

第 14 回ナノテクノロジー総合シンポジウム（JAPAN NANO 2016）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は、微細構造解析、微細加工及び分子・物質合成の3つの分野で最先端のナノテクノロジー施設・設備を有する25研究機関が、全国の産学官の研究者に対して、利用機会を提供し、イノベーションにつながる研究成果の創出を目指す委託事業である。この事業の一環として「第14回ナノテクノロジー総合シンポジウム（JAPAN NANO 2016）」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2016年1月29日（金）に東京ビッグサイトで開催された。会場は、会議棟1階レセプションホールで、日英同時通訳（写真上右）を聞けるよう配慮されていた。

ナノテクノロジーは、新規なナノ構造の創製、あるいは、未知の特異な機能を計測によって引出し、材料、デバイスさらにはシステム化することによって、エネルギー、環境、資源、医療などの課題解決に向けた技術革新に役立つことを目指している。今回の「ナノテクノロジー総合シンポジウム」では、ナノテクノロジープラットフォーム（NPJ）による最新の成果の報告とともに、「次世代エレクトロニクスを拓くナノテクノロジー」を主題として、ナノテクノロジーによる次世代エレクトロニクスに求められる新材料・新機能・新システム創出などの学術的な進展、産業革新を展望した。

豊田工業大学学長の榑 裕之氏が「ナノテクノロジーを基とする次世代エレクトロニクスの挑戦」と題する基調

講演を行い、続いて午前中にパワーエレクトロニクス、午後にNPJ成果紹介、ナノエレクトロニクス、自動車エレクトロニクスの4つのセッションが開催され、最新のトピックスが紹介された。パワーエレクトロニクス、ナノエレクトロニクスには海外からの招待講演が含まれている。昼食後、NPJ成果報告のセッションでは、平成27年度の秀でた利用6大成果の紹介、表彰、共用施設において支援に携わっている方の貢献に対する技術スタッフ表彰、および、全実施機関のポスター発表が行われた。以下に、シンポジウム内容を報告する。

シンポジウムは、総会司会の開会の言葉で始まった。



【開会挨拶／Opening Remarks】

主催者挨拶：橋本 和仁（物質・材料研究機構理事長）／ Kazuhito Hashimoto（President, National Institute for Materials Science, Japan）

文部科学省が平成24年度から進めている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14回ナノテクノロジー総合シンポジウムを開催する。

今後、ナノテクノロジーやナノテクノロジープラットフォームは政策的にも重要になる。2016年4月1日に始まる第5期科学技術基本計画が1月22日に閣議決定



された。この計画での重要課題の中にオープンイノベーションがあり、全国の装置とノウハウを共有してイノベーションを加速することを目指しているナノテクノロジープラットフォームはその先行事例となっている。

また、この第5期科学基技術本計画は Society 5.0 として現在のスマート社会を超える超スマート社会を指向し、科学技術はこの社会構造の変革に資するとしている。情報化社会とフィジカルな社会とが結びついて IoT (Internet of Things) などに支えられた新しい社会が生まれる。IoT の開発では、わが国が比較的強いフィジカルな技術を活用して先行を図る。強いフィジカルな技術の代表がナノテクである。

社会からのナノテクへの期待は大きい。本シンポジウムではプラットフォームの成果紹介と共に、世界有数の方の招待講演を予定している。活発な意見交換が行われ、確かな成果の生まれることを期待する。

文部科学省：小松 弥生（文部科学省 研究振興局 局長）
 ／ **Yayoi Komatsu (Director, Research Promotion Bureau, Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology)**



主催者挨拶をされた橋本氏は総合科学技術・イノベーション会議の議員を務めている。この立場からナノテクの位置付けを語られたが、これは私が言いたかったこと

である。繰返しを避けて補足的な話をするが、ナノテクノロジープラットフォームでは約 1000 台の先端設備を共用し、若手も利用できるようにしている。民間にも開放し、産学官協力の仕組みにもなっている。共用は遊休設備の活用が目的ではない。共用によって交流が深まり、異分野が結びつき、異分野融合で今まで思いつかなかった発展が期待できる。

融合は出口の見えるものに限らない。研究初期のものから融合を進める。このため科研費は広いテーマで括って募集・審査し、融合を進めようとしている。ナノテクは第5期科学技術基本計画の中で未来社会を変革する新しい価値を産み出す技術として強化して行くとされている。文部科学省は皆様の知恵を頂きながら、ナノテクの基盤強化を戦略的に進めて行く考えである。



【基調講演／ Plenary Lecture】

「ナノテクノロジーを基とする次世代エレクトロニクスの挑戦」／ "Challenges of Next-Generation Electronics Based on Nanotechnology" 榊 裕之（豊田工業大学／物質・材料研究機構）／ Hiroyuki Sakaki (Toyota Technological Institute / National Institute for Materials Science, Japan)



先ず、エレクトロニクスとナノテクノロジーの関係について考えてみよう。エレクトロニクスで最も重要なデバイスは電界効果トランジスタ (FET) である。その代表である MOSFET では、電子が表面の厚さ 10nm くらいのところに生成した 2 次元電子ガス (2DEG, 2-Dimensional Electron Gas) を制御して動作する。2DEG は Si だけでなく化合物半導体の超高速トランジスタでも使われているから、エレクトロニクスはナノテクの 2DEG によって支えられていることになる。

ナノテクではいくつかのノーベル賞受賞があり、受賞対象は新たな物理の研究分野を産み出している。磁場中の 2 次元電子による特異な電気伝導が元になった量子ホール効果は、クリッツィング (Klaus von Klitzing) が

1980年に発見して、1985年に受賞した。これは、現在話題になっているトポロジカル絶縁体のさきがけともなった。

エレクトロニクスは微細化によって高速化、低電力化、高集積化が進んだ。1970年に10 μ mだったICの線幅は、2015年には10nmになった。この線幅を化合物半導体トランジスタに適用すれば1.6THzまで動作する。しかし、微細化するとゲートの作用が弱くなり、リークが増すという短チャネル効果の問題が起る。そこで、絶縁体を埋込んだSOI (Silicon on Insulator) 構造が生まれ、チャンネルを三方からゲートで挟んでリークを抑えたFIN FETが実用になった。さらに、電流通路を小さくしたナノワイヤトランジスタは短チャネル効果に強い。微細化で生じた課題をナノテクで対策している。

メモリー分野においては、GMR (巨大磁気抵抗) 効果が発見され、磁気ヘッドに使われるようになってHDD (ハードディスク) は発展した。これはバトラー教授 (アラバマ大学) の理論的予測を産総研とIBMで実験確認したのが元になっている。バトラー教授はNIMS賞の第一回受賞者である。

しかし、HDDにはメカ (機械的駆動部) があるため衝撃に弱い。このため、半導体を用いた不揮発性のフラッシュメモリーが安価になったので、メカのないメモリーとしてパソコンなどのHDD置換えが進んだが、10万回書き換えると情報が失われる。そこで抵抗変化メモリーや相変化メモリーなどが開発されている。

光の分野で、半導体レーザーはサンドイッチ構造のダブルヘテロ構造 (DH) で室温連続発振に成功した。この構造は1962年にKroemerらが提案し、2000年にノーベル賞を受賞している。さらに10nm級の量子井戸構造によってレーザー発振に必要な電流が下がった。青色LEDは、中間層が数nmのAlGaIn/GaN/AlGaInのサンドイッチ構造を使う。さらに、III-V族半導体のサンドイッチ構造の中にナノメートルのドットである量子ドット (QD) を埋込むと、その中に電子、正孔が収まって再結合するので、高効率発光になる。このQDレーザーは温度依存性が少なく、温度が上がっても変調特性が変化しない。1個の量子ドットに1個の電子を入れれば、単一光子発光になり、これは量子暗号通信に期待されている。

パワーエレクトロニクスに関しては、日本における電力消費が1kW/人、電力以外のエネルギー消費はその1.5倍という。照明は、LEDで電力消費削減が期待される。全エネルギー消費の20%を占めている自動車の省エネルギー化にHEV (ハイブリッド車) やEV (電気自動車) の普及が進み、そのモーター制御では、現在主流のSiに加え、SiCとGaNパワーデバイスへの期待が高まっている。

技術開発にはEmerging Needs & Seedsの組合せが必要だが、この例として人間の知能に近い自動運転技術がある。これには画像認識が必要になるが、スーパーコンピュータでも絵を勉強するのに数日かかる。画像理解へ

のナノテクの貢献も期待されよう。環境計測、バイオメディカルセンシングにもナノテクが期待され、特定耐性菌を殺すのに量子ドット構造が有効という。このようにナノテクへの期待は更に広まっている。

ナノテクは深い物質科学を基礎としている。ナノテクの発展、活用には物質科学を維持して行くという文化が重要である。雪華図説という1832年刊行の古書がある。下総国古河藩第4代藩主、土井利位の著書で雪の結晶の顕微鏡観察を行ったことが記され、そこに載った雪の模様は和服の柄にも使われた。日本の科学技術はこのような文化に根ざしている。日本文化を活用した次世代エレクトロニクスの発展を期待したい。



【Session 1 : パワーエレクトロニクス / Power Electronics】

1-1 「将来のパワーエレクトロニクスシステムを先導するキーテクノロジー～ヨーロッパにおける開発動向 / "Power Devices : Key Technology Driver for Future Power Electronic Systems ~ Development Trend in Europe"」 Leo Lorenz (ECPE / Infineon Technologies, Germany)



電力は、直流と交流の変換、電圧変換、周波数変換等の処理により属性を変えて、駆動装置等にエネルギーを供給する。この電力変換等を制御するパワーエレクトロニクスシステムとパワーデバイス開発の課題は、電力密度、効率、信頼性を同時に増大させることである。電力密度と効率の増大はシリコンデバイス、ワイドバンドギャップ材料をベースにした部品、先進的な実装技術、将来のパワー回路トポロジーの新たな開発などによって達成される。このため、ECPE (European Center for Power Electronics) に代表される欧州のパワーエレクトロニクス研究の方向は、材料とデバイスをもとに、冷却、熱管理、高周波能動デバイス、受動デバイス、相互接続、寄生効果低減、パッケージング、3D集積化等の技術を開発し、機能横断型技術 (cross functional technology) に

より統合して、効率よいパワーシステムの構築を目指している。

応用分野ごとに様々な課題がある。自動車では、トラクション、高温エレクトロニクス、充電器など、産業系では、モータードライブ、高電圧、安全、電磁環境など、新エネルギー分野では、送配電、電力貯蔵、電力生成、高電圧直流、半導体トランスがあり、スマートパワーエレクトロニクスに集約され、自動化やコンバーター間通信も必要になる。

パワー半導体は Si から SiC や GaN などのワイドバンドギャップ半導体へと展開する。DC/DC コンバーターは、2005 年頃は Si のみで構成していたものが 2010 年には、Si と SiC のハイブリッド構成となり、2015 年にはオール SiC でできるようになった。体積電力密度は 10 年で約 10 倍になっている。動作温度は 150℃から、175℃、さらに 200℃と高めて行く。体積当たりの出力を高めるにはコンデンサなどの受動素子開発、パッケージング開発も必要になる。ドイツのフ라운ホーファー研究所では、Si-IGBT/SiC ハイブリッド構成で、自動車専用に設計して、出力 245kW、効率 98.5%、体積電力密度 31kW/L を実現した。

今後の技術動向として、スケールアップが進み、高集積になると、熱設計、パッケージコンセプトが変わってくる。寄生インダクタンスやキャパシタンスが問題になるから、スイッチングデバイスのパッケージは重要だ。ワイドバンドギャップ半導体には出力密度と効率、スイッチング速度の向上が期待される。

パワー半導体材料には、Si、SiC、GaN があり、デバイス技術としては、IGBT、MOSFET、JFET、ダイオードなど様々な形態がある。パワーデバイスは適用領域によって材料やデバイス技術を選ぶことになる。降伏電圧 1000V 以下の低電圧領域では、Si もさらに進化を続けるが、GaN が台頭し、スイッチング周波数は 1MHz までカバーする。1000～5000V の中電圧領域の比較的低周波域では、Si IGBT が主に用いられるが、100kHz を含む高周波域では SiC MOSFET の開発が期待される。高電圧領域には、SiC が適用されよう。

パワーデバイスの開発では、デバイス開発から、システム構成まで様々な活動が行われる。デバイスから、パッケージング、コンバーター、パワーコントロールユニットとシステムに組み上がって行く。部品からシステムへ、応用分野の要求を満たすには様々な人々の協力が欠かせない。

1-2 「SiC パワー半導体の現状と将来／"SiC Power Devices ~ Today and Future"」大月 正人（富士電機株式会社）／Masahito Otsuki (Fuji Electric Co., Ltd., Japan)

エネルギー技術の革新 (innovation) は、変換効率を最大化する電力変換器の開発によってもたらされ、持続可



能な社会実現に貢献する。パワー半導体デバイスは、低電力消費の信頼性あるスイッチングデバイスとして、将来のスマートコミュニティにおける、マイクログリッド、ナノグリッドを支える。

これまで、Si IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) が大電力変換に用いられて来たが、SiC (Silicon Carbide) デバイスは、Si IGBT が用いられてきた分野への参入に挑戦している。パワーモジュールは、IGBT、ダイオードとも Si で構成されてきたが、ダイオードに SiC を用いたハイブリッド (SiC ハイブリッド) になり、オール SiC へと進んで行く。

鉄道のインバーターでも Si IGBT と SiC ショットキーのハイブリッドが使われるようになった。SiC ハイブリッドは 2011 に東芝が出したのが最初である。三菱電機製は東京メトロが 2014 から銀座線で使い、富士電機製は新幹線に 2015 年 6 月から適用された。その効果は軽くなることである。58 トンから 47 トンになった。軽くなると慣性が少なくなるので止め易くなるから、走行速度を上げられる。

また、ベルトコンベヤーやビル全体の空調のファンなどのコントロールに使われる 3 相インバーターは、2012 年から SiC ダイオードに置き換わって来ている。富士電機は大容量を狙い、690V 産業用インバーターの例では、Si だと 1 台の出力が 250kW のため 2 台要るところを、SiC ダイオードの 450kW インバーター 1 台で済ませた。このインバーターは、石油、鉄鋼、水処理、港湾クレーンなど大型の設備に使われる。ダイオードの Si から SiC への変更で 28% の損失削減効果があった。オール SiC のパワーシステムはトヨタとデンソーが HEV に使った。三菱電機と小田急電鉄はオール SiC の電車を走らせた。

パワー半導体は、太陽光発電システムにも適用されている。オール SiC の 20kW 電圧制御器の体積は、Si に比べ 1/5 でパワースタックにすると 1/8 になり、システムに近づくほど SiC 利用の効果は大きい。また、1MW のメガソーラー用のパワーコントロールシステムを量産化し、2014 年 8 月に発売した。SiC を使ったことによって大きさが 20% 減り、トレーラーに積めるようになった。完成

品を運搬でき、現地組立をなくした。将来のスマートコミュニティにおいて柱状トランスに使えば、小型になるので景観が良くなる。

デバイス開発には産総研の技術を利用した。TPEC（つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション）の技術を松本の工場に導入し、6 インチの SiC ウェーハを量産し、SiC パッケージも一貫量産ラインで製造している。Si IGBT パッケージの中に SiC を入れても動かないので、SiC 専用のパッケージを開発した。58% 小型になり、インダクタンスは 77% 減った。放熱は 55% 改善した。ワイヤボンディングは使わずに、上からピンがおりて来てハンダ付けする形になっている。電力密度が上がるので、放熱を良くし、性能をフルに出させるよう工夫する必要があった。SiC は MOSFET 構造を使っているため、スイッチング電流は 0V から立ち上がる。ダイオードであると電流が流れるのは立ち上がり電圧からになる。パワーデバイスは最大定格で使うことは少ない。パワーの少ないところで使っていると立ち上がり電圧分の損失が効いて来る。

【質疑】

Q1：新幹線が軽くなったのは電源の効率が上がったためか？

Q2：IGBT に立ち上がり電圧があっても、立ち上がり後の電流増加は大きいのではないかな？

A1：SiC では損失が下がる。発熱が少ないので熱設計が楽になり、小型化・軽量化が出来る。

A2：SiC MOSFET は低電流で効率が良く、大電流では Si IGBT が優れる。使用最適領域は異なる。

1-3 「Si 基板上 GaN パワーデバイスと電力変換機器への応用／"GaN Power Devices on Si Substrates and Application to Power Conversion Systems"」上田 哲三（パナソニック株式会社）／Tetsuzo Ueda (Panasonic Corporation, Japan)



GaN（ガリウムナイトライド）や SiC（シリコンカーバイド）に代表されるワイドバンドギャップ半導体は既

存の Si パワーデバイスの特性限界を打破すると期待されている。AlGaIn と GaN を積層すると分極によって固定電荷が発生し、その差分に相当する大量の自由電子が生じ、2DEG（二次元電子ガス）となる。この 2DEG を用いるゲート注入トランジスタ（Gate Injection Transistor, GIT）を開発した。GIT は Si 基板上の AlGaIn/GaN の上に p 型ゲートを設けて構成したノーマリーオフ型のトランジスタである。超格子バッファを挿入し、結晶成長のノウハウを積み上げて、6 インチ Si 基板上に GaN を量産できるようになった。欠陥密度は 10^8cm^{-2} あるが、欠陥の方向には電流を流さないのが実用上問題ない。移動度は $2000 \text{cm}^2/\text{Vs}$ を超え、サファイア基板上の GaN と同等である。

GIT の構造上の特徴は、2DEG を遮断しノーマリーオフにするゲートに p 型層を用いたことである。オンした時にはゲートから正孔が注入され、これを補償するように電子が増加する。このため、オン抵抗が低く、大電流を流せる。注目すべき特性は $R_{\text{on}}Q_g$ (R_{on} : オン抵抗, Q_g : ゲート電荷) が $700 \text{m}\Omega\text{nC}$ と低いことで、高速スイッチングの潜在能力が高い。GaN ではオン抵抗を下げることで、電流コラプスによるオン抵抗劣化が課題だったが、欠陥によるトラップの制御により 850V まで使えるようになった。現状の Si 基板上の GaN エピタキシャル成長技術では最大動作電圧が 1000V までに限られる。SiC の方が放熱は良いから、SiC は低速・大電力、GaN は比較的低電圧で高速の応用に向いている。

GIT の実用化には、チップをパッケージに収める必要がある。高速 GaN の高い潜在能力を引き出すには、組立て技術（assembly technique）が重要である。リードフレームの線が長いと寄生インダクタンスが大きく、ターンオンが遅くなる。そこで、フリップチップ構成にすることにより寄生インダクタンス減少に成功し、高速スイッチングを可能にした。電力変換の基礎である DC-DC コンバーターに応用し、1kW 出力で 99.3% の効率を実現した。高速性は 500kHz のインバーターで確認できた。GaN GIT で作ったインバーターは Si IGBT における立ち上がり電圧がないので、低出力で効率が良い。還流デバイスが不要なので小型化できる。IGBT の 1/3 に小型化でき、各種電源回路に広く応用される。特に電圧を下げる回路に向いている。

今後の展開では、オン抵抗を下げようと InGaAlN/GaN を検討している。4 元化合物を用いることで分極を 2 ～ 3 倍にできるので電子密度を高められる。集積化は横型で 600V まで可能にし、チップ上にドライバー回路を集積した。トランジスタとゲートドライバーの相互の距離を近付けて高速化したので、絶縁ゲートドライバーをマイクロ波で駆動できる。電磁界コイルを用い、スイッチング信号を重畳して無接触でスイッチできることも確かめている。

【質疑】

Q： 10^8cm^{-2} の欠陥があっても電流コラプスは起らない

いのか？

A：結果として OK になっている。コラプス対策では正孔トラップが関係する。正孔が放出されるとコラプスになる。しかし電流には影響しないことが分って来た。



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

2-1 平成 27 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は平成 24 年度から平成 33 年度までの文部科学省のプロジェクトである。設

備・ノウハウの共有，異分野融合によりイノベーションの創出を図る。微細構造解析，微細加工，分子・物質合成の 3 つの技術分野に 25 機関が参画している。平成 26 年度にはプラットフォームで 2811 件の課題を実施した。この中から秀でた利用 6 大成果を表彰するし，また，設備の活用にはスタッフの支援が欠かせない。このため，今年度はスタッフを 3 つのカテゴリー（優秀技術，技術支援貢献，若手技術奨励）で表彰することにした。

表彰者は下表に纏めた。秀でた利用 6 大成果の中の最優秀賞には分子・物質合成プラットフォーム，実施機関：名古屋大学，ユーザー機関：金沢大学の「溶出順序を自在に反転できるキラル固定相の開発」が選ばれた。

表彰状等が，大泊 巖 技術審査委員会委員長から贈られ，表彰式の後，秀でた利用 6 大成果についてのショートプレゼンテーションが行われた。

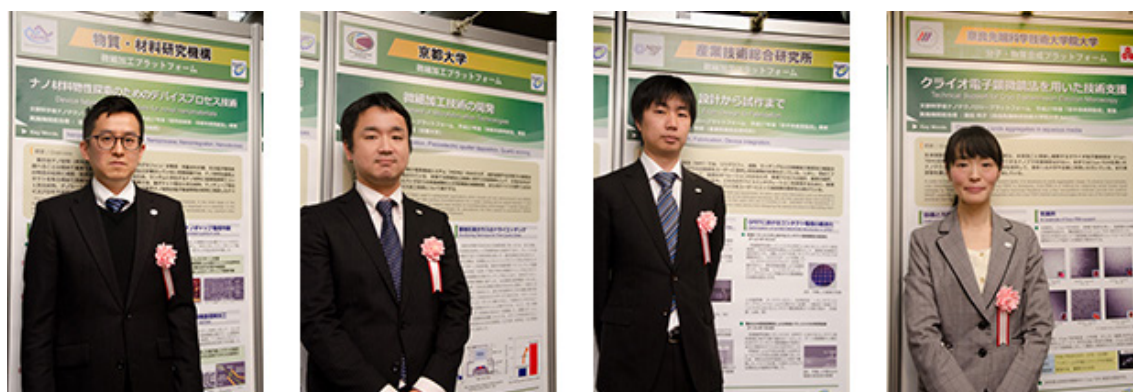


平成 27 年度の秀でた利用 6 大成果（PF：利用したプラットフォーム，＊最優秀賞）

No.	PF	実施機関	成 果	ユーザー代表機関
1	微細構造	北大	複合金属酸化物ナノワイヤの合成と構造解析	広島大
2	解析	原子力機構	水加ヒドラジン酸化触媒の in-situ XAFS 解析	ダイハツ工業
3	微細加工	東北大	音響光学フィルタの開発	長野計器
4		早大	マイクロ流体有機 EL の作製と電界発光特性	九大
5	分子・物	分子研	指定薬物 3,4-ジクロロメチルフェニデートの合成と分析	科学警察研究所
6	質合成	名大	溶出順序を自在に反転できるキラル固定相の開発＊	金沢大

平成 27 年度 技術スタッフ表彰

No.	表彰	表彰者	PF	実施機関	表彰題目
1	優秀技術賞・技術支援貢献賞	渡辺 英一郎	微細加工	物質・材料研究機構	ナノ材料物性探索のためのデバイスプロセス技術
2	技術支援貢献賞	佐藤 政司	微細加工	京都大学	微細加工技術の開発
3	若手技術奨励賞	山崎 将嗣	微細加工	産業技術総合研究所	設計から試作まで
4	若手技術奨励賞	藤田 咲子	分子・物質合成	奈良先端科学技術大学院大学	クライオ電子顕微鏡法を用いた技術支援



技術スタッフ表彰受賞者（左から：渡辺氏、佐藤氏、山崎氏、藤田氏）
 (詳細 ▶ http://nanonet.mext.go.jp/research_support_award/H27_Award.pdf)



副賞のバッジ（左）優秀技術賞，（右）技術支援貢献賞・若手技術奨励賞

2-2 平成 27 年度の秀でた 6 大利用成果ショートプレゼンテーション

(1) 【優秀賞】微細構造解析 PF：北海道大学 「複合金属酸化物ナノワイヤの合成と構造解析」

ユーザー：定金 正洋^a，村山 徹^b，Zhang Zhenxin^c，上田 渉^c（^a 広島大学，^b 首都大学東京，^c 神奈川大学）
 実施機関担当者：坂口 紀史（北海道大学）
 発表者：村山 徹（首都大学東京）

全て無機物で構成され、遷移金属酸化物からなる分子状ナノワイヤの集合体結晶及びナノワイヤの合成に成功し、北大のプラットフォームで構造解析を行った。ナノワイヤは、Mo (VI) と Te (IV) 又は Se (IV) から成り、組成は $\{(NH_4)_2[XMo_6O_{21}]\}_n$ (X = Te 又は Se) と表わされる。成果は Nature Communications に掲載された。

Mo の前駆体，Se 又は Te の前駆体を混ぜてバブリング

し，水熱合成（175℃，24hr）して結晶が得られ，XRD で結晶性と，不純物のないことを確かめた。SEM で，Mo-Te は棒状，Mo-Se は板状になっていることが分った。



繰返し合成して得られたミクロンオーダーの単結晶を分析したところ、6角形のユニットがc軸方向に重なってワイヤになっていた。このワイヤが固まって隙間のある結晶になり、隙間にNH₃、H₂Oが入っていた。ナノワイヤ集合体はプロトン交換し、超音波でコロイド化して分離できる。AFM、TEMで観察すると、1.2nmのワイヤ幅のもの、ピラミッド状に凝集した4.8nmといったものが出来ていることが分った。

今後、触媒機能、REDOX電気化学特性、センサー機能を調べ、半導体デバイス応用の可能性を調べて行く。このような無機物の金属酸化物を用いた高分子のような分子状ナノワイヤは他にほとんど例がなく、注目すべき新材料と考えている。

(詳細▶ http://nanonet.mext.go.jp/seika_selection/2016_SeikaSelection_1.pdf)

(2)【優秀賞】微細構造解析 PF：日本原子力研究開発機構 「水加ヒドラジン酸化触媒の in-situ XAFS 解析」

ユーザー：坂本 友和、岸 浩史、山口 進、田中 裕久（ダイハツ工業株式会社）

実施機関担当者：松村 大樹、田村 和久、西畑 保雄（日本原子力研究開発機構）

発表者：坂本 友和（ダイハツ工業株式会社）



燃料電池自動車開発において、燃料電池材料とその触媒材料の放射光解析を行った。

多くの燃料電池は、プロトン交換膜を用いるので酸性になるため、酸に強い白金などが触媒として使われる。これに対しダイハツでは、アルカリ性の水酸化物イオン交換膜で燃料電池を作ろうとしている。これにより金属に対する腐食反応性が下がるのでFeやCoなどの触媒が使えるから、コストを下げられる。また、水加ヒドラジン(N₂H₄・H₂O)という安定な液体燃料を使う。液体にすると、燃料タンクを小さくできる。水加ヒドラジンはポリエチレンタンクで運べるから、特殊な充填設備は要らない。定置型発電が可能だから、山間などのインフラの少ないところで使える。

電極上での素反応を理解するため、発電状態を模擬し

た状態でXAFS解析を行った。理論計算と合わせて、酸化反応メカニズムを解析している。OH⁻が表面に吸着すると、活性サイトの電子状態が絶縁体から金属状態に変ることで触媒作用が起っていた。解析の知見を基に試作したNi系触媒により燃料電池出力は大幅に向上した。走行試験を行って貴金属触媒を用いなくても運行が可能なることを実証できた。今後も、愛される燃料電池を目指して開発を進める。

(詳細▶ http://nanonet.mext.go.jp/seika_selection/2016_SeikaSelection_2.pdf)

(3)【優秀賞】微細加工 PF：東北大学

「音響光学フィルタの開発」

ユーザー：小林 広樹^a、藤田 圭一^a、堀田 一^b、峯尾 尚之^c（^a長野計器株式会社、^bミマキ電子部品株式会社、^c株式会社オプトハブ）

実施機関担当者：森山 雅昭、鈴木 裕輝夫、戸津 健太郎（東北大学）

発表者：小林 広樹（長野計器株式会社）



橋などの社会インフラの経年劣化が顕著になり、劣化損傷発見センサー、ロボット、非破壊検査技術の開発が推進されている。これに应运って開発している光ファイバセンサーシステムは光波長測定器と光ファイバセンサーが光ファイバで接続され、多点計測が可能である。しかし、光波長測定器が高価で形状が大きい。

光波長測定器は、波長掃引モジュール、ビームスプリッター、波長ごとの光センサーで構成され、どの波長の光が戻って来るかを検知する。そこで、波長掃引モジュールの主要部品である波長可変フィルタを開発した。東北大学PFで、ニオブ酸リチウム(LiNbO₃)基板上にTiを蒸着、パターンニングして熱拡散により、光導波路を形成し、さらにその上に、櫛歯電極を設けて、光センシング用音響光学波長可変フィルタ(Acoustic-Optic Tunable Filter, AOTF)を作製した。このウェーハからAOTFチップを切り出し、光源モジュールに組み込む。音響光学フィルタは、高周波電気信号によって生じた表面弾性波(SAW)の波

の間隔と入射光の波長とが一定の関係にあるときに光を透過させる。

作製したモジュールは、櫛歯電極に与える周波数によってシャープな波長が選択的に出力でき、1480～1600nmの波長範囲を、2kHz以上の速度で掃引できることを確認した。

(詳細▶ http://nanonet.mext.go.jp/seika_selection/2016_SeikaSelection_3.pdf)

(4)【優秀賞】微細加工 PF：早稲田大学

「マイクロ流体有機 EL の作製と電界発光特性」

ユーザー：安達 千波矢（九州大学）

実施機関担当者：水野 潤，笠原 崇史，小林 直史，桑江 博之，庄子 習一（早稲田大学）

発表者：桑江 博之（早稲田大学）



九州大学から発表された液体有機 EL は、溶媒を用いずに 2 枚の電極に発光材料を挟んだ構造の面発光で、軽く、フレキシブルなど、従来の固体有機 EL にない特長が期待される可視光光源である。白色にするには異なる波長の EL 材料をデバイスとして集積化する必要がある。そこで、早稲田大学のフォトリソグラフィを利用したマイクロ流路技術を適用した。MEMS 技術と自己組織化膜を用いて異種材料接合を作製し、液体有機 EL 材料を注入すると、高真空プロセスを用いずに、1 チップ集積化が出来る。

青緑色の液体有機半導体をホストにして色素混合で発光色をチューニングすると、オンチップのマルチ発光が出来る。白色にするため青緑色と黄色を組み合わせた。幅が数 10 μm の流路をストライプ状に形成した EL デバイスを作製し、2 つの材料の同時発光によりムラのない白色発光が得られた。印加電圧 100V で CI（色度）値は 0.40～0.42 の温かい白色光の得られていることが確認された。

【質疑】

Q：量産化は可能か？

A：実用化するにはまだ効率が低い。先ず効率を固体 EL に近づけることが必要と考えている。

(詳細▶ http://nanonet.mext.go.jp/seika_selection/2016_

SeikaSelection_4.pdf)

(5)【優秀賞】分子・物質合成 PF：自然科学研究機構 分子科学研究所

「指定薬物 3,4-ジクロロメチルフェニデートの合成と分析」

ユーザー：辻川 健治（科学警察研究所）

実施機関担当者：井上 三佳，東林 修平（分子科学研究所）

発表者：辻川 健治（科学警察研究所）



危険薬物の鑑定では、血液や薬物の混入された食物などの試験物を前処理してガスクロマトグラフ／質量分析 (GC/MS) にかけて、既知の薬物のスペクトルとの一致で危険薬物と判定する。このため標準試料が必要になるが、危険ドラッグのように新しい薬物では標準品が市販されていないので、標準試料は検査施設で合成する必要がある。しかし、技術的、設備的理由で合成出来ないこともある。このため、分子研との共同研究で 3,4-ジクロロメチルフェニデート (DCMP) を合成・分析した。

DCMP は 1 組のジアステレオマーを有するので、各ジアステレオマーを出発原料のメチルエステル化、ジアゾ化などにより合成した。得られた標準品について GC/MS 分析法の検討を行った。DCMP は遊離塩基の状態では GC 内で容易に熱分解を受け、分析が難しい。そこで、トリフルオロアセチル (TFA) 誘導体化したところ、熱分解は完全に防止され、各ジアステレオマーは GC 上で完全に分離されるので、両者の識別が可能になった。この成果は、法科学分野の専門誌 Forensic Science International に掲載された。

(詳細▶ http://nanonet.mext.go.jp/seika_selection/2016_SeikaSelection_5.pdf)

(6)【最優秀賞】分子・物質合成 PF：名古屋大学

「溶出順序を自在に反転できるキラル固定相の開発」

ユーザー：前田 勝浩，下村 昂平，井改 知幸，石立 涼馬，加納 重義（金沢大学）

実施機関担当者：八島 栄次（名古屋大学）

発表者：前田 勝浩（金沢大学）



受賞対象は、名古屋大学のキラリティ解析装置の利用によって得られた成果である。生体は鏡像関係にある一対の立体異性体であるエナンチオマーに対して敏感である。医薬品においては右巻き、左巻き的一方が副作用を示す。エナンチオマーは物理・化学特性は一定で分離が困難だが、キラル固定相を用いれば高速クロマトグラフで分離でき、純粋なエナンチオマーを取出す分種も可能になる。このため、キラル固定相を作る試みがなされている。

ラセン高分子の分離では、溶質順序をコントロールすることが重要になる。マイナーなものが最初に流出した方が分析感度を高められる。そこで、ラセン高分子をスイッチングできる固定相を作った。アセチレン側鎖にビフェニル基を導入したポリマーを合成すると、左右のらせんが等量存在するが、固体のまま一方のエナンチオマーから成る光学活性なアルコールに浸すとエナンチオマーの向きによって、一方向のラセンが優勢になる。逆のエナンチオマーに浸すと、ラセンの向きは反対になる。光学活性のア

ルコールを除いてもラセンの向きは保持される。元々は混じっていたものから一方を分離し、その向きを反転できるという現象が見つかった。この現象を用いて溶出順序を自在にできるキラル固定相の開発に成功した。

例えば、ポリアセチレンをシリカゲルに担持した固定相を調製し、一方の向きの溶離液をカラム内に通液することでポリマーのラセンを自在に制御できた。また、キラル金属錯体も分離できた。一部に OH^- を導入すると化学結合型固定相になって安定化し、反復利用できるようになった。

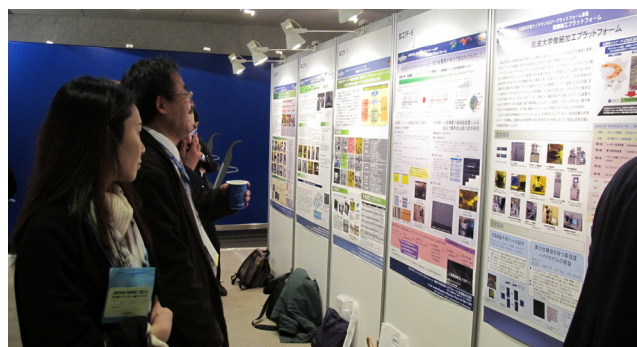
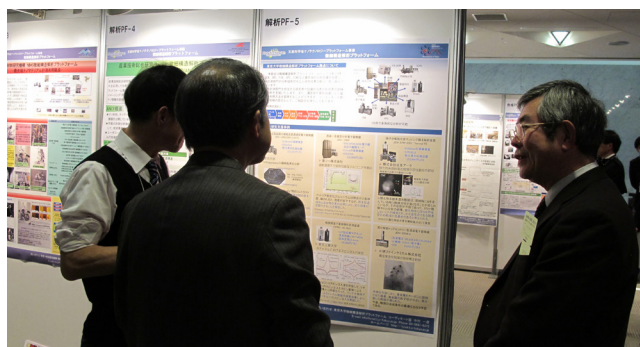
溶出順序を反転できる本カラムはキラル化合物の大量分取に最適であり、産業分野への応用が期待できる。

(詳細 ▶ http://nanonet.mext.go.jp/seika_selection/2016_SeikaSelection_6.pdf)

2-3 ポスター発表／Poster Presentation /Activities of Nanotechnology Platform 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

6 大成果プレゼンテーションに続き、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パネル展示の説明、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 27 年度 秀でた利用 6 大成果
- (2) 平成 27 年度 技術スタッフ表彰
- (3) ナノテクノロジープラットフォーム事業概要
- (4) ナノテクノロジープラットフォームセンター
- (5) 微細構造解析プラットフォームとその参画 10 機関
- (6) 微細加工プラットフォームとその参画 16 機関
- (7) 分子・物質合成プラットフォームとその参画 11 機関





【Session 3：ナノエレクトロニクス／ Nanoelectronics】

3-1 「Si-CMOS を超えるデバイスへの挑戦～IoT 時代への論理デバイスの構造，材料，そして新原理 ／ "Extending Si, Beyond-Si, to Beyond-CMOS: Perspectives on Logic Nano-Electronics Scaling for the Next Decade and Beyond"」 Aaron Thean (IMEC, Belgium)



全てのもののインターネット（Internet of Everything, IoE）の時代に向かうに従って，新しい情報超構造（information super-structure）が登場しようとしている（emerging）．接続されるデバイスの数が何桁も増加するので，未来のネットワークには今日のインターネットと違った展開が予想される．次の 10 年に，我々の情報基盤（information infrastructure）は発展し，データセンター，モバイルデバイス，センサーノードは，無数の（myriad）性能，形態因子（form factor），コスト要求を満たす様々な高効率エレクトロニクスシステムを要求する．従って，ナノエレクトロニクスには，性能，電力，コスト，密度スケールに新たな課題が生まれる．一方，これらの課題の解決は，プロセス能力（process capability），材料集積，デバイス構成（architecture），システム設計にすばらしい（exciting）イノベーションをもたらす．

Moore 以前のエレクトロニクスの発展は，1904 年の真空管から 1947 年のトランジスタまで 40 年かかり，それから 1958 年に IC が生まれるまでに 10 年かかっている．その後 Moore の法則に沿って，微細化は 10nm まで進んだ．

IoT に向い，新しい情報システムが生まれると，センサーを含む多様なデバイスが，多様な応用に使われる．一つのデバイスでは全てのシステムに対応できなくなる．相互接続のためチップ面積の 70% を配線が占めるから高密度配線が求められる．微細化のため多重露光が引続き発展し，EUV が一部を肩代わりするようになるだろう．

Moore の法則に従えば，2 年ごとに新技術が生まれる．微細化では 10nm プロセスが製品化立ち上げ中で，7nm は研究から開発に向かい，5nm は研究中，3nm は 2024 年製品化に向けて研究初期段階にある．商品化には時間がかかるから，早く着手する必要がある．

デバイス開発では，FINFET が多用されるようになった．全周型 FINFET のチャンネルにはナノワイヤが使われるようになる．一方，寄生素子の影響が大きくなり，7nm プロセスだと，キャパシタンスの 75%，抵抗の 70% が寄生素子によるものとなる．層間絶縁の low- κ 化の最終形はエアギャップであろう．

Beyond CMOS の見地からは，水平構造，垂直構造を見直し，Si に III-V や Ge を加えてデバイスを構成し，ヘテロ接合を利用する．FINFET のゲート形成でできた溝に，InGaAs ナノワイヤを形成してチャンネルに使う．トンネル FET（TFET）は他のデバイス構造より良好なサブスレショルド特性が期待できるが，欠陥制御が課題である．InP 基板を用い，InGaAs/GaSbAs ヘテロ接合を活用して 3D 集積化も検討している．2 次元結晶で欠陥を回避しようという動きもある．グラフェン様の MX_2 （M：金属元素，X：カルコゲン元素）も将来期待の材料である．

さらに，信号伝達の手段を電子からスピンの替えることで，消費電力を低減できる．新たなパラダイムとして，4 種のデバイスが示された．（1）電荷拡散輸送型（charge diffusion transport）として MX_2FET ，（2）トンネル輸送型（tunnel transport）として 2D FET，3D FET（III-V），（3）波動コンピューティングスピンロジック（wave computing spin logic）にスピン波（spin wave）と，スピントルク多数決ゲート（spin torque majority gate），（4）Mott/ピエゾ機械スイッチ（Mott/piezo mechanical switch）としての NEMS などである．複数経路のスピン波の流れで多数決をとって出力の経路に送り出すことによって論理を構成し，新たな計算方式ができる．エネルギー対遅延時間の図において，電荷輸送型に比べスピン波などの非電荷輸送型デバイスは低エネルギーに特徴があり，スピン波は 0.002fJ が期待される．

今後の見通しでは，コンセプトから製品までするのに 10 年かかる．IoT のため企業は 10 年も待ってられない．早期着手，複数のイノベーションが必要になる．その推進にはインフラの整備，国家間，企業間のコラボレーションが重要になる．

【質疑】

Q：どこまで小さく薄くできるか．

A：3nm プロセスは既に進めている．元々薄い二次元材料の活用も期待している．

Q：3 次元集積化の話があった．フラッシュメモリーは既に 3 次元構造になっているのではないか．

A：縦型のロジックを考えている．ロジックはランダムだからメモリーとは違った形が必要になる．

Q: MoS₂の移動度は 200 ~ 300cm²/Vs だが, MX₂の移動度に問題はないか?

A: 理論的には 400cm²/Vs も可能という. 同じ厚みの III-V 化合物半導体と同等である. 移動度にこだわらず, 使い道を考えたら良い. フレキシブルなれば面白い使い方ができる.

3-2 「光電子融合に向けたシリコンフォトニクスの展望」/"Prospects of Silicon Photonics for Photonic and Electronic Convergence" 荒川 泰彦 (東京大学) / Yasuhiko Arakawa (The University of Tokyo, Japan)



将来のサイバーフィジカル社会に向け, コンピューティングシステムの進化が求められている. コンピューティング技術は, 当初 CPU が中心であったのに, メモリーが重要技術に加わった. プロセッサがマルチコアになりメモリーが大きくなるに従って, 配線が重要な役割を占めるようになった. スーパーコンピュータは, 地球シミュレータから京コンピュータに進んだ. サーバーも同様に進化している. 地球シミュレータが 2020 年にはサーバーに載ると予想される. これを繋いでさらに大きなスーパーコンピュータを作るとしたら, チップ間接続の進化が求められる. パソコンやサーバーにおける CPU-CPU / CPU-メモリー間の伝送帯域は 2 年で倍増し, 間もなくテラスケールになると見積られる. しかしながら, 現在, 電氣的接続ではテラスケール伝送に対する解がないと見られている. 一方, フォトン幅広い帯域, 短い遅延 (low latency), 低い電力消費, 少ない相互干渉を可能にするから, シリコンフォトニクスをベースにした光相互接続 (optical interconnect) は LSI チップ間のバンド幅ボトルネック問題を解決する有力な候補である.

1980 年頃から光配線の開発は始まっていたが, ようやく必要な技術が揃って来た. 日本では, フォトニクス・エレクトロニクス融合システム基盤技術開発 (PECST) が現状の LSI の限界を超えることを目的に, 13 の FIRST プログラムの一つとして, CSTP (内閣府総合技術会議) の支援のもと, 総予算は約 45M\$ で 2010 年から 5 年間行われた. 最高の帯域密度 30Tbps/cm² をシリコン光集積回

路で示すことに成功し, この成果をもとに, METI (経済産業省) は Integrated Photonics-Electronics Convergence System Technology (光電子融合システム) を 2012 年 9 月に 10 年間のプロジェクトとして始め, 現在, NEDO が総予算 300M\$ の資金で運営している. Photonics-Electronics Technology Research Association (PETRA) はこのプロジェクトの主要開発組織で, 産総研, 産業界, 東大が参加し, つくばのスーパークリーンルームを用いている.

集積化のアプローチにはモノリシックとフリップ-チップがあり, 前者が理想的だが, 後者を使用した. 信頼性が高く, III-V 化合物と Si を組み合わせ易いためである. PECST で光コネクション部のデモを行ったが, Si の光源が難しいので, 波長 1.5 μ m の InGaAsP 量子井戸 (QW) レーザー (LD) をバットジョイントで Si 光導波路に接続した. 変調器を介して光を制御し, 20Gbps のエラーフリーデータ伝送に成功した. しかし, LD を同一基板に搭載すると LSI の熱が問題になる. 一方, 1982 年に提案した 1.5 μ m 量子ドット (QD) LD は温度安定性が良く, 市販できるまでになった. しかも, 反射雑音特性が良いのでアイソレータ不要, 小型化出来る. QD LD を搭載した Si 光集積回路について伝送特性を測定し, アイダイアグラムは無調整で 125 $^{\circ}$ C まで開いていた. 光実装では QD LD のバットジョイント, ボード貼合わせ, ウェーハボンディング技術を開発した.

次いで, 光 I/O を開発し, 評価試料 (ES) の出荷を予定している. さらに, 光 I/O と通信 LSI を搭載したボードも組み上がりつつある. 光インターコネクションの世界を拓き, コンピュータの発展に寄与して行く.

【質疑】

Q: 「京」がサッカーボールの大きさになるという見通しはあるか?

A: LSI チップが進化し, 3D 実装に光インターコネクトが自由に使えるようになることが必要と思う.

Q: 大きな技術だが, 国際協力は行われているか?

A: 米国でも光実装の国家プロジェクトが始まり, これと連絡を取っている.

3-3 「磁化の電界制御とメモリ／ストレージへの応用展開～無充電で長期間使える究極のエコ IT 機器の実現を目指して」/"Voltage Controlled Magnetization Switching and Its Application to Memory/Storage Fields - Toward Realization of a Long Term Use IT Devices without Recharging" 佐橋 政司 (科学技術振興機構／東北大学) / Masashi Sahashi (Japan Science and Technology Agency / Tohoku University, Japan)

今日のモバイル-IT デバイスは高い頻度での再充電を



要求し、多数のバッテリー充電器が家庭やオフィスで長時間接続されている。その間、充電器自身にも電力損失がある。さらに、大規模災害や長期の送電故障の際に充電できないと災害情報へのアクセスも切断されてしまう。IT デバイスの顕著な電力削減、環境発電 (harvested energy) の活用は、再充電の懸念のない心地よいライフスタイルを可能にする。

磁化の磁気制御が安定な記憶方式として広く用いられているが、内閣府総合科学技術・イノベーション会議 (CSTI, Council for Science, Technology and Innovation) の ImPACT プログラム (Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program, 革新的研究開発推進プログラム)「無充電で長期間長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」において、磁気に代る電界制御に挑戦している。金属磁性体に電流を流して磁化制御できることが分り、MRAM が生まれた。電流に代る電圧による磁化／スピン制御が究極の省電力制御方式と考えられる。ImPACT はプログラムマネージャ (PM) を設け、出口まで見据えたイノベティブな研究開発を行う。DARPA (米国国防高等研究計画局) の制度を参考に、FIRST プログラムの発展形として制度化された。研究への参加を募り、一つの構想を実現して行く。眼目はブレークスルー技術を産み出すことにある。

ImPACT プログラム「無充電で長期間長期間使用できる究極のエコ IT 機器の実現」は、5つのプロジェクトで動いている：(1) スピン FET, (2) 電圧トルク MRAM, (3) 単結晶 MTJ (磁気トンネル接合), (4) スピントロニクス論理 LSI, (5) 電圧書き込み磁気ストレージプロジェクトである。DRAM, SRAM の不揮発性化, HDD の記録密度限界打破のための交差相関磁気制御, スピントランジスタの開発などが課題となる。電圧制御ではスピンの歳差運動の制御を用いる。歳差運動の周期が 1ns 程度の中での制御のため、0.5 ~ 1ns の書き込みになり、1fJ/bit という低消費電力が期待される。1fJ/bit になれば 1 ヶ月くらい充電なしで携帯機器を使える。電界によって磁化を垂直から平行 (面内) に変える異方性制御の可能性もシミュ

レーションで確認できた。

一方、ImPACT は補正予算 550 億円を 16 のプログラムで分け合う。1 プログラム 35 億円に過ぎない。このため 5 つのプロジェクトを徐々に絞って行く。電圧磁化制御と高速を期待できるスピン軌道トルクの 2 つを分科会にし、それぞれ目的を明確にして進めようと考えている。例えば、電圧磁化制御は高集積、スピントルクは高速を目的とする。電圧磁化は究極の低消費電力、集積化を拡大し、バッテリー駆動に適用する。

世界でのこの方向の動きとしては電流系の研究が多く、ロジック応用、IoT 適用を狙っている。スピンは使っているが、電流を流すのでは省電力に限界がある。スピン軌道トルクは韓国、フランスで取り上げ、電圧駆動は米国の UCLA が DARPA の支援で取り上げている。

【質疑】

Q：異方性制御ではどんな問題があるか？

A：異方性制御の機能は確認したが、実用には異方性自体を大きくする必要がある。電圧効果がまだ十分でないので、材料、界面の双方から検討する。



【Session 4：自動運転におけるエレクトロニクス／Electronics for Automated Driving】

4-1 「自動運転実現の鍵を握る ICT 要件／"Roles and Issues of ICT for the Development of Autonomous Vehicles"」野辺 継男 (インテル株式会社／名古屋大学) / Tsuguo Nobe (Intel K.K. / Nagoya University, Japan)



自動運転は 2013 年頃から関心が高まった。米国運輸省は 2013 年 5 月に、これからは車と人間の関係が変わると指摘した。自動運転の狙いは、交通事故減少、渋滞緩和による社会コストの削減、高齢者の移動支援などである。自動車の運転は、人間の運転から、緊急ブレーキなどの運転支援を経て、コンピュータによる自動運転へと進む。

このコンピュータ作りが自動運転の研究である。現在の車は人間の意志で動くが、自動運転になったらクルマはコンピュータ判断で動くから、そのソフトウェアをどう書かが問題になる。例えば、交差点では人や車の動きを認識し、混雑のすり抜け方を見出すようプログラムする。現実の交通では、暗黙の了解で運転が行われている。暗黙の了解をコンピュータプログラムにするのは不可能に近い。しかし、これは Deep Learning を当てはめることで解決できるだろうとなってきた。データを集め、分析して、コンピュータに教化学習させる。一方、高速道路なら車線を保ち、適宜追い越したりするだけで良い。高速道路の自動運転なら 95% までできているという自動車会社もある。自動運転の実現目標時期は高速道路が 2020 年、交差点は 2025 年以降と見られている。

自動車の運転では見える世界と見えない世界がある。見えないところは予測して運転している。これをコンピュータにやらせるのは難しい。見えないところの予測にはコンピュータ以外の技術が必要になる。見えるところでは、人間の目の代りにレーザー、LIDAR（空間上の物体の有無を認識）、ミリ波レーダー、カメラ、超音波も使って、360°のセンシングをする。

自動運転のためのデータは道を走らせながら集める。米国の Mountain View ではカリフォルニア州が許可して公道に実装試験車を走らせることが出来る。Google は 8 台の自動運転車を、それぞれ週に 1 万～1 万 5 千マイル走らせているという。

ものの認識はパターンに加え、点群によって行う。点群を用いれば、対象物を人と確認できるだけでなく、人の意図も分る。例えば、道路脇に立っている人が道を渡ろうとしているかを判断できる。

見えないところに対してどうするかだが、ドイツでは 200km/h の速度での運転を自動化している。センサーで検知できるのは 200m 先までだが、200km/h で走れば 3.6 秒で通過してしまう。そこで、Vehicle IoT により、先行車が取った工事情報や車線消滅などのデータをアップロードし、地図も更新しておく。

自動運転では環境認識と走行状態把握が重要である。認識・把握したデータは 3D マップデータベースを参照する。その関係を分析して運転の判断を下す。得られたデータを活用すれば、配車サービスのウーバーのような新ビジネスを産み出す可能性がある。コンピュータには、画像認識・距離測定など走行中に取得したデータ、3D 地図などの既存データを組み合わせて状態分析して判断できる能力が求められる。

情報通信技術の指数関数的成長に、ニューロサイエンスと人工知能の進歩により、自分自身で走る車の実現は近づいている。開発を完成させるには、システムと人間の関係、サイバーセキュリティ・プライバシー問題などのヒューマンファクタを具体的に検討し、速やかに実用的な解を導くことが必要である。

4-2 「自動運転の実現に向けた画像認識技術とプロセッサ / "Image Recognition Technology and Processor for Automated Driving"」 岡田 隆三（株式会社東芝） / Ryuzo Okada (Toshiba Corporation, Japan)



自動車の安全機能は、シートベルトのような交通事故の損傷を減らそうという受動安全から、衝突の事前防止という能動安全に展開している。能動安全は、歩行者、障害物や先行車両との衝突を避ける自動緊急ブレーキ、運転レーンからの逸脱を避けるレーン維持 (lane keeping) のような運転自動化を含む。能動安全に用いる技術は、運転操作の多くを自動化する自動運転に向かってさらに進んで行く。

世界で年間 140 万人が車の事故で死亡している。特に新興国への車の普及が死亡事故増加を速めている。欧州の安全性基準は 2016 年には昼間の歩行者、2018 年には夜間の歩行者や二輪車、2020 年には交差点や対向車に対する緊急ブレーキを求めている。自動化によって人為的ミスによる事故は大幅に削減されよう。

車の運転では、知覚、認識、判断、操作が順次行われ、これらが自動運転の技術を構成する。知覚したものを分析、認識した結果から、状況を判断し、運転操作の指示を出す。知覚に関する技術には、カメラ、レーダー、加速度センサー、ミリ波を用いた距離測定、GPS などが含まれる。認識に関する技術は対象によって異なるが、障害物や交通標識を認識し、地図と照合して自分の位置を確認する。これらを纏め上げた障害物地図によって自分の状況を判断して経路を選び、運転操作を決めて走る。

自動運転のために重要な技術には、まず歩行者認識がある。この技術はパターン認識に相当し、あらかじめ画像を集めて人の特徴量を抽出し、学習しておく。特徴量に人物と非人物を分ける境界を定め、これを基に、歩行者を抽出する。人の認識にモノクロでは輝度勾配処理を用いているが、モノクロの輝度に色などの情報を加えようとしている。色が加われば夜間でも人が捉えられるようになる。次の要素技術は、物体領域分割 (semantic

segmentation)である。各画素が、道路か、木か、車か、空か、対象物を同定する。これには、畳み込みネットワークという Deep learning の技術を用いる。三番目は3次元構成で、カメラの映像と三角計測を使って道や障害物を3次元で表示する。周辺障害物地図は、レーザーの反射光戻り時間計測を基本とする LIDAR による距離計測データを利用した高次元生成を用いて作成する。

得られたデータをもとに高度な画像認識を行うには、高い演算性能が求められる。画像認識は、組込まれたプロセッサ LSI に多大なコンピュータ処理を要求する。ここではコストと温度や振動に対する耐性などの車載要求を満たす必要がある。最高動作温度は電力消費の上限を決め、プロセッサ LSI の計算資源を制限する。従って、自動運転用画像処理 LSI には低い消費電力での高い処理性能という高効率性が求められる。

そこで、自動車の要求に応えられる、低電力、高／低温動作可能な画像処理プロセッサ (image processing processor) を開発した。高効率を得るために、画像認識 LSI シリーズに独自の汎用処理コアからなるヘテロジニアスマルチコアアーキテクチャ、メディアプロセッシングエンジンとパターン認識、3D 再構成、ブロックマッチング、様々なタイプの空間フィルタと変換に専ら用いられる画像処理アクセレータを導入した。2001 年の第 1 世代から、現在の第 4 世代まで順次開発して来たが、コアになる画像処理プロセッサは当初の 4 個から 8 個に変更して性能を高め、夜間の歩行者検出も可能にした。1.4W の電力消費で、1900GOPs の処理速度を実現している。講演の最後に、道路検出など 8 つの動作が動画で紹介された。

4-3 「自動運転知能実現に必要な要素技術開発の取り組み」／"Key Technologies for Automated Vehicles - High Precision Map and Driving AI" 二宮 芳樹 (名古屋大学)／Yoshiki Ninomiya (Nagoya University, Japan)



自動運転は人が行っている認知、判断、操作を人工知能 (AI) で行うことになる。自動運転は 2020 年に出来

るようになるというが、4 つのレベルがある。レベル 0 は自動化以前の人間が運転するもの、レベル 1 はアクセルとブレーキのどちらかを自動化する人の支援で、例えば速度自動制御である。レベル 2 は自動運転しているが人が監視していて、機械が怪しくなったら人に代る、レベル 3 は自動では難しいものは人が受持つ、レベル 4 は車が全てやる。自動運転はレベル 2～4 を指し、法規が整っているのはレベル 2 までである。

自動運転の実現には、技術的実現性と社会的インパクトが必要である。これらが自動運転ブームの背景となる。事故の減少、車間が詰められるので渋滞解消、環境汚染減少などが期待できる。日本では高齢化で運転者が減り、移動が困難になるのを自動運転で補う。米国では長時間運転中の時間有効活用に自動運転が期待されている。自動運転は 1950 年に GM の出したコンセプトだが、テープを張ってその上を走らせるといったものだった。1980 年代に自律走行が試みられ、1990 年代には磁気レールを道路に敷いたインフラベースの自動運転が試みられた。2000 年頃からセンサーを使った運転支援が行われるようになり、自動ブレーキの普及が始まった。現在の自動運転の試みは DARPA がその可能性を探ったことからブームになった。

自動運転実用化の課題としては他の車との親和性、ドライバーの受容性、経済的な成立性などがある。必要な機能は、環境理解、判断・計画、操作である。判断では人の意図や動きの予測を含む。人間はあらゆる危険を予測し、譲り合って運転している。自動運転では人間と同じレベルの安全は保てないという懸念がある。道路環境をセンサーで認識し、制御して運転するというループを形成せねばならない。

市街地の道路を自動運転するのに必要な主要課題は、実地試験、高精度地図、運転 AI (人工知能)、画像深度センサーである。自動化のポイントの一つは高解像度距離センサーが使えたことである。これにはカメラ、LiDAR、Radar があり、100m、360°の障害認識が出来る。第 2 は高精度地図の作成で、地図は空間情報データベースとなる。第 3 は一般公道での評価で、これにより自動運転のコンピュータが学習する。課題は解像度、感度、コストである。光の波長を変えることによる解像度向上、受光素子の感度向上などが図られている。地図は静的情報であるが、これに移動物の存在性を加えることができる。さらに、3次元構造地図を作ろうとしている。この地図の中のどこに車がいるかセンサーデータとのマッチングをとる。リファレンス測位で 10cm の精度で地図上の位置が決まる。GPS との併用もある。課題は高精度地図を作るコストと鮮度保証である。地図のデータは計測車両でとることができる。自動で位置を決めることは出来るが、どこを走ったら良いかまでは示せていない。走行車両のセンサーでとった情報で地図を絶えず更新することも考えられる。公道評価はある地域での知能獲得になる。今のところ基礎データの取得の段階にある。

自動運転では、人とのコミュニケーション，災害対応などが問題となる．ナノテクノロジーにはセンサーなどの開発を期待している．



【閉会挨拶／ Closing Remarks】

野田 哲二（JAPAN NANO 2016 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）／ Tetsuji Noda（Chairperson of the Organizing Committee of JAPAN NANO 2016 / Director, Center for Nanotechnology Platform, National Institute for Materials Science Japan）

本シンポジウムでは，ナノテクノロジープラットフォームの成果を紹介し，最新のトピックスの講演をお願いした．事務局の報告によると参加者は 500 余名，うち海外



からの参加者は 10 余名であった．悪天候の中の出席，長時間の参加に感謝する．

（古寺 博）