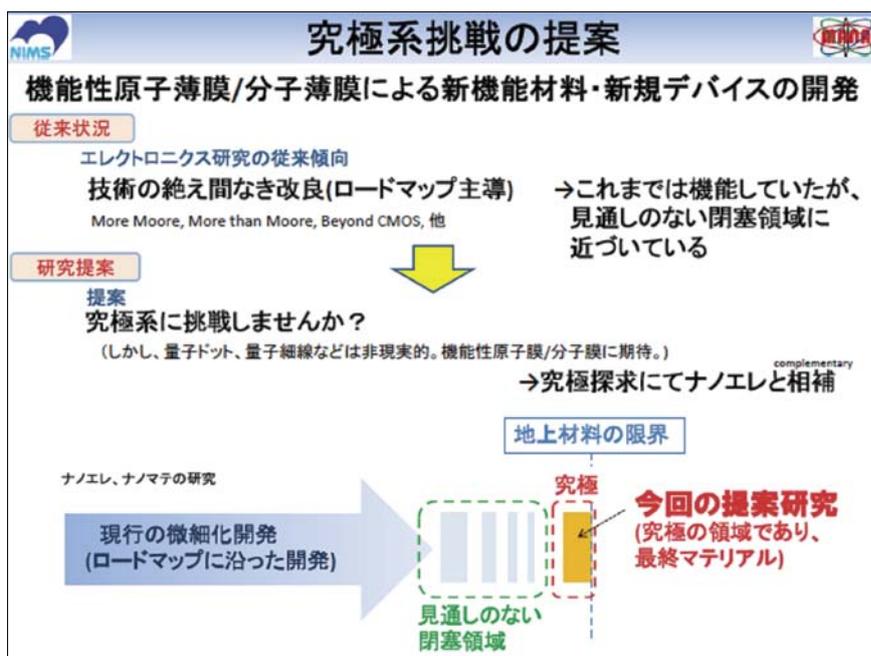


図 1.3.4

ブーリアン系、ノイマン系のエレクトロニクスで最低エネルギーで動くスイッチの速度を考えると、物質が物理的に動くよりも電荷/スピンを最小量で用いる方が有利である(図1.3.5)。

なぜ、原子膜/分子膜？
“Functional atomic/molecular film electronics based on negentropy design”
「個々のFunction, 個々のシステム, 社会の中のエレクトロニクス」を総合的に検証するべき
(物理、化学、工学、社会が協力して対処すべき課題)

究極への取り組みの必要性

- ・ブーリアン系エレクトロニクスを前提としたとき、最低エネルギーでのスイッチを駆動するには、**最小限の電荷/スピんで駆動するシステム**が理想。 **吾郷、長汐**
- ・エレクトロニクス動作に際してのエネルギーロス最小化には、究極的に薄い膜。
→原子膜半導体/原子膜絶縁体など。 **佐々木、塚越**
- ・チャンネル最短化。
- ・さらに次の概念では、電荷不要のスピนว、トポロジカルインシュレータ。 **小野、岩佐**
- ・出来る限り不偏材料の使用。可能であれば、グラフェンを構成するカーボン。
(化学的なアプローチとの共栄システムの探求が必要。) **寺西、福島**
- ・システムを作るための次世代材料も必要。 **工藤**
- ・リサイクル可能、もしくはリサイクル不要な材料を考えなければならない。

必要な関連研究

- ・エレクトロニクスによる装置全体のエネルギー抑制も必要。(回路)
- ・エレクトロニクスによる社会システムのエネルギー抑制も必要。(社会システム)

↓

基軸概念“negentropy design”を目指し、個々や総合の究極を探求！

図 1.3.5

さらにエネルギーロスを最小化するには究極に薄い膜が最良であり、短チャンネル化も効果がある。将来的には、スピนว波やトポロジカル絶縁現象などの系も有効になる。また、地上の何処でも作れる材料を使うことができれば、材料の移動のための余計なエネルギーの消費も減る。たとえば、もし、カーボン等を中心とした化学的なアプローチと共栄できるシステムや、リサイクル可能あるいは不要な材料が見つければ、さらに効果は大きい。実効的な取り組みとするならば、回路や社会システム等の研究と学際的に取り組むべきであるが、限られた時間でのWSであるために、今回はナノ材料と伝導にフォーカスしたい。

そこで、「一番薄いスイッチング系のための材料」を吾郷氏と長汐氏、「原子膜を重ねる、原子膜をうまく使う」という研究を佐々木氏と私が紹介する。また、「スピนว系とトポロジカル絶縁系」に関しては小野氏と岩佐氏、「化学的な材料アプローチ」に関しては寺西氏と福島氏、「原子素子を作るために不可欠なレジスト」については工藤氏に紹介をお願いしている。

ここで「なぜ原子膜/分子膜が究極か？」を整理したい。究極系に関する従来の取組みとしては、量子ドットやナノワイヤーがある(図1.3.6)。

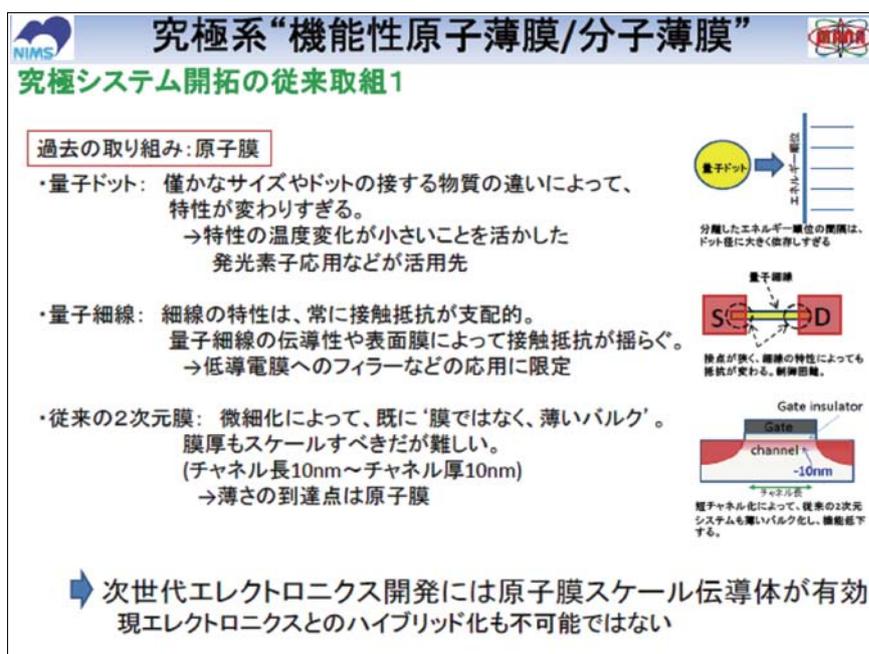


図 1.3.6

しかし、“量子ドット”は僅かなサイズの違いや、接する物質との界面具合によって特性が変わり過ぎるため、演算素子などへの適用よりも、発光材料などが適していると思う。“量子細線”は、接触抵抗が高過ぎ、接触抵抗デバイスになってしまう。また“従来の2次元膜”はソース・ドレインチャンネルが短くなった時にチャンネルもスケールすべきだが、これは容易ではなく、薄膜化の極限を先取りすると原子膜になる。したがって、次世代エレクトロニクスのためには「原子膜スケールの伝導体」が研究対象となる。現在のエレクトロニクスのハイブリッド系も可能である。

次に分子膜に関して考える。まず“孤立分子”による分子エレクトロニクスの研究も盛んだが、分子サイズが小さ過ぎるために、スイッチングのために外部入力電界をかけるゲートと分子との静電容量が小さ過ぎて外部入力での伝導変調が困難である(図 1.3.7)。“分子集合膜/堆積膜”は、周知のように液晶や有機ELなどが発展してきた。しかし、個々の分子間のネットワークには深い検討はなく、ネットワーク化によって有用な新しい材料系を創り出せる可能性があり、検討したい。

究極系“機能性原子薄膜/分子薄膜”

究極システム開拓の従来取組2

過去の取り組み: 分子膜

- ・孤立分子: 機能を有する分子・超分子などは多々合成されたが、、、
→エレクトロニクス応用に向けた分子は、
サイズが小さすぎるために、
エレクトロニクス機能の追求は極めて困難。
- ・分子積層膜: 液晶や発光材料としての機能材料として有用。
→新たな方向性の探索が必要。
- ・ポリマー: ポリマーの伝導性はホッピング等の伝導機構に基づき、
制限される。(厚い保護膜用などには有効)
ネットワーク化できれば、新しい方向性が拓く。

➡ 2次元ネットワーク創生による新機能材料系の開拓
(新規原理レジスト、導電材料など)

図 1.3.7

以上のように本 WS テーマは非常に先進的であって、大きな研究投資が必要な分野と考える。しかし、国外でも研究が沸騰し始める兆しもあり、海外の動向を後ほど榎先生にお話しいただく予定である (図 1.3.8)。研究協力体制に関しては、複数機関の連携はもとより、上述のロードマップ的アプローチの方々との連携や、国際融合も視野に入れるべきである。

原子膜/分子膜に関しての広い研究協力体制の提案

- ・原子膜/分子膜の機能発現探索
- ・原子膜/分子膜の作製技術開発
- ・原子膜/分子膜の展開探索

↓

**機能原子膜/機能分子膜の研究は、世界で沸騰が始まる直前。
今なら、世界をリード出来る研究を推進できる。**

→榎先生から、他国状況ご紹介

機関間連携は前提。従来開発とも連携。
もはや、一機関だけの単発研究では、
世界の進展に追随するだけで力尽きる。
戦略的に連携するべき。

国際連携も視野。
もはや一国だけで解決をもとめるべきでなく、
他国のアイデアを融合するべき。

稲作(6000年前から) 文字(1500年前から) など、国際的技術導入と融合化は日本のお得意

図 1.3.8

原子薄膜と分子薄膜の各々に特有の優位性を、図 1.3.9 に掲げる。原子薄膜は、原子スケールの膜厚のみであるにも拘わらず、意外に電流が流れる。さらに、薄膜であるが故に、電

界が透過し外部入力に対して伝導特性を変調することができる。また、異種材料との組み合わせにより物質特性が変わり、新しいシステムができる等の新規性がある。分子薄膜は、合成可能な自由度の高い系であって、自己組織化、自己形成化する材料である。表面コートや分子レベルの触媒などに発展する可能性もある。

現在のブーリアンロジックに基づくエレクトロニクスを想定する限り、原子／分子スケール薄膜等の次元の低い領域は、量子ドットやナノワイヤーも含め、現時点の科学技術として最も挑戦的で最も可能性があり、現時点では最もやりがいのある対象で、今、取り組むべき分野と言える。

新薄膜=機能性原子薄膜/分子薄膜

原子膜に特有の優位性:
原子厚でも素子应用到十分な電気伝導を有し、移動度が極めて高い材料もある
原子薄膜のため電界が透過し、外部変調が可能(金属/半導体の従来概念の新展開)
外部電界や膜厚により特有のエネルギーバンド構造を形成
異種原子薄膜の積層化で、新たな伝導システムを自在に設計できる
新規材料物性分野を創出できる
光学的透過性や物理的柔軟性に優れている

分子膜に特有の優位性:
分子の自在合成
分子間や分子/基板との相互作用による自己組織化/自己形成化
分子膜を介した異種材料間の接合
分子膜を用いた次世代レジスト材料
分子膜を用いた低摩擦表面形成(表面離型剤など)
分子膜レベルの触媒

今回の提案研究
現行のエレクトロニクスを前提とする場合、
本提案(機能性原子膜/分子膜)領域は“Final material領域”である。
他の方向性(ロジック): ブーリアンに替わるアーキテクト発明が必要

図 1.3.9

以下では、上述の提案の背景となる私の研究経緯を紹介する。

まず、GaAs系の二次元電子系(1,000,000cm²/Vs)でバリスティック伝導を研究し、単電子ロジックで超低消費電力素子の研究を行った。160個の電荷を1パケットとしてロジック動作を実現したが、このような究極低電力(粒子系)素子は外部C-MOS系電流系とのマッチングが非常に悪いというデメリットに気付いた(図1.3.10)。

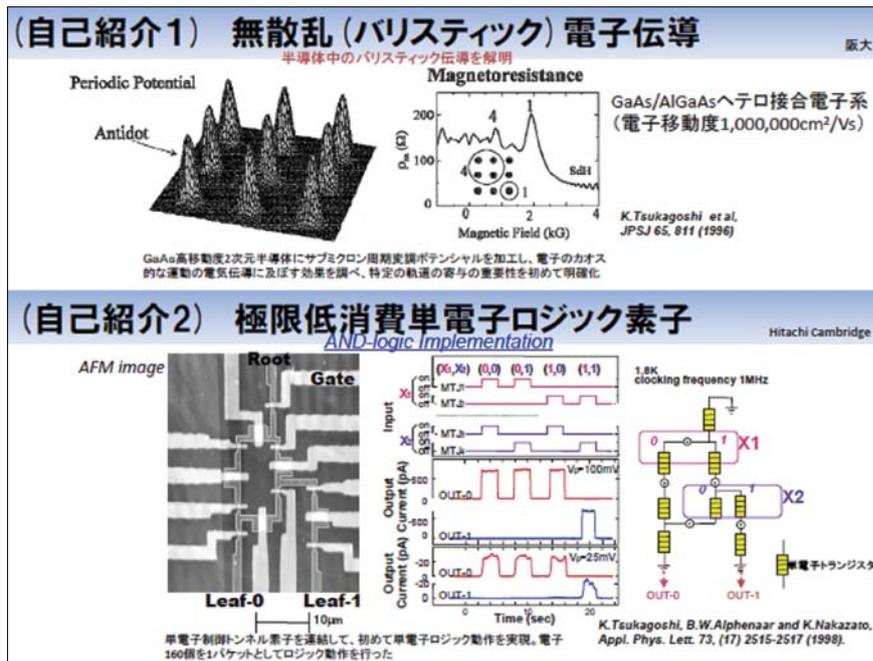


図 1.3.10

また、図 1.3.11 のように、ナノカーボン系にも一通り取り組み、広く問われる接触抵抗問題や、これまでの半導体系とのマッチングなどを検討し、共同研究を続けている。

(自己紹介3) ナノカーボン電気伝導			
Dimension	0D	1D	2D
Material	Fullerene 	Carbon nanotube 	Thin graphite film
Contact resistance	Tunneling (very high)	Tunneling/Ohmic? (high)	Ohmic? (relatively low)
Gating effect	poor	○	○
Additional process	×	△	◎
	2004	1999-2000	2008-Present

図 1.3.11

有機トランジスタ (図 1.3.12) の研究や、100°C以下での革新的ガラスインプリント (図 1.3.13) などの研究を通して、様々な技術開発や議論を産業界の方々に行わせていただいた。

この様な様々な経験から、次世代材料への産学官の連携、物理・化学・工学の連携によって新材料を見つけ出す必要があると思っている。

物理・エレクトロニクス・化学などが学際的に協力することで初めて実現するであろう

新しい系の面白さと有用さは疑いようがないと信じている。

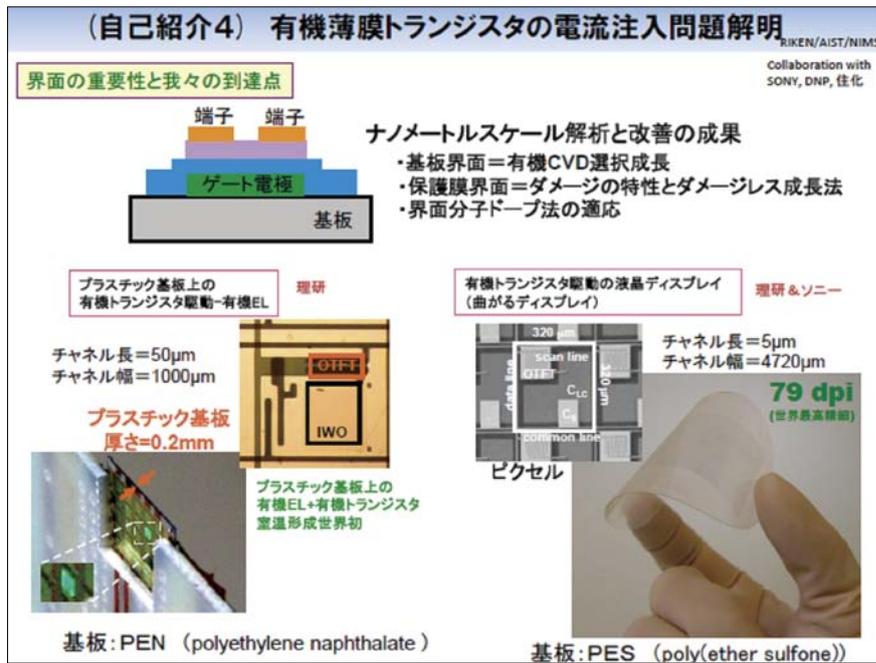


図 1.3.12

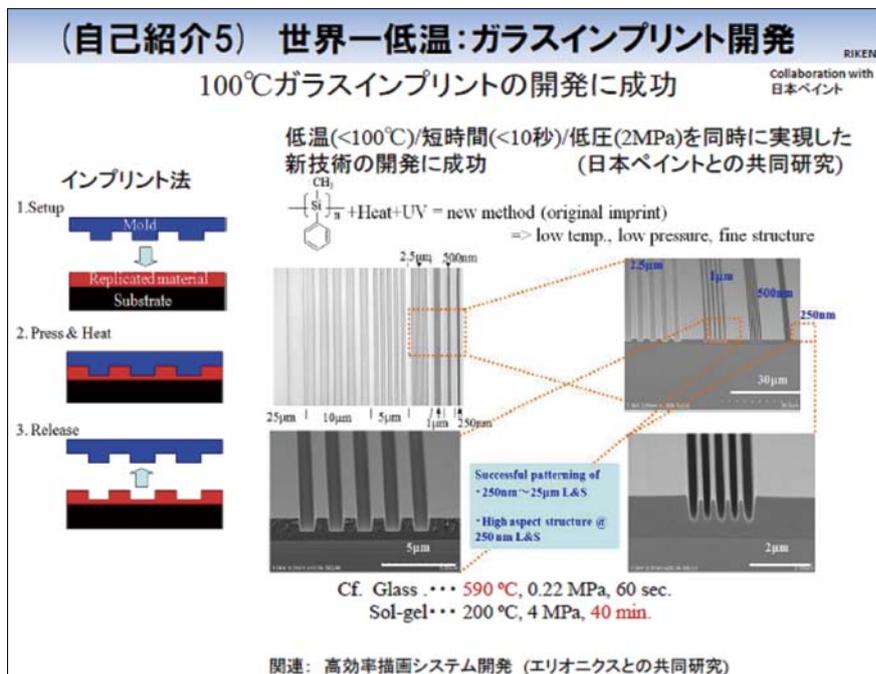


図 1.3.13

最近の研究では、グラフェンに取り組んでいる。電界制御をしたバンドギャップ制御、ナノリボン系や、原子薄膜でのエサキダイオード、原子薄膜 Inverter、原子薄膜トンネル FET など、「グラフェン及び原子薄膜」である (図 1.3.14、図 1.3.15)。さらに、各種原子薄膜系を使った原子膜トランジスタに取り組んでいる (埼玉大上野先生と共同研究)。これは、絶縁性原子膜や、半導体原子膜を重ねて、原子膜間の相互作用を利用して新材料

システムを作ろうとの試みである。原子薄膜系材料には、磁性、誘電、超伝導といろいろな特性を示すものがあるので、新しい材料展開が期待できる。

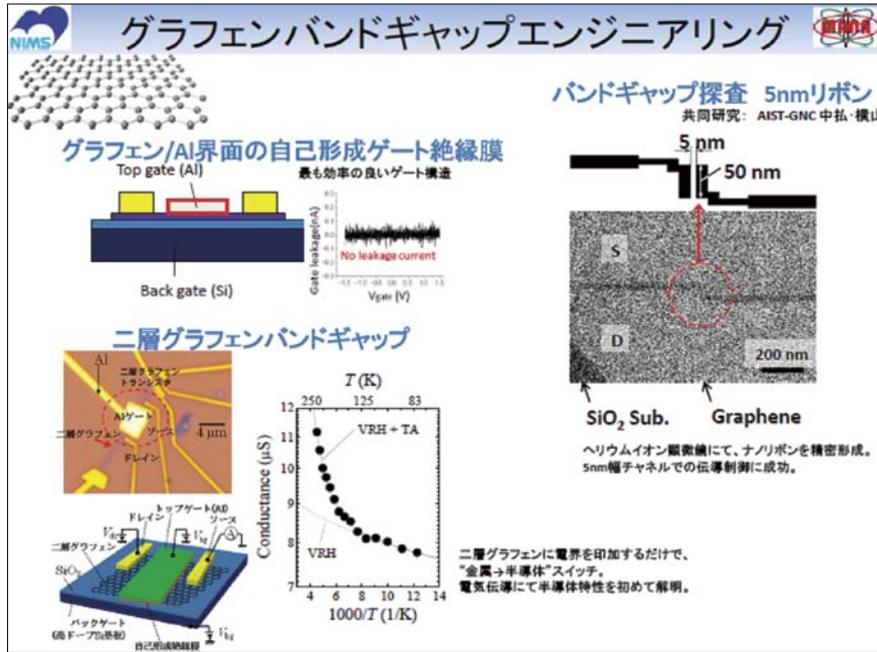


図 1.3.14

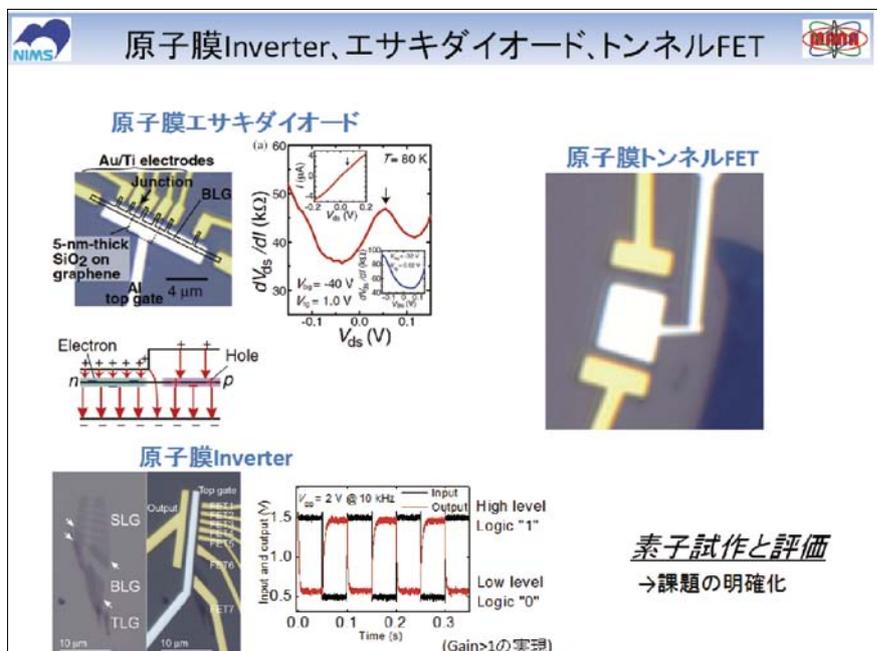


図 1.3.15

セッション2 グラフェン

2.1 グラフェンのマテリアルサイエンスと将来展望

吾郷浩樹（九州大学先導物質化学研究所 准教授）

現在、有機デバイスの研究が盛んに行われているが、カーボンを用いたデバイスは、その移動度の高さなど非常に魅力的であり、シリコンやゲルマニウムを超えるような移動度がカーボンナノチューブやグラフェンで報告されている。そのような優れた特性を持つナノカーボンを、エレクトロニクスに応用したいと考えている(図2.1.1)。そのためには、カーボンナノチューブはカイラリティーや直径、そしてグラフェンでは層数やエッジをコントロールすることが重要である。グラフェンは移動度だけでなく、機械的なフレキシビリティや光透過性が高いこと、そして天然グラファイトが非常に安価で入手できるというメリットがある。

デバイスの観点から、グラフェン研究は2つのアプローチがある。ひとつはナノエレクトロニクスへの展開で、高速、集積化である。もうひとつは、マイクロエレクトロニクスへの展開で、大面積で安く、透明・フレキシブルに作るということである。これら2つのアプローチでは、いずれも高品質のグラフェン、欠陥のないグラフェンが必要となる。そこでまずグラフェンの作製方法について述べる。最初にグラフェンを発見したマンチェスター大のグループは、グラファイトをスコッチテープで剥離しシリコンの上に付けるという“機械的剥離法”で作製した。この方法で作ったグラフェンは結晶性は高いものの10ミクロン程度の小さなサイズしか得ることができない。

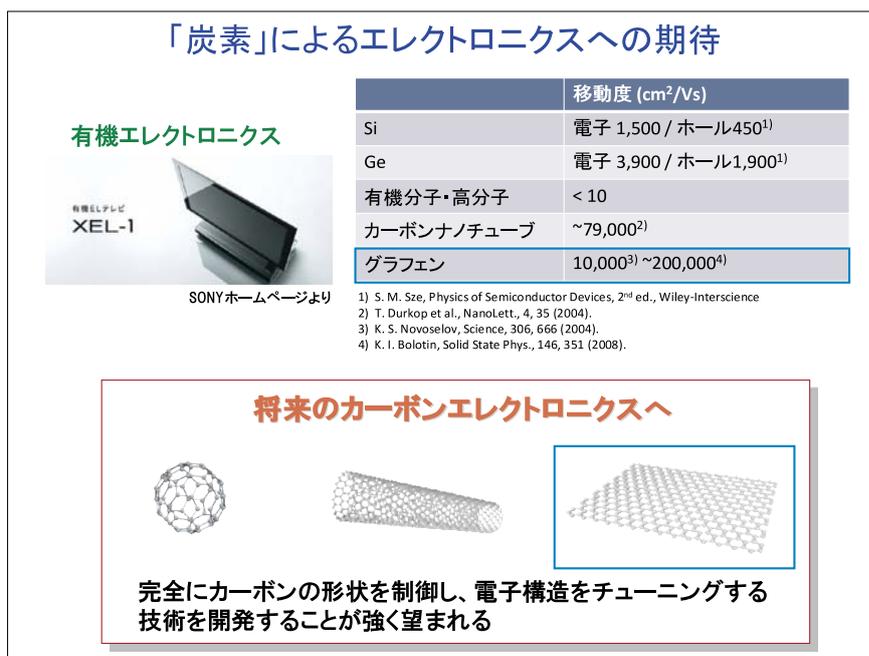


図 2.1.1

一方、SiCの熱分解法や酸化グラフェンの還元という方法があるが、それぞれ図2.1.2に示す問題点がある。2008年末頃からCVD法が注目を集めるようになり、膜の結晶性、均一性、サイズ、コスト、いずれの点においても優れた特性が得られている。

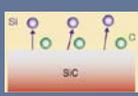
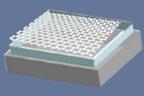
	機械的剥離 	SiCの熱分解 	酸化グラフェン 	CVD 
膜の結晶性	◎	○-◎	×	○
膜の均一性	×	○	△	○
膜のサイズ	×	△	◎	◎ 2008年末から活発化
コスト	○	×	◎	○
利点	簡便なのに高結晶	SiCの上にデバイスを作れる	安く大面積に作製可能	低コスト 大面積 今後のポテンシャル
問題点	制御できない	高価 均一性は不明	欠陥が多く、理想的なグラフェンからは遠い	金属触媒と転写が必要

図 2.1.2

CVD法について以下に説明する(図2.1.3)。約1,000℃の高温の炉の中に金属触媒を置き、そこにメタンを注入すると金属触媒の上でメタンは接触分解を起こす。その結果カーボンが表面に残りグラフェンとして膜となる。この金属触媒は重要な役割を果たし、炭素溶解度の高いNiでは部分的に厚さが異なる一枚の膜ができるのに対し、低い溶解度のCuではきれいな単層のグラフェン膜ができやすいということが既に分かっている。その理由はNiでは炭素原子が中まで進入してしまい、炭素析出時の厚さが制御できないのに対し、Cuの場合には炭素がほとんど溶けこまないため表面でグラファイト化が進むからであると言われている。この知見を応用したのが2010年の6月に報告された韓国の研究グループの論文である。CVD法によりCuホイルを使って30インチという大きなグラフェンシートを作り、それをRoll-to-rollで転写したというものである。彼らは、ITOは3-4%のひずみで折り曲げるとシート抵抗が悪くなるが、グラフェンはこの程度では抵抗値は変わらないことを示し、グラフェンが折り曲げ可能で透明なデバイスとして高いポテンシャルを有すると提案した。

大面積のグラフェンも実際には多結晶のグラフェンの集まりになっている。そのような結晶を観察する方法が、1年前にコーネル大学のグループから報告されている。TEMの回折像から、グラフェンが1ミクロン程度の小さなドメインから構成されているということが示された。その一つの理由は、従来は多結晶の金属触媒を使っていることである。このため、グラフェンの向きが違ったものができるしまう。

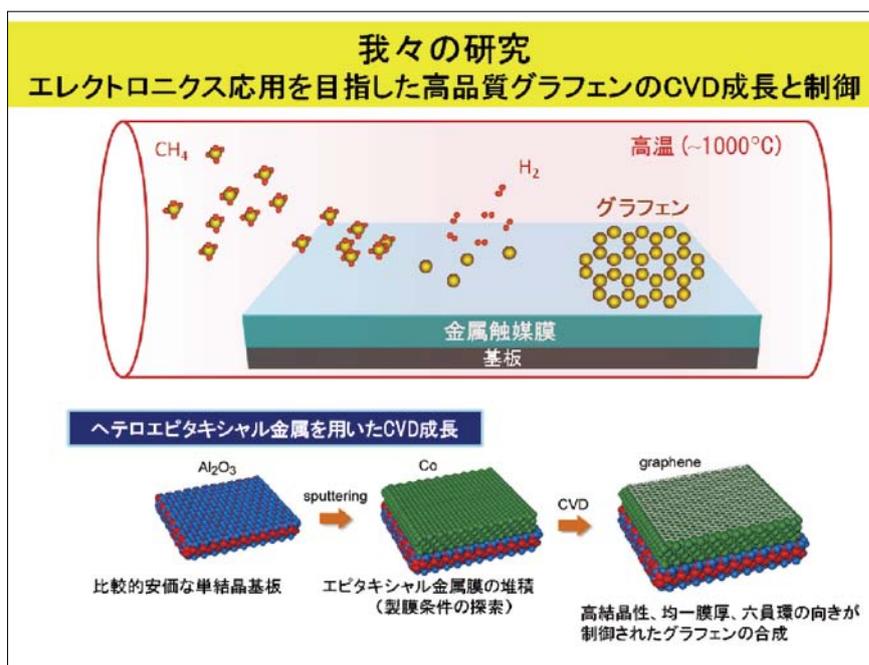


図 2.1.3

そこで私たちは、図 2.1.3 のようにヘテロエピタキシャルの金属をつけ、高結晶性・高配向のグラフェンを作ろうという試みを行っている。その結果を図 2.1.4 に示す。通常のニッケル触媒を使うと厚さの違いができるが、サファイアの上の結晶性の高いコバルトを使うときれいな単層のグラフェンができるようになる。TEM の断面図で一層のグラフェンができているのが分かる。従来、困難とされていた Co や Ni のような高い炭素溶解度を持つ金属でも、きれいな単層グラフェンができるということを見出した。

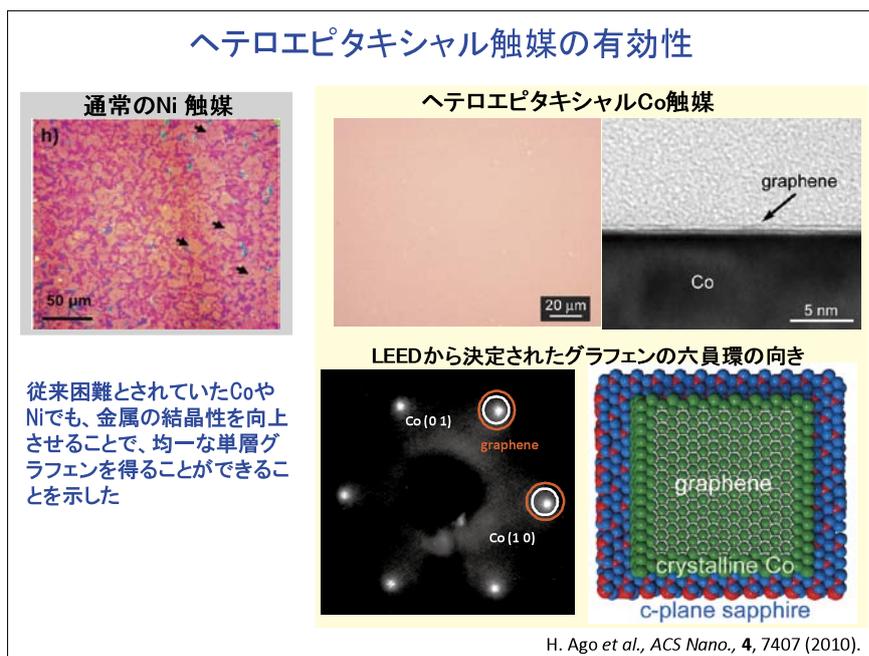


図 2.1.4

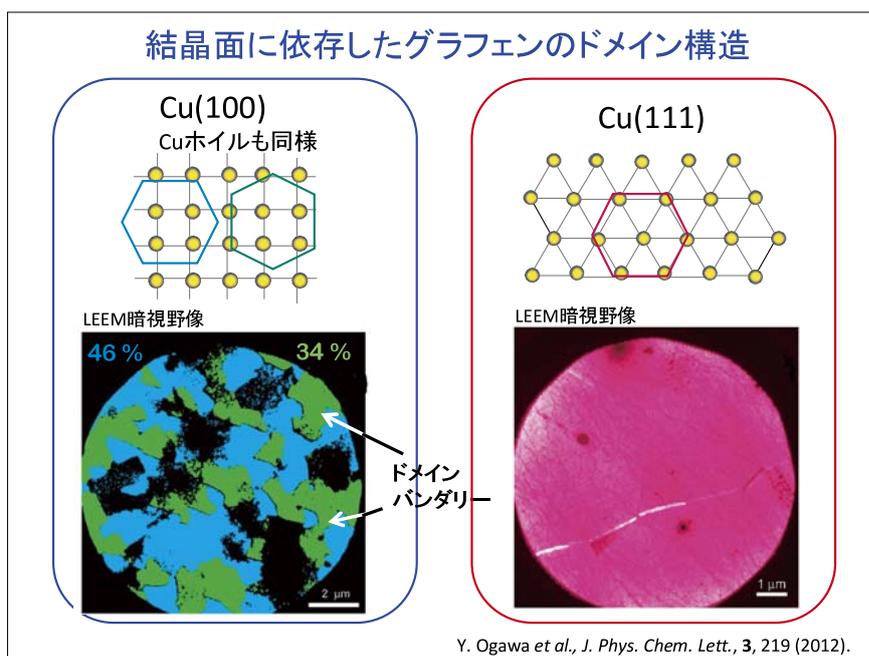


図 2.1.5

ここで重要な点はその六員環の向きである。LEED と呼ばれる表面の電子回折像で調べると、きちんとコバルトの格子とグラフェンの格子が揃っていることが分かった。現在は、そのドメイン構造をさらに詳細に調べている。図 2.1.5 はヘテロエピタキシャルの Cu 金属触媒上に合成したグラフェンを、LEEM という特殊な顕微鏡で観察したドメイン構造である。広く使われる Cu ホイルは通常 (100) 面の正方形の格子を持っている。Cu (100) の場合、図に示すようにグラフェンの六員環は必然的にこのような 2 つの方向を持つため、マルチドメイン構造になってしまう。一方、Cu (111) を使うとグラフェンの六回対称性とマッチするためにグラフェンの方向が揃い、ドメインが巨大化しているように観察される。現在は、ドメインのバンダリーがどのようになっているかを検討しているところである。

我々は 1 年半ぐらい前に高品質なグラフェンをつくる技術を開発した後、日本の研究開発に貢献するため、ベンチャー企業を通じて 1cm^2 の基板で 10 万円程度の価格で販売することを試みた。これまで数十枚が販売され、大きなニーズや関心があることが分かっている。このような試みは、ノーベル賞の後の新聞でも紹介され、今後九大 TLO を通じて正式に販売を行う計画である。さらに昨年の 2 月から最先端・次世代研究開発支援プログラムにより、グラフェンの半導体応用に向けた研究を行っている。グラフェンはキャリア移動度が非常に高いもののバンドギャップをもたないので、グラフェンを半導体として活用するにはバンドギャップを開く必要がある。その解決方法としてグラフェンをナノリボン化したり、二層グラフェンを選択的に作るなどの研究を進めているところである。

グラフェンに関する世界の研究状況を図 2.1.6 に示す。研究者という立場で見ると、日本のグラフェン研究は厳しい立場にあると感じている。グラフェン研究は特に米国が強く、基礎から応用まで幅広く先進的な研究を行っている。韓国もデバイスに関連した応用研究が進んでおり、中国もアプリケーション研究を進めている。また、シンガポール国立大学ではグラフェン・リサーチセンターを立ち上げており、昨年は太陽電池用の研究に 30 億

円の予算を追加している。また日本とシンガポールのグラフェンの論文数を比較すると、国の大きさや人口を考えても明らかにグラフェン研究が盛んで、積極的に投資されていることがわかる。

世界中の日本 — グラフェンでは危機的状況 —				
国名	デバイス	合成	他の応用	特徴
米国	基礎から実用まで多様なデバイス	薄膜合成 液層分散 SiC合成	NEMS、複合材	研究者人口多く、創造性の面で突出
韓国	薄膜デバイスが中心	薄膜合成		デバイスに関連した応用が多い 既存技術の組み合わせが多い スピード速い
中国		液層分散	キャパシタ、複合材等のバルク応用	質は悪くても、とりあえず何か応用に使おうという姿勢
日本	二層デバイス 物理	薄膜合成 SiC合成		人口が少なく、歴史も浅いため、レベルが十分には高くない
シンガポール	デバイス一般、分子デバイス	液層分散	キャパシタ等のバルク応用	2大学(NUS, Nanyang)が積極的物性も応用も
英国	物理的なデバイス	剥離 分散技術		マンチェスターと分散が強み
欧州 (英国除く)	デバイス全般	SiC合成	ナノリボンの化学合成	深い物理は強いが、合成・応用では存在感薄

図 2.1.6

次に研究ファンディングとの関連から、研究体制について考えていることを紹介したい。昨年、イギリスで Nanotube 2011 というナノチューブとグラフェンに関する国際会議で数件の招待講演がなされた。彼らのホームページを調べるとポスドクが 10 人程いるような研究室ばかりであり、グラフェン研究もパワーゲーム的な国際競争の時代に入りつつある感がある。一方、日本の大学では修士課程の学生が中心であって、「研究」を専門に行うポスドクを 10 人も雇うのは難しい状況であり、産総研や理研、物材機構で集中的に研究を行うか、あるいは大学で一点突破的な研究をやらなければ勝ち目がないのではないかと感じている。また新たな研究シーズ、萌芽的なテーマの促進という面では日本の大学の講座制も改善すべき時期がきているようにも思う。

「グラフェンへの投資の意義」としては、グラフェン研究はサイエンスやアカデミアでの我が国の存在感を示す上でも重要だと考える（図 2.1.7）。そして、産業応用への可能性としては、大学や国研がリスクを負った先進的な研究を行うことで裾野を広げ、産業界を刺激していくということに意義がある。加えて、国際化の推進も非常に重要である。その場合、優秀な人を外国から集めてくると同時に、有能な研究者を送り出すシステムが必要になってくるであろう。

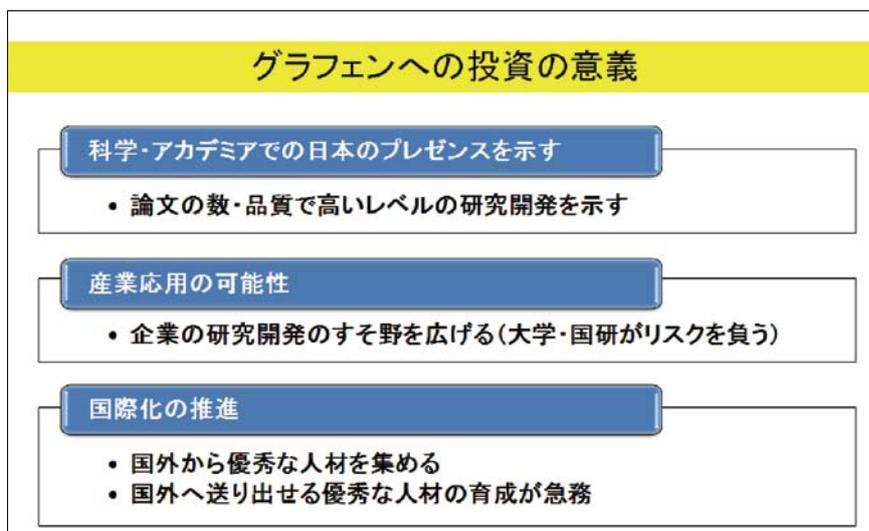


図 2.1.7

最後に「今後のグラフェン研究のテーマ」について述べる（図 2.1.8）。合成研究では大面積の単結晶グラフェン合成や層数制御の研究があげられる。またプロセス研究ではバルクのグラファイトの分散技術や炭素に適した加工技術の開発が重要であろう。物性研究では、電気伝導だけではなく、熱、フォノン、光物性、それからプラズモン、磁性など興味深い物理研究対象があると思う。応用研究では、シートで使う場合には透明電極やタッチパネル、半導体応用としてトランジスタ、高周波デバイス、LSI、バイオセンサーといったことが考えられる。それからバルク応用としては、スーパーキャパシターや電池、複合材料等が考えられる。

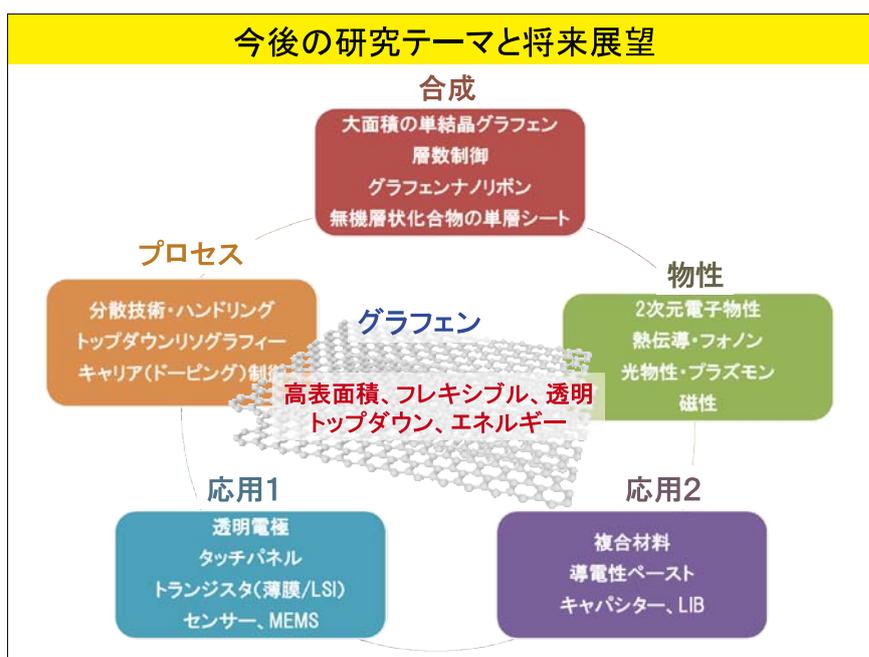


図 2.1.8

新たな方向性としてはグラフェンだけでなく、**h-BN**（ヘキサゴナル BN）や金属カルコゲナイドなど他の 2 次元無機材料と組み合わせていくことが興味深いものとなる。グラフェンの移動度は普通では 1 万 cm^2/Vs だが、**h-BN** の上に乗せると 6 万 cm^2/Vs まで上がるということが報告されている。層間に原子やイオンなどを挿入するインターカレーションも、新たな物性を発現する可能性があり興味深い。グラフェンは、透明、フレキシブル、ベンダブル、軽量であることを特徴として、タッチパネル、バッテリー、トランジスタ、バイオインターフェイスというエレクトロニクスに発展していく可能性があり大いに期待したい。

2.2 グラフェンのアクティブチャンネル応用はあり得るか？

長汐晃輔（東京大学大学院工学系研究科 准教授）

ここではグラフェンのデバイス応用、特に産業応用上非常にインパクトの強いアクティブチャンネル応用に焦点を当て述べる。グラフェンのデバイス応用は、タッチパネル、フレキシブル・ディスプレイのような、パッシブなデバイスの実現性が世界的に認識されているが、グラフェンのポテンシャルを引き出しFETやRFのようなアクティブなデバイス応用を実現したいと考えている。ただし現時点では、ここには大きな壁があるというのが共通認識だと感じている。その原因は、グラフェンの移動度は半導体材料の中で1番高いが、バンドギャップがないことである。バンドギャップを開くためにnm幅のリボン形状にして量子閉じ込めを利用すると、オン／オフ比は 10^6 となり大きく向上するが、移動度が $100\text{cm}^2/\text{Vs}$ 程度まで下がってしまう。一方、2層では、グラフェンとの相互作用の小さい2次元物質であるBNを絶縁膜として利用し上下から電界を掛けることによってギャップを形成することができる。移動度 $300,000\text{cm}^2/\text{Vs}$ を保ちながらオン／オフ比が 10^6 と他の高移動度チャンネル材料よりも優れた特性を示しており、アクティブ材料として非常に有望である（図2.2.1）。

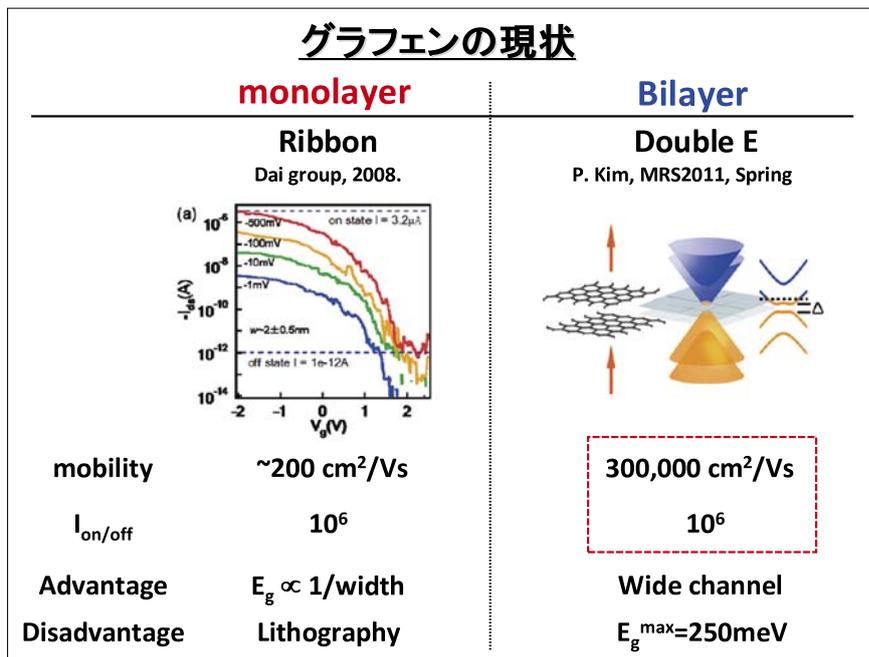


図 2.2.1

今までグラフェン単層は直線の分散関係になっているため移動度が高く、2層の場合は電子の分散関係は放物線状になっており移動度が低いのではないかという認識があった。その違いを検討する。直線の分散関係で光と同じ分散関係ということから、“Massless Dirac Fermion”と言ってしまうと議論が続かないので、それをデバイス研究サイドから古典論に落とし込んで話をする。

グラフェンの質量はサイクロトロン質量の定義で考えると、キャリア数をnとすると

\sqrt{n} に比例する。これが、質量一定と考える通常の半導体と異なる点であり、すでに実験的にも確認されている。正確に質量が0なのは、ディラックポイントだけということになる（図 2.2.2）。

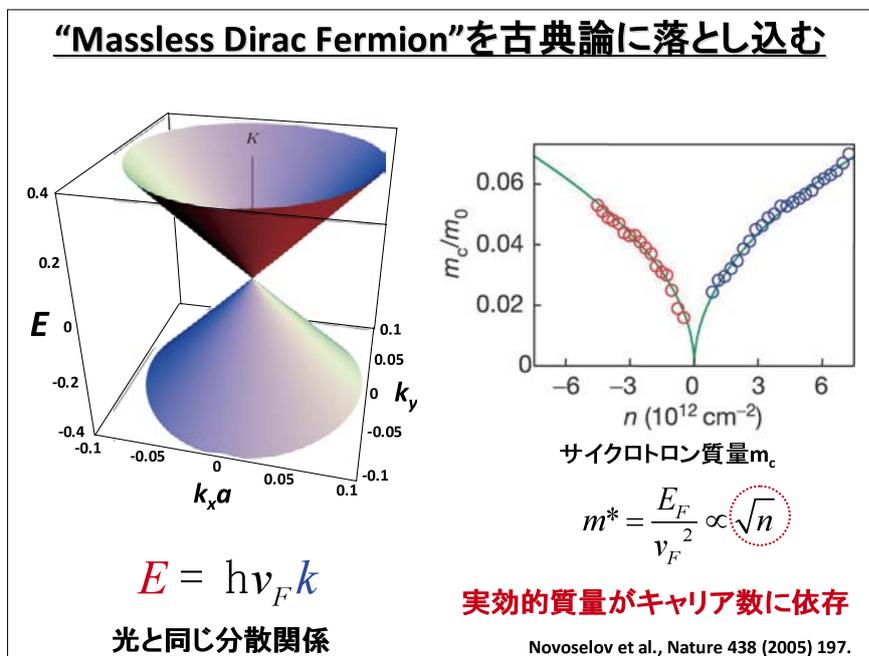


図 2.2.2

この有効質量を使って他の材料と比較してみる。シリコンは0.26でありグラフェンの方が圧倒的に有効質量が小さく、ガリウムヒ素よりも小さい。正確には散乱源の議論をしなければならないが、有効質量の観点で考えるとグラフェンは移動度が高いと言える。ここで2層のグラフェンの場合は0.037になる。デバイスを使う時には、キャリア濃度としては 10^{13}cm^{-2} 程度のところで用いるため、実際には2層の方が有効質量は低いところで使えることになる。したがって2層グラフェンはギャップ形成を含め非常に有望であると判断する。

電界効果で動かす時にはカップリングが強くなければいけない。これが既存のシリコンMOSの問題点であるが、グラフェンは単原子層故、短チャネル効果を防ぐという点で理想的である。しかしながら、グラフェンの電子は図 2.2.3 に示すように Pz 軌道にあり環境に敏感である点に注意しなければならない。

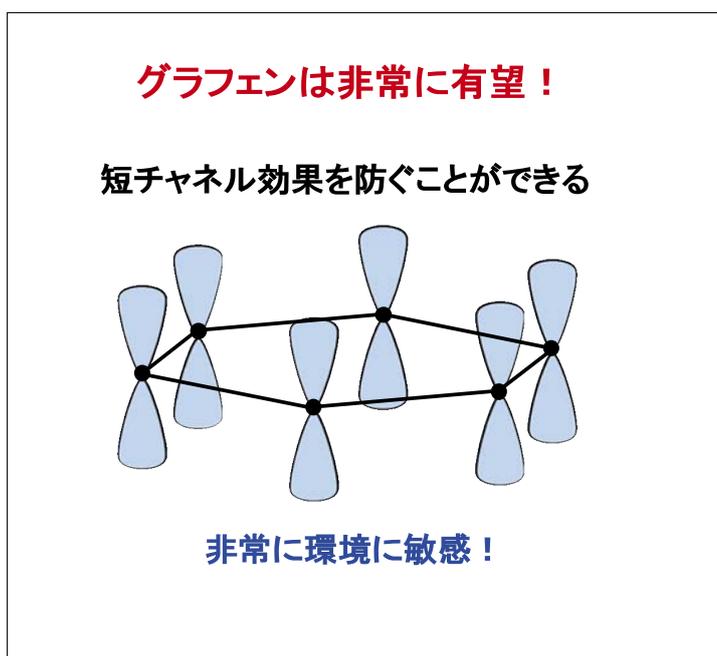


図 2.2.3

図 2.2.4 は横軸に論文の報告された年、縦軸に移動度を示したグラフである。SiO₂ 上にグラフェンを構成した場合、最初 10,000 cm²/Vs という移動度を実現したが、その後の進展はない。これはグラフェンと SiO₂ の間に電荷を持った不純物が存在していて、それが散乱源になっているからである。それ故、コロンビア大のグループは SiO₂ を取り除き 200,000 cm²/Vs という値を実現している。現在、同様な手法で 1,000,000 cm²/Vs という値まで実現している。ただし、電気的信頼性や真空の誘電率であることを考えると実用にならないので絶縁膜を選択する必要がある。その結果、現在では NIMS の BN を使って、コロンビア大のグループが 40,000 cm²/Vs という値を実現している。電気的なカップリングが非常に強いが、そのインタラクションをどう弱めていくかが重要である。

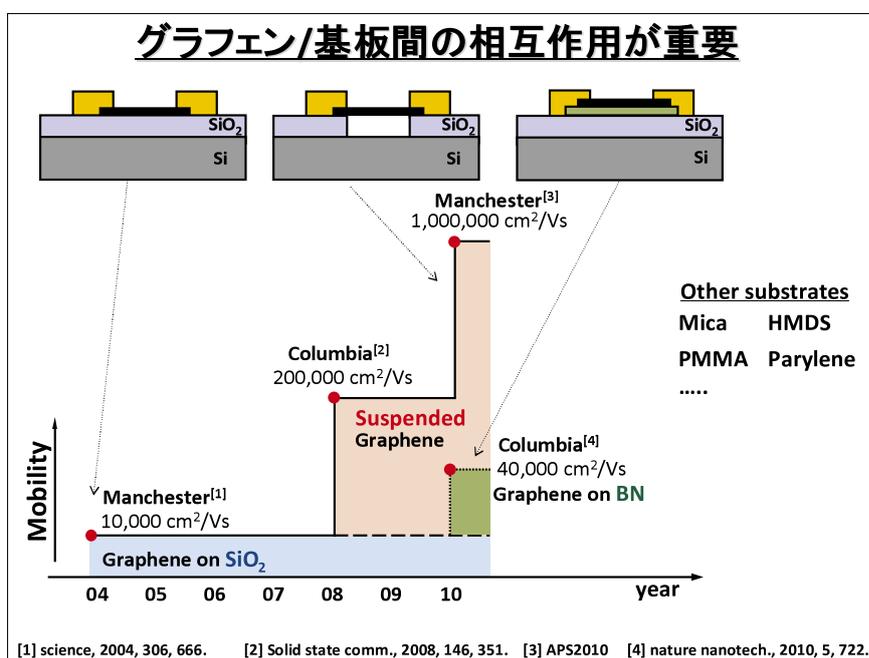


図 2.2.4

図 2.2.5 に典型的な半導体における移動度を示す。絶縁膜上にグラフェンを構成した場合はシリコンやゲルマニウムよりも移動度が高い。またすでに 10¹³ cm⁻² 近傍のキャリア数でのデータがあることは重要である。理想的なゲート構成は、シリコンや CMOS と同じような構成を考え High-k を使うか、BN を使うかということになる。ただし、現状としてはギャップ形成、移動度の向上の検討が必要であり、ゲートの信頼性、絶縁膜の生成や量子容量の問題、コンタクト抵抗の問題が残っている。サイズを小さくするとコンタクトの影響が見えてくるので金属とグラフェンのコンタクトの検討が重要である。特にグラフェンでは、C=C 結合が強く不純物ドーピングによる状態密度の向上は困難であることを考えるとグラフェンの特徴を使ったコンタクト抵抗の低減手法を考えていかなければならない。

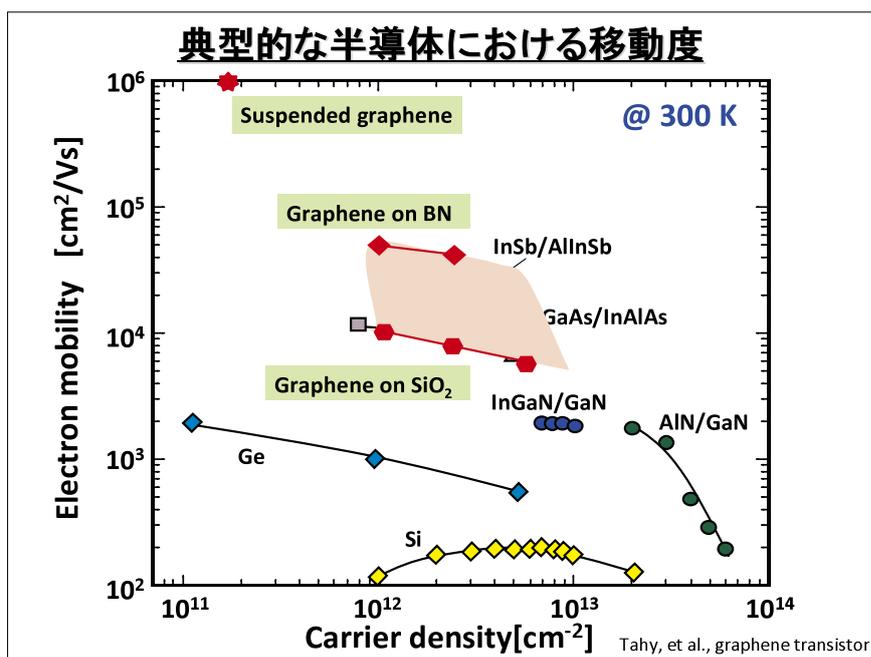


図 2.2.5

そこで金属の下のグラフェンに着目して研究を行った。電気特性で電極直下のグラフェンの電子輸送特性を抽出するためにソースドレインとは別にグラフェンチャンネル上に金属を構成した。電流は最も抵抗が低いところを流れるので、金属の長さが長いと、グラフェンから金属に入り金属の中を優先的に通り出てきてしまう。この場合、金属直下のグラフェンの電子輸送を抽出できない。

ただし金属が短くなるとコンタクト抵抗が効いてきて、グラフェン側を優先的に流れることが期待できる。そこで図 2.2.6 に示すように単層グラフェン上でソース、ドレインと 7.9 μ 、2.9 μ 、1.6 μ 、1 μ の長さの 4 端子デバイスを作った。

金属直下グラフェン変調の実証測定結果であるが、図 2.2.7 に示すように金属の長さが短くなればなるほど、電流がグラフェン側を優先的に流れておりそれが変調の増加として取り出すことに成功した。注目したいのは、金属のないグラフェンの特性とほぼ近いところまでできていることである。このことから金属とグラフェンは思った以上に相互作用が少ないということが言える。古くより Ni 上に成長したグラフェンは Ni と π -d 結合をして強固に結合しているという報告があるが、デバイス構造においては、グラフェンが単原子層であることを考えると、金属/グラフェン/基板という 3 つの材料での相互作用を考える必要があることを示唆している。この点は既存の 3 次元の半導体材料には無い考え方であり、非常に重要である。

以上の結果を踏まえ、コンタクト抵抗率を下げるには金属のコンタクトの下に埋め込み電極を置き、ここの部分だけを局所的に状態密度を上げればよい。デバイス研究を続けていると、シリコンやゲルマニウム等の物質のデバイス構成に頭がいくが、グラフェンの特徴を取り出しそれをデバイスの構造にフィードバックしていくことが重要である。

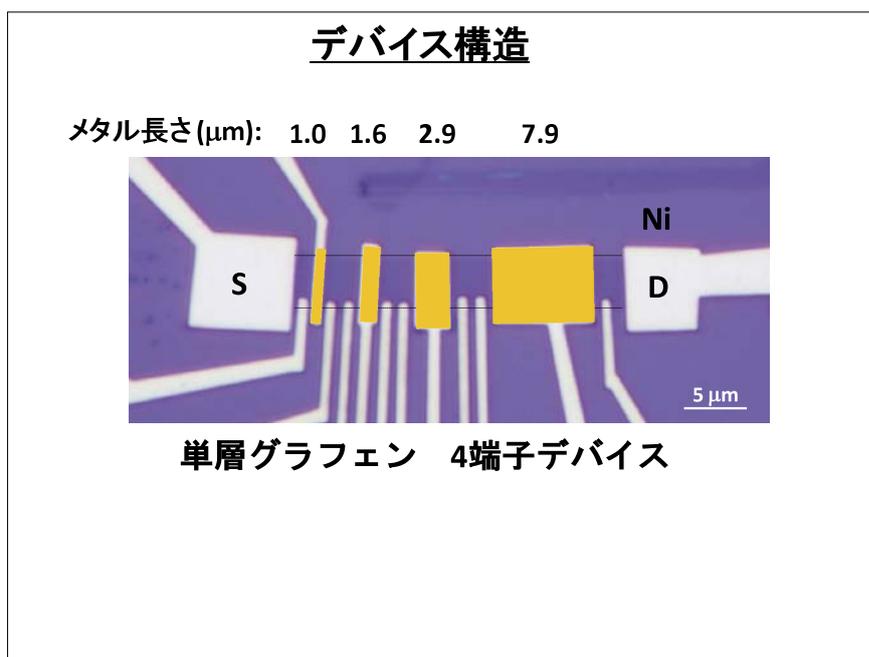


図 2.2.6

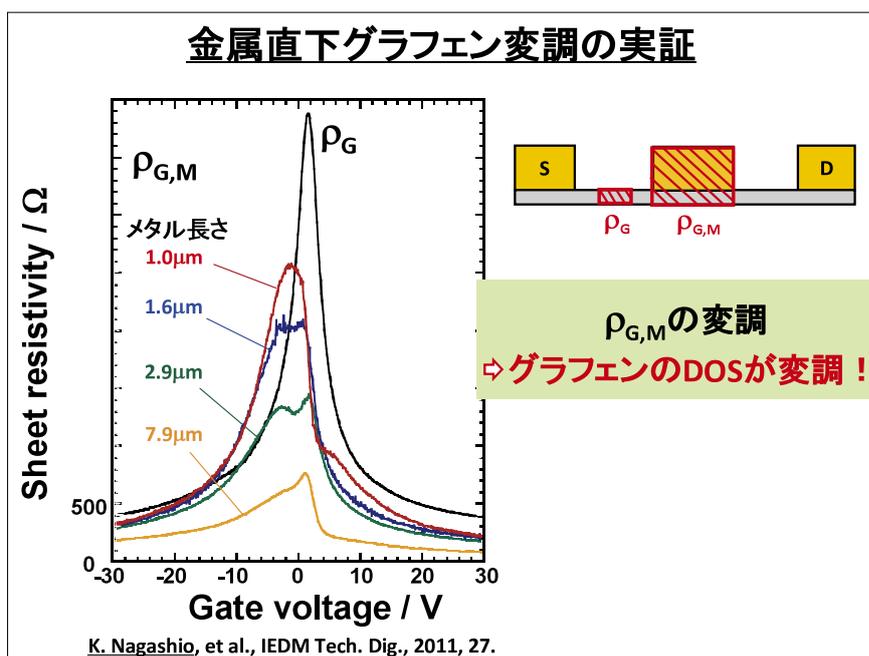


図 2.2.7

最後にグラフェンの将来に関してであるが、2006年の「nature」の記事では“克服できない問題などない。All the lights are still go.”ともうすぐチップの中にグラフェンが入ってくるというように非常に煽っている記載になっている。2011年の論調ではタイトルが“The long game”となっており、“グラフェンはミラクルな材料ではない。ただ将来有望なだけだ。ポテンシャルを引き出すために継続的な研究が必要だ”といている。さらに“どんなテクノロジーも研究室から製品化まで、20年かかる”と記述している。やっと nature は足元の現状を見つめているということがいえる。

デバイスの関係では最も世界的権威のある IEDM (International Electron Devices Meeting) で、大きな変化があった。1992 年から 2010 年まで、ほとんどセッションは変わらなかったが 2011 年にメインセッションである CMOS のセッションがなくなった。これが何を意味しているかということ、シリコンに固執するのではなくて、他の高移動度材料も含めて同じ土俵で戦えということを行っている。

日本はまだ、個別にグラフェンの研究を行っている時点であり少し厳しく研究の質にかなりの開きはあるが、まずは土俵に乗せるということが重要であると認識している。現在、グラフェンのオン／オフ比と高い移動度が両立できたので、ゲルマニウムや III-V 物質等と競争するための入り口にきているのではないかと考えている。

セッション3 無機系機能原子薄膜

3.1 無機ナノシート～2次元機能性ナノ物質としての可能性～

佐々木高義（NIMS 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 フェロー）

我々は原子数個分の厚さをもつ非常に薄い無機ナノシートの研究を行っており、今回のワークショップの主題に合致するものであると考えている。まず初めに「ナノシートとはどんなものなのか」についてお話したい。我々がナノシートと呼んでいるのは図 3.1.1 に示すような層状酸化物から化学的力で層を1枚1枚バラバラにしたものであり、厚さ1nm前後、横サイズ数 μm であり、単結晶である。最近では100 μm 程度の大型ナノシートまで作れるようになってきた。図 3.1.1 の下部に示した物質が、90年代に我々がこの研究を始めるきっかけになった層状チタン酸化物である。チタン・酸素の八面体が図のように繋がって層状構造を持っているが、それを4級アンモニウムイオンのような嵩高い有機イオンで反応させると系全体が懸濁したコロイド液が得られる。その過程を詳細に調べると、層状構造の層間距離が広がるにつれて、平行性を失ってバラバラになり最終的にはX線が干渉しなくなることがわかった。またTEMやAFMで調べることにより、元の層状チタン酸化物の層1枚が確かに取り出されていることがわかった。手前味噌になるが、Web of Scienceで「ナノシート」で検索すると我々の成果が初めてであることがわかるように、この物質系においては日本が先頭を走ってきたことがお分かりいただけると思う。

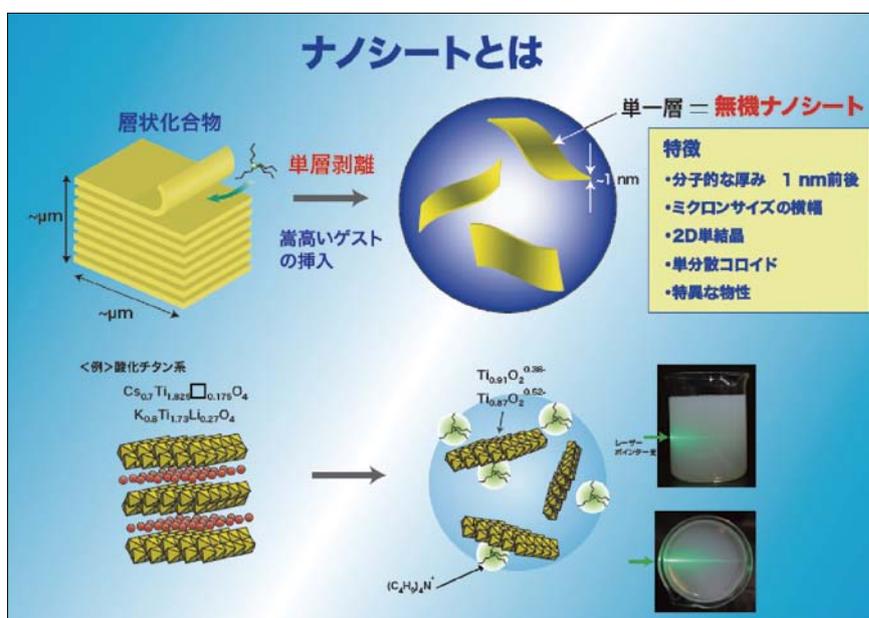


図 3.1.1

それ以来、10数年経過し、いろいろな層状物質が剥離され、グラフェンも含めて様々な物質系のナノシートとして報告されている。そのような背景の中で、今回のワークショップで特にご紹介したいのが、酸化物、水酸化物のナノシートである。グラフェンに比べるとまだまだ手つかずの状態であり、研究が進んでいない物質であるが、その分、面白いこ

ともたくさん残されている。図 3.1.2 に示すのはこれまでに報告された様々なナノシートであるが、例えば、チタンやニオブ、タンタル系の酸化物であれば光触媒性や誘電性があり、一方、マンガンやコバルト系の酸化物であればレドックス性を示す。このように非常に薄い酸化物、機能をもった酸化物といったものがライブラリーとして揃ってきているのが現状である。上記を踏まえて、私なりにナノシートの特徴、魅力、将来の方向性について述べていきたい。

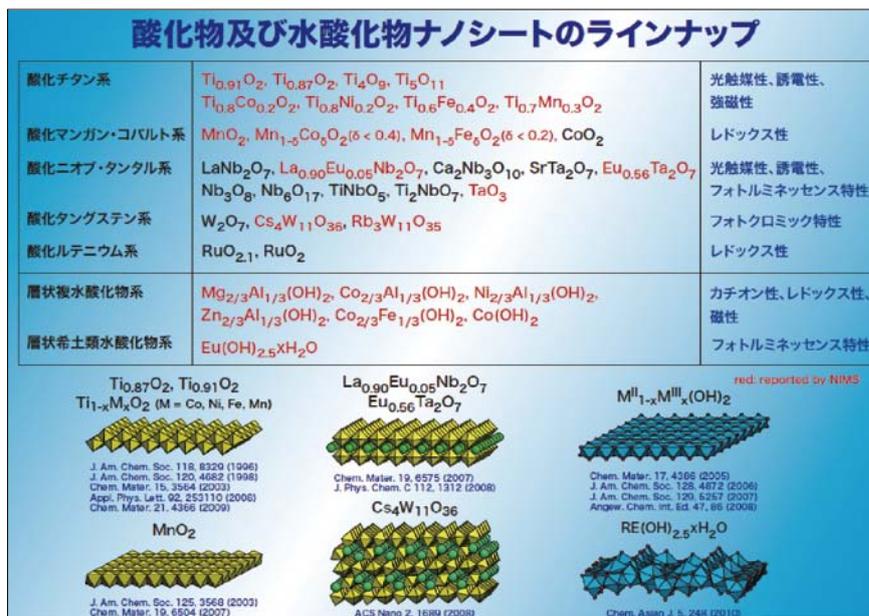


図 3.1.2

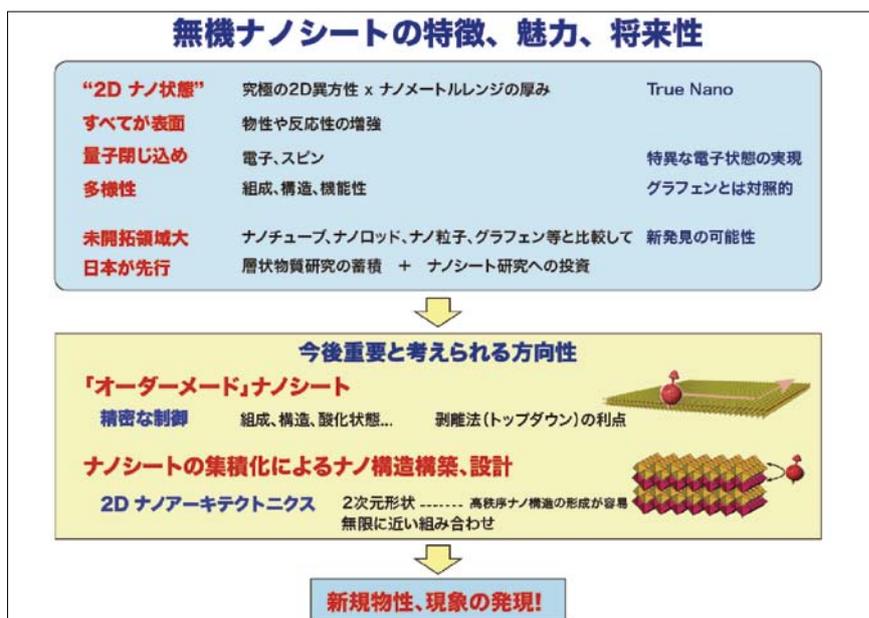


図 3.1.3

図 3.1.3 に示すように、無機ナノシートのユニークさは何と言っても究極の 2 次元異方性とナノレベルの厚みということで、True Nano の物質であり、すべてが表面であると言

える。こういった2次元のパッケージの中に電子やスピンの閉じこめられるといったことで、物性や反応性が增強されたり、特異な電子状態が実現すると期待される。実際にそれを匂わせるデータも出つつある。

もう一つこの物質系で強調しておきたいことは、非常に高い多様性を持っているということ。グラフェンが素晴らしい物質であることは言うまでもないが、多様性という観点から見た場合には限界があることも事実である。その点、無機ナノシートでは、組成、構造にバラエティーを持たせることができることが魅力であると言える。また、初めに少し述べたように、ナノシートはナノチューブやナノロッド、ナノ粒子、グラフェンなどと比べると、まだまだ手つかずの部分が多く残っているので、基礎的なことも含めて今後いろいろな展開ができる可能性があると考えている。

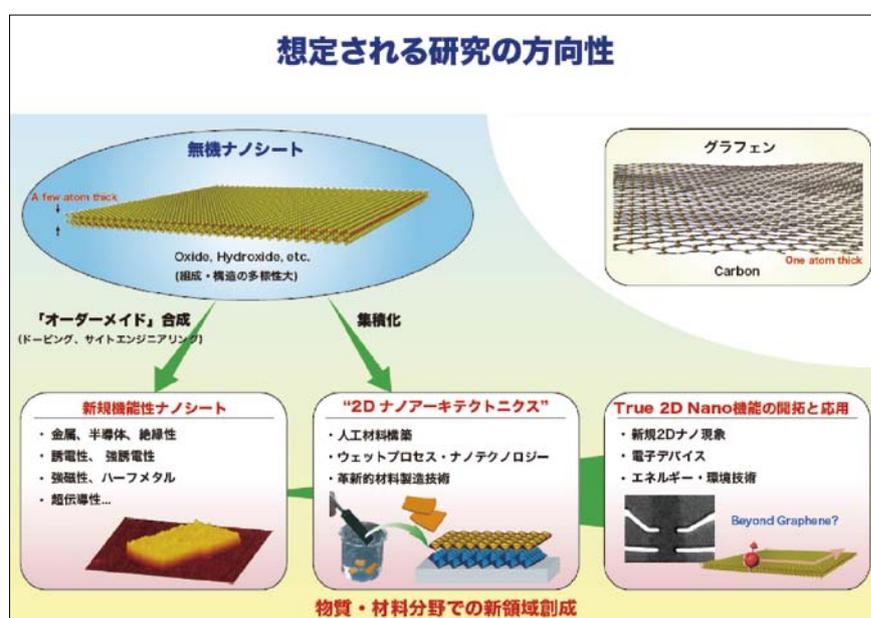


図 3.1.4

次に、無機ナノシートの将来の方向性について2点述べたい(図3.1.4)。1つ目は、「オーダーメイド」でのナノシート作りについてである。バルク材料ではドーピングや元素置換などをやって、機能を極限まで高めるといことが常套手段になっているが、ナノ物質でのそのような取組はまだ限られているように感じる。一方で、ナノシートは剥離法というトップダウン的な要素を持っている合成法を使えるので、このようなアプローチが可能と考えられ、“True 2D Nano 機能の開拓と応用”に展開できると期待される。

2つ目は、ナノシートはビルディングブロックとして積み木細工のように積み上げることができるので、ある機能を持つ層と別の機能を持つ層を集積することによってプラスαの機能が引き出せる可能性がある(“2D ナノアーキテクチャ”)。

こういったユニークな2次元の酸化物、水酸化物を舞台として、様々な「オーダーメイド」合成を行うことにより、電気的、磁氣的、工学的にいろいろな機能を作り込める可能性があり、これをさらにナノレベルで精密に集積、複合化することで、ナノの新しい物理やそれをベースとしたデバイス、環境エネルギー技術といった分野にどんどん発展できると考えている。

最後にまとめとして、無機ナノシートは2次元性と多様性が両立できる、“セラミックス版グラフェン”とも言える物質で、新しい機能の開拓や機能の増強といったことに展開できるだけでなく、溶液プロセスでビルディングブロックとして組み合わせることにより、新しいナノテクとしても展開が可能である。基礎的には新しい物質科学領域を創成できる可能性もあり、応用的にもいろいろなことが期待できる。図 3.1.5 には、私が興味を持っているエレクトロニクスやスピントロニクス、環境・エネルギー分野に関連した応用の可能性を列記しているが、ナノシートは基本物質と言え、プロセスも非常にファンダメンタルである。様々な人に見ていただいて、使い込んでいただくことで、もっと広がった展開ができるのではないかと考えている。



図 3.1.5

国内外では、グラフェンの研究が盛んであることは言うまでもないが、いわゆるポストグラフェンの流れも一部で始まっている。しかし私が見る限りでは、まだカルコゲナイトやBN系に終始しているように思う(図 3.1.6)。本日紹介した酸化物、水酸化物をこれだけ薄くきちんと作成して、応用しようといった考え方で研究しているところはまだまだ少なく、是非とも皆さんにも参入していただきたい。

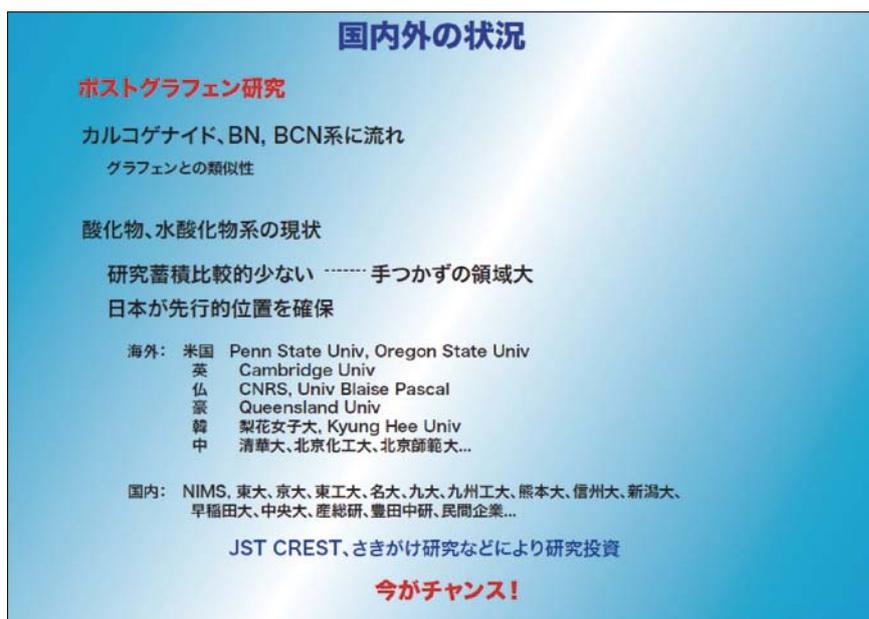


図 3.1.6

質疑応答

- ・ 層状物質には多種多様なものがあり、バラエティーに富んだナノシートが合成できる。
- ・ 積層を組み合わせるときには、ブロック、ブロックとして積み上げることになるので、格子のマッチングはあまり関係ない。
- ・ グラフェンと融合させると非常に面白い。

3.2 原子薄膜機能の電界制御

岩佐義宏（東京大学大学院工学系研究科 教授）

初めに私がどういうスタンスで研究しているかということから話を始めたい。まず「現状の認識」として、「知的好奇心に導かれた基礎研究」を「応用研究」に繋げて、さらに「実用化」というリニアモデルは20世紀で破綻している、ということは皆さんも感じていらっしゃると思う。それに対して、JSTでは「目的基礎研究」という概念を提案され、これまで非常に成功を収めてこられているが、凡人が普通にやってしまうと非常に近視眼的なミッション設定になってしまいがちである。我々のような大学の基礎研究者は「どういふことをすればいいのか」、「どうやってこの現状の問題を克服すればいいのか」について日々考えている。その答の一つとして、大学の先生には「基礎科学だけができる挑戦的なアプローチの研究が必要であろう」と私は考えており、おそらく誰もが考えていることであろう。それでは「そのためには何をすべきか」ということが問われることになるが、世界的にメジャーなトレンドとしては、非常に大きな戦略的かつ組織的な研究が大きなグループによってなされ、その大きなグループのみから良い成果がどんどん連発されるといった事態になっている。

小さな研究室で運営する我々としては、「小さな方向性としてどんなことを考えるか」ということになり、「応用研究で使われている技術を基礎研究にフィードバックして、今までと全く違う方向性の研究を目指す」ということを考えている。応用分野から新規物理学が発展するということは、古くは、熱力学、量子力学の建設、最近では量子ホール効果の発見に見られるように、歴史的には何度も起こった現象で、この方向で **game changing technology** を創出したい。

私は、有機エレクトロニクスの研究分野にいたが、そこに近い分野に“2次電池”や“キャパシタ”といったものがあつたため、これらを融合させて、新しいトランジスタである“電気二重層トランジスタ (EDLT)”というものを作って、「超強電界物性から新しい機能を開発したい」と考えた (図 3.2.1)。

その電気二重層トランジスタとは何かというと、基本的にはチャージを貯めるデバイスであるキャパシタのことであるが、キャパシタの片方の電極に半導体を用意して、そこにチャージを貯める。図 3.2.2 の右図が電気二重層トランジスタであるが、上にもう一つの電極をつけると、基本的には左図の従来型のトランジスタと全く同じコンセプトのトランジスタができる。従来型との大きな違いとしては、キャパシタと言えるくらいであるので、チャージの量をもものすごく貯めることができる。大体1桁から2桁のオーダーの高い電場とチャージの量を貯めることができる、ということがわかっている。

1桁あるいは2桁の何かコントロールパラメータが変わってくると、物理の世界が大きく変わるのではないかと。単純な電流スイッチングとしてトランジスタを使うのではなくて、物質の持っている相や電子の位相、スピンの制御を新たに行えるのではないかと、と考えて電気二重層キャパシタを開発してきた。そして典型的な成果として、電界効果によって超伝導が誘導できることを発見することができた。臨界温度はまだまだ低いですが、バルクでは超伝導にすることができない物質に対して、ケミカルドーピングでは超えられない **Solubility limit** を電界の力で越えることで超伝導を実現することができることを示した。



図 3.2.1

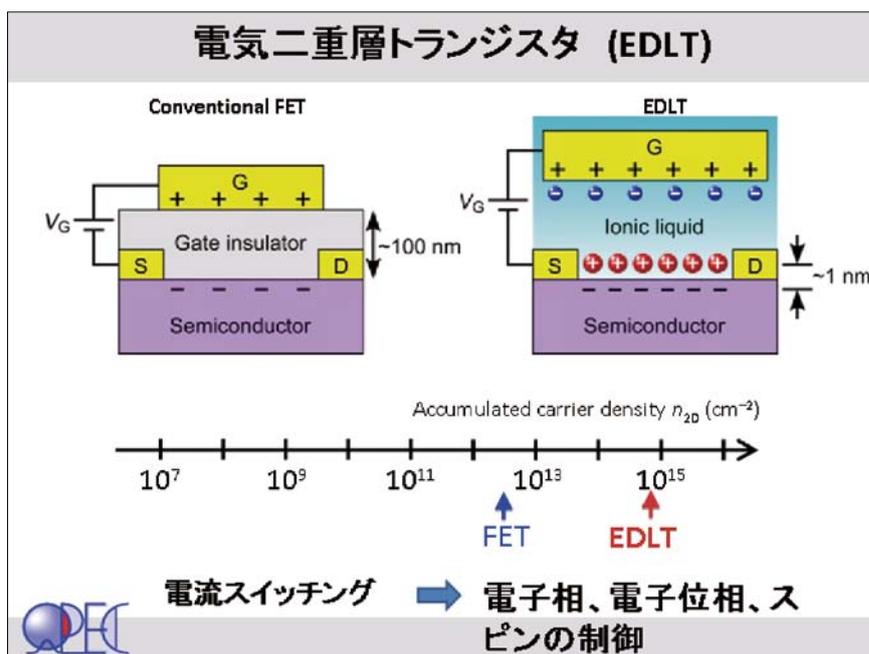


図 3.2.2

最近では、世界各国で酸化物、銅酸化物の超伝導に応用した研究が始まっている(図 3.2.3)。

我々としては、この電気二重層トランジスタを使った超強電界の物性研究がいろいろなところに展開できるのではないかと考えている。つまり、超伝導だけでなく、様々な物質の相のコントロール、スピンのコントロール、光のコントロールなどに応用できるのではないかと考えている。

その対象として原子薄膜はとても良いものであると考えており、研究を進めている。その理由として、物質の多様性、物性・機能の多様性というものが挙げられる。最近では、

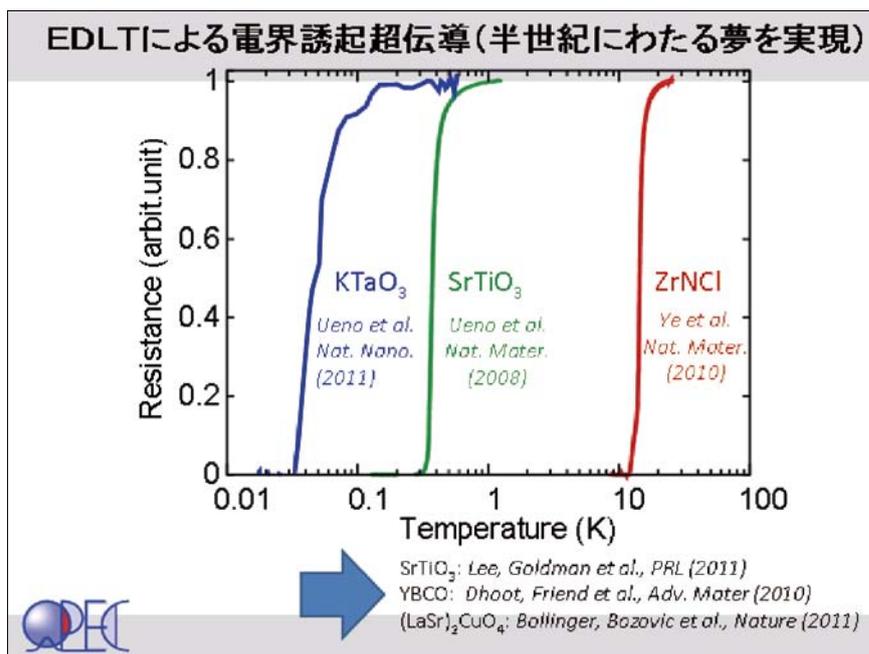


図 3.2.3

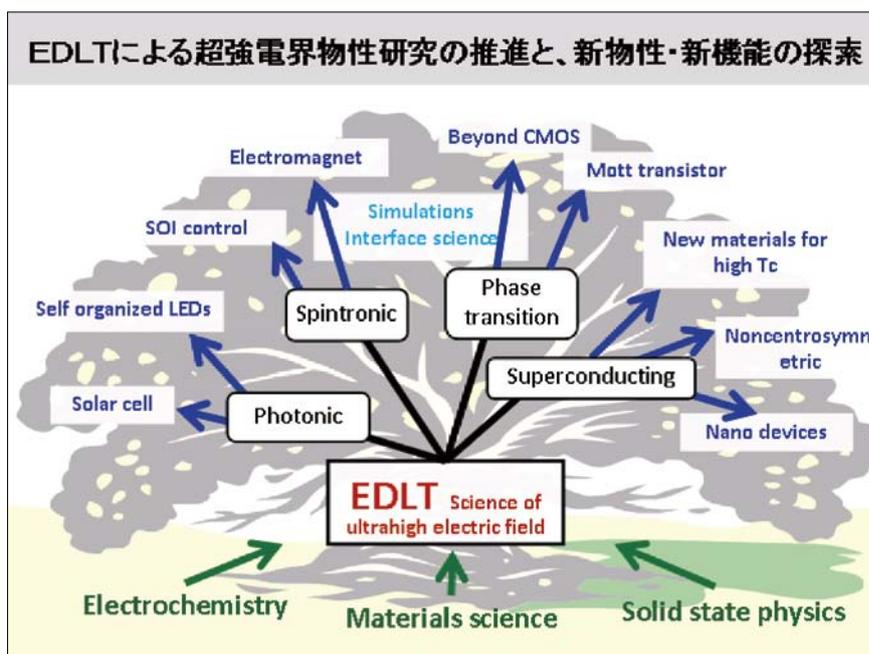


図 3.2.4

トポロジカル絶縁体やスピントロニクスといったものも挙げられる (図 3.2.4)。

また薄膜の作製技術というものが問題で、スコッチテープというのは基礎物理以外には全く役に立たないが、そこからまず、MBE、さらには CVD といったように、ステップ・バイ・ステップで量産につなげていく道が見えているわけなので、機能性向きの物質として原子薄膜はいろいろな意味でメリットがあるのではないかと考えている。

ご存知のように、日本の強みは材料開発であり、いろいろな材料をいろいろな人が持っているという状況にある。実際には、それを周辺分野、応用分野、特に今の場合にはエレ

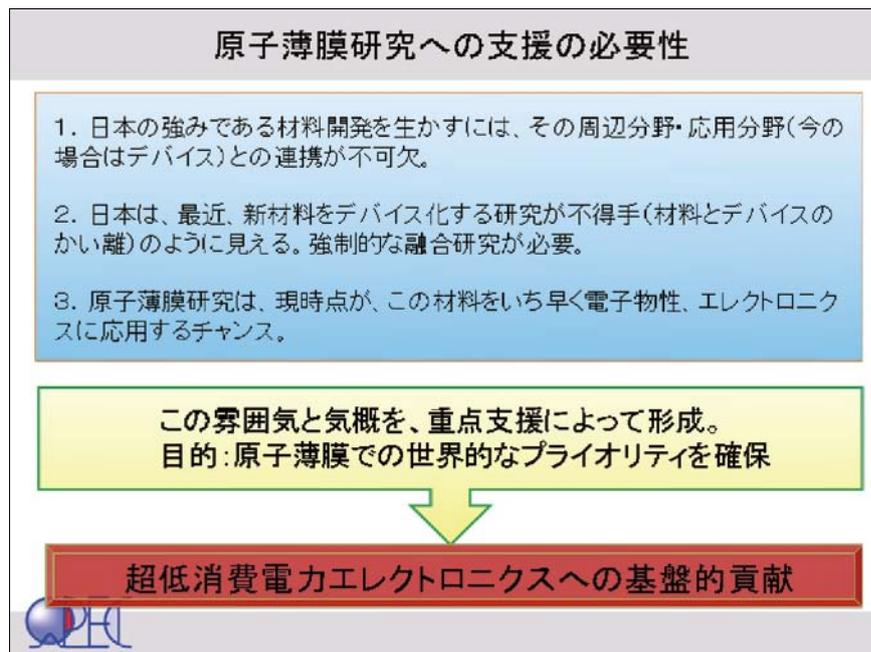


図 3.2.5

クトロニクス分野に発展させていく必要があるが、不思議なことにカーボン材料の分野では新材料をデバイス化する研究は日本にとって不得手で、材料研究とデバイス研究が非常に乖離しており、結果として、エレクトロニクスにおけるプライオリティをカーボンナノチューブやグラフェンで日本が取り損ねた、という現状がある。今現在の原子薄膜研究を物理サイドで世界的に見ると、グラフェンと同じような方法が使える原子薄膜を使って、いち早く新しい機能を出していこうという潮流が起こっており、このような機会を捉えて、特にデバイス化へ向かった研究に、これまでは半導体しかしてこなかったエレクトロニクス屋に何としてでも参入してもらえるように研究資金を配賦し、世界的なプライオリティを確保するべきである。これは非常に重要なことである。直近の応用にはならないが、長い時間的スケールで見たときには、まず基礎研究でプライオリティを取って、それから超低消費電力エレクトロニクスへの基盤貢献へと向かうべきである、というのが私の望みである（図 3.2.5）。

JST 中村理事長コメント

- ・ エレクトロニクスを含め、新しい材料やデバイスをどういうふうに取り組んでいくべきか、まさに今 JST でも検討を始めている。岩佐先生のお話にもあったように、本当の意味での基礎研究の中から本当の意味でのゲームチェンジングなテクノロジーを出すことが我々 JST に求められていることだと感じているので、日本で本当にやるべきことをみんなで知恵を絞って議論していきたい。
- ・ JST のスタンスとしては、あくまで基礎研究の中に将来に繋がる大きな宝物が出てくると非常に期待しており、もし何か面白いものが出てきた際には、「その次どうするか」「横にどう展開するか」ということを研究者の先生方と共にリアルタイムで連携と取りながら議論していきたいと考えている。基礎研究の成果を最大化し、横断的にあるいは応用的にダイナミックに展開していくためにはどうすべきか、

JST 内でも議論している。

- ・ 私もこの分野には期待しているので、是非ともこの場で活発な議論をお願いしたい。

質疑応答

- ・ 基礎とデバイスの溝を埋めるための有効なお金の使い方として、いかに分野連携・分野融合を促進するか、どのようなインセンティブを与えるか、が今後さらに重要となる。

3.3 強磁性超薄膜における磁性の電界制御 —磁気メモリの電界書き込み—

小野輝男（京都大学化学研究所 教授）

本日お話をさせていただく内容は非常にシンプルで、「磁気メモリを電界で書き換え、消費電力を下げる」ということである。

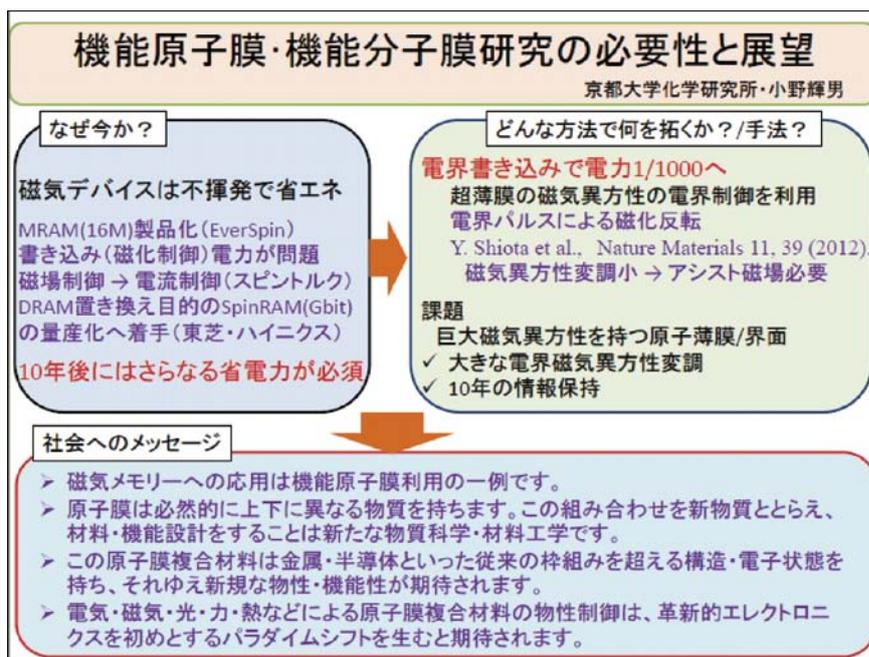


図 3.3.1

まず「必要性と展望」についてであるが、ここには最近我々が行っているコバルト数原種の原子膜を電界で制御する研究を通じてわかってきたことを記載している（図 3.3.1）。原子膜とは、本来、必然的に上下に異なる物質が付いて初めて使えるものになる。それを新物質と積極的に捉えて、第一原理計算などを利用して機能設計していくことが新しい物質科学や材料工学に繋がる。これは岩佐先生の発表でもお話されていたことである。

より広く捉えると、金属とか半導体とかいうバルク概念を超えて、原子膜とその上の物質との電子軌道をうまく制御することによってスイッチングを起こさせることが将来的にはできるのではないかと考えている。とにかく積極的に、例えばグラフェンに何か付いていると移動度が下がってしまうが、化学を使ってそのくっつくものを制御することができればもっと良いものができるのではないかと考えている。

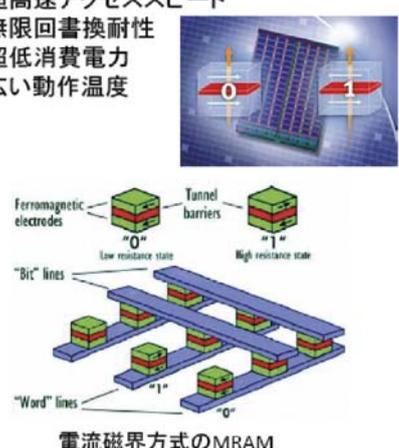
先ほどの岩佐先生のお話の中にも、「産業技術を物理で使う」というお話があったが、我々もまさにそこが重要であると考え、特に「微細加工技術」に注目してきた。「半導体で使われていた微細加工技術を磁石研究へ導入する。」ということが私の先生の新庄先生と10年ほど前から始めた研究である。研究開始当初は研究を簡単にするために細線や円盤を作り、その中の磁石の向きが規定できるような系でいろいろと面白いことを発見した。次に電流との相互作用で磁石の向きを変えることを考え、これを積極的に使ってメモリやアク

タイプデバイスを作る、という研究を進めてきた。

◆不揮発性磁気メモリ(MRAM)

製品化が始まり、研究開発競争の途上にある

- >不揮発・待機電力ゼロ
- >20年以上のデータ保持信頼性(製品)
- >超高速アクセススピード
- >無限回書換耐性
- >超低消費電力
- >広い動作温度
- ...



電流磁界方式のMRAM

EverSpin社 MRAM(16Mbit)

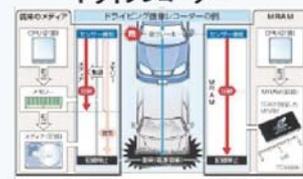


<http://www.everspin.com>

次世代旅客機の制御コンピュータ



ドライブレコーダー



宇宙産業/軍需産業/サーバー

図 3.3.2

その中で一番分かりやすい例が磁気メモリであり、磁気メモリは不揮発性なので省エネという点から期待されている。図 3.3.2 にあるように、特徴としては、不揮発性なので待機電力がゼロ、20 年以上のデータ保持、アクセススピード 10 ナノ秒以下、無限回書き込み可能などがあり、「夢のメモリ」といわれている。典型的な形はクロスポイントにトンネル磁気抵抗素子が挟んであり、この抵抗が高いか低い（磁化の向きが平行か反平行かに対応）、が 01 に対応しており、読むときは抵抗を読めばよく、磁石の向きを変えれば、それが書き込みになる。既に EverSpin 社で製品化されているが、配線に電流を流して電流の作る磁場で書き込む“磁場書き込み”と言われているものが情報書き込みに使われている。次世代旅客機の制御コンピュータやドライブレコーダーに使われるらしく、宇宙産業にも使われているという点が面白い。宇宙にいくと宇宙線が飛んできて半導体が壊れてしまうので、半導体が使えないところに磁気メモリを使っているらしい。他にはサーバーに使われている。大方の場合、サーバーはハードディスクに大量の情報が詰まっているが、サーバーからサーバーにデータを転送する際に、早くて信頼性の高い不揮発性メモリが必要となるので、磁気メモリを使っているようだ。

図 3.3.3 に示すように、磁気メモリでの問題は磁界書き込みでエネルギーを要することである。そこで、我々は電流と磁石の相互作用を利用する“スピントルク”を研究してきた。基礎研究はほぼ終わり、これから次世代 MRAM を作ろうとしている。既に、東芝やハイニクスでは 3 年後を目処に 1 ギガビットの MRAM を生産する、と新聞発表されており、おそらく 10 年も経たないうちにこの技術はきちんと皆さんの目の前に出てくるであろう。

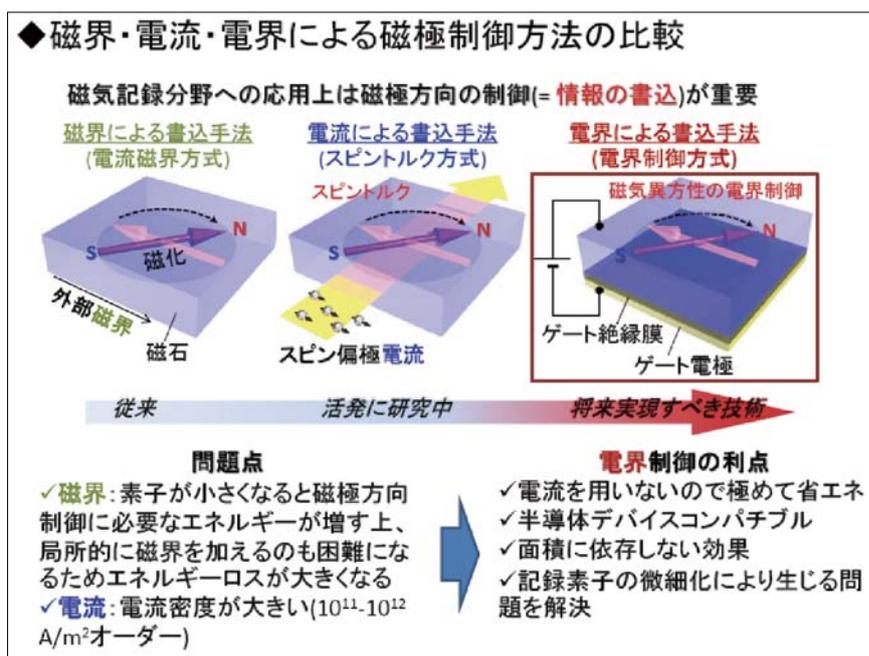


図 3.3.3

今、我々がすべきことは「次のことを考える」ということである。今のままでは消費電力はおそらく 1/100 か 1/1000 にはなると思うが、それでもまだ電流が流れており、パワーが必要となる。もっと省エネにするために「電圧で磁石の向きを変えられないか」ということになる。それができると、極めて省エネであり、半導体にコンパチブルであり、面積に依存しない効果でもあるので、微細化にとっても非常に有利になる。これが一つの出口となる。これを数字で表すと、典型的には 100 μ W くらいの書き込み電力が、電圧による書き込み手法を用いると 25nW くらいになり、結局流れる電流がキャパシタンスの充電のみになるので非常に小さくなる。実際に基礎研究では、外部磁場で少しアシストしてはいるが、電界制御方式が阪大のグループから昨年発表されている。また、磁性に関しては、東北大の大野グループで約 20K の低温で強磁性半導体に電圧をかけて磁石のオンオフができる、ということが 2000 年に発表されている。その後、「半導体ではなく金属でも同様の効果が見られるのではないか」ということで、阪大の鈴木グループでは数原子層の鉄に電圧をかけて磁気異方性を変えることに成功している。これは磁石の固さが電圧で変化したことを意味する (図 3.3.4 の左下図)。一方、我々のグループでも Hf をゲート絶縁体に使ったデバイスを使って電圧をかけたところ、10V では磁石、-10V では磁石の性質の消失、という結果が室温で得られた (図 3.3.4 の右下図)。このように最近では、金属超薄膜でも磁性の電界制御が可能になっている。

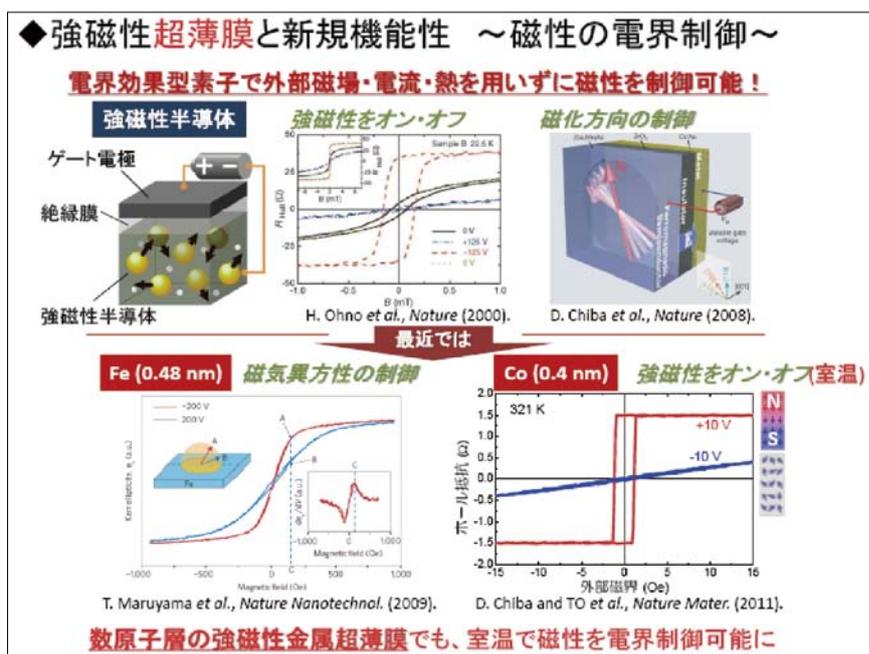


図 3.3.4

最後に、国内外の研究状況について最近の論文数を図 3.3.5 にまとめている。2000 年の大野グループの強磁性半導体の成果が第一歩で、それに対して海外のグループが追随している。金属系の研究がここ 1、2 年で始まっているが、半導体、金属とも日本は先駆的な研究をしている。これからも確実に研究者と論文数は増える分野である。

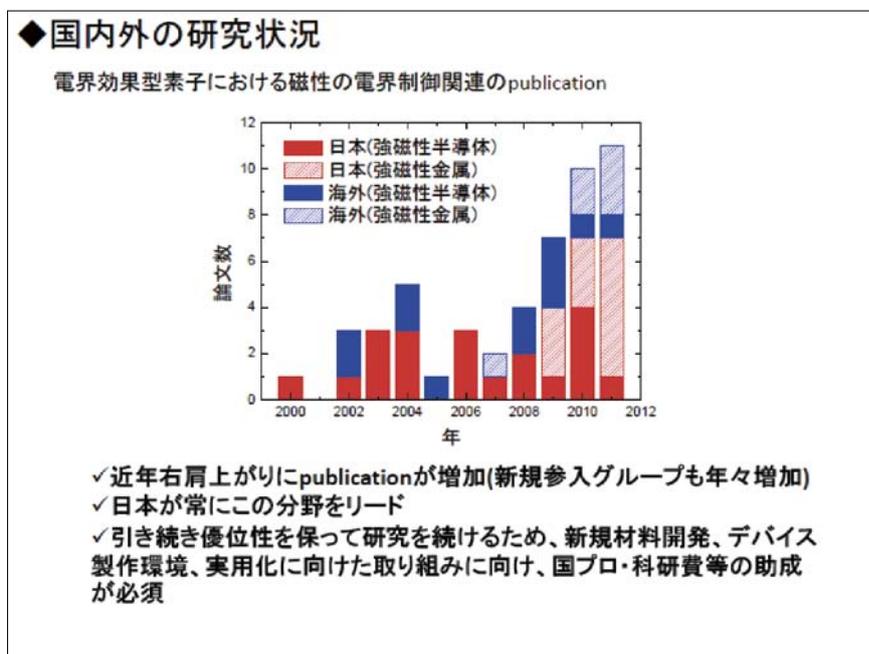


図 3.3.5

セッション4 有機系機能分子薄膜

4.1 大環状 π 共役平面分子の平面配位による無機ナノ粒子の機能変換

寺西利治（京都大学化学研究所 教授）

有機と無機の両面から、二次元物質の革新性をご紹介したい。有機物質と無機物質の機能融合による革新的材料創出のためには、単に有機物質と無機物質を物理的に接触させたり σ 結合で繋げるのではなく、両者間を電子的に結合させる必要がある。すなわち、無機物質表面と有機分子のナノ界面を精密に制御し、両者の電子軌道間を積極的に混成させることが必要不可欠だと考えている。三次元あるいは0次元の系では実現できないような革新的な機能を、異方性の高い二次元系で創出できる可能性がある。

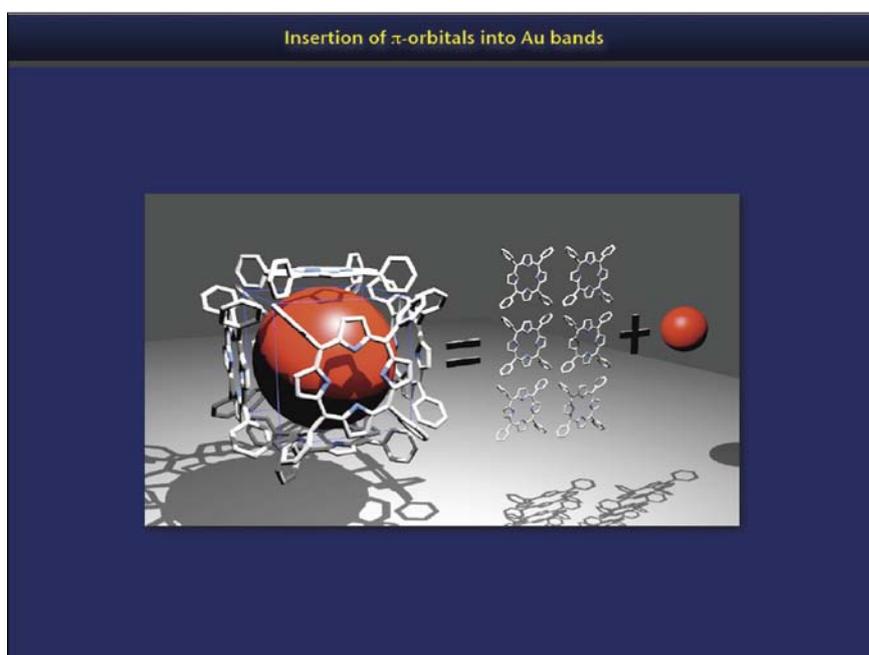


図 4.1.1

有機物質-無機物質ナノ界面に軌道混成をもつ系として、二次元平面分子のポルフィリン6個が1 nm程度の金クラスターを内包する構造体の合成に最近成功した（図4.1.1）。この系では、有機分子 π 軌道が無機物質表面に近接することにより、有機分子の $\pi \cdot \pi^*$ 電子遷移がほぼ消滅するとともに、有機分子自身の抵抗が激減する。さらに、ポルフィリン分子の設計によりポルフィリン π 軌道と金クラスター間の軌道の重なりを自在に制御することができ、抵抗の大きさをチューニングすることができる。この系では、 π 軌道と金との軌道混成が起き、有機分子が金属のように振る舞うようになる。金クラスターから見れば、自身の電子軌道にポルフィリンの電子軌道が挿入されているわけである。より大きな10 nm程度の金ナノ粒子にポルフィリン類似の大環状 π 共役二次元有機分子を結合させると、その溶液を塗布・乾燥するだけで電気伝導度 $\sim 7000 \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ の膜や線を作成することができ、有機デバイスにおける有機分子との接触抵抗の低い電極や配線として利用可

能である。

最近考えていることについて、ぜひ物理学の専門家の意見をお聞きしたいと思っている。例えば、図 4.1.2 に示すように、大環状 π 共役二次元有機分子の π 、 π^* 軌道 (HOMO-LUMO) を無機物質表面に自在に挿入することで、不導体の軌道を増加させ導体にすることはできないだろうか。また、金属のフェルミ準位近傍に多数の二次元有機分子 π 軌道を挿入することにより、フェルミ準位をチューニングすることができないだろうか。特に、表面の割合が大きいクラスター系や二次元無機物質でこのような π 軌道挿入を行うと非常に面白いことが起きるのではないだろうか。二次元絶縁体や半導体のバンドギャップに多数の二次元有機分子 π 、 π^* 軌道を挿入すれば、バンドギャップチューニングになるのではないかと考えている。また、二次元有機分子に外部刺激応答部位を導入しておけば、外部刺激に応じた π 軌道挿入が可能となり、無機物質の時空間的可逆電子構造変調が実現するのでないだろうか。

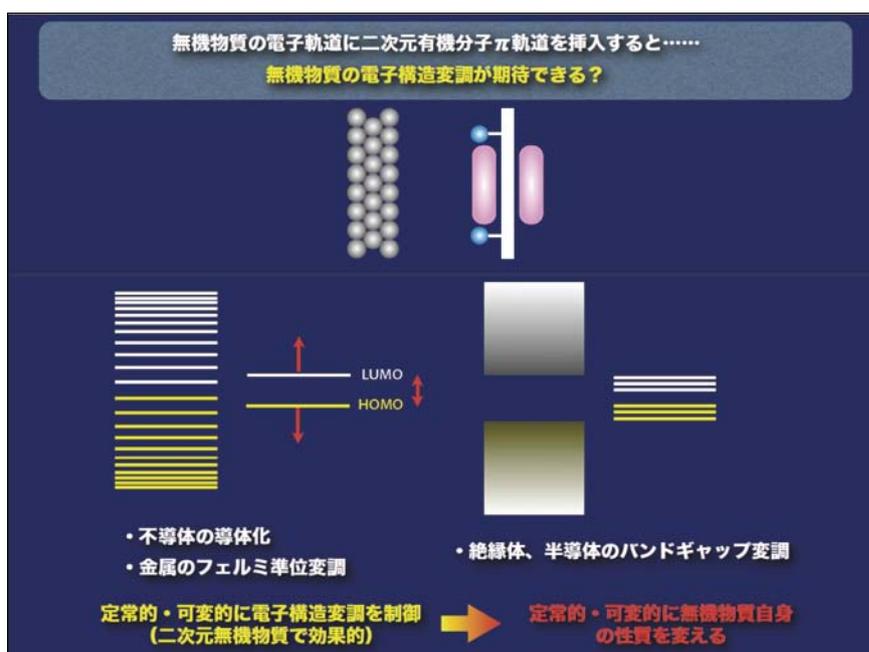


図 4.1.2

一方で、二次元無機物質の革新性の観点から、二次元無機ナノ粒子のプラズモニック特性について紹介したい。プラズモニクスは現在、科学のあらゆる分野で大きな注目を集めている。自由キャリアを有する無機ナノ粒子に光を照射すると、ある固有振動数でナノ粒子中の自由キャリア振動が光電場と共鳴する。これがいわゆる局在表面プラズモン共鳴であり、光電場をナノ粒子近傍に増強させることができる (図 4.1.3)。無機ナノ粒子の粒径・形状・組成を精密に制御することで局在表面プラズモン共鳴波長や光電場増強度を細やかに制御可能であり、無機ナノ粒子近傍に存在する有機・無機物質の光励起過程を増強光電場で高効率化できるのが、プラズモニクス研究の第一の魅力である。例えば、酸化インジウムスズ (ITO) ナノ粒子の近赤外局在表面プラズモン共鳴波長 (~2200 nm) で色素の二光子励起を行うと、ITO ナノ粒子不在下と比較し、見かけの色素励起効率 (見かけの

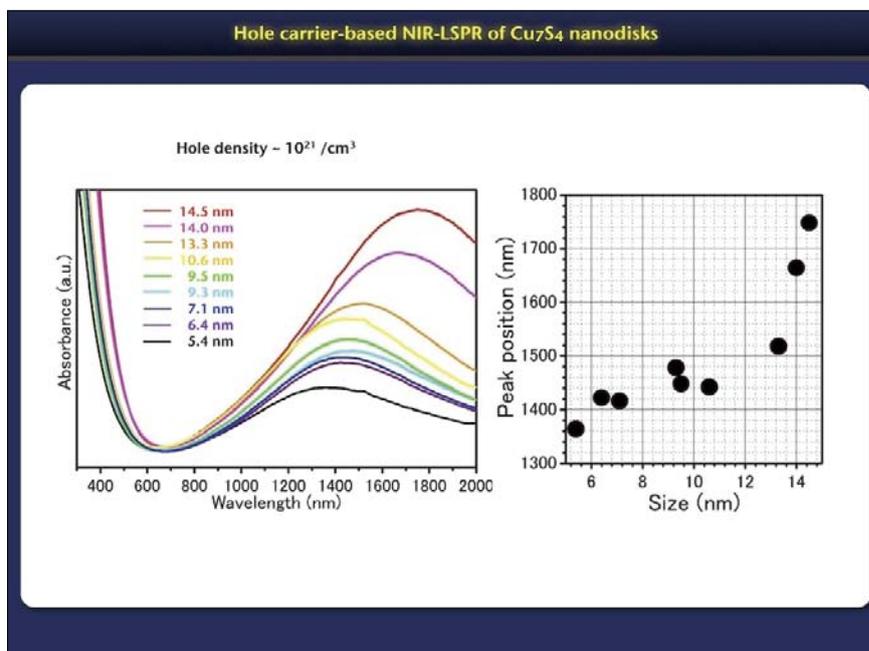


図 4.1.4

以上を総合すると、図 4.1.5 に示すように、安価で豊富な元素からなる二次元無機物質に大環状二次元有機分子の π 軌道を挿入することで、バンド（分子軌道）内あるいはバンド間の電子構造を変調して、元素の性質を超えた物性・機能を発現できるものと期待できる。また、無機物質の二次元化のみに着目しても、異方性双極子を発現させることにより利用可能な光の波長領域を紫外から可視・近赤外に大きくシフトさせることで、通常利用できないユビキタス材料の利用範囲を拡張できるものと考えられる。以上のような概念が確立できると、すべて安価で豊富な元素からなる物質を有用なエネルギー関連材料へ展開可能であり、無機材料の設計指針を大きく転換できるのではないかと大いに期待している。こうした研究はおそらく中長期的に成果を出す必要があり、10～15年を目途に学独を中心に基板技術を創出していく必要がある。

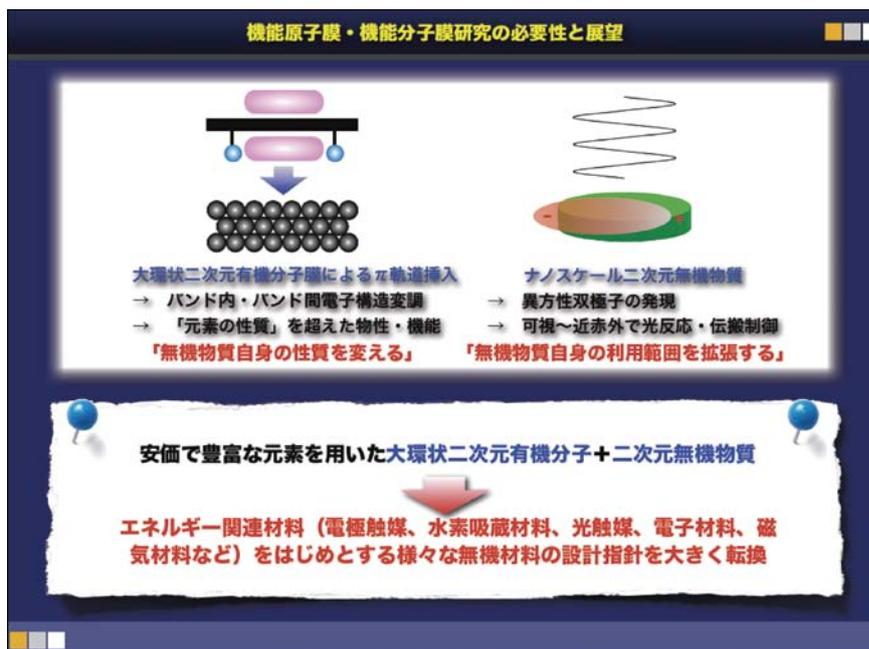


図 4.1.5

質疑応答：

- ・ ポルフィリン分子と金粒子の間の具体的な距離はどれぐらいになっているのか。
- 実際に距離を測定することはできないので、ポルフィリン単結晶から予測するしかない。例えば、硫黄原子とフェニル基の間にメチレン基が一つあるものでは、硫黄とポルフィリン環の距離が 3.45 オングストローム程度離れているが、メチレン基が一つ増えると 4.85 オングストローム程度まで伸びる。メチレン基がない場合、約 2.0 オングストロームの距離になると思う。ほとんど双方の軌道がオーバーラップしてもおかしくない距離である。

- ・ 二次元の無機物質と組み合わせる際に、例えば酸化物を用いる場合にはまた別のデザインが必要になるということか。
- Yes。酸化物と結合できる官能基を導入すればよい。

4.2 二次元物質の合理的デザインへ向けた基盤技術創出

福島孝典（東京工業大学資源化学研究所 教授）

有機物の二次元物質は無機物と違い、その定義が曖昧であり、現時点ではまだ基礎科学を確立するステージにある材料ではないだろうか。例えば、「二次元ポリマー」を厳密に定義すると、やはり原子一層からなるグラフェンのように、分子1層からなる単分子膜か、せいぜい2分子膜ぐらいを対象にするのが正しいように思う。しかし、実際に完全な単分子層でできた二次元物質（膜）があるかということ、国際的に見てもその成功例はほとんどないというのが現状である。

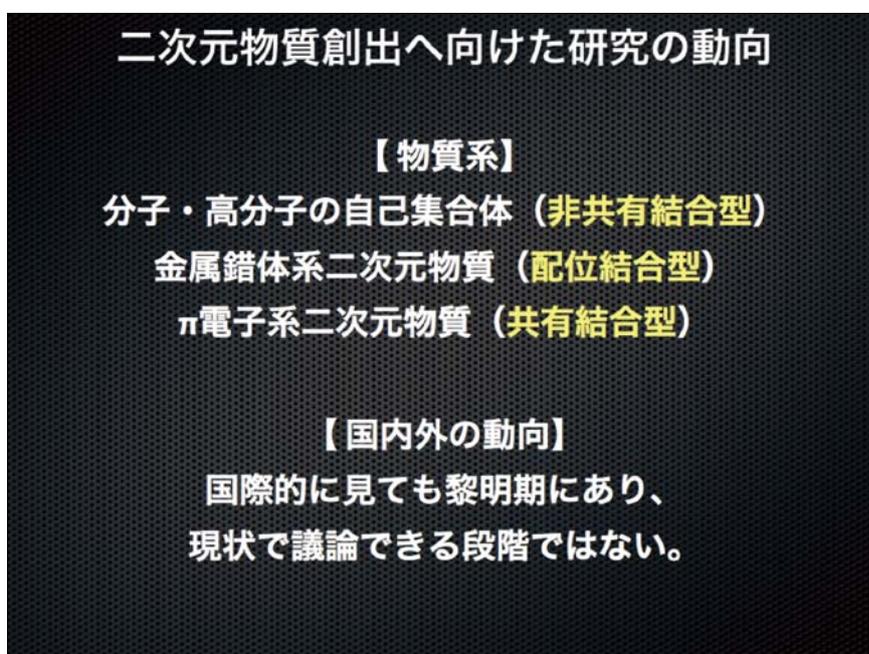


図 4.2.1

有機物質の特徴は、無機物質やグラフェンと違い、コンポーネントである分子一つから設計できる優れたデザイン性にある。また、複合化を含め、無限の拡張性があるということも大きな利点である。強度や電子的な性質では無機物質やグラフェンに勝てないものの、デザイン性を活用して新しい機能の創出を可能にする物質系だと考えている。有機系では分子の自己集合化によって構造形成が行われるが、その際に使われるドライビングフォースはほとんどの場合、両親媒性に基づく分子間相互作用やマイクロ相分離による。こうして二次元構造が実現されている系として、自然界に例を探すと細胞膜がある。細胞膜は、電子的な性質ではないが別の機能をいろいろ担っており、このような構造体は二次元物質デザインへの原理やヒントを私たちに与えてくれる。

私たちもカーボンナノチューブとグラフェンから着想したチューブを作っているが、それらは二分子膜構造からなっているので、全体的な構造は1次元でも擬の二次元物質と言って良いように思われる。カーボンナノチューブと比較すると、我々が作成したナノ

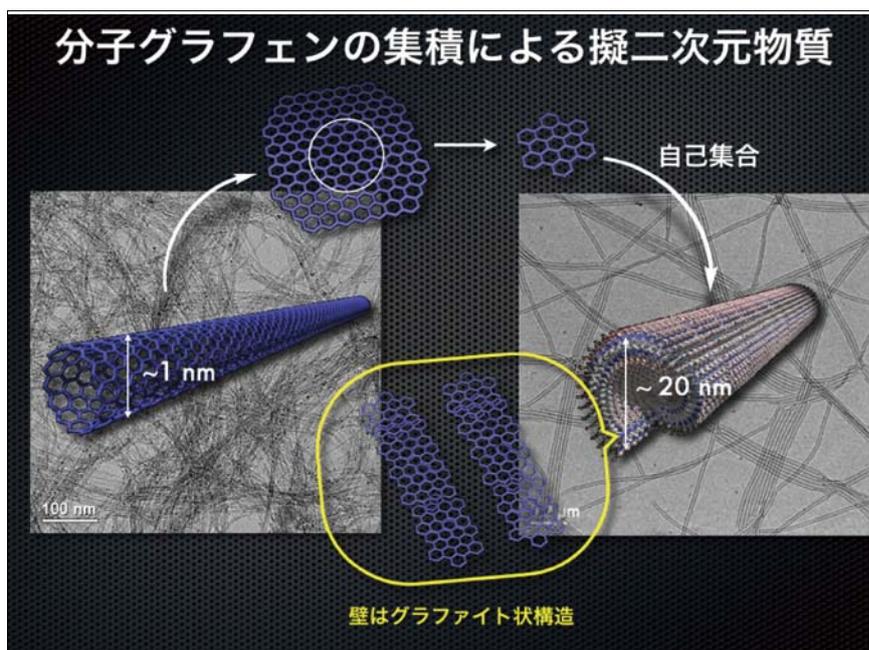


図 4.2.2

チューブの径は 20 倍ぐらい大きく、グラファイトの部分構造をもつ分子が集まったアレイからできている。この物質の特徴は、化学合成で作ることができ、かつ収率 100%で定量的に得られることにある。また、コンポーネントである分子をデザインすることで、いろいろな性質を付与することができることも重要なポイントである。

このような有機物の優れたデザイン性を利用すると、例えば、光を当てると電気が流れるナノワイヤーなどを実際につくることができ、また、まさにグラファイトとフラーレンの複合体のようなものも合成することができる。このように、擬の二次元物質と呼べるものの合成例は多々ある。適切な分子デザインと自己集合を利用することにより、ナノスケールで精緻な構造体の作り込みは可能になってきたが、残念ながら得られる物質は、無機物質などに比べて物性はまだまだというのが現状である。自己集合系は、熱力学的に安定な構造をエラーなく作ることができるため合成方法としては有望であるが、構成要素が非共有結合性の相互作用で結び付いているため構造が脆弱であることも問題である。一方、コンポーネントとして金属錯体を用いた例も多く検討されている。ごく最近、界面を利用して、配位子と金属イオンを集積化して二次元物質を構築した例が報告された。比較的強い配位結合を使った自己集合システムであり、大きなサイズの単分子膜が得られている。ただし、物質のキャラクタリゼーションを行ったに過ぎず、性質については明らかにされていない。コンポーネント間の強い相互作用による相乗的な機能の実現にはほど遠い段階である。また、現在までに得られている例では、自己完結させてしまった構造を持つため、そこにどういう機能団や機能を付与して行くかということが問題になるだろう。

有機系二次元物質の最重要課題は、共有結合系の実現であろう。また、コンポーネント間の電子的なカップリングを強めた形でネットワーク構造をどう作るかというのも重要である。今後の取り組みの時間軸に関しては、まだ実例がほとんどない状況で見えているわけではないが、作製方法の基盤技術さえ開拓できればそこから先は早いだろうと考えてい

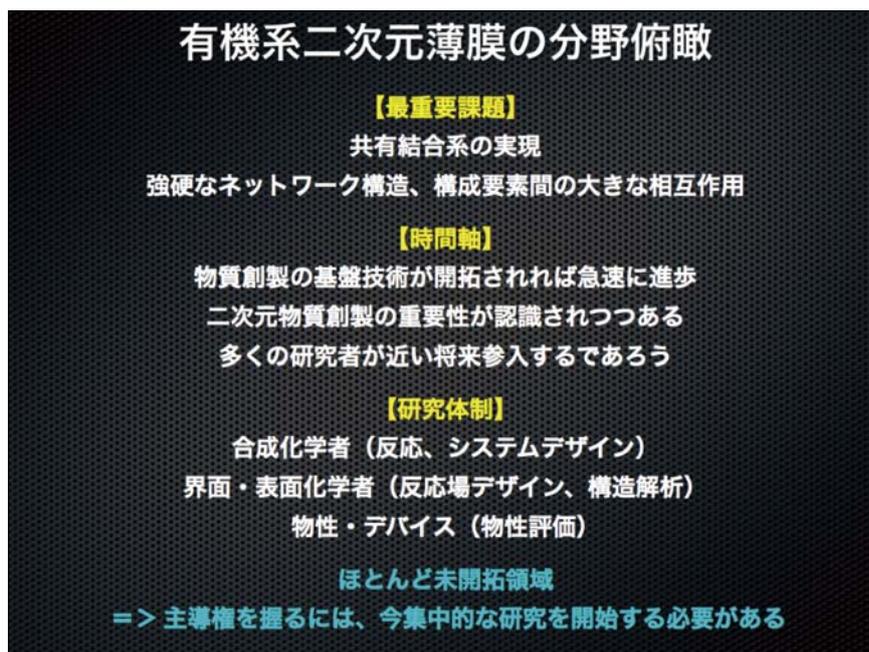


図 4.2.3

る。グラフェン研究や薄膜を扱う技術はかなり成熟してきているので、物質のキャラクターゼーションや応用展開にはそれらを適用することができる。研究体制に関しては、日本が非常に強い有機合成化学を活かして、その分野で活躍する合成化学者に分子だけでなく、もう少し材料を作りましょうという方向性を持ってもらうことであろう。二次元を作るのであれば、やはり二次元基板などをうまくテンプレートにするのが合理的な手法と思われる。界面・表面科学者とも共同し反応場のデザインを行い、そこに日本屈指の合成化学技術を投入すればできるのではないかと（図 4.2.3）。

さらに、作ってキャラクターゼーションして終わり、ということではいけないので、やはりデバイス研究者が入ってデザインへの提案ができるような体制が良いであろう。二次元有機物質は未開拓の領域であり、今後主導権を日本が取っていくためには今から集中的な研究を開始する必要があると考えている。

応用例としてトランジスタの例を上げる（図 4.2.4）。有機モット FET は移動度が非常に高く、200 ～ 300 が実現できているという話だ。しかし、オフ電流を抑えるために非常に低温でしか使えないという点が問題である。これを解決するためには、有機チャンネル層を超薄膜化して、単分子膜や二分子膜ぐらいのものを作ってバルク電流をカットすることができれば、移動度 200 や 300 でかつ室温で作動するデバイスができる可能性がある。まさに二次元物質によって、有機トランジスタの世界が変わるのではないかとという希望が持てる。有機系二次元薄膜がデザインできるようになると、使える用途としてはフレキシブルセンサーや触媒なども考えられる。二次元物質は言わば全てが表面であり、特異な機能を最大に引き出せる構造体であることは間違いない。さらに、医療材料への展開などでも意味がでてくるのではないかなと考えている。

私たちが合成したディスク状分子で分子量が 576 ぐらいのものがあるが、蜂の巣のよう

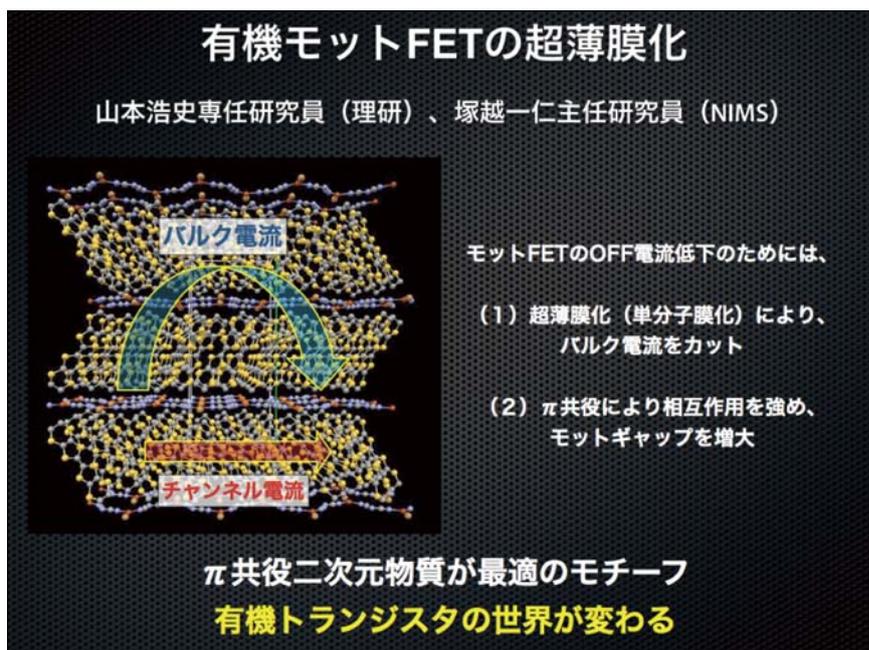


図 4.2.4

なへキサゴナル格子をつくって集まるものがある。もしこの物質を角砂糖 1 個分に相当する量を作って、単分子層で広げていくと、サッカーグラウンドの半分を占める面積になる。フラスコで容易に合成可能な、ナノとマクロをつなぐ物質系であって、私たちが手でさわれる。作ってしまえばおそらくプロセスはローテクでできる。1 分子を扱おうとした分子エレクトロニクスとは大きく異なる点である。すなわち、膜として扱える二次元材料は、ナノスケールの構造精密さをもったマクロな物質であり、ハンドリングの問題は解決できる。高機能性も期待できることから、超省エネルギーや、省資源、超コストに恰好のモチーフになると思う。

まだ誰もやれていない、ほとんど手つかずの分野であり、日本の合成化学の技術を結集して、世界の主導権を握っていく絶好のチャンスではないかと考えている。

質疑応答

- ・ グラフェンに対してどれだけ優位性があるのか。もっと共役性を上げるとか、結合性を上げるといったことだったら、最終的には結局グラフェンシートをきちんと作る技術があれば一番良いということになるか。
- グラフェンと真っ向から闘う必要はないと思う。グラフェンと同じようなものではなくて、デザイン性をどう活かすかがとても大切になる。分子レベルの触媒であるとか、センサーであるとか、エレクトロニクスに関係がないものでもよい。グラフェンが使えるものであればグラフェンでやれば良いと思うが、グラフェンとは違ういろいろな機能を持たせることができるのではないか。
- ・ 得意なところと不得意なところがあると思う。ハイブリッドもあって、無機系にはどういう機能を期待するか。
- やはり有機が弱いのは電気物性であり、また、磁性も弱い。そういうものは無機物

質に期待する。例えば燃料電池用の固体の電解質膜を作るときも、無機をサポートを得ながら有機物を使うことによって、すごく早いホッピング伝導でイオンやプロトンを動かすということも可能になるかもしれない。普通に考えられる物理的な性質ではやはり無機には勝てなくて、それを同じレベルで作らましようというよりは、お互いを補うような、無機を足場材料として有機と複合化させるという利用法もあっても良いと思う。逆に、無機の性質を変えるための有機物であっても良いと思う。いろいろな考え方があろう。

4.3 ラダー型環状オリゴマーを基盤とした分子レジスト材料の開発

工藤宏人（神奈川大学工学部 准教授）

有機化合物でレジスト材料の合成を研究しているが、レジスト材料は1980年代からレーザーがg線、i線、KrF、ArFと進展し、2000年頃から企業や大学の研究者によってF₂レジストの多くの材料が開発された。ところがF₂がぱたっと消え、今現在ではArFレジスト材料が液浸レジストとなって、32nmパターンが市販されている。さらに次世代はExtreme Ultra-Violet Laser (EUV: 極端紫外線) が期待されて、波長13.5nmのレーザーまで絞られてきている。現在では22nmの領域だが、なるべくこのパターンを絞りたいということで、当面目指しているのは16か15nmというところである。しかしながら、15nmも私はあまりターゲットに絞っておらず、さらにその先の7nmぐらいが終着点かと考えている。そこまでパターンを絞ってくると分子レベルであり、分子レベルを扱うにはどうすればいいかについて研究をしてきた。

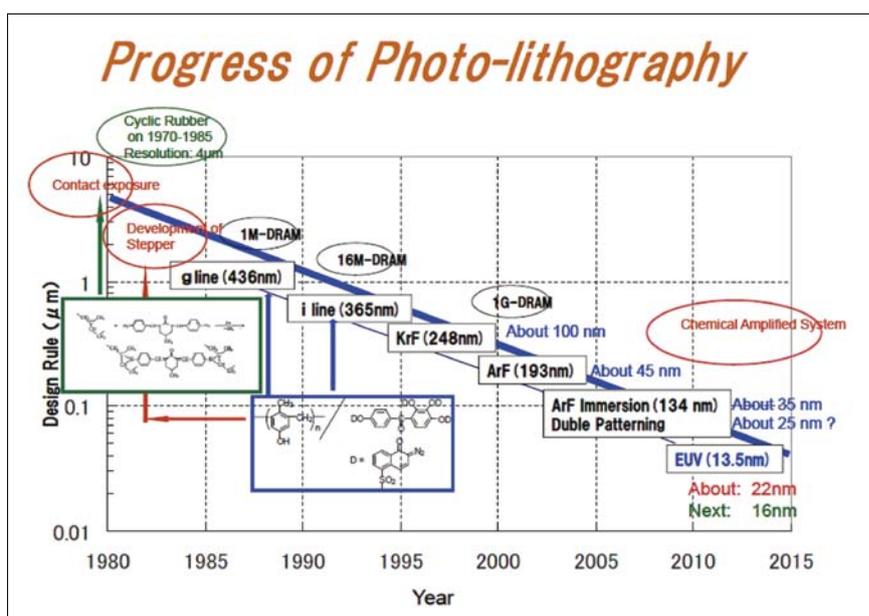


図 4.3.1

現在、EUVレジスト材料の研究を大学で遂行しているのはもしかすると日本では私だけかもしれない。それほど研究人口が減ってしまい、減少の理由は有機化学の研究者がEUV露光機にたどり着けないことにある。EUVは13.5nmの極端紫外線レーザーだが、これで狙っているのは22nm以下であり、レーザーに対して感度を高めなければいけない。22nmのレジストパターンを切ると、側面のギザギザ（ラフネス）が悪影響を及ぼすためこれを何とかクリアしなければいけない。レジストを切るときにはレーザーを照射することになり、材料としては透明性が問題になる。ArFの場合、透明性を付与するために非常に難しい分子設計をしてきたが、EUVでは透明性をほとんど気にしなくてよい。なぜなら、元素に依存するからであり、炭素Cや窒素Nや酸素OというのはよくEUVを通すためである。したがって、まさに有機化合物でCとNとOを使えばどんな有機化合物

も作れるため、本当は分子設計がしやすいはずである。有機科学者はここに手を付ければいろいろな材料ができるはずだが、実際には手が付けられていない。解像度と感度とラフネスのどれかを縮めると、残りが高くなってしまという三者のトレードオフの関係になっている。このトレードオフの関係を打ち破るような材料や露光システムが必要ということであり、そこで注目されているひとつが、分子レジストである。

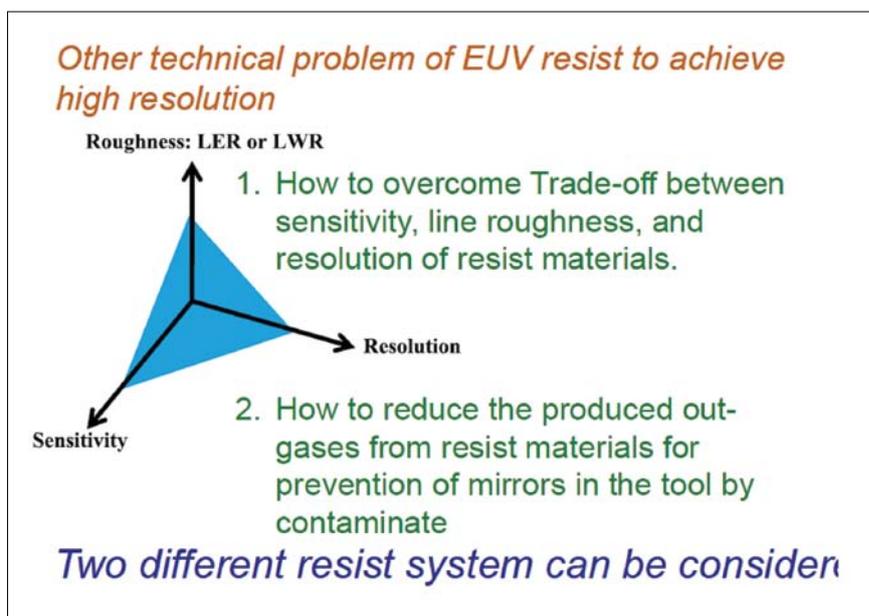


図 4.3.2

これまでのポリマーレジストと比較すると、分子サイズが大きなポリマーではレジストパターンを切ったときにギザギザが大きくなってしまいが、分子であれば、サイズが小さいためあまりギザギザは出ないのではないかと期待されている（図 4.3.3）。

電子線レジストパターンの報告は数多くあり、大体 40nm、解像度としても良くても 30nm の解像度だが、これが 20nm 以下のレジストパターンになるとほとんど報告がない。EUV のレジストパターンはどうかというと、2010 年に産総研／Selete の研究で、フラーレン型で 26nm のパターンが得られているという報告があるが、実は 2010 年で報告がばたっと止まっている。2011 年からの報告はほとんどなく、実際は誰もやらなくなった、やれない環境になってしまったといえる。

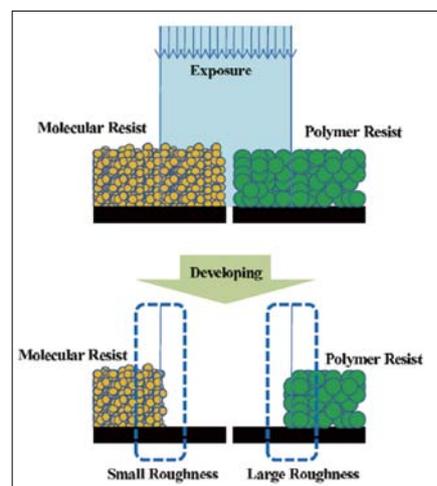


図 4.3.3

私は環状化合物のカリックスアレーンに注目してきたが、その理由は分子の側鎖に光反応性基を付ける際、ポリマーに比較して環状オリゴマーは光反応性が良いからである。環状オリゴマーでレジスト材料を作れば、感度が稼げるのではないかと考え研究した。環状オリゴマーにはもうひとつ利点があり、機械的特性がよい。環状オリゴマーを使えば、ポ

リマー並みの機械的特性とオリゴマーの光反応性の両方を持っているため、環状オリゴマーを使ってレジストを作れば高感度のものができると考えた。その後分子設計の改良を重ね、水車の構造に似ている *Noria* という分子を合成した。*Noria* を電子線レジストで評価してみると 77nm までできたため、EUV レジストとしての適用を検討した。官能基の導入率を変えることで、22nm で何とかパターンが得られているところまできた。さらに、*noria-Alkoxy*, *pyroNoria*, *calixarene-dimer*, *calixarene-trimer*, *double-calixarene*, および *triple-calixarene* など、特殊構造分子の合成にも成功している。これらの分子をレジスト材料に展開すれば、次世代レジスト材料の分子設計指針も構築できるものと考えられる。しかし、これらを 15nm まで達成するには、まだいろいろなことを検討しなければならない。検討するための場所が有機化学者には非常に必要だが、例えば EUV 露光機の現像液に関しては、ほとんどが 2.38 wt% のテトラメチルアンモニウム水溶液であり、変更が許されていない。おそらくこういったところを変えると、分子レジストはそれに敏感に反応するため、きっと 15nm や 7nm ナノメートルの達成が見えてくると考えているが、なかなかそこまではたどり着けない。つまり、有機化学研究と EUV 露光研究が上手にコラボレーションが組める環境すらないのが現状であり、大きな問題である。

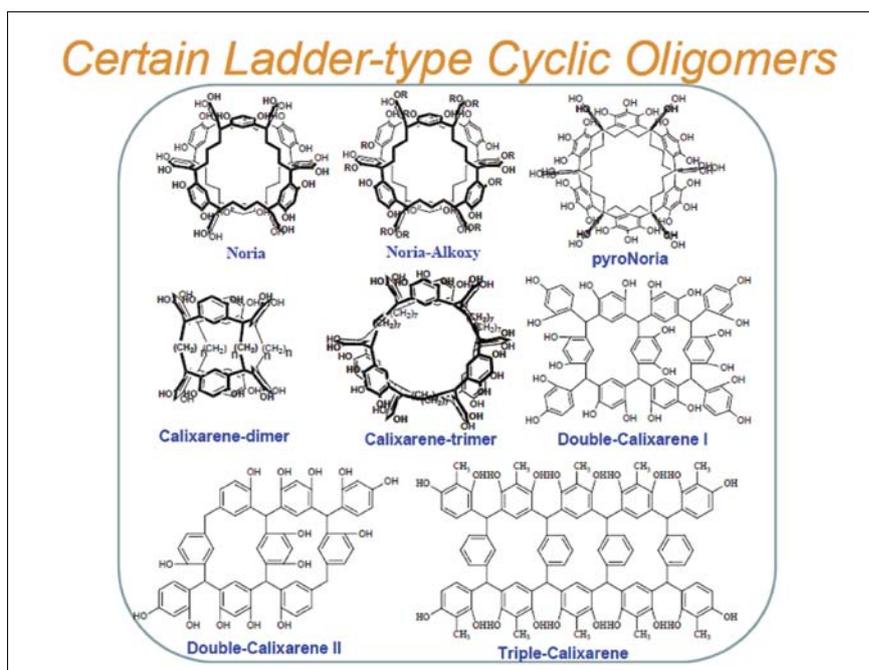


図 4.3.4

まとめると、レジストシステムは透明性の後の制約が緩くて本来は分子設計が容易であるはずであり、1x ナノメートル、つまり 15nm のレジストパターンが狙えるはずである。しかし、現状では新しいレジスト材料が無く、分子設計の指針も無い。その原因は、露光機までのアクセスが遠く、あるいは無い。また、この状態では日本は EUV レジスト材料の研究に遅れて、その結果、日本の半導体産業は世界の競争に取り残される可能性がある。これを打破するためには、EUV 露光機を基に分子設計が得意な有機化学者と EUV 露光機研究者および技術者が共同で取り組む体制が求められる。EUV 露光機はもちろんクリーンルームにあるため、クリーンルームからちょっと離れたところでも構わないであろうか

ら、EUV 露光機の近くに有機化学の研究室があれば、新しいコンセプトの分子設計と、露光機の機械設計の両方を打ち出すことができるのではないかと考えている。その結果として、15nm や 10nm、7nm のレジストパターンが可能になるのではないかと考えている。

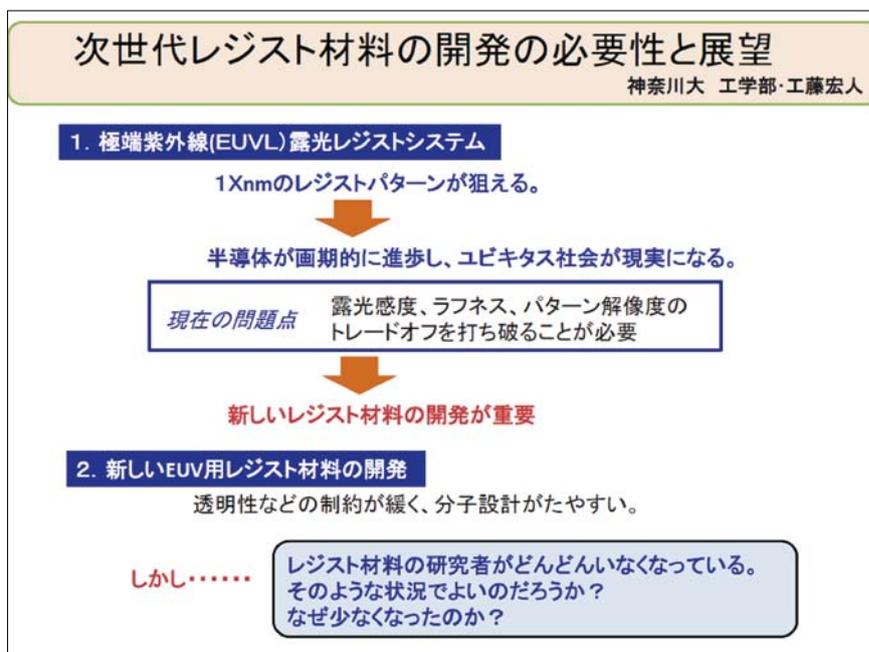


図 4.3.5

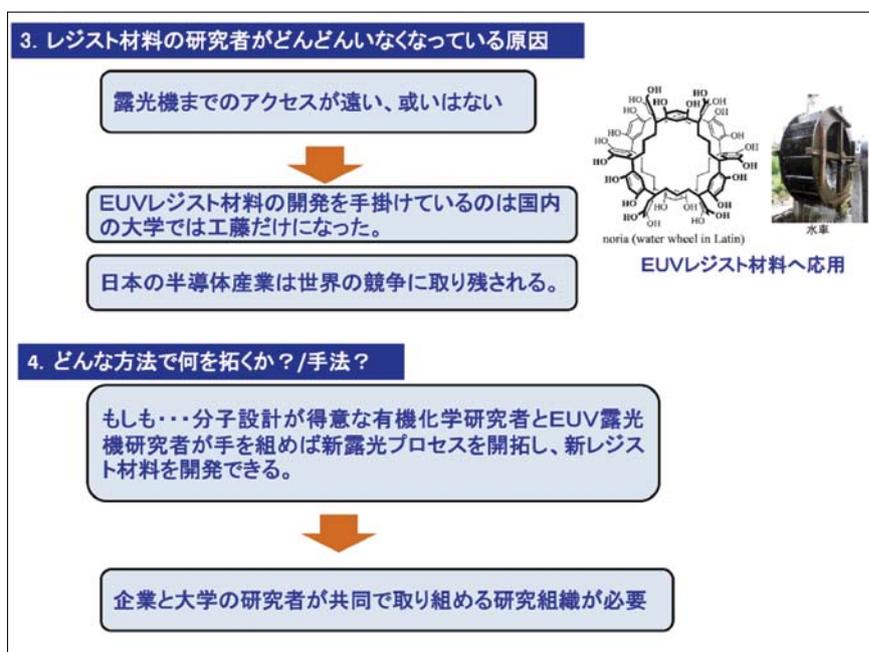


図 4.3.6

セッション5 全体討論

5.1 国際的ファンディング状況について

榎 敏明（東京工業大学理工学研究科 教授）

組織的な調査ではないが、各国で指導的な立場の先生方で、個人的にコンタクトのある5、6名の方と一緒に議論して得た情報を元にお話する。まず、シンガポール、グラフェン・センター所長の Antonio Castro Neto。アメリカではジョージア工科大学の de Heer 教授、テキサス大学・オースティンの Ruoff、そして、クリントン大統領のときのナショナルナノテクノロジー・イニシアティブの責任者であった Dresselhaus。

また、中国は中国科学アカデミーの物理研究所所長の Gao 教授で、彼は今年のグラフェンのコンファレンスのチェア。韓国からは Ahn 教授。彼は昨年 of グラフェンのコンファレンスのチェアをつとめた。もう一名、イギリスから Vladimir Falko 教授。彼はヨーロッパ全体のプロジェクトをまとめる責任者だが、EU 関係を幅広くケアしている。

まずシンガポールのグラフェンセンター所長、Antonio Neto によると、グラフェンセンターには、およそ5年間で S\$100M（100 ミリオン・シンガポールダラー）の運営費の配分があり、それとは別個に S\$30M が研究者や産業界に流れているので、全体としては大体 S\$130M、これはおよそ米ドルにして USD \$100M くらいと思えばよい。

一方、米国では個別の研究が中心で、中央で組織した大型プロジェクトはなく、個別にいろいろなことをやっている。他の方も大体同じような意見を持っていて、いろいろなところから出てくる独自の成果が、総体としてアメリカの科学技術を支えているという見方であった。

中国の場合は、グラフェンのナショナルプロジェクトとして 973 プロジェクト、これが大体 USD \$10M と、加えて、個々の研究者に与えられるファンドが \$14M、これらの合計として約 \$20M ～ \$30M でファンディングが構成されている。

彼の言では、日本はナノチューブではずいぶんいろいろと研究が盛んで、投資もかなりやられたが、日本はその後のグラフェンではサイエンティフィックにも、また、お金の問題も特に深刻で十分なケアがされていない、国際的なコントリビューションも見えにくい、とのことであった。

韓国は、いくつかあるが、nanomaterials based soft electronics、これは有機物も含めたものだが、42人のグラフェン研究者が一緒になって9年間のプロジェクトをやっている、年間 \$9M ～ \$13M。それから、産業界のアクティビティとしては、例えばサムスンや LG で活発に研究をやっており、トータルで大体 USD \$200M、この規模の投資がなされている。

イギリスの情報は Falko 教授からいただいた。彼はグラフェンを中心とするいろいろな国際会議に関わっており、2006年にグラフェンウィークという会議を立ち上げたり、その他にもグラフェン関連の委員会の責任者やEU関係のプロジェクトの責任ある役職を色々やっている方で、昨年11月にも日本とイギリス合同でグラフェンのワークショップを実施した。その縁で Falko 教授にヨーロッパ、および世界のグラフェン研究とファンディングの状況についてお尋ねしたところ、パワーポイントの資料を送っていただいたので、ここに紹介する。

まず、パブリケーションを見てみると、アメリカはやはり圧倒的にパブリケーションが多い。次に中国、日本、それからイギリス、ドイツ、フランスと続く。日本もそれなりのパブリケーションを出している。各地域の分布としては、大体ヨーロッパとアメリカとアジアで三分してグラフェン研究のアクティビティを保っている形だ。

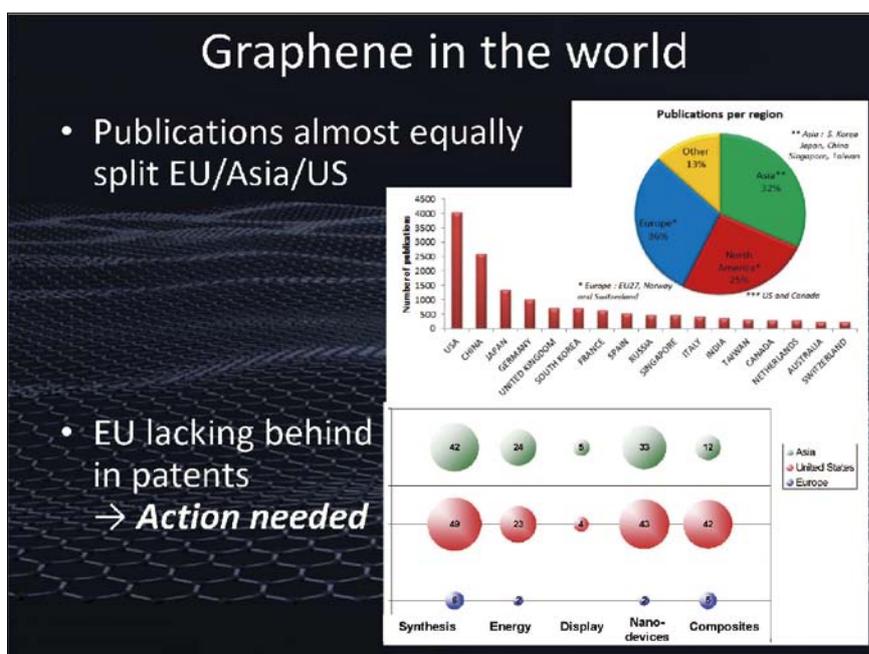


図 5.1.1

ヨーロッパの弱いところは何かというところ、特許である、と彼らは認識している。このグラフは、合成、エネルギー、ディスプレイ、あるいはナノデバイス、コンポジットといった分野で特許数の統計を取った図だが、概してヨーロッパは特許を取ることにあまり興味無く、特許ではアメリカと日本を含むアジアが中心だ。

次にヨーロッパのグラフェン関連のファンディング状況を紹介します。最初は2006年、グラフェンウィークというコンファレンスをスタートした。その後、オランダVOMのプログラムで約5M€(5ミリオンユーロ)、期間が2008年から2012年ということで走り出した。それから、イギリスのほうは2008年にScience and Innovation Awards for 4 Graphene Centersということで15M€、期間は2009～2014年、このようなファンディングがある。

European graphene funding	
2006	Annual <i>Graphene Week</i> Conference series has been started (MPG, ESF, ICTP-UNESCO)
2007	Netherlands: VOM Programme <i>Graphene</i> (5 M€ in 2008-12)
2008	UK: EPSRC <i>Science and Innovation Awards</i> for 4 Graphene Centres, 15 M€ in 2009-14
2009	ESF (22 countries): Eurocores Programme <i>EuroGraphene</i> , 7M€ for 36 groups in 2010-13
2010	Germany: DFG Priority Program <i>Graphene</i> , 15 M€ for 36 groups in 2011-16 EU-FP7 STREPs <i>GRAND</i> , <i>ConceptGraphene</i> ; <i>RODIN</i> , <i>GRANADA</i> (15 M € in 2010-13)
2011	UK Graphene Hub (£50M investment into infrastructure in 2012-2013); Sweden: 10M€ investment in Chalmers graphene centre (2012-2016); Denmark: 5M€ investment in Danish graphene centre (2012-2015).

図 5.1.2

その後、2009年にヨーロッパ22ヶ国のプログラムで、Euro Grapheneがあり、36グループに2010年から2013年にかけて7 M€が配分されている。それから、2010年にドイツでは、2011年から2016年に36グループに対して15 M€。それから、Concept Grapheneというファンディングだが、2010年から2013年で、15 M€となっている。

昨年2011年の秋ぐらいに、突然マンチェスターのグループにイギリス政府の責任者が訪問して、グラフェン研究に50ミリオンポンド出すということで、マンチェスターのグループは非常に驚いたらしいが、インフラストラクチャーへの投資という名目で2012年～2013年にかけて、かなり大きなファンディングが動いている。

それからスウェーデンが10 M€(2012～2016)。デンマークが5M€。昨年ぐらいから、Falko教授を中心にして、ヨーロッパのなかでファンディングを得ていこうといったEUとしての全体的な動きが非常に強く出てきている。

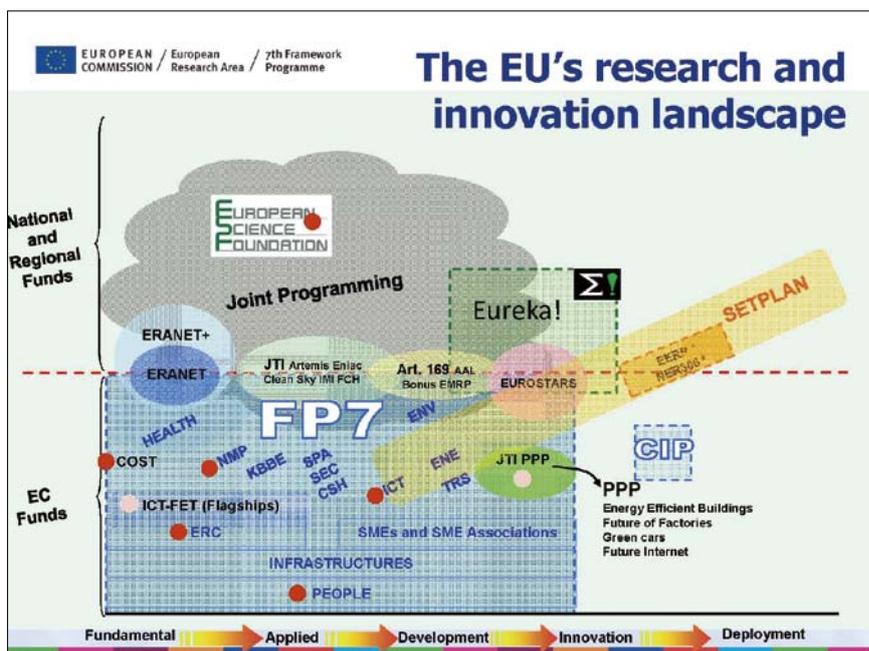


図 5.1.3

これは、ヨーロッパの研究とイノベーションの関係のランドスケープを描いたものだ。ファンダメンタル、アプリケーション、デベロップメント、イノベーションという格好で多様な階層のプロジェクトが走っていることがわかる。

Falko 教授をはじめ、インドの首相アドバイザーを務めている先生方とも議論をしたが、これらファンディングの主なターゲットは、グラフェンではあるのだが、グラフェンに加えて 2 次元物質、これを入れなければならないということを非常に強調していた。そういう意味で、世界的な動向としてグラフェンに他の 2 次元物質も加えて、総合的な 2 次元物質の展開といった方向性が潮流になりつつあるといえる。それから Falko 教授は同時に産業界とのインタラクションが非常に重要とも指摘しており、前回のイギリスとの会議ではいろいろな産業界の方々の発表も加えていた。

化学と物理の間は、この 20 ～ 30 年の間にかなりインタラクションが強くなってきている傾向にあり、例えば化学者の作った物質が物理で利用されて種々の新現象を出してきたということがある。まさにこのインタラクションの部分が核心である、ということが岩佐先生のご指摘だと思う。その意味で、今これからプロジェクトを立ち上げるとすると、化学と物理に同時にアプリケーションが一体化する、こういった問題の立て方、プロジェクトの立て方といったことが重要となる。外国のいくつかの国のそれぞれ責任を持ってやっている人の話を聞いても、その点が強調されていた。

その意味では、例えばシンガポールや韓国といった国では総合的な化学が未だ十分にできていない状況にある。日本では先ほど福島先生の話もあったが、合成化学というのは非常に強い分野だ。従って、日本でプロジェクトを立ち上げるとしたら、化学、物理、それからアプリケーションと併せて、総合的な学問、技術が発展する可能性があり、日本は独自の強い力を持って新しい方向が展開できるという意味で、今がチャンスだと思う。

総合討論

A：欧米では、アプリケーションとしてどういうものをターゲットにしているのか、それともまずは基礎を固めようとしているのか。

B：たとえば基本デバイスが一つのターゲット。その他としては、いろいろな化学的な機能の応用、たとえば、触媒などを含めて総合的に広い視野でのアプリケーションを考えているようだ。

C：論文の数や特許の数についても、日本のアクティビティはかなり悪くないデータが示されているのだが、外国人にまで日本ではお金が出ていないという印象を持たれているというのはどういうことなのか。

B：グラフェン関係では、「カーボン」という代表的な雑誌があるが、昨年までは論文数で中国が 1 位、日本が 2 位だった。昨年で抜かれて、今は論文の数はカーボンに関して

は中国、韓国、日本の順だ。先にお見せした統計データは少し古く、最新のデータでは、やはり日本の苦戦が外からも鮮明に見えてきているということだと思う。

また、ファンディングについては、ある程度の大きさを持ったまとまったものが確かに無い。そういった意味で、外から見て（グラフェンや2次元物質に対する）活動をしているということが見えないのではないか。他の国ではプロジェクトを立ち上げてやっているという意識が非常に強く、アメリカは少し様子が違うが、そういった意味で目立っているし、それを政府が後押しするという姿勢が非常に強い。それから、例えば国際会議に出てみると、日本人が招待講演者として出てくるケースが比較的少ないように思う。全体的に、いろいろな会議のリードを他の国がやっているという感じが非常に強い。

D：日本の総合的な戦略が見えていないことと、個々にはある程度論文があるにもかかわらず、会議などの責任を持つ体で行動をしていないというご指摘だと思う。

B：この分野では、国際会議を日本が責任を持ってやったというケースはない。小さい会議はいくつかやっているが。日本もコミュニティーのなかで実力を示す、ということに注意を払うことが必要ではないか。

E：企業が持っている特殊技術を掘り起し、例えば、グラフェンのプロダクションに職人技を活用するような戦略はあり得るだろうか。

F：NEDO でここ数年実施している「ナノテクチャレンジ」がそれに近い仕組みを持ったプロジェクトであり、そういった趣旨の事業を全くやっていないわけではない。

G：日本では、文化的にも気質的にも、いいアイデアがあったら、大学から飛び出てベンチャーを始める、という雰囲気が希薄だ。米国ではトップ大学の優秀な人間が、ベンチャーを始めることは珍しくないが、日本ではなかなか考えにくい。企業内の特殊技術を掘り起してスポットライトを当てるような事業も、本当の意味で今の日本で成り立つかどうかは、すぐには結論がでないように思う。

H：製造装置を作る観点からすると、中小企業の技術力というのは非常に魅力的で、実際われわれの装置は、こちらがデザインして、中小企業で作っていただいている。そこでディスカッションしていく中でいろいろなアイデアが得られる経験をしているので、今までに無い装置を作って、高品質のグラフェンを作るといった可能性は十分あり得る。ただ、直接中小企業にファンディングをするというよりは、やはり大学の先生のような方にファンディングをして、それを中小企業の方と一緒にやっていただくというのが、現実的なところではないか。

D：もっとこういうディスカッションの場を設けさせていただいて、活発な議論を時々するというのが重要と思う。その中からコラボレーションが生まれ、可能性の芽を顕在化させていける形を作れるとよい。また一方、第四期として課題解決型という日本の方針があ

るので、例えば、グラフェンの信頼性などを科学的に徹底的に調べることから何か始まる可能性もあるのではないか。

G：やはり公的資金による研究開発を行おうとする以上、社会が今何を求めているのかということ、われわれ自身は常日頃考える必要がある。特に今のような日本の状況や世界の状態になってくると、それは避けがたいことである。しかし、それは科学技術の側の発展を促進するためにファンディングをしないという意味ではない。われわれ自身は科学技術の世界で今どういうことが進んでいるのかを注視し、我々が俯瞰や深堀などと呼んでいる調査と議論の活動の中で、グラフェンをはじめとする2次元物質という観点が大事だと気がつき、本日のワークショップを開催している。適確に今の日本の状況を掴んだ上で、皆さんのご意見も聞いた上で、われわれとしては提案をしていきたい。

I：二つ、お話しさせていただきたい。ひとつは私たちのところは受託分析の仕事をしているが、そうすると、非常にきれいな銅の上にグラフェンを積んでいるのだが、グラフェンの品質が良くないというケースがある一方、その逆に、グラフェンは非常にきれいなのだが、下の銅はあまり良くないなど、それぞれ特徴のある技術がうまく統合されていないということを感じている。

今の話題はごく一例に過ぎないが、そういう事例が非常に多く、たとえば、A先生とB先生と一緒にやればすごくいいことができそうだと思うのだが、実際問題としてそれは絶対できませんというようなこともよく聞く。B先生のところに分析をお願いすると、B先生がファーストオーサーにならないと論文が書けない状態であるそこに出したくない、非常にその間の連携がうまくいっていないような、もったいない例が多くあって、ファンディングにしても、もっとコーディネーターの人が強権を持って、A先生とB先生の技術をもって、より高いレベルの成果を出していくということができると、もう少し日本の技術は進むのではないかと、日頃から感じている。

それからもうひとつは、ファンディングの仕事をいろいろ頂くが、これが事務的に非常に大変な作業になっている。それが研究者の方に全部押しつけられて、いろいろなことをやらなければいけないという状態である。もちろんコンプライアンスも大事だし、説明責任もあると思うが、それが全部研究者に押しつけられている感じがする。

そうすると、研究をやっているのか、説明責任のための資料を作っているのかわからないと感じるのがひとつ。その辺はファンディングの方なり、そういうところをまとめてやっていただく方なりが処理して、研究者は研究に専念する、国民に対する説明は別の方がやっていただけるような仕組みができると、もう少し研究が進むのではないかなと思っている。

D：二つ目の件は、私は本当に心の言葉で、代弁していただいたような気がする。ひとつ目の件に関しては、まったくもってこれと先ほどのご指摘そのもので、もっと頻繁にこういう機会を持つべきではないかと思っている。せつかく良い芽があっても、それがそのまま消えていくのは惜しい。それから、もし大学の先生が問題のときは、私たちのところに

持ってきていただければ受けられる可能性はある。

G：今の方のご指摘は、ものすごく本質的なご指摘であって、2つあったと思う。ひとつ目は、ファーストオーサーをどうするかという類の話は、これはアカデミアサイドでよく話し合っただけの問題である。もうひとつ、後半の話が実はものすごく深刻だ。産総研の法人化が始まって10年が過ぎ、そして国立大学が国立大学法人になってからもちょうど10年くらいになる。あれが一体どういう影響を及ぼしたのかというのは、定量的にきちんと評価をしないといけない。日本はそれをまったくやっていない。

総合科学技術会議が課題解決型の方針に転換するときにも、評価はきちんとやられなかった。そういう問題が常にある。経験として、どこを失敗してどこを成功したかということもきちんと評価した上で新しい施策を実行すれば、いろいろなソフトの面での蓄積効果が出てくるはずだが、それがやられていないものだから経験が蓄積しない。これは日本の大きな問題だ。

一部、独立行政法人で大学法人も含めてだが、法人化でどういう影響があったかということも科学技術政策研究所が調べているが、この10年ぐらいで研究者が研究に使う時間が減ってしまったというきちんとしたデータが出ている。それはおそらくコンプライアンスや、あるいは個人の細かい評価や、そのためにどれだけ多くのお金が使われているかということだろうと想像される。

アメリカでも実は最近そういうことがあって、間接経費がどんどん減らされた結果、連邦政府の研究費をとってくると、大学のファカルティ・メンバーが研究や教育に使う時間が減ってきているというデータがある。これはAPSのバックページでそういう紹介がされていた。

これはどこで誰がやるべきなのか。大学からもそういう声を上げていただきたいし、政府に頼むだけではなく、アカデミアサイドあるいは法人サイドで自主的にいろいろな努力をして声を上げる、あるいは国がなかなか動かないのだったら、与えられた環境のなかで何とかそれをクリアしていくように考えるということをししないと、なかなか動かない。国がだめだから放り出すというわけにはいかないのだから、この問題を考えるときには当然システムをも一緒に、運営方法も一緒にプロポーザルしていくべきだ。

D：私たちとしては、そういうことに時間をとられているのは事実だが、一方、研究する時間がないと外には口が裂けても言えないのも事実であり、一生懸命頑張っていますとしか言いようがない立場にある。

J：本日お話を聞いていて、このグラフェン、あるいは色々な極限の薄膜材料が出てきた。有機の材料も出てきたし、無機も、それらのハイブリットもある。やはりそういう多様性を大事にしたほうがいい。

ここからどんな機能が生まれてくるのか、例えばエレクトロニクスだけにとらわれてチャンネル、というだけではなく、触媒の可能性だってあるし、いろいろな機能をもっとマルチで追求していく必要があるのではないかと、今はまだそういうことがすごく重要なフェーズにあるように感じる。

開発フェーズに入ると必要な研究費は桁で増大する。ただ、ファンダメンタルの良いところは、多様性を共用していろいろなところに分散投資が可能という点。その中で面白いものが出てきたら企業が大きなお金を投入する。一方、基礎的なところでは、あるところに集中してお金を投資すると、**all or nothing** で失敗したときのダメージがすごく大きい。いろいろな可能性を追求していくことが今まさに必要だと思う。

それから、異分野同士の共同研究は、本当はやりやすいはず。同業者同士の共同研究では、ペーパーの問題が出てくるが、ケミストリーの人と物理の人は出そうとしている学会が違っているので、お互いにシェアして出せるという運営上の良さもあるはずだ。

K：二次元材料での新しい物理を使ったデバイスが本当に作れないのかと、我々は常日頃議論している。例えばトポロジカルインシュレーターの上に二次元材料を乗せたらどのような機能が発現するかなど、何か新しいものが生まれてくるのではないかと、そこでジャンプができないかと、いろいろな可能性を考えて研究をやっていたらよい。

A：たぶん、日本のひとつの大きな問題は、アメリカなどに比べると人材の流動が少ないということ。だからそれを活発にやるのもひとつの解決策だと思う。

J：今の人材の流動性ということとも関係するが、今、日本というのは強力な円高で企業が全部外へ出ようとしている。この流れは止められない。国内に残ってくれと言うほうが酷であって、これも確実に皆さん海外へ行く。

日本に何を残すべきか。R & Dは絶対に残してほしいし、残さないといけない。もちろんその反面として、海外の人もある程度は受け入れないといけないだろう。相当な危機感があることは強調しておきたい。

G：最後になるが、本日メインプレイヤーとなつていただいた若い先生方、言い損なつたことがあれば、メールなどでどんどん言っていただけたら我々としても大変ありがたい。私自身は、本日は大変心強く感じた。先端のところで様々な新しいアイデアがあることがよく理解できたので、今後これをどう扱うか、真剣に議論をさせていただきたい。本日はどうもありがとうございました。

付録

付録 1

ワークショッププログラム
「機能性原子薄膜／分子薄膜の創生と展開」

(敬称略)

主催：独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）

開催日時：平成 24 年 2 月 2 日（木）12 時 30 分～18 時

開催場所：科学技術振興機構 東京本部別館 2 階会議室（東京都千代田区五番町 7）

セッション 1 ワークショップ開催趣旨

- 12:30-12:50 1.1 主催者挨拶 田中一宜（JST/CRDS）
1.2 趣旨説明 河村誠一郎（JST/CRDS）
12:50-13:30 1.3 塚越一仁（NIMS）「WS の課題と論点」

セッション 2 グラフェン

- 13:30-13:50 2.1 吾郷浩樹（九州大）「グラフェンのマテリアルサイエンスと将来展望」
13:50-14:10 2.2 長汐晃輔（東大）
「グラフェンのアクティブチャネル応用はあり得るか？」

セッション 3 無機系機能原子薄膜

- 14:10-14:30 3.1 佐々木高義（NIMS）
「無機ナノシート～2次元機能性ナノ物質としての可能性～」
14:30-14:50 3.2 岩佐義宏（東大） 「原子薄膜機能の電界制御」
14:50-15:10 3.3 小野輝男（京都大） 「強磁性超薄膜における磁性の電界制御」

15:10-15:30 休憩

セッション 4 有機系機能分子薄膜

- 15:30-15:50 4.1 寺西利治（京都大）
「大環状 π 共役平面分子の平面配位による無機ナノ粒子の機能変換」
15:50-16:10 4.2 福島孝典（東工大）
「二次元物質の合理的デザインへ向けた基盤技術創出」
16:10-16:30 4.3 工藤宏人（神奈川大）
「ラダー型環状オリゴマーを基盤とした分子レジスト材料の開発」
16:30-16:40 小休憩

セッション 5 総合討論（司会：塚越一仁）

16:40-17:55

コメンテータ：栗野祐二（慶応大）、榎敏明（東工大）、小林俊之（ソニー）、曾根純一（NIMS）、福島伸（東芝）

17:55-18:00 閉会挨拶 田中一宜（JST/CRDS）

付録 2

参加者リスト（敬称略、所属・役職は本WS実施の時点）

◎コーディネータ、講演者、○コメントータ

氏名	所属	役職
◎ 塚越 一仁	(独) 物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点	主任研究者
吾郷 浩樹	九州大学先導物質化学研究所	准教授
長汐 晃輔	東京大学大学院工学系研究科	准教授
佐々木高義	(独) 物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点	フェロー
岩佐 義宏	東京大学大学院工学系研究科	教授
小野 輝男	京都大学化学研究所	教授
寺西 利治	京都大学化学研究所	教授
福島 孝典	東京工業大学資源化学研究所	教授
工藤 宏人	神奈川大学工学部	准教授
○ 榎 敏明	東京工業大学大学院理工学研究科	教授
○ 福島 伸	(株) 東芝研究開発センター	主席技監
○ 栗野 祐二	慶應義塾大学理工学部	教授
○ 曾根 純一	(独) 物質・材料研究機構	理事
○ 小林 俊之	ソニー (株) 先端マテリアル研究所	研究員

傍聴者

馬場 寿夫	内閣府政策統括官（科学技術政策・イノベーション担当）付 (総合科学技術会議事務局)	政策企画調査官
多田 国之	文部科学省科学技術政策研究所科学技術動向研究センター	客員研究官
桐原 和大	(独) 新エネルギー・産業技術総合開発機構	主任研究員
柳 喜芳	電子・材料・ナノテクノロジー 一部	主査
門平 卓也	(独) 物質・材料研究機構	主幹エンジニア
平原奎治郎	(独) 物質・材料研究機構国際ナノテクノロジーネットワーク拠点	運営室長
若林 克法	(独) 物質・材料研究機構国際ナノアーキテクトニクス研究拠点	独立研究者
森本慎一郎	(独) 産業技術総合研究所つくばイノベーションアリーナ推進部 TIA 企画室	主幹
秋永 広幸	(独) 産業技術総合研究所ナノデバイスセンター	センター長
長谷川雅考	(独) 産業技術総合研究所 ナノチューブ応用研究センター	研究チーム長
佐藤信太郎	(独) 産業技術総合研究所連携研究体グリーン・ナノエレクトロニクスセンター	グループリーダー

平田 一郎	一般社団法人 ナノテクノロジー・ビジネス推進協 議会	事務局次長
森田 雅夫		
吉田 隆	富士電機（株）技術開発本部先端技術研究所	所長
市川 幸美		技師長
藤井 健志		研究員
白井 肇	埼玉大大学院理工学研究科	教授
上野 啓司		准教授
笹川 崇男	東京工業大学・応用セラミックス研究所	准教授

JST

中村 道治	(独) 科学技術振興機構	理事長
宮野健次郎	(独) 科学技術振興機構／東京大学	研究主監 ／教授
荒岡 礼	(独) 科学技術振興機構経営企画部 科学技術イノベーション戦略室	主査
工藤 研一		主査
平川 誠也		主査
白石 淳子	(独) 科学技術振興機構イノベーション企画調整部	主査
松村 郷史	(独) 科学技術振興機構研究領域総合運営部	主査
田中 康裕		主任調査員
小賀坂康志	(独) 科学技術振興機構研究プロジェクト推進部	副調査役
中島 高弘		係員
古賀 新	(独) 科学技術振興機構研究推進部	主任調査員
屠 耿	(独) 科学技術振興機構国際科学技術部	調査役
千野 昌彦	(独) 科学技術振興機構産学基礎基盤推進部	主査
今村 健		主任調査員
中本 信也	(独) 科学技術振興機構研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット	フェロー
魚崎 浩平		特任フェロー
大泊 巖		特任フェロー
品田 賢宏		特任フェロー

■ワークショップ企画メンバー■

田中 一宜	研究開発戦略センター 上席フェロー
石原 聰	研究開発戦略センター 特任フェロー
河村誠一郎	研究開発戦略センター フェロー／エキスパート
佐藤 一美	研究プロジェクト推進部 主任調査員
島津 博基	研究開発戦略センター フェロー
永野 智己	研究開発戦略センター フェロー
宮下 哲	研究領域総合運営部 主査
渡辺 正裕	研究開発戦略センター フェロー

※お問い合わせ等は下記ユニットまでお願いします。

CRDS-FY-2011-WR-12

科学技術未来戦略ワークショップ

「機能性原子薄膜／分子薄膜の創生と展開」報告書

平成 24 年 3 月

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター ナノテクノロジー・材料ユニット

〒 102-0076 東京都千代田区五番町 7

電 話 03-5214-7481

<http://crds.jst.go.jp/>

© 2012 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。
引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

