

## 第12回ナノテクノロジー総合シンポジウム (JAPAN NANO 2014) 開催報告



第13回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議が2014年1月29日(水曜日)から31日(金曜日)まで、東京国際展示場(東京ビッグサイト)において開催された。最終日の1月31日(金曜日)には、このイベントを締め括る文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム「第12回ナノテクノロジー総合シンポジウム (JAPAN NANO 2014)」が同展示場会議棟1階のレセプションホールで、10時から17時30分まで開かれた。新しい科学技術を創出する研究環境の整備・充実・共用に向け、大学、公的機関、企業の研究者が全国規模で研究分野や機関を越えて研究ネットワークを構成する、ナノテクノロジープラットフォームセンターの主催によるシンポジウムである。

今回は、将来にわたり人々が安全・安心な生活を営むことのできる社会を実現していくことが求められる中で、より高度で安全・安心な社会構築に向けてのナノテク・材料技術の寄与の観点から、ナノテクノロジー研究の国内外の最新の研究開発状況を概観することを目指した。シンポジウムのテーマは「より高度な安全・安心な社会構築へ向けてのナノテクの貢献—防災、医療、食品の安全—」である。主催者と文部科学省研究振興局長の開会挨拶、基調講演に続き、防災、食品の安全、ナノ医療の3セッションで海外からの2件を含めて、9件の最先端技術が紹介された。また、「ナノテクノロジープラットフォーム等の概要」のセッションが設けられ、従来からの講演会場ロビーにおけるポスター発表に加えて、講演会場内

で、平成24年度「秀でた利用6大成果」を紹介するという新しいプログラムも設けられた。ポスター発表はナノテクノロジープラットフォーム各機関、低炭素研究ネットワーク、蓄電池基盤プラットフォームから行われた。

シンポジウムは、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 吉原邦夫氏の総合司会で始まった。以下は、当日会場でとったメモと出席者に配布された講演予稿を基にしたシンポジウムの概要である。



### 開会挨拶 / Opening Remarks

開会挨拶の司会には野田哲二 (JAPAN NANO 2014 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) 氏が当たった。

### 主催者挨拶：潮田 資勝 (物質・材料研究機構理事長)

このシンポジウムは、平成24年度より、先端装置の共用化、ノウハウ提供によりイノベーションの加速を図ってきた、ナノテクノロジープラットフォーム事業の一環として開催し、最先端の研究成果を披露して、今後の方向性を探るものである。

ナノテクノロジーは様々な学問の基盤となり、ナノテクノロジープラットフォームでは微細構造計測、微細加



工、分子・物質合成の3つの技術領域を設けて運営している。

ところで、安全・安心な社会の構築には、災害、医療、食糧などにおける不安要素を払拭しなければならない。科学技術には安全に関する課題解決が求められる。本シンポジウムでは、資源、エネルギー、食糧等の問題解決に向けた最新の研究を紹介し、合せて、ナノテクノロジープラットフォームの利用成果を報告する。講師の方々には、忙しい中で、講演をご快諾頂いた。

参加者にとって、本シンポジウムが、防災、食品、医療等、安全・安心に係る研究の方向性を見出す機会となると共に、新しいパートナーを見つけるきっかけになることを期待している。

**文部科学省：小松親次郎（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における科学技術の新しい可能性を生む基盤である。また、自動車やエレクトロニクスなどの基幹産業を牽引して、イノベーションの源泉となる。

我々の直面している課題には、東日本大震災からの復興再生、社会インフラ老朽化への対応、グローバルな資源・エネルギー問題等があり、その解決にはナノテクノロジーが必要になっている。課題解決に向けては多くの研究がなされ、シンポジウムと同時に開催されている展示会の nano tech 2014 にも多数の成果や技術が展示されている。

政府は3本の矢の一つに成長戦略を挙げている。このため、閣議決定された日本再興戦略、並びに、科学技術基本会議が定めた科学技術イノベーション総合戦略によって総合的対策を立てている。その中には、新材料開発をはじめとして、ナノテクノロジーが明記され、政府としてもナノテクノロジーの重要性を強く認識している。

この状況の中で、シンポジウムは安全・安心な社会構築を主題として開催されている。我々の課題に焦点を当てる時宜を得た企画である。文部科学省は、社会的課題の解決に向けて、ナノテクノロジーの研究開発と人材育成に努めて行こうと考えている。

ナノテクノロジープラットフォームプログラムは先端機器の共用を一つの課題としている。従来、研究設備は自前で持つものと言う考え方が強かったが、もう少し考えを広げ、日本各地の優れた研究設備を活用してほしいと思っている。既に多くの共用設備利用者がいるが、シンポジウムを機に、さらに活用が進み、顕著な成果が生まれることを期待する。本シンポジウムがナノテクノロジーの様々な可能性を切り開いて行く機会となることを望みたい。



## 基調講演 / Plenary Lecture

基調講演の司会は、古屋一夫（物質・材料研究機構ナノテクノロジープラットフォーム副センター長）氏。

**「安全・安心な社会構築に向けた科学者の役割」 "The role of scientists towards the construction of a safe and secure society" 橋本 和仁（東京大学）**

日本ではこれまでにあった安全神話が揺らいでいる。インフラ設備の劣化が第一の問題である。中央高速道でトンネルの天井が落ちたのはショッキングな事件だった。先進国のトップに行くアメリカではミネアポリスで橋が落ちている。日本の橋は、1950年頃から増え始め、建設は1970年代がピークだった。建設数の年次推移のカーブはアメリカの方が、日本より20～30年早い。橋に限らず、道路、下水、学校など社会インフラの建設後の平均経過年数は日を追って増大している。中国の状況を見ると、高速道路総延長の伸びは日本より20年遅れているが、伸びは急速である。世界中で整備されたインフラ設備は20年後には必ず高齢化する。

第二に、少子高齢化の問題がある。1950年にピラミッ



ド型だった人口構成は、2000年には中間に2つのふくらみを持った形になり、2050年には80歳代が最多人口となる紡錘型になると見られている。人口の年齢構成は予測でなく、確実にそうなるものである。急に何か施策を行ってもこの構造は変わらない。75歳以上の人口の割合は2030年頃に20%になる。高齢化に伴い、医療費は急増する。75歳以上の人のために医療費の半分近くが支払われるようになる。世界のデータを見ても、65歳以上の人口はどここの国でも増加している。中国は一人っ子政策もあって、特に高齢者人口比率が伸びる。わが国と中国の差は数年しかない。日本で先行している少子高齢化はどここの国でも起る問題である。

このように確実に起きて来る課題があるが、わが国は戦後の経済崩壊というピンチを経験した。戦後復興の中で、困難を乗り越えることができたのは技術力だった。高度技術製品として、鉄と造船が産業をリードし、石油ショックの始まった1973年にはエネルギー効率向上を追求した。電気製品や自動車で新商品が生まれ、生産技術や品質の良さで輸出が伸びた。さらに、プラザ合意後の円高では、海外進出を行い、新技術を産み出すことによってピンチを脱した。科学技術はピンチをチャンスに変える。その例は1970年にアメリカで成立したマスキー法への対応である。有害排気ガスを5年間で1/5にすることが求められ、自動車が売れなくなる恐れが生じた。これに対し、日本の自動車産業は法の要求をクリアすることによってシェアを高めた。技術力で課題を解決すると共に産業競争力を高め、世界に出て行くことができた例である。1960年代には環境問題があった。現在の北九州市の空は澄み切っているが、1960年には煙に包まれていた。1960年代にはごみだらけだった隅田川も今は船で宴会を楽しめるまでになった。環境問題を技術力によって解決したが、その基本には科学があった。

現代の課題の一つは社会インフラの安全である。トン

ネルは‘こんこん’と叩いて割れなどがいないか調べている。これをもっと先端的な検査技術にしようというプロジェクトも始まっている。従来のものに新しいものを入れて行く。サイエンスベースで新しいものを導入する。サイエンスの分野では自己修復、自己診断材料が注目されている。自己修復などは、産業競争力会議の資料にも書き留められた。止血という人体の機能を真似たものが研究されている。構造材料の中にカプセル化した修復材を入れておき、材料が破断したらカプセルが割れて、修復材が放出されて材料が修復されるというものだが、ナノテクを使って開発が進んでいる。大きな構造の修復に小さなところを扱うナノテクノロジーが重要な役割を果たしている。長寿社会になると支援ロボットが必要になるとされるが、ロボットには表に現れない数々のナノテクノロジーが使われている。研究成果のみで評価されるのではなく、どのように実用機器に組込まれるかが評価される時代になっている。DDS (Drug Delivery System, 薬物送達システム) は薬を直接、患部に運ぶことによって、既存の薬の効能を上げられる。DDSは既存の薬でもよいから、経済性は高い。医療を変える可能性がある。ピンチをチャンスへ、技術の先進性と経済性の両立を図る。これに向けてのフロンティア開拓が科学技術のイノベーションになる。コストを上げないで最先端の科学技術を実現することが求められる。

政府の推進するアベノミクスは金融緩和、積極財政、成長戦略の3つからなる。3本目の矢は、これから、アイデアを仕込んでの実行段階に入る。少子高齢化、インフラ老朽化、財政再建、エネルギー・環境の4つの課題がある。ここに集中投資して、貿易と産業の双発立国を図る。日本産業再興プランには科学技術が特だして明記された。総理レベルで明記されるということはそれだけ期待されているということである。2013年6月には科学技術イノベーションとして、再興戦略が閣議決定され、5つの課題が示された。エネルギー、健康、インフラ、農業、復興である。この課題に科学技術者が立ち向かうことになるが、その根底にはナノテクノロジーがある。しかし、素晴らしいナノテクノロジーの成果もこのような課題で使ってみせないと消えてしまう。

再興戦略を元に、2014年から戦略的イノベーション創造プログラム (SIP, Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program) を始める。府省・分野の枠を超えて基礎研究から出口 (実用化・事業化) を見据えた研究開発を推進するものである。プログラムマネージャー (PM) の下、基礎から実用まで、建設なら基礎研究から工法までやる。エネルギーなどの5つの課題に対し、10のプログラムが決まった。クリーンエネルギーの課題には次世代半導体、健康長寿社会実現に向けては再生医療、ロボット介護機器、次世代インフラ整備の課題にインフラの維持管理ロボット、点検・診断技術システム化、自己修復材料による耐久性向上、地域再生の課題

には農業におけるゲノム情報活用, IT・ロボットによる生産性向上, 復興再生のためには災害時の健康支援, 食料生産地域再生のプログラムがある。これまでの成果を活かして, 社会の課題を解決する。例えば, 次世代パワーデバイスの一つである SiC の加工にはナノテクが有効だ。SiC の利用で消費電力は 40% 減らせるが, 性能向上にはデバイスのナノ界面の制御が重要な役割を果たすであろう。

もう一つの施策は革新的研究開発推進プログラム ImPACT (Impulsing Paradigm Change through disruptive Technology) である。実現すれば社会に大きな革新をもたらすような研究開発を狙う。先端研究開発の成果を産業や社会の変革につなげて行くため, 革新的な研究開発を強力に推進する。総合科学技術会議が設定したテーマに対し, 厳選された PM が研究開発の企画から実用化まで一貫して管理することにより, ハイリスク・ハイリターンを狙う。近く具体化して提案を求めることになるので, 積極的な提案を期待している。

社会的課題解決に向けて, 研究者のコミュニティには出口を見据えた研究開発課題設定を求めたい。研究者は自分の成果の実用化というボトムアップ的なやり方をすることが多い。自分のやってきたことが世に出るのは研究者の夢であるが, これだけだと成功の確率は低い。そのため, 夢だけでなく出口を見据える確率の高いアプローチも必要である。出口から見据えた課題設定である。自己修復に何が必要か, それをどう解決するか。自分のオリジナルな手段にとらわれるのではなく, どこに課題があるかにするどい感性を持ち, 必要なら既にあるものの中から選択してでも解決策を作り上げるといった行き方が必要になる。

科学者への期待は総理だけではない。元官房長官の細田博之氏を代表とした超党派の科学技術の会が国会議員で組織され, 科学技術を超党派で推進しようとしている。1999 年のブダペスト宣言で科学は人類への奉仕を第一とするとしている。お互いに科学技術の社会貢献を目指して努力して行きたい。

#### 【質疑】

Q: SIP では経産省, 厚労省, 文科省などの横断的連携を謳っているが, まだ縦割りが多い。国際的には標準化などでロビー活動が必要だから, 経験者を活用することが望ましいのに, 省庁の役職者は 3 年ごとに変る。薬などでは既得権益を守ろうとする傾向がある。このような課題に対しては, 従来のシステムからのパラダイムシフトが必要ではないか。

A: 指摘されたような問題は産業界競争会議でも論じられている。規制緩和で既得権益打破, 国全体で最適な組織を求め, 横断的運営による縦割り克服など, 会議では前向きな議論が行われている。

SIP は縦割り対策でもある。しかし, 事務局が必要だから, どこかの省庁が事務局を引き受ける。その結果バラバラに運営されることにならぬよう, 束ねる役が必要になる。PM はその全体的なまとめ役となるので, 技術者, 政府の双方にもの言える人を選んでいる。



## 【セッション 1 / Session 1】防災 / Disaster Prevention

セッション 1 前半, 午前中の司会は藤田大介 (物質・材料研究機構 先端的共通技術部門長) 氏。

### 1-1 「安全・安心な社会インフラのための材料技術」 "Materials technology for safe & secure social infrastructures" 土谷 浩一 (物質・材料研究機構)



講演題目のテーマについては 1 年前から調べ始め, 日を追って大変なことを認識するようになった。

国土交通省は 15m 以上の長さの橋の 26% は 2020 年までに, 53% は 2040 年までに建設後 50 年経過すると見積った。橋やトンネル, 港湾, 河川施設などのインフラは老朽化するが, 維持してゆかなければならない。現在 8 兆円の維持費は 2030 年には倍になるという。インフラ老朽化の問題は日本だけではない。たまたま見たヨーロッパの新聞によると, ドイツはインフラの維持管理費を減らしてきた。ところが, ケルンにあるスチールの橋にクラックが見つかり, 交通制限で渋滞が起きた。50 年前の橋で, 当時は今のような大型トラックの通行を想定していなかった。インフラ老朽化の一方, 建設・土木技術者の数は減少していて, 20 年後には半減する。インフラは国が作って地方自治体が維持するから, 地方には財源問題が生じる。国土交通省は定期点検を義務づけるが, 費

用は地方自治体の負担になる。

NIMS (物質・材料研究機構) は、この危機に応じて、(i) インフラの劣化を定量的に無人でオンライン監視する技術、(ii) 劣化したインフラを低価格で修理、強化する技術、(iii) 長寿命、高強度材料の開発を行ってきた。インフラ構造材の強度はある時点から低下するから、点検、診断、保守が必要となる。補強すれば強度は上がり、劣化開始時期を遅らせることができる。点検、診断、保守、補強には劣化機構の理解が必要となる。一つの例になる超鉄鋼プロジェクトでは寿命2倍の鉄材を狙った。周辺技術も含み、構造材、制震ダンパ材も開発した。

セメントはCaOとSiO<sub>2</sub>が水和して溶け合って固まり、コンクリートになる。鉄筋や砂を加えることでコンクリートの強度は上がる。しかし、水和の過程は明らかになっていない。KEK (高エネルギー加速器研究機構) は中性子回折で水和の過程を見たが、反応が完全に終わるまでの期間は50年なのに、実験で見られるのは4,000時間に過ぎない。この時間では反応途中の副産物を見ているだけになる。水和物のナノスケール解析は英国で行っているが、高電圧をかけて解析するので結晶が変化するため観察は難しい。そこで第一原理計算が始まった。コンクリートのひびは鉄筋や砂が原因になっている。鉄は錆びて膨張する。シリカと鉄材の反応で骨材が劣化する。

コンクリート構造の劣化は年数の経ったインフラ構造の主要課題である。強化コンクリート構造 (Reinforced concrete, RC) の主要劣化原因は、鉄筋の腐食による体積膨張である。コンクリート中のpHと塩素イオン (chloride ion, Cl<sup>-</sup>) 濃度 (X<sub>Cl</sub>) の変化を0.3mmφのマイクロ電極で模擬的に連続監視する試作システムを開発した。pH及びCl<sup>-</sup>濃度の変化を電気化学インピーダンスの変化と比較して、強化鉄筋の腐食はpHとX<sub>Cl</sub>がある臨界値を越えた時から始まることが分った。このシステムはRC構造の健全性監視に有用で、現存するインフラに適用できる。

社会基盤の健全性監視のため、新しい可視化技術として、スマートフォニックフィルムを開発した。PDMS (ポリジメチルシロキサン) エラストマーに埋込んだポリスチレン球状ナノ粒子から成るフォニック結晶薄膜を黒いPETシートに被着する。PETシートは2つの役を担う。(i) 柔軟性のあるコロイド状のフォニック結晶膜の支持基板となり、(ii) 透過光の吸収層となる。フィルムが歪むと球状ナノ粒子の間隔が変化し、構造色に変化する。従って、変形した金属板内の局所的歪みやコンクリートモルタル板のクラックを構造色で可視化することができる。このスマートフォニックフィルムはインフラ構造の表面に取り付けて、構造内の変形 (distortion) を遠くから検知できる。橋などで実証しようとしている。

NIMSは既存インフラの更新、修復、強化に有用な新しい材料をいくつも開発した。その中のいくつかは1997-2005の超鉄鋼 (Ultra-steel) プロジェクト (強度2倍、

寿命2倍を目標に、組織の結晶粒径を微細化し、鉄の概念を変えることを狙う)の中から生まれている。いくつか挙げると: Al-Si 耐候性スチール、コンクリート強化Cr添加スチール、水素脆性への高い抵抗力を与えるナノ構造をもったスチール、海洋インフラのための超高腐食抵抗を持ったTi合金などである。これらの材料では高価な元素の利用は極力おさえた。インフラに使われる材料の量は大きく、材料費は常に問題となるからである。従って、元素戦略とリサイクル材料の利用が重要になる。低コストで短期間に処理する新しい修復技術も緊急の課題である。溶接と溶射成形 (spray forming) による修復技術を開発中である。

破壊のメカニズムは分っていない。原子間の結合が切れるのはオングストロームのオーダーで起るが、10mの構造物の大きさはその10<sup>11</sup>倍もある。損傷・劣化の機構解明はNIMSなどの役割である。SPring-8を使った腐食の研究も行われている。

社会インフラ構造のための材料技術の開発、活用には、建設者、関連研究機関、省庁の緊密な連携、協力が必要である。このため、NIMSと土木研究所 (Public Works Research Institute, PWRI) は2013年7月に包括連携覚書を結んだ。この連携の一環として、沖縄県の宮古島と伊良部島を結ぶ全長3.5kmの伊良部橋で新材料の暴露試験を始めたところである。

## 1-2 「災害に強い通信ネットワーク研究の取組み」 "Approach of resilient telecommunication network research on large scale disasters" 浜口 清 (情報通信研究機構)



情報通信システムは2011年3月11日の東日本大震災で壊滅的な損傷を被った。この災害では地震、津波、原発事故が重なった。通信インフラも被害を受け、設備が

機能しなくなった。携帯電話は3万ヶ所で止まり、通信トラフィックは設計値の50倍以上になって、電話は50回掛けても繋がらないということになった。この結果、通信ネットワークの災害時における重要性がクローズアップした。巨大地震はプレートの端で起るが、日本は太平洋プレートとの位置関係上、巨大地震から逃れられない。オールジャパンでの対策が求められる。総務省は2011年度補正予算で情報通信ネットワークの災害耐性強化のための研究開発プログラムを始めた。また2012年度補正予算では災害時における情報伝送インフラストラクチャ技術の研究開発プログラムを始めている。これらのプログラムには、大学、通信業者、電機製造業などが参加している。

情報通信研究機構(NICT)は、2012年4月1日、東北大学片平キャンパスに耐災害ICT研究センター(Resilient ICT Research Center)を設立した。災害に強いICT技術の実現と、被災地の経済活動再生を目指す。このセンターは3つの目的を持つ:(1)災害時の通信輻輳を低減するネットワークインフラ構造の構築,(2)耐災害無線ネットワークの導入,(3)災害時に迅速で正確な情報を提供する情報分配プラットフォームの導入。

災害時の対応には4つの段階がある。発生通知、避難誘導、安否確認、再生復興である。避難誘導では自治体からの情報伝達になる。災害情報を収集し、一元管理して、マルチメディアプラットフォームを作ってそこから住民に情報を伝える。安否確認における通話接続困難の原因には、処理するコンピュータのリソース不足があった。様々な計算機リソースの活用でリソースを5倍にする。早期復旧の困難は電話ボックスや局舎が流されてしまったことで生じた。しかし、局舎が流されても無線ネットワークは残ることがある。有線という物理ネットワークに依存しない無線システムは、回復力に富む通信網として情報伝達に重要な役割を果たす。

NICTは途切れないシステムを目指し、地域に根ざしたネットワークを構築する。従来は携帯電話網と自営通信網が大容量の伝送路として平行して存在した。この2つの間に細かいメッシュネットワークを作り、その中を回線を繋ぐことにより、ユーザー間通信を可能にする。この考えの下に、大災害の後でもデータ接続を確保する研究を目的として、東北大学に無線試験網(テストベッド)を設置した。

このテストベッドの構成は、分散(distributed)データベースメッシュネットワークで、インターネット回線が切断されても分散制御技術によって、ネットワーク通信を可能にする。航空機中継ノードがこのネットワークに加わり、計算機制御で自律的に飛行する無人小型機に中継器を搭載する。青葉山と片平の両キャンパスにテスト局を設け、30台の無線機を校舎屋上に設置した。2つのキャンパスはNICTのJGN-X R&Dネットワーク(Japan Gigabit Network, 新世代ネットワーク)、衛星回

線(WINDS)にも繋がっている。

様々な定常及び災害時応用がテストベッドに組込まれ、被災情報共有、生存者安全確認、地域商業広告配布などができるようにしている。また、災害後に大きな問題となる被災者健康管理などを目的とした無線通信も含まれる。安否情報はグループ登録しておけば家族全員の安否をスマホ上で確認できる。子供や高齢者は、スマートフォンに馴染みが薄い。そこで安全情報をICカードと、ICカードリーダーの付いた屋外広告看板に登録するようにした。ICカードをリーダーにかざすと居場所が他のノードステーションを通して家族に伝わる。デジタル広告板は同時に他の家族の安全情報をも表示できる。

このテストベッドで、2013年3月に公開実験を行った。無人機は軍用のものを転用したが、障害物がないので遠くまで情報を送ることができる。切断された経路を通ろうとした情報は別の経路で送られ、公開実験ではすべての系が繋がって動くことを確認できた。

災害に強いICTネットワークを作る試みを行い、実験には成功した。技術はできたが、社会への普及は、取組みを始めたところである。被災地でのテスト、世界防災会議での紹介など行って行く。津波で流された女川町で、拠点間無線接続、海面情報の共有、アラートの発信などをモデルに取込んで地域実証試験を行うところである。

### 1-3 「ナノ摩擦発電器 新エネルギー技術」 "Triboelectric nanogenerators - A new energy technology" Prof. Zhong Lin Wang (Georgia Institute of Technology, USA / MANA NIMS, Japan)



身体へのセンサ埋込み型医療、センサネットワーク、もののネットワークなどは多数のセンサを必要とする。医科学、環境やインフラ監視、防衛技術、さらに個人用エレクトロニクスのセンシングにとっても無線ナノデバ

イス、ナノシステムの開発は極めて重要である。センサの駆動にはエネルギーが必要で、通常のセンシングシステムは電池を内蔵する。しかし、環境からエネルギーを採れば、電池が要らなくなる。その一つの候補は摩擦電気である。ガラスと毛皮をこすり合わせると電気が出る。雲の上では氷晶の摩擦によって生じた静電気によって雷が鳴る。摩擦電気を利用した van de Graaf 発電機は 1929 年に発明され、加速器に使われた。摩擦電気はギリシャ時代から誰にもよく知られたものであるが、通常は負の効果と捉えられ、多くの技術では避けられていた。

Wang 氏らは最近、摩擦電気ナノ発電器 (TENG, triboelectric nanogenerator) を発明した。摩擦電気と静電誘導によって機械エネルギーを電気に変換する。原理は接触・分離である。ここでは次のような現象が起こっている。有機薄膜と無機薄膜のように仕事関数の異なる物質を接触させると、仕事関数差によって二つの物質間に電位差が生じて電荷の移動が起る。帯電した二つの膜を引き離すと電圧が発生する。外部回路を繋げば、帯電した電荷を電流として取り出すことができる。基本的な動作モードには、垂直接触分離 (2 枚の膜を接触させて離す)、面内迂回 (2 枚の膜を面に沿って互いにこすらせる) がある。

代表的な材料はポリマーだが、金属、織物 (fabric) まで幅広い材料が使えるようになった。表面の形態は、物理的な手法によってピラミッド状、角型や半球状のマイクロ或いはナノパターンを形成すると接触面積が増すので、性能が上がる。材料の表面を、様々な分子、ナノチューブ、ナノワイヤ、ナノ粒子で化学的に修飾すると摩擦電気効果は向上する。ポリマーの中にナノ粒子を埋込んだような複合材料は、表面の帯電を変化させるだけでなく、誘電率が変わるので静電誘導も向上する。

2012 年 1 月に TENG が日本で初めて報告されたときの出力は  $3.67\text{mW}/\text{m}^2$  だったが、12 ヶ月の間に TENG の外部出力密度は 5 桁上がった。面積電力密度は  $313\text{W}/\text{m}^2$ 、体積密度は  $490\text{kW}/\text{m}^3$  に達し、変換効率は約 50% に達している。

TENG は、日常生活で利用可能なのに廃棄されているすべての機械エネルギーの収集に使うことができる。人の動き、歩行、振動、機械衝撃 (triggering, 始動, 発動)、タイヤの回転、風、流水等々である。ポリマーを使って、透明な発電器ができる。ポリマーだから、広い面積にできる。シャツの内側にも付けられるし、靴の中敷に入れ、歩くと LED が光るようにもできる。音波によっても発電する。風船に息を吹き込んで LED を光らせるデモの映像など発電の実例が示された。自己充電も可能だから、非常口のサインにも使える。駅のホームに置けば、人が歩くことで発電する。環境エネルギー収集 (Energy harvesting) だが、電力の管理としてはバッテリーに保存する。自己充電、保存、リサイクルが可能である。ポリマーの安い材料で作れることが特徴だし、どこでも使え

る。心拍のような人体の動きも利用できる。将来は波力による発電にも使えるだろう。ポリマーだから軽いので海面に浮かして、波力による大規模発電の可能性がある。

TENG の基本動作は機械的刺激による電圧/電流の発生である。従って、エネルギー収集だけでなく、機械的なセンサにもなる。動きによる信号を検出し、広い範囲のセンシングができ、自己発電型である。変位のセンサにもなる。分解能は  $136\text{nm}$  と高い。セルフマッピングもできる。セルフマッピングできるから、絨毯の上を人が歩くと灯りがつくようにできる。グリッド構造にすればタッチパッドにも使える。振動の発生源も特定できる。地震予測、橋の欠陥検出などに応用できる。ドアノブに触れると警告音が出る。紙の上にも付けられ、指で触っただけでベルを鳴らせる。音波の検出ができるから、音声記録、音楽録音にも使える。多数の発電器で違った周波数の音を拾えば、どこで音が出ているか  $5\text{cm}$  の分解能で検知できる。さらに信号波形から運動方向が分る。発電性能は、 $300\text{W}/\text{m}^2$ 、50% の効率を達成したがなお改善の余地がある。

この後、2013 年に CNN で放映されたビデオが流された。ビデオの中には、地下鉄プラットフォームに設置した例、コイン型のものを靴に入れるなどナノ発電器の応用例が示されていた。

これで午前の講演は終了し、昼食休憩に入った。

昼食休憩の始まりに、平成 24 年度 6 大成果の表彰が行われた。受賞内容の報告は Session 3 で行われた。



セッション 1 の午後の司会は横山利彦（自然科学研究機構 分子科学研究所）氏。

#### 1-4 「『京』コンピュータが拓く新しい世界」"New frontiers opened up by the K computer" 平尾 公彦 (理化学研究所)



コンピュータ上にモデルを作って、現象をシミュレートし、予測することが世に受け入れつつある。2013年のノーベル物理学賞、化学賞は、研究のあらゆる分野でコンピュータ利用 (computing) が変革をもたらしていることを示した。化学賞は「複雑な化学反応に関するマルチスケールモデルの開発」に与えられた。シミュレーションにノーベル賞が与えられたのは初めてである。物理学賞は「素粒子の質量に関する機構の理論的発見」に与えられ、理論で予測されたヒッグス粒子の存在は加速器を用いた実験で確かめられたが、コンピュータなしでは解析できなかった。実験、理論に続く第3のアプローチとして計算科学がクローズアップされてきた。科学技術、産業競争力強化、安全・安心な社会にとってコンピュータは不可欠なものとなっている。

『京』コンピュータは2013年9月に正式運用が始まった。『京』は富士通と理研が共同開発した日本のスーパーコンピュータで、部品からシステムまで、すべて日本で作られた。『京』コンピュータは完成直後の2011年に、LINPACKベンチマークテストで10 Peta FLOPS (PF, 毎秒  $10^{15}$  の浮動小数点演算) をマークしてTOP500 (世界の高速コンピュータ500のランク付けプロジェクト) で第1位になった。10PFのマイルストーンを達成した最初のコンピュータである。スーパーコンピュータの性能は毎年2倍向上する。10年では1,000倍の高速化が進む。『京』はできてから2年経ったので、現在では順位を下げ4位となっている。1位は中国国防大学、2位は米

国 Oak Ridge 国立研究所、3位は同じく米国の Lawrence Livermore 国立研究所のものである。いずれも軍事目的のものであるのに対し、日本の『京』は民生用で、世界中の研究者に開放している。使用するための唯一の条件は、平和目的に使用することである。

『京』は2013年9月の正式運用開始後、ずっと安定して稼働している。世界のどのスーパーコンピュータに比べても安定である。効率 (理論的な公称性能値に対する実稼働時の性能) は通常60%程度、中国の国防大学のものが61.7%であるのに対し、京の効率は93%に達する。高い効率は、様々な応用プログラムを走らせたとき、プログラムによって性能が落ちることがないことを示している。性能はLINPACKという名のベンチマークテストで順位付けしているが、このテストは連立方程式を解くもので、演算性能だけを指標にしている。最近では、メモリアクセスやネットワーク効率も加えた総合性能で評価すべきとの声がある。歴史ある性能評価方法のLINPACKが使い続けられているが、『京』の100倍の性能のスーパーコンピュータの時代には性能評価法も変わっているかも知れない。

『京』は1,000万元のマトリックスを解くのに30時間を要する。この30時間の間、安定に動作しているというのは驚くべきことである。『京』は100万元の固有値問題であれば解に要する時間は1時間である。『京』は、2011年に「京による100,000原子シリコンナノワイヤの電子状態の第一原理計算」でGordon Bell賞 (計算科学の成果に対し、ACM, Association for Computing Machineryが授与する賞) に輝いている。1PF以上の性能を安定して発揮し、サイエンスで成果を出すことのできる、ScienceにおけるStrong machineである。

『京』ができて初めて可能になったものも多い。一つの例がDrug designである。抗癌剤の候補が10以上あった中から、『京』が有力なものを選び出した。また、心臓のモデルを細胞から階層を重ねて組立てられるので個々の患者の心臓を正確に再現できる。その結果、モデルによって心臓のどこが悪いか分かるようになる。ポリオウィルスのシミュレーションでは1,000万原子の計算を必要とし、『京』の計算が抗ウィルスの開発に使われるようになる。気象変動予測では格子点上でNavier-Stokesの方程式を解くが、従来は数km単位の格子だったのを0.8km単位にできた。この結果、気象変動や台風発生を予測する性能が上がった。台風は10日前、気象変動は従来1週間前までしか分らなかったが、30日前に予測できる。東日本大震災の地震で発生した津波のシミュレーションは、従来の地球シミュレーターでは2時間かかった計算が10分でできるようになった。地震発生後、津波が来るまでの30分間に予測が可能になった。南海トラフ地震ではM9が予想される。この時の津波が四国に到達する様子をシミュレーションできた。地形をきちんと取入れ、都市構造物への影響まで求められている。ものづくりの面で



は、自動車の設計において風洞実験以上のデータが得られる。

スーパーコンピュータは全世界に普及し、サウジアラビアでもスーパーコンピュータが使われるようになった。各国のスーパーコンピュータ保有数を見ると、米国 206 台をトップに、中国 63 台、日本 28 台、英国 23 台と続く。世界にある 500 台のスーパーコンピュータの半数は産業界にある。日本は 28 台中、産業界が保有するのは 4 台に過ぎない。しかし、『京』によって産業界のスーパーコンピュータ利用が活性化された。『京』は 10PF の性能を持つが、次は 1Exa ( $10^{18}$ ) FLOPS を目指す。日本では、この 4 月に Exa FLOPS を目指したプロジェクトが始まる。理化学研究所が中心になって、1,400 億円を投じる。2014～2017 年に設計、2018～2019 年に製造、2020 年本格稼働の計画である。

スーパーコンピュータは新しい認識を与えてくれる。Exa FLOPS に行くまでの間に予測の科学が生まれるといわれている。Simulation が、Experiment に対し Suggestion を与えられるようになる。スーパーコンピュータは産業競争力、科学技術に役立つだけでなく、人類の当面する課題の解決に全面的に貢献するものになると考えている。

#### 【質疑】

Q: 『京』は天気予報にも使われているか。

A: 現在の天気予報には気象庁にある以前のスーパーコンピュータが使われている。『京』は有用な情報を出しているが、現場で使うようになるには 5～6 年かかるだろう。



## 【セッション 2 / Session 2】食品の安全 / Safety of Food

セッション 2 の司会は、中嶋直敏（九州大学）氏。

### 2-1 「ナノ・マイクロテクノロジーを駆使した食品の安全・品質測定用バイオセンサー」"Nano- and microtechnology-based biosensors of food safety and quality" Prof. Maarten Jongsma(Wageningen University and Research Center, The Netherlands)

オランダは、食品や農産物の輸出国である。日本の 1/10 の国土 (4 万 km<sup>2</sup>)、1/8 の人口 (1600 万人) の小さい国だが、食品輸出はアメリカに次いで、世界第 2 位になっている。ユニリーバ、ハイネケンのような食品メーカーがあり、花や野菜の輸出も多い。オランダは、世界の花市場の 6 割を占め、花はオランダの輸出の 5% を占める。17 世紀から鎖国時代の日本とも長崎で交易を行ってきたように、貿易のノウハウを積み上げてきた。小



な土地、少ない人口で確実に国の経済が成立つよう、輸出を盛んにし、研究開発では農業、食品に力を入れている。

Wageningen (ワーヘニンゲン) 大学は食品と農業の大学で、多くの機関と共同研究し、世界各国に代表者をおいて、連携を図っている。ナノテクノロジー関係は、NanoNext NL の中で活動している。NanoNext NL は 100 以上の企業、大学、研究所、医療機関のコンソーシアムで、オランダのナノテクノロジー研究の方向を定めている。NanoNextNL には 2010-2016 に 250 million euro (350 億円) の政府補助金 (半額補助) が投入される。プロジェクトは 28 のプログラムから成り、それぞれのプログラムは 10 のテーマに分れる。テーマにはリスク解析 (Risk Analysis and Technology Assessment)、応用 (Application Themes)、技術 (General Theme) の 3 つのタイプがあり、全体に係るリスク解析はそのまま 1 テーマとし、応用タイプにはエネルギー、ナノ医療、クリーンウォーター、食品の 4 テーマ、技術タイプには Beyond Moore、ナノ材料、バイオナノ、ナノ加工、センサ・アクチュエータの 5 テーマがある。応用の 4 テーマを横軸、技術の 5 テーマを縦軸にとったマトリックスでプロジェクトを位置づけ、ニーズとの関係を見て、リスク分析、技術評価を行っている。

食品 (food) のテーマには 4 つのプログラムがある：(1) 食品製造監視と品質 (Food process monitoring and product quality assessment)、(2) 食品分子構造 (Molecular structure of food)、(3) 食品生産物と製法 (Food products and processes)、(4) 食品構造化と分離のためのマイクロデバイス (Microdevices for structuring and isolation)。

Jongsma 教授は、食品安全と品質のために、オランダの他の研究所、企業と共同で、3 つのプロジェクトを進めている。(i) マイクロリング共振器と非対称マッハツェンダー干渉計光導波技術を用い、DNA プローブで抗体を

捕獲するマイクロ流体デバイスによる食品細菌の検出，(ii) 新たに設計した CNT 上の遷移金属複合物 (transition metal complex) を用いてエチレン放出を電子的に測定する腐敗菌の検出，(iii) 人の嗅覚・味覚・消化器 (gut) 受容体 (receptor) を生きた細胞に集積したナノデバイスによる品質と安全の確保，である。これらの検出プラットフォームは，光または電子的読み出しを用いてマイクロ流体システムの中でバイオセンサとして動作する。

プロジェクトでは，自然の機能性，人間の受容体を用いて食品のにおい，味，健康度 (healthiness) を評価できるプラットフォームの開発に焦点を当てている。G 蛋白結合受容体 (GPCR) と人体内のタンパク質は，生理学的または疾病に関連したプロセスで重要な役割を持ち，我々の嗅覚や味覚を決める。そこで，これらの受容体を，小型化と自動化の可能性を持つマイクロ流路技術と結びつけてセンサ技術を開発する。外部からの化学的刺激に対する生きた人間の細胞の応答を画像化するため，3つの異なる技術を開発した。(1) 蛍光プローブによる Ca イオン濃度測定，(2) 約 15kHz における金マイクロ電極インピーダンス測定による細胞形状観察，(3) マイクロ電極による 10MHz 以上での細胞膜キャパシタンス測定，である。いずれも単一細胞レベルまで微細化できる。

細胞内の Ca 濃度変化を監視するための実験セットを作った。まず，カメレオンタンパクを作る。シアン蛍光タンパク (CFP) から成るカメレオンタンパクと Ca 結合を可能にする黄色の蛍光タンパク (YFP) とを，GPCR と融合して一つのタンパク質分子にする。一つの細胞で見ると，細胞膜に埋込まれたこの分子は，細胞内の過渡的に高い濃度の Ca を結合することにより蛍光スペクトルに変化を生じる。Ca 濃度の高いときに波長 435nm の青色光で励起すると，CFP は弱い蛍光，YFP は強い蛍光を発光を生じる。5nm の蛍光粒子を 20  $\mu$  m の細胞の中で発光させて Ca の濃度を測る。濃度が高いほど黄色くなる。細胞の応答は Ca 濃度の上昇によって追跡できる。反復測定も可能で，5 分ごとの測定ができる。1nmol で信号が得られる。5  $\mu$  mol も測定できるからダイナミックレンジは広い。人間の味覚のベンチマークテストを行ったが，人では 1nmol を検出できないが，細胞では検知できた。

細胞形状追跡はマイクロメータレベルで調べられる。フローチャネルを使い顕微鏡で観察すると化合物の出入りが見られる。装置は，3つのポンプ，ループ注入バルブ，フローセルホルダー，封じ可能なフローセルから成るマイクロ流路構成である。フローセルにプラスチックガスケット (配管材) を用いたので形状と高さは自由に設計できる。500nm 間隔で 256  $\times$  256 のアレイを設け，試料の並列測定も可能である。

バイオセンサをフローセルに挿入してインピーダンスを計測すると，細胞の有無により，インピーダンスが変り，周波数を変えることによって，ものの違いが分る。細胞形状もモニタできた。細胞膜キャパシタンス測定で可視

化して細胞を見ると，細胞は自分で動くので動画が撮れる。バイオセンサによって水中でホルモンの検出，濃度測定ができる。汚染物質測定には分析，評価基準試料が必要となる。未知のものを測る時でも人間の細胞を使えば，受容体内に活性化するものが来たことは分る。通常は，抽出・分離などのステップが必要だが，開発したチップは 1 ステップで未知の毒素まで測定できる。

## 2-2 「高感度検知のための蛍光指紋技術の開発」 "Development of fluorescence fingerprint technology for sensitive detection" 杉山 純一 (農業・食品産業技術総合研究機構)



食品における危害物質を高感度に測る新しい方法として蛍光指紋法を紹介する。光による分析法の一つである吸光法は，試料を挿入した時に光の透過率が試料がない時の 100% から，どれだけ下がるかを見る。100-  $\alpha$  の観察だから，変化が僅かだと測り難い。これに対し，蛍光法は光刺激によって放出される光を見る。何もなかったところから出て来る光を測る。0+  $\alpha$  の観察のため測りやすく，高感度である。蛍光分光法は紫外線で刺激して，刺激光とは違った波長の応答光を測る。刺激と応答は 1 対 1 である。これを多数の組合せにする。刺激光の波長を変化させた時の蛍光スペクトルを見る。励起光波長 - 蛍光発光波長の 2 次元マトリックスができ，一つの波長の組ごとに蛍光強度が得られるから，3次元のボリュームデータとなる。これを蛍光指紋 (fluorescence fingerprint, FF) と呼んだ。スペクトルにはピークだけでなく，谷もある。スペクトルの特徴データを全部，コンピュータに入力し，データマイニングで必要な情報を探り出す。FF は蛍光分光器で測定し，計量化学 (chemometrics) を用いた FF データの解析によって，食品安全性の客観的価値 (objective value) を求める。

蛍光指紋法による分析・検出事例の一つはカビ毒である。小麦が湿って温度が高いとカビが発生する。カビ自体は調理すれば無害になるが、カビの作った毒素は加熱しても残る。主要カビ毒はデオキシニバレノール (deoxynivarenol, DON) である。このほかのカビ毒にはニバレノール (nivarenol, NIV), ゼアラレノン (zeararenon, ZEA) がある。従来はガスクロ質量分析など化学的方法で検出していた。これを光で瞬時に検出しようと考えた。畑に菌 (DON) を蒔いて汚染した小麦を作る。収穫した小麦を粉砕し、2つのグループに分け、従来の化学的方法と蛍光指紋法で分析した。蛍光強度は粉をセルにいれ、蛍光分光光度計で測る。3,000 ~ 4,000 の2次元変数 (励起, 蛍光波長) についてz方向の蛍光強度を見る。この結果から化学分析と蛍光指紋法の結果との間に高い相関のあることが確かめられた。検量線作成に用いた試料とは別の、同じ菌の試料での結果も検量線に乗ることが確かめられ、他種の菌である ZEA, NIV でも検量線に乗ることが分かった。しかも、蛍光指紋法では、化学分析では測れない ppb オーダーの分析も可能だった。

事例の第2は生菌数の測定である。肉の表面の生菌数を測りたい。従来の生菌数測定では、肉の表面を拭き取って採取した菌を48時間の培養をして数えていた (一般生菌数: aerobic plate count, APC)。この従来法による測定と、肉の表面を直接蛍光指紋法で測定した結果とを比較した。PLS (蛍光スペクトル) モデルで生菌数を判定し、この検量線を基に別の肉の試料の生菌数を測定できた。さらに蛍光指紋のどの強度が測定に使われるか調べ、肉分解のバクテリアの餌になるトリプトファンなどの蛍光物質が同定された。そのほかに検出されたのはバクテリアの代謝物だった。


次にイメージングに拡張した。1つの画像 (ピクセル) を1つのセンサとして扱い、画素ごととの蛍光強度を生菌数とすることにより、生菌数の絶対数で可視化することに成功した。

蛍光指紋法は前処理なしに高感度、迅速測定が可能であるが、現時点での課題は検量線を必要とすることで、今後さらに検討する。

**【質疑】**

Q: 液体は均一だが、固体の場合はスポットでの測定になり、どこを測っているかで差がつき、誤差を生じることはないか。

A: 肉の場合は全部拭き取って測っている。6~7mmに絞った刺激光を4ヶ所に当てて測り、その平均を取ることで場所の影響を除いているので、平均値の測定になっている。画素単位でデータが出せれば、スポットごとのデータが出せるかも知れない。

 **【セッション3 / Session 3】 ナノテクノロジープラットフォーム等の活動概要 / Activities of Nanotechnology Platform and Other Projects**

**ナノテクノロジープラットフォーム概要及び H24 年度 6 大成果 / Outline and six research topics of Nanotechnology Platform**

このセッションの進行には、野田哲二 (物質・材料研究機構) 氏が当り、次の報告から始まった。

No.	プラットフォーム		成果題目	研究者
	領域	機関		
1	微細構造解析	東京大学	超構造セラミックスの1次元電気伝導機構解明 ~最先端電子顕微鏡と大規模理論計算を駆使~	斎藤 光浩・王 中長 (東北大学 AIMR), Johannes Georg Bednorz (IBM Zurich Research Laboratory)
2	微細構造解析	物質・材料研究機構	強磁性体におけるスキルミオン構造の直接観察	長尾 全寛 (早稲田大学), 長井 拓郎・原徹・木本 浩司 (物質・材料研究機構)
3	微細加工	東北大学	シリコンエレクトレットマイクロホンの開発	樹所 賢一・伊藤 平・山田 綾子 (リオン株式会社), 安野 功修 (一般財団法人小林理学研究所)
4	微細加工	豊田工業大学	プラズマを利用しない MEMS 犠牲層 Si エッチング	田嶋 聡美・林 俊雄 (名古屋大学), 佐々木 実 (豊田工業大学)
5	分子・物質合成	名古屋大学	インクジェットによる極微量 DNA 高速解析	安達 稔・矢部 雄一・安達 良紀 (クラスターテクノロジー (株)), 安井 隆雄・加地 範匡・馬場 嘉信 (名古屋大学)
6	分子・物質合成	九州大学	CNT 複合体の膜形成技術の開発	今津 直樹・渡邊 修・鈴木 基之 (東レ株式会社), 藤ヶ谷 剛彦・中嶋 直敏 (九州大学)



「このセッションでは平成24年度のナノテクノロジープラットフォームにおいて、装置共用の成果の中で優れたものを紹介する。ナノテクノロジープラットフォームには25機関が3つの領域に参加し、37の組織が先端装置の共用を支援している。平成24年度には2,080件の利用があり、その中から、37件を選び、選考委員会で審査して前頁の表に示した6大成果を選んだ。この中で、No.3のシリコンエレクトレットマイクロホンを最優秀賞とした。」

野田氏の報告に続き、それぞれの研究者などから各成果の概要が紹介された。

### No.1 超構造セラミックスの1次元電気伝導機構解明:



研究対象となった超構造セラミックスの組成は  $\text{LaTiO}_x$ ,  $x = 3 \sim 3.5$  で、 $x$  によって結晶構造が変化し、ペロブスカイトの周期構造がずれることによって特異な性質を示す。この振舞いを解明しようと、東大の微細構造解析プラットフォームでCs-TEM(球面収差補正透過電子顕微鏡)により結晶構造を観察した。La原子に相当した明るいスポットが観察され、c軸方向に周期がずれていることが分る。次に微小プローブで電気特性を測定した。さらにEELS(電子エネルギー損失分光)スペクトルからLaの原

子価変化を求めた。これらの観察に加えて、第一原理計算により、バンドの状態密度を求め、その結果から量子細線構造が周期的にできていることが分り、一次元電気伝導機構が解明された。

### No.2 強磁性体におけるスキルミオン構造の直接観察:



スキルミオンは磁化の渦巻きである。内部磁界はセンサになり、電流で磁界を変えることができる。Mn酸化物の強磁性-常磁性転移温度以上でスキルミオンが生じる可能性が指摘されたが、確認できていなかった。そこでMn酸化物の構造をNIMSのローレンツ電子顕微鏡で観察した。その結果、磁気コントラストが変化し、2つのスキルミオンの存在することが分った。超常磁性的に、磁化が右、左回りに反転していることが分り、磁気障壁エネルギーを求めることができた。

### No.3 シリコンエレクトレットマイクロホンの開発:



リオン株式会社は医療、計測の2事業を行い、両事業で共通に使われる機器がマイクロホンである。MEMSで高性能のエレクトレット型マイクロホンを作ろうとしたが、リオンにはMEMS技術がなかったので当初はNHK技研との共同研究で開発を進め、今回、東北大の微細加工プラットフォームの設備を利用した。振動膜の厚さ制御にボロン拡散でエッチストップを設けることにより、3

～4 μm の膜が作れるようになりプロトタイプを完成させて、2013年のNHK 技研公開で展示できた。微細加工プラットフォームを利用した開発を通じて技術者を育成できたのも成果の一つである。

#### No.4 プラズマを利用しない MEMS 犠牲層 Si エッチング：



豊田工大の設備はウェーハの連続供給が可能で、NO と F<sub>2</sub> の反応による FNO<sub>x</sub> を用いて、Si のエッチングができる。プラズマ放電を使用せずに、ガスを流すだけで Si のエッチングができる。MEMS を作る時は Si を犠牲層にして金属の構造を作る。F を用いた Si のエッチングでは、同じガス系で温度を変えることにより、異方性、等方性、水素終端、F 吸着、ダンダリングボンド形成、F 以外の反応の促進と阻害、低温で粗いエッチングと変化させることができる。例えば、異方性エッチングが等方性になり、滑らかな低速エッチングができるようになる。現在、A-STEP (JST 研究成果最適展開支援プログラム) により装置化を進めている。

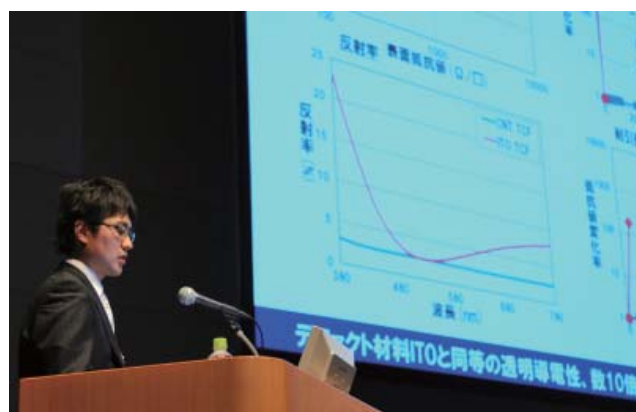
#### No.5 インクジェットによる極微量 DNA 高速解析：



クラスターテクノロジー株式会社は樹脂等の複合材料と共に金型加工から精密成形品、ナノテク関連製品の開

発・製造、品質検査まで一貫して客の要望に応える会社である。その中で、15 μm φからの単ノズル樹脂製インクジェットノズルを作っている。このインクジェットインジェクターをバイオ系に展開しようと名古屋大学のインクジェット DNA 解析への適用を試みた。当初は、低コスト、コンパクトにはできるが、微量液滴制御に問題があった。そこで交叉したチャンネルを用い電気泳動をかける方式を開発した。一次元の流路に流れる DNA に交叉した流路から試薬を直接与える。同じ流路なので DNA が分解することなく解析できる。次の段階としては並列同時・多サンプル解析への展開を考えている。

#### No.6 CNT 複合体の膜形成技術の開発：



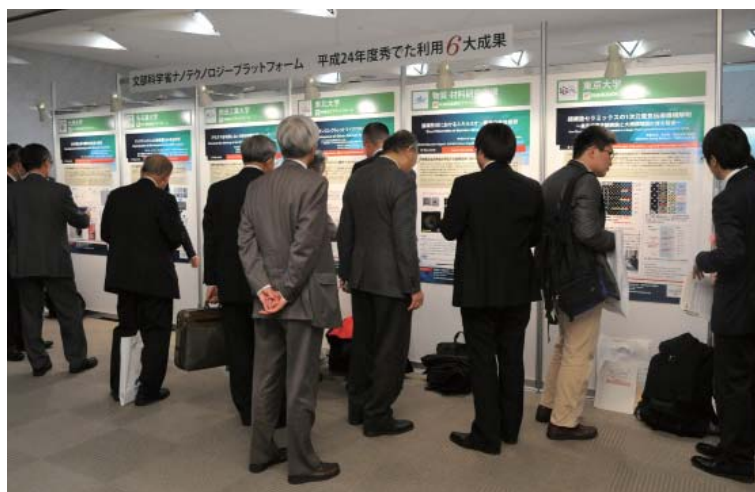
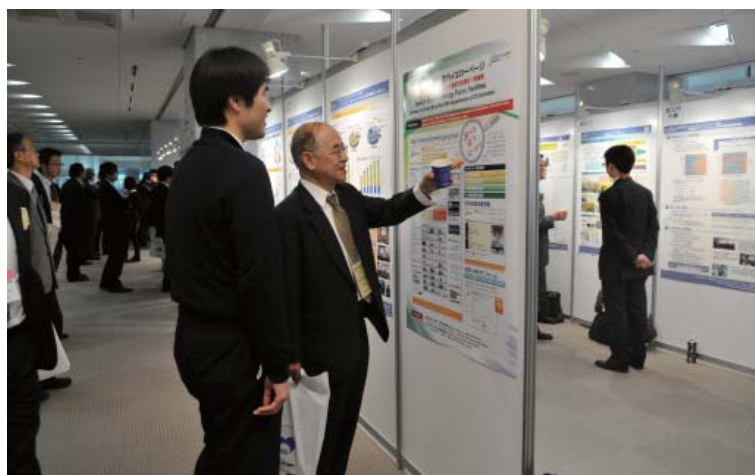
2層CNTに着目し、純度90%以上の高純度CNTに表面修飾して高分散を実現した。インクにする時は超音波で分散させると修飾で生じた静電反発力によって凝固しない。1m以上の幅でPETにウェットコーティングして、透明導電フィルムを作ることができた。4.4 × 10<sup>-4</sup> Ω・cmの体積抵抗値が得られ、反射率の波長依存性がない。耐久性も高い。電子ペーパーの上部電極応用は上市済で、耐久性を活用してタッチパネルを開発中である。

Session3の終わったところで休憩に入った。休憩時間中は、ロビーで行われているポスター発表の場で、参加者と発表者との1対1の対話や討論が行われた。



#### 【ポスター発表】「ナノテクノロジープラットフォーム、低炭素研究ネットワーク及び蓄電池基盤プラットフォーム」。

テーマに挙げられている3つの事業の概要紹介に加え、ナノテクノロジープラットフォームでは、平成24年度6大成果、微細構造解析プラットフォーム10機関、微細加工プラットフォーム16機関、分子・物質合成プラットフォーム11機関の活動状況が発表されていた。



## 【セッション4 / Session 4】 ナノ医療 / Nano-Medical Care

セッション4の司会は馬場嘉信（名古屋大学）氏。

### 4-1 「超分子ナノマシンによるがんの標的治療への挑戦」 "Targeted therapy of cancer by supramolecular nanomachine" 片岡一則（東京大学）

標的治療は薬物を体の中の患部に送り込んで治療する医療である。薬物を体の隅々まで送り込むには、ウィルスサイズにする必要があり、機械加工では無理だから高分子の自己会合を使うことになる。使う高分子は、親水性の分子（ポリエチレングリコール、PEG）と疎水性の分子（ポリアミノ酸）が組合わされてできたブロックコポリマーである。どちらも生体適合性は高い。この長さ10nm程度のブロックコポリマーの中にターゲティング



(標的), クロッシング (障壁通過), オペレーション (作動) などの機能を作り込む。ブロックコポリマーを水中に核酸や薬剤と一緒にしておくことで水和により、疎水性の部分と親水性の部分とが覆うようになり、疎水性の薬剤が内部に取込まれる。薬剤 (コア) が高分子セル (シェル) におおわれたコアシェル型ナノマシンができる。単なる薬物送達 (DDS, Drug Delivery System) を越えたスマートマシンである。例えばターゲティングでは蛍光物質を標的に送り込み、可視化することができる。物理エネルギーを与えるアクティベーションでは、患部に光を当て光らせることで手術することもできる。DDS では薬物を血管の中を動かす必要があるが、薬物は凝集作用のある血小板にくっついてしまう。これに対し、ポリエチレングリコールで被覆したナノマシンは、血小板による凝集が起らないので、血管の中を自由に動き回れるようになる。

標的治療の検討対象として先ず難治癌を採りあげている。難治癌には転移癌、薬剤耐性癌、膵臓癌や脳腫瘍などの薬剤の到達し難い癌、癌肝細胞の4つがある。耐性癌に対してはダハプラチン (DACHPt) という白金抗癌剤があるが、水に溶けない。このため、臨床ではオキザリプラチンが使われているが治療効果は高くない。オキザリプラチンを超えるものを作ろうと、DACHPt, PEG, ポリグルタミン酸を水中で混ぜ、自己集合により、DACHPt を内包した 30nm の高分子ミセルを作った。オキザリプラチンは血中からすぐに抜けて行くのに対し、高分子ミセルは 48 時間経っても血管内を回っている。その結果、EPR 効果 (enhanced permeability and retention, 癌部位に特異的に高分子物質が集まるという現象) が起って、薬剤が癌細胞に集まる。その理由は、癌細胞の近傍の血管壁が粗悪にできていて隙間があるため、ミセルが入って行けるので癌の部位に高分子が集まることにある。正

常血管ではそうした隙間はなく、ミセルは血管から出られない。このため、副作用を避けられる。ミセルの外側に青、中に赤の色素を付けておくと、中の薬剤を放出した時に青から赤に変わるので放出を確認できる。この観察のために高速走査共焦点顕微鏡を開発した。薬剤はミセルの中に隠れて癌細胞の中に入って行くのでトロイの木馬と呼んでいるが、その動きを確認できた。

膵臓癌は 5 年生存率の最も低い癌だが、癌組織は厚い間質を持っているので、従来の薬剤は中に入れなかった。高分子ミセルは自己集合で作るので大きさをコントロールできる。ミセルを 70nm から 30nm にすると中に入れる。その様子を放射光施設 SPring-8 の X 線蛍光で調べ、30nm のミセルが癌細胞の中に入っているのを観察できた。ミセル治療したマウスは 70 日生存した。これは人間の 10 年に当る。人間の膵臓癌にも適用し、余命 3 ヶ月といわれた人が、術後 1 年経っても生きている。pH に応答するミセルも開発した。酸性にすると中の薬を放出する。ミセルを用いた膵臓癌治療は実用化一歩手前の治験第 3 相に入っている。

脳腫瘍の場合は、腫瘍の近くの血管にミセルの通り抜ける隙間がないため、EPR 効果が弱く、薬剤が腫瘍部位に届き難い。この対策としては、ミセル表面に生理活性物質の CRDG ペプチドを付けることによって、癌細胞の中にミセルを送り込めた。この結果、癌細胞の増殖が抑えられることを確認している。

DDS は造影剤をミセルに入れれば画像化して診断に使える。また、治療機器ともなる。多発性の膀胱癌には、光増感剤を投与して内視鏡下で光を当て、活性酸素を発生させることによって、癌細胞を壊すという治療法がある。しかし、膀胱全体に光増感剤を入れてしまうと、発生した酸素は癌周辺の正常な組織も傷めてしまうので、膀胱萎縮が起る。光増感剤をナノマシンに入れて送り込むと、ナノマシンが癌細胞に集まるので、膀胱萎縮なしに光治療することができた。

以上述べてきたように、ナノマシンは癌の治療に使い、このほかにも造影剤を入れて癌を詳しく観察することができている。DDS は薬を患部に送り届けるものだった。ナノマシンは、これに加えて、届いた先の患部の環境を検出し、それによって構造が変わり、そこでだけ薬を放出し、作動する。このようなスマートな機能を持ったナノマシンをどんどん作って行きたい。こういった研究を進めるに当たっては多方面の人々の協力を必要とし、FIRST プログラムが役立っている。

#### 【質疑】

Q: 高齢化などによる細胞の劣化によって EPR 効果や標的治療の性能が落ちることはないか。又、体温環境の変化の影響を受けないか。

A: EPR と癌の種類との関係や高齢化の影響は、動物実験レベルでは差が出ていない。高齢の患者

でも効果が出ている。今日話したミセルは温度に  
応答しないから、患者が発熱していても使える。

#### 4.2 「iPS 細胞をどのように使うのか？ 創薬と創血 について」 "How can we utilize iPS cells? – Strategy for drug and blood development –" 江藤 浩之 (京 都大学)



iPS 細胞の作製にノーベル賞が与えられた (受賞理由：  
様々な細胞に成長できる能力を持つ iPS 細胞の作製) が、  
この講演は多能性細胞の iPS の作り方ではなく、その利  
用の方法について述べる。

iPS は 2006 年に受精卵を模した、高い性能の細胞とし  
て試験管内で作られた。iPS は再生医療だけでなく、難病  
の薬や病気の原因を探すツールになる。ルーゲーリック  
やホーキンスが罹ったので名を知られた筋萎縮性側索硬  
化症 (ALS) は、脳の働きは保たれるのに、筋肉が萎縮し  
て運動機能が衰える。iPS によって原因の一つが分った。  
運動機能を支配するモーターニューロンのネットワーク  
ができなくなる。これに対し、アナカルジン酸によって  
運動ニューロンのネットワークを作る能力を高められる。  
運動ニューロンが伸びる。薬が見つかったら、次には投  
与法を開発しなければならない。又、白血病では造血幹  
細胞により血液を作る機能が侵されている。一つの治療  
手段は骨髄移植だが、ドナーが足りない。これに対し、  
iPS 細胞をストックしておけば、造血幹細胞が作れる。し  
かし、まだ試験管内で安定に作れるようにはなっていない。  
一方、iPS 細胞は傷ついた遺伝子を修復できる。遺伝  
子による病気は将来治療できるようになるだろう。イン  
フルエンザでは白血球が免疫応答する。癌は免疫応答で  
治療できる。TE 細胞 (リンパ球) が癌を小さくするが、

すぐに疲弊してしまう。しかし、iPS 細胞によってリンパ  
球を作り、活性を持ったリンパ球を患者に戻して疲弊し  
たリンパ球を若返らせることができる。患者自身の免疫  
力を利用する可能性がある。

iPS 細胞応用で力を入れているものの一つに、iPS 細  
胞から輸血製剤を作る試みがある。献血する人が減っ  
ている。最近、厚生労働省は 2027 年には必要な輸血  
(transfusion) 製剤の 20% は供給できないという見積  
を発表した。その対策は急務である。iPS 細胞は遺伝子を  
導入して作るので癌化の恐れがある。しかし、赤血球や  
血小板では細胞核がないので増殖の恐れがない。さら  
に、血小板は半減期が短いので癌化の危険は少ない。し  
かも、無核 (anucleate) 細胞のため、使用前にガンマ線  
照射ができる。ガンマ線照射はすべての汚染有核 (nucleated)  
細胞を死滅させられるという利点をもつから、安全性は  
高い。血小板は大きさ  $2 \sim 3 \mu\text{m}$  の血液細胞で、止血の  
役をする。巨核球が切れて血小板ができるが、血小板は  
突起を出しながら固まることにより止血する。血小板は  
体内で種々の成分を運び、血管を作るのにも必要である。  
マラリア菌を殺す役割を果たすが、リュウマチでは血小  
板が集まるので悪さをすることになる。血小板はメン  
タル面でも鬱病に影響がある。このため血小板を作って  
送り込むが、血小板は  $18^\circ\text{C}$  以下で機能が落ちるため、  
低温保存できないからバクテリア繁殖の危険がある。こ  
のためヨーロッパでは 7 日など、保存日数が決まっ  
ていて、保存日数を過ぎたものは捨てられる。iPS から  
血小板を作れるが、効率が低い。赤血球は沢山できる  
が、血小板は少ないので高価になる。そこで、まず、  
巨核球 (骨髄中にある大型の多核細胞。その細胞質が  
多数に分断して血小板になる) を作る。巨核球は冷  
凍できるので巨核球の段階で増やす。マウスで細胞  
の株のできることは分った。コントロールしやすい  
細胞核から血小板を作って供給する。同様に赤血球  
の前駆細胞を作る。血流の刺激で血小板ができている  
から、血流を刺激するシステムを作って効率を上げる。  
iPS から作った血小板では凝固能力を確かめた。工  
業的に作れるようになったら、プラントにして将来  
の血液の不足を解決したい。マスターセルとして貯  
蔵して供給する。血小板は DDS にもなる。今後スケ  
ールアップが必要だが、それには多方面の協力関係  
が重要になる。

#### 【質疑】

Q1： 人間の個性は染色体で決まる。成長過程で  
人は変わる。環境に対応して変化する。脳内のシ  
ナプスは 1 千兆個あるという。iPS はこのような状  
況に対応できるか。

A1： 環境が影響することは一卵性双生児の実験  
でも分っている。このような研究にも iPS は使え  
るだろう。人間の変化は遺伝子の構造パターンに  
よるものだから、iPS は対応可能と思う。



Q2: 血小板を自分の細胞から作るが、大量生産で問題になる品質、歩留りはどうか。輸血提供者が病気を持っていることがある。スクリーニングはどうか。

A2: 量産に関しては、研究室ベースで10人分くらいは作ることができている。将来は10万人分必要だが、そこにどう持って行くか関心を持っている。輸血製剤は寿命が短いので検査し難い。ストックできると検査の時間がとれるから、安全性確保が可能になる。

### 4.3 「マルチスケールシミュレーションによる脳血管障害に対する予測医療」"Predictive medicine for cerebrovascular disorder using multi-scale simulation" 大島まり (東京大学)



セッション1の京コンピュータに繋がる話である。コンピュータが医療にどう役立つかという問題だが、まだシミュレーションの医療利用は少ない。この講演では患者データを利用した脳血管障害への流体力学シミュレーションとその結果の医療利用を紹介する。

脳動脈瘤は破裂すると、くも膜下出血を起こす。動脈硬化症の進行によって閉塞が重くなると、血管が変性して、血流が悪くなり脳梗塞などが起るのでステント挿入などの外科処置をする。しかし、この処置によって血流が急に変るので過灌流により頭蓋内出血のような合併症が起る。シミュレーションによってこのような危険を予知したい。機械工学の研究を続けてきたので、血液の流れを見ようと考えた。流れは刺激となり、血管壁をこすって、wall shear stress (剪断応力) が発生する。これが低いところでは病気になることが統計的にも、病理学的に

も明らかになっている。このような場合手術することになるが、残念なことに脳内出血を起こす場合がある。何が起っているか、患者のデータを使ってシミュレーションで、詳しく見ることになった。

患者のデータとしては、CT, 超音波, MRI のデータを利用するが、全身のデータとしては不足する。それをシミュレーションで補う。人体の血管は毛細血管まで入れると9万kmになり、その中のシミュレーションになる。そこで全体流と部分とをそれぞれ見ることにする。対象によって取り扱う大きさを変えるマルチスケールシミュレーションを行う。血管をネットワークに見立て、そこで何が起っているかを見ることになる。CT, MRI などから、形状、速度などを抽出し、これを使って患者の頭の中で起っていることを計算して可視化する。患者のデータを基にシミュレーションした結果を使って治療法を患者に説明する。シミュレーションでは、血管を取出し、血管壁のスケルトン構造を描き出す。手術などによるデータの変化はコンピュータとインタラクティブに処理できる。そうして患者の脳の血管配置を見ると、患者の血管が一部欠けているところも見つかる。血管の形は人の顔のように人ごとに違っている。長さ、曲りなど数値的に取出して構造を定量的に表現するのが重要なステップである。

44歳の脳動脈瘤患者の例では脳の血管を3Dで表現した。脳動脈瘤が2つあるが、一方は手術し、もう一方は経過観察していた。処置を決める基準は、先ず形である。脳ドックで動脈瘤が見つかり2009年10月にコイルリング(コイル塞栓)手術を施した。形だけでは判断できないので血流を見て、手術をするという判断を下した。手術した側は、血液の拍動中に瘤の先には血が行っていなかった。放置すると血管が脆くなり、破裂しやすいと判断して手術している。経過観察していた瘤は3年後の2013年3月には形が変わってきた。しかし、形は少し変わっていたが、力は正常にかかっている流れが変わらず血流のよどみもなかった。このため、引き続き経過観察することになった。血管の形と血流を見ることによって何が起っているかが分り、処置が決まるという例である。

もう一つの例は、ステントを入れた後に、血液が急に流れる過灌流が起って、脳内出血を起こしたものである。この79歳の男性の場合、脳梗塞を起こしていて、狭窄が起っていたので、ステント手術をした。CT, MRI で血流速度などのデータを求め、90%の血管狭窄が分った。血管の形を取出し、PC-MRI (位相コントラスト磁気共鳴画像) のデータを用いてシミュレーションした。脳の中の血流分布の測定は難しいが、シミュレーションによって流速分布が求められた。手術前後の計測データとシミュレーションデータは一致し、脳内の血液循環が再現できた。この結果から今後の予測まではできないが、少なくとも現状の分析はできることが分った。

手術前後の変化を見るのには、全身のデータをコンピュータ上に再現する。毛細血管は簡単なモデルで表わ

し、各部の血管をネットワーク上に階層的に積み上げる。手術の前後で流れの場の変化が見られた。流れの変化、それがどのような影響を与えているかという相互関係も見られる。MRIでは見られない血の流れもシミュレーションで描き出すことができた。

このような患者のデータを用いたシミュレーションによって将来の予測が可能になるだろう。病気の画像診断とシミュレーションを組み合わせ、高度な情報が得られ、手術の計画 (surgical planning) が可能になる。病気の進行予測はシミュレーションにとって挑戦的な課題である。

#### 【質疑】

Q： 伸び、縮みや液中の摩擦係数はどのように扱うか。

A： 伸び、縮みは考慮するところとしないところがある。脳血管は硬いので伸び縮みは少ない。心臓は拍動があるので伸び縮みを考慮する。また、何を見るかで手法を変える。悪玉コレステロールの解析は、物質輸送になるので、血管内のデータが必要となり、摩擦も入れて計算する。解析対象により手法を変えている。



#### 【閉会挨拶／ Closing Remarks】

最後に、野田 哲二 (JAPAN NANO 2014 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) 氏から次のような閉会の挨拶があった。

第12回となる本シンポジウムでは「より高度な安全・安心な社会構築へ向けてのナノテクの貢献」をテーマとした。文部科学省の小松局長からは、このテーマがタイムリーで重要であるとご指摘をいただいた。引き続き、



10人の方に講演していただいたが、総合科学技術会議や産業競争力会議のメンバーである橋本教授の基調講演では出口から見た研究課題設定の重要性の指摘や国の科学技術への取組みをご紹介頂いた。講演は安全・安心をテーマに、ナノテクの医療貢献にも及んだ。今回は、ポスター発表に加えて、ナノテクノロジープラットフォームの紹介、平成24年度6大成果の紹介も行った。事務局の纏めによると本日の参加者は600人、海外からは14ヶ国30人の参加だったとのことである。来年も是非同規模のシンポジウムをタイムリーに開催してほしいとの声が多かった。

(古寺 博)