

第13回ナノテクノロジー総合シンポジウム (JAPAN NANO 2015) 開催報告



文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業の一環として「第13回ナノテクノロジー総合シンポジウム」が、文部科学省ナノテクノロジープラットフォームセンターの主催で2015年1月30日に東京ビッグサイトで開催された。ナノテクノロジープラットフォーム(NPF)は、新しい科学技術を創出する研究環境の整備・充実・共用により、大学、公的機関、企業の研究者が全国規模で研究ネットワークを構成してイノベーション創出に資することを目指している。今回のシンポジウムは、「ナノテクによる材料革新—設計・創る・測るがイノベーションを生む」のテーマの下にプログラムが組まれた。

主催者を代表する物質・材料研究機構(NIMS)理事長と文部科学省研究振興局長の開会挨拶、タイ王国 科学技術大臣 Pichet Durongkaverroj 博士による「タイにおける科学技術政策」と題する特別講演、大阪大学 河田 聡教授の「プラズモニクス：光でナノを操る科学」および、トヨタ自動車株式会社 梅村 晋氏の「材料技術が切り拓く革新的クルマ社会」と題する基調講演が行われた。最新の成果は、コンピュータ主導材料設計、ナノテクノロジープラットフォーム活動/平成25年度の秀でた利用6大成果、先端計測・解析技術の進展、自動車用材料の4つのセッションで報告された。平成26年度より、共用施設において支援に携わっている方の貢献に対して技術支援者賞を

贈ることになり、表彰が行われた。また、ポスターセッションではナノテクノロジープラットフォーム参画機関と参会者との交流・意見交換を行った。



開会挨拶 / Opening Remarks

司会：野田 哲二 JAPAN NANO 2015 組織委員長 (物質・材料研究機構 ナノテクノロジープラットフォームセンター長)。

主催者挨拶：潮田 資勝 (物質・材料研究機構理事長)

文部科学省は平成24年度より、先端装置の共用化、第一線研究者のノウハウ提供によりイノベーションの加速を図るナノテクノロジープラットフォーム事業を実施している。本シンポジウムは事業の一環として産官学の研究者を一堂に集め、最先端の研究成果を披露し、今後の方向性を探るものである。

ご来賓にタイ王国 科学技術大臣、および文部科学省 常盤 豊研究振興局長をお迎えした。タイ王国 科学技術大臣には特別講演を頂くことになっている。また、大阪大学 河田 聡教授、トヨタ自動車 梅村 晋氏に基調講演を



お願いした。ナノテクノロジーのトピックスとして、コンピュータ主導による材料設計、ナノの世界を観る・測る技術、日本の産業を牽引する自動車用産業関連部材の研究動向を採り上げ、米国 MIT の Ceder 教授ほか国内 5 名の方に最新のトピックスを話して頂く。これに加えて、本事業の成果を報告する。

このシンポジウムが、参会者にとってナノテクノロジープラットフォームを知って頂く機会となり、研究の方向性を見出すと共に、新たなパートナーを見つけるきっかけになることを期待する。

文部科学省：常盤 豊（文部科学省 研究振興局 局長）



ナノテクノロジーは、環境・エネルギー・ライフサイエンスなど幅広い分野の科学技術の新たな可能性を切り拓くとともに、自動車・エレクトロニクスなど日本の基幹産業を牽引する重要な基礎基盤技術である。政府の戦

略としてもナノテクノロジーは産業競争力の源泉となる重要分野と位置づけられている。文部科学省は、引続きナノテクノロジーの研究開発、基盤整備を推進する。

文部科学省が平成 24 年度から実施しているナノテクノロジープラットフォーム事業は、最先端の研究設備を共用することにより、研究活動を活性化し、イノベーションを図ることを目的としている。1000 台の装置が共用され、若手研究者が高価な装置を使える。共用装置に人が集まるから異分野融合でイノベーションが進む。ナノテクノロジープラットフォームは、これまでも着実に成果を挙げているが、今後も産業界始め多くの人々の積極利用と日本各地で顕著な成果が生まれることを期待する。



特別講演 / Special Lecture

司会：引き続き、野田 哲二氏

「タイにおける科学技術政策」 / "Thailand S&T in Transition" Pichet Durongkaverroj (Minister, Ministry of Science and Technology, Thailand / タイ王国 科学技術大臣)



タイは様々な困難に遭遇し、変革期にある。経済環境が変化し、製品やサービスの輸出にも影響が出ている。気候変動は農業や産業に影響を与えている。問題解決に英知を集めるには国際協力が重要になる。このため、今年末にスタートする ASEAN Community と日本の協力を期待している。科学技術イノベーションによって国の競争力を高め、地域の課題に対応したい。

このため次の 5 つの政策を取り上げた。

- (1) 研究開発費は GDP の 1%、企業と官の比は 70 : 30
- (2) 社会イノベーション：英知の移動 (Talent Mobility)、労働と学習の統合

(3) 研究開発にインセンティブ:法律と規制を改め, 地域・コミュニティと協働

(4) メガプロジェクト推進:鉄道, クリーンエネルギー, 自動車, 電気, 水, 廃棄物処理など

(5) 科学技術基盤整備:COE (Center of Excellence) 設置等

研究開発における民間部門の寄与を高めるには人材育成が重要である。官の人材が民間で働くことを可能にし, 民間で働く中で学んで大学に移るといった Talent Mobility 活動を進める。国家イノベーション計画の中で科学技術は他のプログラムとは違った運営をする。10年をベースにものと考え, 予算は年間予算を3年から5年継続するものにする。タイには20の省があるが省庁連携が求められる。戦略産業を定めて, そこにリソースを集中させる。このような運営にはガバナンスとマネジメントが大切になる。

このため, ナノテクノロジーは2003年に重要な成長技術(Key emerging technology)と位置付け, 国家科学技術開発局(NSTDA, National Science and Technology Development Agency)の下に4組織:(1) BIOTEC: National Center for Genetic Engineering and Biotechnology, (2) MTEC: National Metal and Materials Technology Center, (3) NECTEC: National Electronic and Computer Technology Center, (4) NANOTEC: National Nanotechnology Center をおいた。NANOTECは2003年に設立, NSTDA, 科学技術大臣のもとで運営されている。

ナノテクノロジーの狙いは経済競争力, 生活の質の向上, 健康, 福祉, 環境持続性の強化である。このため, ナノテクノロジーの人材開発を進めR&D人員1万人当たり2.5人, 民間:政府比50:50とし, ナノテク研究開発費にGDPの0.2%を投じる。インフラを整備し, 投資へのインセンティブを与えて, 応用拡大を図る。戦略的枠組み(Strategic Framework)として4つのクラスター:(1)健康と医療, (2)農業と食糧, (3)製造, (4)エネルギーと環境 を設け, ドラッグデリバリーシステム, 医薬/化粧品, ナノコーティング材, センサ, ナノエレクトロニクス, 機能性ナノ構造, ナノ触媒/汚過材料などの製品を想定する。その基盤となる技術(Platform technology)は, 設計による材料合成(Material synthesis by design), ナノ封じとドラッグデリバリーシステム(Nano encapsulation and drug delivery system), ナノ加工と製造(Nano fabrication and manufacturing)である。

この計画を進めるために, 大規模施設をThailand Science Parkに設け, ここでナノテクノロジーに取り組む。ナノテクノロジー, コンピュータ, バイオ, 遺伝子工学などの国家センターに, 科学者を集めてネットワークを作る。タイは農業国なのでナノテクノロジーの農業応用を重視する。科学技術には社会への貢献が求められ, 科学技術の成果は, 組織, 国だけのものではなく広く共有さ

れる。NSTDAの下で国際協力を推進し, 各国との協力のもとに研究開発推進を図っている。

【質疑】

Q:国際協力, 組織連携にどのように取り組んでいるか

A:国際協力ではInternational Partnershipが動いている。省庁ごとに, パートナーと組み, 人材交流も行ってデマンドサイドの研究を進めている。研究には全ての省庁が関わるのでプラットフォームにはChief Scientific Advisorをおいて各省庁との連携を図っている。

Q:人材流動性は大学が対象か。民から大学への移動もあるか。

A:双方向が必要だが, 段階的に進める。先ず, 大学と官から民間への移動を進める。



基調講演 I / Plenary Lecture I

司会:堀池 靖浩 NIMS 名誉フェロー

プラズモニクス:光でナノを操る科学 / "Plasmonics: Manipulating Nano with Light" 河田 聡 (大阪大学) / Satoshi Kawata (Osaka University, Japan)



ナノの世界の観察にはAFM(原子間力顕微鏡)などが用いられるが, 光が使えれば得られる情報量は大きい。2014年のノーベル化学賞は「超高解像度の蛍光顕微鏡開発」に与えられた。バイオでも光学顕微鏡は注目されている。2008年の下村 脩氏のノーベル化学賞受賞はクラゲから出る緑色蛍光タンパクの発見だった。1963年に「位相差を用いた手法の実証, 特に位相差顕微鏡の発明」にノーベル賞が与えられ, 透明な細胞を着色せずに位相差で見ることができた。一方, 1930年にはラマン効果の発見にノーベル賞が与えられ, 蛍光着色せずに光と物質の

相互作用により分子振動を捉えられたが、レーザ散乱光にラマン散乱光が隠されてしまう。20世紀末に、レーザー光源、レーザ散乱光を除くフィルタ、高感度固体撮像、走査機構などの必要なツールが揃い、ラマン顕微鏡で分光画像がとれるようになり、生きている細胞の観察ができた。ここまではマイクロの世界だった。次に光でナノを見るのに金属を使うことになった。金属の周りに光が出るのをを使うのがプラズモニクスである。

今年国際光年 (International Year of Light and Light-based Technologies) である。国際連合は2013年に、2015年を光と光技術の国際光年 (ILY2015) とすることを宣言した。1815年のフレネルの光波動説から200年、1865年のマクスウェルによる光伝搬の電磁理論から150年といった節目の年に当る。この国際光年の起点となった光波動説は、光による観察の分解能が光波長程度に止まることを導いた。光の波長 λ は光速 c に比例し、周波数 ν に逆比例する。光速を小さくできれば波長が短くなって分解能が上がる。屈折率1.5の水の中では光速が $1/1.5$ になるから、1.5倍の分解能になる。さらに、金属表面に光を当てると、光と金属の中の自由電子とが相互作用してプラズモン共鳴を起こし、光速が小さくなる。電波受信のダイポールアンテナは波長を $1/2$ にする。光の場合は金属の先端でプラズモン共鳴を起こして波長を短くし、この光を利用するアンテナを作る。波長は入射光の $1/10$ にできるので可視光源を用いてナノの観察が出来ることになる。具体的には、原子間力顕微鏡の探針を用い、例えば SiO_2 で作ったカンチレバーの直径20nmの先端に銀を被覆する。この金属先端 (tip) に光を当てると、プラズモン共鳴によって光子が局在化し、探針先端近傍の電磁界が強められ、波長の短い散乱光が放出される。試料に対して針を走査して得られた散乱光をCCDカメラなどで検出・画像化する。解像度は探針先端の大きさで決まる。Raman効果を観察できるから、TERS (Tip-Enhanced Raman Scattering) イメージにより20nmの解像度で物質分析が可能になる。CNT (カーボンナノチューブ) を光顕微鏡で観察するとぼやけているが、TERSでは明瞭な像が得られる。力を加えて押しすと局所歪みが生じ、Ramanシフトで光のスペクトルが変るのを計測すれば10nmの分解能でナノ材料の歪み分布が求められる。歪みシリコン (Strained Si), CNT, DNA, グラフェンなどの観察例がある。

この金属探針を用いた近接場走査光顕微鏡でナノ領域の観察ができたが、この方法には限界がある。先ず金属では分解能が10~20nmに止まり、0.1~1nmにはならない。針を細くし過ぎると原子数が少なく、自由電子が少ないので共鳴しない。そこで10~20nmの針をサンプルに押し込むと、原子が一つひとつ変形して行くので、その変形によるRamanシフトのピーク位置を見る。このピークシフトをCNTに沿って測ると、半幅幅4nmのプロファイルがとれるので分解能1~2nmの観察が可

能になる。また、細胞は、表面だけでなく内部も見たい。針を細胞に刺したのでは細胞が針の動きを拒否する。そこで細胞の中に金の粒子を埋込み、金の粒子を介して細胞内の3次元的情報を追うことができる。このほか紫外光の利用も考えている。

手法を開発して論文を書いただけでは面白くない。使ってもらおうと、ベンチャ企業を興し、TERS sense という装置を作った。プラズモニクスはナノイメージングやナノスペクトロスコピーだけでなく、ナノエレクトロニクスデバイス、センサ、フォトグラフィなど様々な分野に使われている。プラズモニクスは新しい光の可能性を拓く技術である。

【質疑】

Q: DNA など、光による動態観察がバイオの分野で重要と思う。ミトコンドリアを見ることもできるか。

A: DNA などは見られる。ミトコンドリアのような細胞は動くので、プラズモニクスのような時間を掛けて見る方法は直ぐには使えない。もう一工夫必要になる。

Q: 河田先生は2000年頃に、3次元造形をやられたのに、ナノテク展で花盛りの3D造形においてわが国は周回遅れといわれているのはどうしてだろうか。

A: そうならないようにプラズモニクスは論文だけでなく製品にしようとしている。しかし、以前は大学でやることに規制があり、2002年から規制がなくなった。3次元造形の頃は時期尚早だった。



Session 1: コンピュータ主導材料設計 / Computer-driven Materials Design

司会: 小寺 秀敏 京都大学教授

1-1 マテリアルゲノムによる材料イノベーションの加速 / "Materials Genome Approach to Accelerating Materials Innovation" Gerbrand Ceder (Massachusetts Institute of Technology, U.S.A)

講演の最初のスライドは、"Engineered Materials Enable Society" であった。そこには適用対象として、可視化、輸送、クリーンエネルギー、健康、消費、通信、建設などが並び、人間が作り出した材料が社会を支えているとする。新しい材料が発見されてから実用化されるまでには、平均で18年かかる。テフロンは1940年に見つかったが実用化は1965年だし、リチウムイオン電池は1975年に発明されたが、ソニーが実用化したのは1990年代半ばだった。エジソンが白熱電球を発明した時、3000の材料を試して、フィラメントの材料を選んだ。その後20年間に亘る研究でタングステンを採用することになった。



材料の選択、設計を行う場合、材料の特性が必要になる。しかし、50万から200万の無機化合物がある中で、弾性率が分っているのは200しかない。超伝導体は1000、誘電率は300～400しか分っていない。すべての特性で分っているのは1%以下である。

材料探索は海図のない航海のようなものである。そこで、様々の素材を検討する前にコンピュータで特性を調べておこうと、この材料プロジェクトが始まった。材料の遺伝子 "gene" の性質を世界中の化合物について計算し、その情報を材料研究者達に提供して、材料探索や設計の迅速化を図るものである。計算は複数のモデルを組合せ、多数の計算機を繋ぐことによって詳細に多くの計算を行い、材料のデータを積み上げることができる。2004年から、アルカリ電池用のアルカリに強いカソードの探索を行った。既知化合物30,000のデータベースをもとに、約100,000の新化合物を考え、既知の化合物を合わせると100,000～200,000になる候補についてイニシャルスクリーニングを行って10,000～20,000の化合物を選び、データマイニング、計算機スクリーニングで候補材料を選んだ。この結果、1500の化合物で1Ah/ccの容量、1.1Vから2.2Vの平均電圧、1.7Wh/cc以上のエネルギー密度の得られることが分り、その中からKOH中で安定な200の化合物が選ばれ、テストして、数件の特許を取得できた。

この成果をもとに、大統領科学顧問が第一原理計算を通じて基本特性を確認するプロジェクトをオバマ大統領に提案した。2011年6月には、マテリアルゲノムイニシャティブが始まった。計算機ツール、新しい材料評価手段、データベースの構築資金を支援し、迅速により少ない費用で、予測精度高く、材料を発見することを目指すものである。MITとLawrence Berkley National Laboratoryが中心になり、東海岸、西海岸の10以上の大学の研究者が

入り (UC Berkley, Duke University など)、計算結果は自動入力され、データはオープンにして相互に利用する。数値情報に止まらず、2元、3元の状態図のようなグラフ情報も含まれる。精度、確度の確保に留意し、特性を精査している。

既に49,000以上の化合物を調べ、1,000,000を超える特性値を計算している。その数は毎月増加し、数万の相図、反応エネルギー、数万の結晶構造を保有し、ナノポーラス材料の探索も行っている。この結果、 $\text{Li}_9\text{Fe}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ から出発して充放電特性の優れたLiイオン電池電極材料 $\text{Li}_9\text{V}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_3(\text{PO}_4)_2$ がコンピュータ利用で発明された。水素発生に適したバンドギャップ1.8eVの酸化物吸光体 $\beta\text{Mn}_2\text{V}_2\text{O}_7$ も作り出された。

将来の材料開発の姿は次のように描く。(1) 10年以内に多くの基本的な無機化合物の特性が計算され、材料ゲノムチャートが用意される。(2) 実験と計算のシナジー効果により新たな材料予測手法が生まれる。(3) デマンドに応じた材料設計がなされ、合成・製造が加速される。

【質疑】

Q: 多くの研究者の計算結果をデータベースに入れるのか。

A: 外部と協力してデータをインポートし、ユーザーのコメントをもとに有効なデータを選んでいる。

ここで午前の講演が終了し、昼食休憩に入る。昼食後は、セッション2よりシンポジウム再開。



Session 2: ナノテクノロジープラットフォーム活動 / Activities of Nanotechnology Platform

司会: 古屋 一夫 NIMS ナノテクノロジープラットフォームセンター副センター長

2-1 H25年度の秀でた利用6大成果 / Research Topics of Nanotechnology Platform

ナノテクノロジープラットフォーム (NPF) は最先端装置の共用によりイノベーションの創出を支援する。これまでに、微細構造解析、微細加工、分子・物質合成の3つのプラットフォーム (PF) の利用件数は2,500課題を超えた。その中から、平成25年度「秀でた利用6大成果」が選ばれ、このセッションで、ユーザーまたは実施機関担当者から成果の概要が紹介された。

(1) 微細加工 PF: 北海道大学

「パルス状コヒーレントX線溶液散乱法のための溶液試

料ホルダの開発」 / Development of solution sample holder for pulsed coherent X-ray solution scattering

ユーザー：木村 隆志, 西野 吉則 (北海道大学), 城地 保昌 (高輝度光科学研究センター), 別所 義隆 (台湾中央研究院)

実施機関担当者：松尾 保孝, 大西 広 (北海道大学)

発表者：木村 隆志 (北海道大学)



生体試料などには溶液中で安定なものが多く、細胞も水中にある。細胞を可視の光学顕微鏡で観察しようとする分解能が足りない。電子顕微鏡だとステージに固定される上、細胞が破壊される。そこでX線溶液散乱法を用いることになるが、強いX線を照射すると細胞が破壊されてしまう。しかし自由電子レーザー施設 SACLA の自由電子レーザー (XFEL) を使うとパルス幅が 10fs と短く、高輝度で空間完全コヒーレンスを有するため、細胞破壊前の生きた状態の回折データを取得できる。この測定に必要な、真空中でも溶液試料を保持できる環境セルを北海道大学の微細加工 PF の半導体プロセス装置を利用して作った。二枚の窒化ケイ素薄膜の間に数 μm の溶液試料をパッキングする構造になっている。封入セル内の細菌は 1 時間以上生存できることを確かめた上、XFEL による X 線回折パターンを位相回復計算によって解析して試料像を再構成した。この結果、570nm サイズの生細菌の内部構造を数十 nm 以下の分解能でイメージングすることに成功した。

(詳細は ▶ http://nanonet.mext.go.jp/seika_selection/2015_SeikaSelection_3.pdf)

(2) 微細構造解析 PF：物質・材料研究機構

「ナノワイヤ結晶成長のその場 TEM 観察」 / In-situ TEM observation of nanowire crystal growth

ユーザー：Rebecca Boston (University of Bristol)

実施機関担当者：根本 善弘 (物質・材料研究機構)

発表者：Rebecca Boston (University of Bristol), 根本 善弘 (物質・材料研究機構)



微細坩堝法により Y_2BaCuO_5 (Y111) ナノワイヤの結晶を成長させ、結晶成長の様子をその場で、TEM (透過電子顕微鏡) により観察した。微細坩堝法とは原料の塊を加熱することで Y_2BaCuO_5 などの酸化物ナノワイヤを原料表面に成長させる結晶育成法で、ポーラスな原料の表面の凹凸が坩堝の役をする。Y, Ba, Cu を混合した硝酸水溶液アルギン酸ナトリウムを加熱して Y_2O_3 , BaCO_3 , CuO のナノ粒子中間体を得る。これを再び加熱すると、 BaCO_3 が溶けて液相となり、液相のできたところから原料が供給され、過飽和になってその表面にナノワイヤが成長する。TEM 動画モードで観察すると、ナノワイヤは先ず長手方向に、次に横方向に成長する。この現象は、ナノワイヤと原料の界面構造を EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) によって調べることにより、原料表面に先ずアモルファス領域ができ、その太さのままナノワイヤが成長し、その後、アモルファス領域が拡大してナノワイヤが太くなることが分かった。

(詳細は ▶ http://nanonet.mext.go.jp/seika_selection/2015_SeikaSelection_2.pdf)

(3) 微細構造解析 PF：産業技術総合研究所

「弾性応力下におけるマルテンサイト鋼中の水素起因格子欠陥の形成促進と水素脆化」 / Enhanced lattice defect formation associated hydrogen and hydrogen embrittlement under elastic stress of tempered martensitic steel

ユーザー：土信田 知樹, 鈴木 啓史, 高井 健一 (上智大学), 平出 哲也 (原子力研究開発機構)

実施機関担当者：大島 永康 (産業技術総合研究所)

発表者：大島 永康 (産業技術総合研究所)

水素エネルギーの利用には、水素容器の低価格化、小型化のため鉄鋼材料の高強度化が求められるが、鉄に水素が入り込んで破断し易くなる水素脆性の問題がある。そこで、産業技術総合研究所 微細構造解析 PF で開発、公開している陽電子プローブマイクロアナライザ (Positron Probe Micro Analyzer, PPMA) と TDA (昇温脱離分析, Thermal Desorption Analysis) を組み合わせて、水素チャー



ジによって形成する格子欠陥の実験的評価を試みた。PPMA は、パルス化して試料に打込んだ陽電子と電子が結合して発する光強度の時間変化を計測する。欠陥があると、欠陥には結合する電子がないので、陽電子の消滅が遅くなる。陽電子の寿命分布から欠陥の分布が求められる。高強度鋼、焼き入れ焼き戻しマルテンサイト鋼を用い、TDA による水素吸蔵量分析から格子欠陥を見積る。一方、PPMA により、欠陥の形成、分布を調べた。この結果、弾性応力下で水素をチャージすることによって欠陥が形成され、破断面近傍部に局所的に欠陥が形成されていること、格子欠陥は原子空孔、マイクロボイドなどの空孔型欠陥であることが分かった。

(詳細は ▶ http://nanonet.mext.go.jp/seika_selection/2015_SeikaSelection_1.pdf)

(4) 分子・物質合成 PF：北陸先端科学技術大学院大学「植物培養細胞を利用した有用たんぱく質合成技術の開発」／ Development of a method for synthesizing useful proteins by using suspension-cultured plant cells

ユーザー：森 正之（石川県立大学）
 実施機関担当者：梅津 喜崇，大木 進野（北陸先端科学技術大学院大学）
 発表者：森 正之（石川県立大学）



有用たんぱく質は大腸菌や酵母などで作られるが、SS（ジスルフィド）結合のような強固な結合を持ったものは作れない。動物培養ではコストがかかり、少ししかできない。植物による培養では SS 結合を持つたんぱく質も作ることができコストも安いですが、発現量が少ない。そこで、北陸先端科学技術大学院大学の分子・物質合成 PF を利用し、複雑なたんぱく質の合成を可能にする、植物培養細胞（BY-2）を利用したたんぱく質合成技術を開発した。BY-2 は簡単な液体培地で増殖できるが、葉緑体を持たないので炭素、窒素の供給が必要になる。このため、目的のたんぱく質遺伝子を持つウィルスベクター遺伝子を、植物培養細胞の染色体に導入した。この結果、目的たんぱく質が従来の 10 倍の発現率で合成できた。また、液体培地に ^{13}C 、 ^{15}N のラベルを着けた試薬を加えることにより、安定同位体で標識された、NMR（核磁気共鳴）解析可能なたんぱく質を合成する技術を開発した。さらに、種子の大きさを揃える ESF（Embryo Surrounding Factor）を大量に合成することに成功し、その立体構造を NMR で解明して、機能を担うアミノ酸残基を特定した。この植物培養による有用たんぱく質合成は、医薬品開発などに役立つことが期待される。

(詳細は ▶ http://nanonet.mext.go.jp/seika_selection/2015_SeikaSelection_4.pdf)

(5) 分子・物質合成 PF 分子科学研究所

「内包フラーレン分子錯体の特徴的分子磁性の ESR 測定」／ ESR and X-ray observation of a helium atom and placing a nitrogen atom inside He@C₆₀ and He@C₇₀

ユーザー：森中 裕太，田邊 史行，若宮 淳志，村田 理尚，小松 紘一，加藤 立久，永瀬 茂，村田 靖次郎（京都大学），佐藤 悟，二川 秀史，溝呂木 直美，赤阪 健（筑波大学），古川 貢（分子科学研究所）
 実施機関担当者：横山 利彦（分子科学研究所）
 発表者：加藤 立久（京都大学）



フラーレン C₆₀ はサッカーボールの形状を持った分子である。電子雲を含めたファンデルワールス直径は 10

Å (1.0nm) で、ファンデルワールス半径 3.7 Å の中空がある。この中空に他の原子を入れる。He を入れたものを He@C₆₀ と表示し、He 原子をナノスケールのフラスコに入れたことになる。He 原子のファンデルワールス半径は 2.8 Å、N 原子は 3.1 Å だから、He か、N の原子 1 個を入れることができる。He を収めるには、有機合成分子技術を用いる。フラーレンのカゴに有機化学メスで孔を開け、He 原子を押し込んだら、有機化学縫合を行う。He 原子の入っていることは X 線回折で確かめられ、C₆₀ のナノフラスコに閉じ込めることにより He 原子像の直接撮影に成功した。N の場合は原子イオン衝撃を用いて閉じ込める。フラーレン粉末を数百℃で昇華させたところに窒素ガスを流し、電磁放電を起こさせる。このグロー放電合成法により N@C₆₀ のできている証拠写真を撮ったが、解析には X 線が使えない。そこで、N が小磁石になるのを利用して ESR 測定を行い、N の特徴を表わす 3 本のスペクトル線が観測された。次に、He を入れた上にさらに N を入れられるか試みた。He@C₆₀ と He@C₇₀ に窒素プラズマ放電することにより、C₆₀、C₇₀ ナノケージに He と N を共存させた。ESR スペクトルには N の 3 本の線の脇に He の影響によって分裂した線が見られ、He の共存が確認できた。異種原子の共存は、ナノサイズフラスコの中の化学反応の基礎となるものである。

(詳細は ▶ http://nanonet.mext.go.jp/seika_selection/2015_SeikaSelection_5.pdf)

(6) 分子・物質合成 PF 名古屋工業大学 「フッ化物薄膜を用いた真空紫外光源」 / Vacuum ultraviolet field emission lamp using fluoride thin film

ユーザー：小野 晋吾 (名古屋工業大学), 福田 健太郎, 須山 敏尚 ((株)トクヤマ), 柳田 健之 (九州工業大学), 吉川 彰 (東北大学)
実施機関担当者：種村 眞幸 (名古屋工業大学)
発表者：小野 晋吾 (名古屋工業大学)



波長 400nm 以下の紫外線の中で、特に波長の短い 200nm 以下の真空紫外光源を開発する。真空紫外光は光

子エネルギーが大きいため、殺菌、洗浄、表面改質、薬品合成などに使える。従来の真空紫外光源はガスランプのため安定性を欠いていた。そこでフィールドエミッションを用いることにした。カーボンナノファイバを使って室温で放出させた大量の電子を蛍光体に照射して真空紫外光に変換する。カーボンナノファイバは、室温でグラッシーカーボンに Ar ビームを照射して作ったカーボンの突起の上に成長させる。ランプ光源だと加熱フィラメントがあり、紫外線とともに熱線が試料に当たるので熱によるダメージがあるが、電界放射では熱の影響を受けない。蛍光体には KMgF₃ (KMF) を使い、パルスレーザ堆積法により真空中で製膜する方法を開発した。これにより、F₂ のような有害なアシストガスを用いることなく、フッ素欠陥の少ない高品質 KMgF₃ ナノ単結晶薄膜作製に成功し、電界放射ランプ (FEL) として波長 150 ~ 200nm、出力 2μW の発光が得られた。KMgF₃ のほか、Nd ドープ LuF (Nd+:LuF₃) 薄膜も作り、波長 180nm 付近に比較的波長幅の狭い発光スペクトルが得られた。真空紫外光源を用いたセンサを 2 年後に完成させようとして共同開発を進めている。

(詳細は ▶ http://nanonet.mext.go.jp/seika_selection/2015_SeikaSelection_6.pdf)

2-2 表彰式 / Award Ceremony

各成果の内容紹介に続き表彰式が行われた。授賞対象を選ぶに当たり、次の 3 点を重視したという。(1) イノベーション創出に大きな影響が期待できる。(2) 産業界との連携によって大きな成果が期待できる。(3) ナノテクノロジーの適用が大きな効果をもたらす。

選ばれた成果の中から、最優秀賞が選ばれ、最後に発表した名古屋工業大学の「フッ化物薄膜を用いた真空紫外光源」が最優秀賞に選ばれたことが紹介された。

表彰は、最優秀賞から順に行なわれ、審査委員会を代表して文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム運営統括会議主査の大泊 巖 早稲田大学名誉教授より、受賞者に表彰状が贈られた。

また、ナノテクノロジープラットフォーム事業における設備・装置の有効活用には、設備の整備から装置使用上のノウハウ提供などの技術支援が不可欠である。このため、ナノテクノロジープラットフォームセンターでは、平成 26 年度より秀でた技術を有し、ナノテクノロジーに多大な貢献の認められる技術支援者に技術支援者賞を贈ることとした。ナノテクノロジープラットフォーム事業実施機関に推薦を求め、その中から、東北大学マイクロシステム融合研究開発センター 森山 雅昭氏が選ばれ、技術支援者賞が授与された。授賞テーマは、「シリコン深掘りエッチング (Deep RIE) における超精密形状制御」である。森山氏に、大泊 教授より、賞状と副賞の「ナノテクの匠」バッジが贈られた。

2-3 ポスター発表:ナノテクノロジープラットフォームの実施概要及び利用成果 / Poster Presentation / Activities of Nanotechnology Platform

引き続き、会場入口ロビーで、下記のポスター発表が行われ、ナノテクノロジープラットフォームの実施概要及び利用成果の展示、展示発表者と参会者との討論、交流が行われた。

- (1) 文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム 平成25年度 秀でた利用 6 大成果
- (2) ナノテクノロジープラットフォーム事業概要
- (3) ナノテクノロジープラットフォームセンター
- (4) 微細構造解析プラットフォームとその参画 10 機関
- (5) 微細加工プラットフォームとその参画 16 機関
- (6) 分子・物質合成プラットフォームとその参画 11 機関



表彰式



技術支援者賞

(詳細は ▶ http://nanonet.mext.go.jp/ntjb_pdf/v8n1_BestResearchSupportAward2015.pdf)



ポスター発表

Free from Radiation Damage by Using X-Ray Free-Electron Laser 西野 吉則 (北海道大学) / Yoshinori Nishino (Hokkaido University, Japan)



X線自由電子レーザー (XFEL, X-ray Free Electron Laser) 施設 SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) は 2012 年 3 月に供用を始めた。現在、日本とアメリカの 2 つの施設でのみ XFEL を利用できる。XFEL の X 線は位相の揃ったコヒーレント X 線である。これまでの X 線による結晶の原子レベル解析は結晶の周期性を必要としていた。コヒーレント X 線解析では、イメージングにレンズを用いず、結晶のような周期性を必要としない。回折データをもとにコンピュータで試料の構造情報をイメージ化する。この手法は既に SPring-8 で用いられていた。2003 年に大腸菌の回折パターンを、コンピュータでイメージ化し、2009 年には人の染色体を 3 次元で観察している。

従来のシンクロトロン放射光 (SOR, Synchrotron Orbital Radiation) に比べ、XFEL の X 線は輝度が高く、パルス幅がフェムト秒 (fs) になる。このため、短時間に、試料が壊れる前の観察ができる。生物学的応用が可能になり、周期性を要しないから、結晶化の難しいたんぱく質の解析も可能になる。生細胞などは溶液中に存在するから、溶液試料を保持するマイクロキッドアレイ (MLEA, Micro Liquid Array) が必要になる。窒化シリコンの薄膜で溶液試料を挟んで保持するホルダ製作にはクリーンな環境での微細加工を必要とし、北大の微細加工 PF を利用し、平成 25 年度秀でた 6 大利用成果の一つに選ばれた。

SACLA の XFEL で生きた細胞を観察する前に、まず Au ナノ粒子が自己集合で形成したボールの観察を行い、10nm の分解能を確認した。次に、サブミクロンの微生物が生きた状態で MLEA に閉じ込められるかを確かめた。細胞と共に、細胞が生きていると赤く、死ぬと青く

なる蛍光体を MLEA に入れて、約 1 時間、真空中においたが、青に変わることはなく、生きた状態で閉じ込める能力のあることが確認できた。そこで、SACLA に持ち込んで 1 μ m に絞ったコヒーレント X 線を照射すると、シングルショットの XFEL 回折パターンがとれる。短時間の照射でとられた、細胞が生きた状態での X 線干渉縞である。これをコンピュータ解析して細胞の構造を再現した。幅は 194nm、長さは 582nm のカプセル状で、内部の密度は不均一に細胞内に分布していた。TEM 観察では樹脂で固め薄くし染色しているため細胞は死んでいる。今回の観察結果は TEM 観察とは異なっていた。今回見つかった密度の分布は DNA の詰まった核様体が見えているのではないかと解釈している。この結果は JST サイエンスニュース (2014.7.17, 動画) にも紹介された。 (<http://sciencechannel.jst.go.jp/M140001/detail/M1400001005.htm>)

これまでは生物試料の観察を行って来たが、この技術の産業応用に向け、SACLA 産学連携プロジェクトが始まった。製薬会社との共同研究 (微生物等が対象)、トヨタとの自動車用ナノマテリアルの形態把握などの課題を取り上げている。また、Li イオン電池や触媒材料などの in-situ 観察などを行っている。

【質疑】

Q: 細胞の周りの水からの反射の影響はないか。

A: 光は垂直入射なら直進する。凹凸があると散乱するので、平坦にして散乱を抑えている。

Q: SACLA は基礎科学にも有効か。

A: 放射線損傷を受けるような材料、溶液中の試料など様々なものを見ることができる。

Q: ダメージフリーで広く使えるということか。

A: ダメージフリーの状態、壊れる前の状態を観察できることが特徴である。



基調講演 II / Plenary Lecture II

司会: 横山 利彦 分子科学研究所教授

「材料技術が切り拓く革新的クルマ社会」 / "Materials Breakthrough for Innovative Mobility Society" 梅村 晋 (トヨタ自動車株式会社) / Susumu Umemura (Toyota Motor Corporation, Japan)

人の移動距離は GDP (国内総生産) とともに増加する。移動には車が多く使われ、車が経済発展に寄与している。新興国の移動距離はまだ短く、今後は新興国が主要市場になる。一方、新興国は交通事故が多いので、一層、安全への取組みが重要になる。自動車の安全への取組みは



衝突防止から、予防安全に移行しつつある。これにはIT技術との連携が不可欠になるので自動車産業とIT産業とでOpen Automotive Allianceを組織した。CO₂の放出について、日本は走行距離当たり排出量を現在の130g/kmから2020年には95g/kmにすることが求められている。米国はゼロエミッション車の割合を現在の12%から2018年には16%にしようとしている。このような動きは各国に広がり、次世代の車に対するインセンティブを与える様々な政策が実施されている。

自動車産業の大きな方向は、電動、軽量、知能化である。電動化ではエネルギー産業、家電業界とのコラボが必要になる。電動化に必要な電池では、エネルギー密度を高める必要があり、現在のLiイオン電池における300Wh/Lに対し、1,000Wh/Lが最終目標だが、700Wh/L付近の中間目標には固体Li電池などが候補になる。知能化では交通環境から情報を取得し、ビッグデータを活用して車に新しい価値を加えるので新しいビジネスが生まれる。軽量化は材料、部品、車が絡み合う。総力を挙げて取り組むべき課題である。材料は鉄をアルミや樹脂に置換えることも進むが、車の構造や製造技術の革新が必要となる。電動、軽量、知能化の3つは互いに連関するのでバランスをとって進める必要がある。

CO₂削減には材料開発が不可欠である。エネルギー消費はガソリン車から、ハイブリッド(HV)、プラグインハイブリッド(PHV)、電気自動車(EV)と減って行く。エネルギー消費は、パワートレイン(動力源から、末端部分までの駆動系)と走行抵抗に分れる。電動化に伴い、パワートレインが減少し、走行抵抗の割合はガソリン車の25%から、電気自動車では56%になるからその削減が重要になる。今後どのタイプの車が使われるか予測すると、2020年以降、FC(燃料電池)車、EV、PHVなどの次世代車が普及する。ガソリン車は材料とパワートレイ

ンの改良で燃費を向上させる。材料側からの燃費向上の例として、潤滑油の改良でエンジンの設計が変わり、摩擦が減って燃費が良くなったことが挙げられる。潤滑油だけでなくセットで考えることが重要になる。走行抵抗には、空気、転がり、加速、勾配の4要素がある。これには軽量化が重要だが、燃費だけでなく、安全、運動性能にも注意を払う。安全規制が進むと衝撃に対して強くなるようにするため車は重くなる。炭酸ガスの削減には軽くする必要があるから、安全と軽量を両立させねばならない。単に軽くするだけでなく、重心を下げることで重量と運動性能のバランスをとる。100kgの軽量化で燃費は1km/Lの改善効果がある。軽量化の取組みではAl、Mgの使用は単発的だった。ただの部品置換でなく、全体最適で材料を選ぶ。運動性能とともに、世界各地で生産可能なことも考えねばならない。材料を適材適所で使うので、車はマルチマテリアルになる。マルチの材料になると異種材料の接着・接合技術が重要になる。

これからの材料技術を考えて、一つはバッテリーである。燃料電池車「MIRAI」は2014年12月に発売した。スタック、セル、触媒、電解質など電池の材料要素技術は多岐にわたる。また、HVやEV、FC車にはモーターが要る。さらに、Heat Managementも重要だ。ガソリン車で発生する熱の70%は現在捨てているから、排熱の有効利用が求められる。一方、HV、EVになると熱源が少なくなるので熱が不足する。熱の有効利用は益々重要になる。排熱を集めて、貯めて、如何に利用するかが大切になり、そのための材料開発が求められる。この開発に当っては、材料の要素技術開発とともに評価が必要になるが、車を作った際の検証は難しいのでシミュレーション技術も必要になる。

車は社会システムの一つである。社会のエネルギー管理システム(EMS)の中の一つになって、社会貢献が求められる。CO₂削減においては、車を作ってから乗って、捨てるまでのLCA(Life Cycle Assessment)を考えねばならない。ハイブリッド車の炭酸ガス排出量はガソリン車の0.6になる。しかし、ハイブリッド車では運転中の排出量は少ないが、使用する材料のLCAにおけるCO₂排出量は大きい。材料を作るときの炭酸ガス排出を抑えることが必要になる。

Innovative Automotive Societyでは、エコは当たり前になり、小さく、軽く、リスクマネジメントされ、低抵抗タイヤで走る。その一方、軽い材料で乗り心地をよくする(快適空間)ことができるかが問われる。エコとともに新しい車が要ることになる。車は社会の中で共存共栄できるようトータルEMSが求められる。CO₂削減とともに新しい車の価値を提供し、QOLを高めることに貢献したい。

【質疑】

Q: マルチマテリアルや、電気を使うことで車は複雑になる。資源のリサイクルはどうするか。

A: 今日話す時間がなかったが、リサイクルは重要と認識している。炭素繊維 (CFRP) 利用では如何にカーボンを分離して使うかが問題になる。自動車メーカーだけでは解決できない問題もあるので関係者と協力して行く。希少資源の Nd, Dy など使わずに済むよう、NIMS とも協調して研究している。

Q: 熱マネジメントはどのような段階にあるか。

A: 発生する熱の 30% は暖房などに使っている。後の 70% の使い方を考えることになる。熱エネルギーのストレージは研究段階である。

Q: 少子高齢化が進むと、軽量で近距離の移動は多くなるだろう。社会構造の変化の中で将来のモビリティ社会をどう見ているか。

A: 近距離移動には電気自動車が有用だろう。高齢者の安全にはインテリジェンス (知能化技術) が必要で、そのサポートをする。長距離移動は車の魅力でもある。長距離は燃料電池、中距離はハイブリッドと場面ごとに変えることになるかとみている。



Session 4: 自動車用材料 / Materials for Automobiles

司会: 引続き, 横山 利彦 分子科学研究所教授

4-1 「希少元素をつかわない自動車用永久磁石材料の開発」 / "Development of Dysprosium-Free Neodymium Permanent Magnets for Automotive Applications" 宝野 和博 (物質・材料研究機構) / Kazuhiro Hono (National Institute for Materials Science, Japan)



ハイブリッド自動車や電気自動車の駆動モーターに使う永久磁石の基本特性は、磁化を保持する力の保磁力 H_c

と、モーターに与える磁気エネルギーの BH_{max} である。保磁力が大きいと外部条件が変わっても永久磁石の状態が良く保たれ、 BH_{max} が大きいと磁石を小型にできるので省エネルギーになる。 BH_{max} は、1920 年代の本多博士による KS 鋼から材料開発によって向上し、1970 年に希土類を用いた Sm-Co 磁石が生まれて KS 鋼の 100 倍の $280\text{kJ}/\text{m}^3$ 程度になった。高価な Co を安価な Fe に替えられないかと日本でフェライト磁石が生まれたが、 BH_{max} は Sm-Co 磁石の 1/2 以下である。さらに 1980 年代に、これより BH_{max} の大きいネオジム磁石が発明された。

ネオジム磁石の組成は、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ で、Co を Fe に変え、Nd を加えたことに当る。ネオジム磁石の BH_{max} は大きく、最大 $500\text{kJ}/\text{m}^3$ に達する。フェライト磁石は、Fe の酸化物を主体とし、安いため最も広く使われているが、 BH_{max} が小さい。このため、高性能の要求されるハイブリッド自動車のモーターにはネオジム磁石を使わざるを得ない。 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ の H_c は 1.61T (Fe は 2.2T , T: テスラ), H_c の元になる異方性磁界は $H_A=7.7\text{T}$ だが、強磁性の保たれる温度であるキュリー温度 T_c は 312°C に過ぎない。 H_c も BH_{max} も温度が上がると急速に低下して強磁性が失われる。このため、温度の上がるエンジンルームにおかれるハイブリッド自動車用のネオジム磁石には重希土類元素の Dy を多量に添加する。重量比組成で $\text{Fe}_{65}\text{Nd}_{22}\text{Dy}_{11}\text{B}$ のものを使う。Dy 添加で H_c は 3 倍以上になり、 BH_{max} の温度依存性が緩やかになるため高温で使えるようになる。しかし、Dy のスピンの向きは、Nd や Fe とは反対のため、 BH_{max} は 1/2 近くに低下する。しかも重希土類元素には供給不安がある。そこで、Dy なしで高温使用可能な磁石材料の開発を進めている。

焼結磁石の保磁力は粒子サイズが小さくなると増すことが経験的に知られているが、微粒子化の効果は限られる。磁石の内部をトモグラフィで観察すると、非磁性層が磁性粒子を囲んでいる。その境界の欠陥を高分解能電子顕微鏡で観察し、粒界組成をアトムプローブで解析して、保磁力を向上する方法を探る。高速回転している銅のロールに融かした磁石材料を吹き付けて急冷して粉にし、熱間加工で強い圧力を加えて 20nm の結晶粒の方位を揃えると、ある程度保磁力が上がる。粒界の組成を調べると、Nd の量が少ない。そこで、Nd と Cu の低融点合金を融解して、圧力をかけて体積膨張を抑えながら、Nd を結晶粒界に浸透させた。この結果、Dy を 5% 含むものと同等の保磁力が得られた。 $(BH)_{max} = 358\text{kJ}/\text{m}^3$ を示し、保磁力温度係数が低いため、 200°C においても $(BH)_{max} = 191\text{kJ}/\text{m}^3$ で、Dy を 4% 含む焼結磁石を上回った。

これまでの話は、ネオジム磁石の改良だが、 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ を超える新しい磁性化合物があるかは、永久磁石の世界で長い間疑問とされて来た。 $\text{Nd}_{11}\text{FeTiN}$ が期待できそうだが、Ti が非磁性層のため磁化が低く、Ti を抜くと安定性が損なわれるのでバルク材料を作るのは難しい。これに対し、 $\text{MgO}(100)$ 基板に被着した W 膜の上に NdFe_{12} 膜を

エピタキシャル成長させて窒化することにより、NdFe₁₂N 磁性膜を合成することに成功した。その固有の磁気特性は Nd₂Fe₁₄B より優れている。NdFe₁₂N 化合物の希土類元素量は少ないから、新しい省希土類磁石が期待される。課題は、微細構造と磁気特性の解明、大量のバルク材料を作製するプロセスの開発などである。新たな材料探索、優れた磁石の開発は今後も継続する。

ここで司会者交代、次の2件の司会：中嶋 直敏 九州大学教授

4-2 「放射光／シミュレーションを活用した低燃費タイヤ開発」／"Development of Environmentally-Friendly Tire Using Synchrotron Radiation and Simulation" 岸本 浩通 (住友ゴム工業株式会社)／Hiroyuki Kishimoto (Sumitomo Rubber Industries, Ltd., Japan)



自動車の燃費は自動車の受ける抵抗で決まるが、タイヤ抵抗は全体の20%を占め、ガソリンの20%はタイヤが消費している。2001年のG8洞爺湖サミットでIEA (International Energy Agency, 国際エネルギー機関)はタイヤに関わる燃費性能の5%改善を提言した。タイヤを金属のように硬くすれば、燃費は良くなるが、グリップ性能が下がり安全性が低下する。燃費とグリップ性能の両立を図る必要がある。

ゴムは高分子、フィラー (カーボンブラックとシリカ)、可塑剤、添加剤、クロス架橋剤から成る複雑な材料システムである。さらに、シラン結合剤や高分子内のシリカ粒子の分散を増すために機能性高分子を加えるようになった。これらの材料のすべてがナノメートルからマイクロメートルの不均質構造に凝集し、それが物理的性質に現れる。フィラーをナノ粒子にするとゴムは強くなる

(補強効果)。伸縮時のヒステリシスが7%と大きく、エネルギーロスのためよく止まるから、グリップ性能は良い。一方、変形し易く熱が発生し、燃費性能は下がる。このようなゴム複合材の性質はナノ粒子の階層構造に関係すると思われるが、階層構造とバルクの物性がどのように結びついてタイヤ性能に関係しているか、精確なメカニズムは明らかにできていなかった。

そこで、研究の焦点を、タイヤの転がり抵抗とグリップ性能に大きく寄与するシリカ粒子の階層構造に絞った。シリカ粒子の3次元構造を解析するため、SPring-8シンクロトロン放射光施設において、2次元超小角/小角X線散乱 (2D-USAXS/SAXS, two-dimensional ultra-small-angle/ small angle X-ray scattering) を用いた。2D-USAXSの実験はカメラ長160.5mのビームラインBL20XUで、2D-SAXSの実験はカメラ長3mのビームラインBL03XUで行った。このX線入射角度の異なる二つのビームラインを組み合わせることで、6nm～5μmの様々な大きさでの構造解析が可能になった。

試料として、スチレンブタジエンゴムを用い、シリカと結合する変性基の導入位置の異なるゴムを作った。X線散乱の実験を行い、回折データを解析すると凝集構造が見られる。さらにモデル解析を行った結果、サブミクロンレベルのシリカ粒子の凝集構造が転がり抵抗と密接に関係していることが分った。低燃費化するポリマーは凝集構造が少ないので、凝集構造を減らし分散させることが必要となる。

ここで分ったことを作り方に結びつけるため、材料開発にコンピュータシミュレーションを導入した。有限要素法、原子動力学法、分子動力学法などの第一原理計算法を組み合わせ、それぞれの特徴に適した現象を解析する。例えば、有限要素法では変形を求め、エネルギーロスの少ない場所を探す。SPring-8の結果と組み合わせると発熱しているところは凝集構造の多いところで、シリカ粒子が密に集まっていた。そこで、シリカとポリマーの分布を熱平衡シミュレーションで解析したところ、分散指数と転がり抵抗の間に相関のあることが分り、変性基の位置によって燃費性能の良いポリマーを作れることが分った。この結果、開発したタイヤでは発熱が抑えられ、ゴムの部分単体でのエネルギーロス低減は約39%、タイヤにしたときの車の燃費性能にして6%の改善効果になった。

今後は、ナノ粒子周りに吸着したゴム分子の性質をJPARCの中性子準弾性散乱で調べ、スーパーコンピュータ「京」でのシミュレーションと結びつけて、ゴムの破壊機構を調べるなどの展開を図る。

【質疑】

Q：燃費とグリップ性能の話があったが、乗り心地に材料はどのように関係するか。

A：低燃費化を進めると、車がよく跳ねるようなゴ

ムになる。この問題はタイヤの材料でなく、構造で解決したいと考えている。材料と構造の両面から対策することで燃費性能と快適性の両立を図る。

Q：ナノテクは電子材料だけと思われ勝ちだが、ゴムのような違った分野でも有効というお話を頂いた。大いにPRしてほしい。そのほかの適用例はないか。

A："もの"と"もの"の界面の課題が多い。スチールワイヤとゴムの界面など、多くの適用が期待される。

4-3 「炭素繊維複合材料の開発と用途展開」／ "Carbon Fiber Composites, Developments and Applications" 遠藤 真 (東レ株式会社) / Makoto Endo (Toray Industries, Inc., Japan)



炭素繊維の80～90%はポリアクリロニトリル(PAN)をもとに作られる。この材料は1959年に、工業技術院大阪工業技術試験所にいた進藤 昭夫氏が選び出したものである。東レは炭素繊維を1970年に上市したが、暫くは用途開発に苦労した。1970～1980年はゴルフシャフト、テニスラケットに使われた。1990年代に航空機一次構造に使われるようになって、一般産業に展開した。市場規模は、1970年代はじめの年数千トンから2010年代後半には年10万トンになると予測されている。1980年代には欧米メーカーが多かったが、1980年代後半から撤退が増えた。日本では3社(東レ、東邦テナックス、三菱レーヨン)が製造を続け、日本の世界シェアは70%になった。今は新興国勢が参入して競争が激化している。

炭素繊維の応用対象は引張り強度と引張り弾性率で決まる。一般用は強度の低い領域にあり、航空機用は高強度が求められる。1970年頃から炭素繊維の特性は改良が

進んで来た。最初の商用炭素繊維では、炭素繊維表面に欠陥が多く存在し、その大きさもマイクロサイズで脆かった。改良を進めた結果、これらの表面欠陥はサブマイクロサイズに改善され、今はナノサイズにまでなっている。航空機ボーイング787用には引張り強度の高い材料を用いる。炭素繊維は織物、一方向に揃えて樹脂で固めたプリプレグ、細かく切って添加するチョップトファイバなどの中間体を經由して製品にする。

炭素繊維は軽量、高強度の特徴により応用が進んだ。航空機に複合材料を使用するのは最近のことで、アルミニウムの使用が長かった。1980年代にCFRP(Carbon fiber reinforced plastic)を一次構造に使うようになり、787では尾翼、主翼、胴体へと適用が広がった。要求性能には、耐雷電性、温度、湿度、有機溶剤耐性、引張り強度、圧縮強度、体積変化、衝撃抵抗など様々なものがある。炭素繊維を含んだシートを重ねて使うので、界面を強くする層間強化技術が大切になる。ひびが入っても亀裂の伝搬しないことが求められるが、レジン内に分散させた粒子がクラックの伝搬を抑えるので、アルミに比べて衝撃に強い。この結果、航空機重量の50%が複合材になった。

樹脂と炭素繊維を重ねてプリプレグを作り、オートクレーブで加熱成形してシートを作る方法ではプロセスが長くなるので、より効率よく作る方法が検討された。炭素繊維で形を作った後に樹脂をしみ込ませる Resin Transfer Molding を発展させて A-VaRTM (Advanced Vacuum assisted Resin Transfer Molding) という方法が開発された。この方法で作った炭素繊維は三菱リージョナルジェット機MRJの垂直尾翼に使われることになり、量産段階に入っている。自動車応用ではフォーミュラカーに適用され、BMW車、最近では燃料電池車「MIRAI」へと適用が拡大している。

自動車に適用するには効率と生産性を考える必要がある。RTMからのアプローチで、NEDOプロジェクトにより、自動で型を作り、高速でしみ込ませ、短時間に硬化させる方法を開発した。自動車のフォアパネルを10分で成形できる。これまではCFRPを熱硬化法で作っていたが、次は熱可塑加工を検討する。プレス成形やモールド製品が可能になり、深絞り形状もできる。このような様々な開発を行っているが、本当に自動車に使えるか、材料メーカーとしても確かめようと、EVのコンセプトカーを作り、炭素繊維構造材を組込んでテストしている。

地球環境へのCFRPの貢献では、航空機のCO₂排出量は重量に依存するから、機材の50%がCFRPになると、重量は20%減り、炭酸ガス排出はライフサイクル(製造、運航、廃棄のサイクル)当り1400トン減少する。100席以上の航空機1万5千機では年間4,100万トンのCO₂削減になる。車はライフサイクル当りの排出量削減は50トンと、1台あたりは少ないが、3,700万台走っているから年間1,900万トンの削減になる。CFRPのリサイクルは、

CFRPを碎き (crushed), 熱または化学的クラッキングによってチョップトファイバなどの形で取出し, 樹脂に加工, 再利用する. 経産省や炭素協会の支援を受け, 大牟田にテストプラントを作って実証を行った. JCMA (Japan Carbon Fiber Manufacturers Association) で今後の実用化, マーケット展開を検討している.

今後は, 繊維とマトリックスレジン, そのインターフェースの改良が重要である. 成型法, 効率化, 用途に合ったプロセス, コスト, ライフサイクルマネジメントなど課題は多い. 企業だけではうまく行かない. 産学官の連携が必要である.

【質疑】

Q: 軽量化の効果は素晴らしい. メンテナンスにおいてどこが悪いかをどのようにして見つけるか. それと 787 はほぼ全面採用だったのに 777X では主翼だけの部分採用になったのは何故か.

A: 欠陥検出には苦勞している. Acoustic Emissionを使っているのから一歩抜け出したい. 部材の耐久性基礎データを取るようにしているが, 疲労強度と故障の検出法が課題である. 777X では胴体をアルミにした. 胴体へのCFRP適用はアルミに比べて十分なメリットがないらしい, 主翼はアスペクト比が大きいのでCFRPのメリットがある. 加工法も開発してアルミに差をつけたい.



閉会挨拶 / Closing Remarks



最後に, 野田 哲二 (JAPAN NANO 2015 組織委員長, 物質・材料研究機構 ナノテクノロジープラットフォームセンター長) 氏から閉会の挨拶があり, その中で, 参加者は約 600 名, 内, 海外からの参加者は 30 名弱との事務局からの報告が紹介された.

(古寺 博)