

KARCFRONT

未来 ICT 研究所ジャーナル

Vol. **25**

2012
AUTUMN

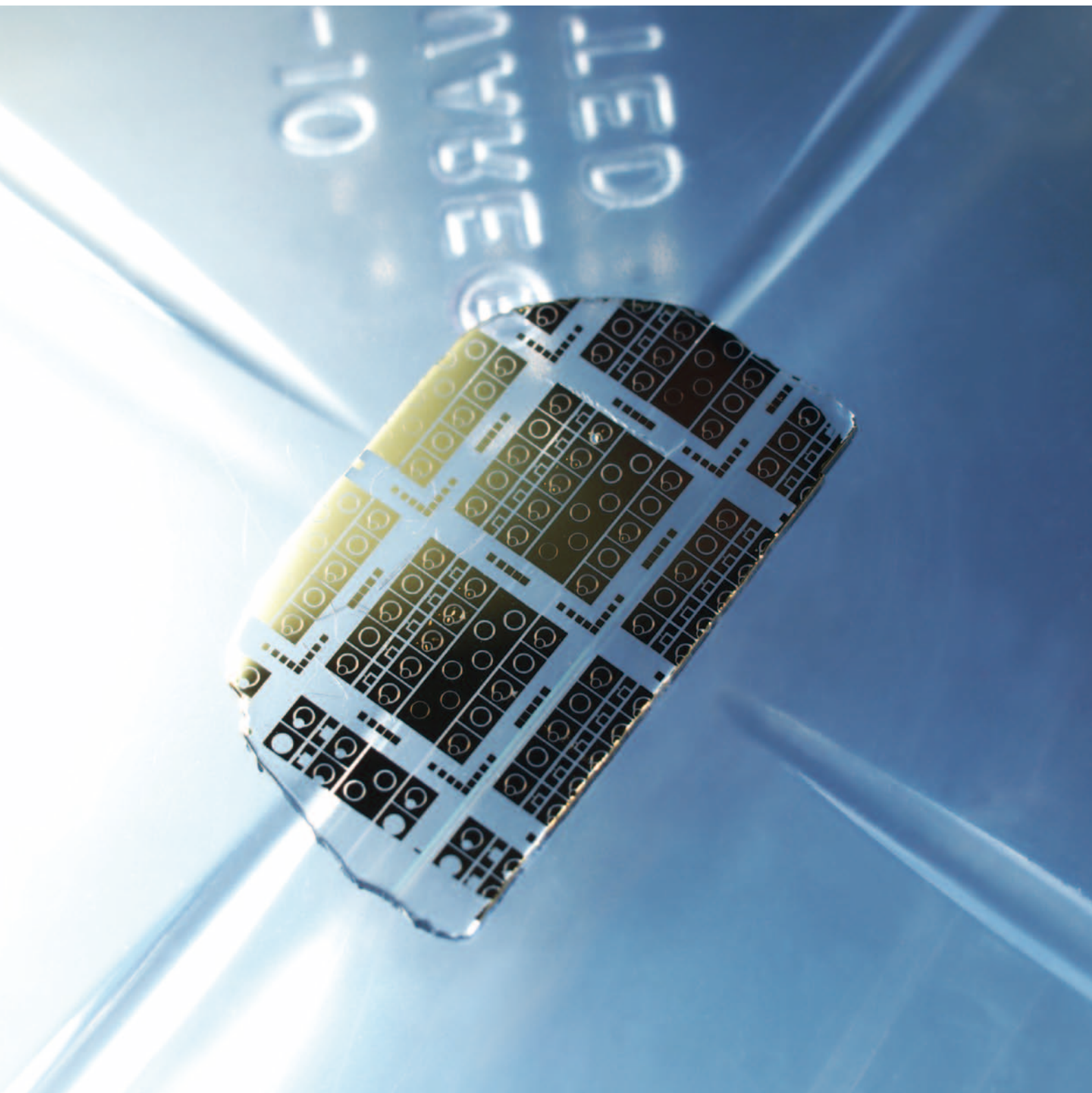


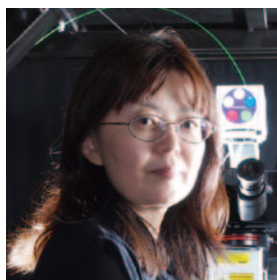
特集：世界が注目する未来 ICT の先端研究

次世代高性能パワーデバイス素材
“酸化ガリウム”

相同染色体の認識と対合に關与する RNA

鞭毛ダイニンの構造変化を 3D 解析





特集：世界が注目する未来 ICT の先端研究 1 3



トランジスタの動作実証に成功

次世代高性能 パワーデバイス素材 “酸化ガリウム”

総括主任研究員 東脇 正高 博士 (工学)

特集：世界が注目する未来 ICT の先端研究 2 8



染色体間コミュニケーションの巧妙な戦略

相同染色体の認識と 対合に関する RNA

主任研究員 丁 大橋 博士 (理学)

特集：世界が注目する未来 ICT の先端研究 3 11



鞭毛・繊毛運動の動力源を探る

鞭毛ダイニンの 構造変化を3D解析

主任研究員 榊原 斉 理学博士

TOPICS 14

報道発表「超小型テラヘルツ波プローブの開発に成功」／「第 5 回 未来 ICT 研究所 研究交流会」開催／「未来 ICT 研究所施設一般公開 2012」開催／「第 19 回 細胞生物学ワークショップ」開催／「国際フロンティア産業メッセ 2012」に出展

未来 ICT 研究所 STAFF 総覧 16

トランジスタの動作実証に成功

次世代高性能 パワーデバイス素材 “酸化ガリウム”

未来 ICT 研究所では民間企業と共同で、次世代高性能パワーデバイスを開発しています。酸化ガリウムを素材としたパワーデバイスの研究開発は、ほぼすべての電子機器において電力ロスを軽減する切り札になり得るものとして、現在注目を集めています。今回は、世界初となる酸化ガリウムトランジスタの動作実証に成功した東脇正高総括主任研究員にお話を伺いました。



Q：パワーエレクトロニクスとはどのようなものですか。

東脇：パワーエレクトロニクスは、一般に半導体素子を用いた電力変換、電力開閉に関する技術を指します。代表的なパワーエレクトロニクス回路である、交流を直流に変換するコンバーターと、直流から交流に変換するインバーターは、ほぼすべての電子機器に組み込まれており、目立たないですが私たちの生活に非常に身近な技術なのです。

このパワーエレクトロニクスは、今、社会の注目を集めています。

1つは省エネという観点からです。ノートパソコンのアダプターが温かくなっていることに驚いた経験は誰でもあるのではないのでしょうか。これは電力変換の際に、変換ロスが熱

未来ICT研究所
総括主任研究員

東脇正高

Higashiwaki Masataka

博士（工学）

略歴

1998年、大学院博士後期課程修了後、日本学術振興会博士研究員を経て、2000年、郵政省通信総合研究所（現NICT）に入所。2007～10年、University of California, Santa Barbara (UCSB) Project Scientist (NICTより転籍出向)。2010年NICT復帰。現在、JSTさきがけ研究員、工学院大学非常勤講師を兼務。

研究分野

半導体電子デバイス、半導体結晶成長、デバイス特性評価、物性評価

近況

オン・オフともにバタバタとした毎日を過ごしていますが、5歳の娘と0歳の息子が日々の生活の励みです。休日、昼間は自分の時間など取れないので、家族がまだ寝静まっている早朝にゴルフ練習場へ行くことが、良いストレス解消になっています。

として発生しているからです。データセンター、大規模サーバーのように膨大な数のコンピューター、半導体素子を使用している所では、その発熱を冷ますためのエアコン代だけで莫大な電力と費用がかかっています。CO₂排出量の43%は発電に伴うものです。そのため、電力変換効率を上げ、少しでも電力利用時のロスを減らすことができれば、社会全体として大きなCO₂排出量削減につながります。

また、パワーエレクトロニクスを担う電力用半導体素子（パワーデバイス）は、産業として非常に成長している分野でもあります。現在、ハイブリット自動車や電気自動車が牽引力となることで、パワーデバイス市場は年率60～70%のハイスピードで拡大しており、少なくとも2020年まではこのペースで成長が続くと言われていました。また、パワーデバイス市場は、現在も日本が世界をリードしている数少ない半導体産業分野です。そのため、新たな技術を導入して市場を開拓していくことは、日本経済の持続的成長にとって大きな意義を持ちます。

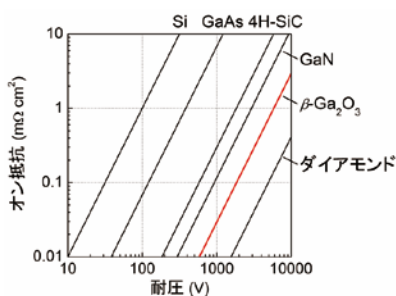


図1 オン抵抗と耐圧の関係。酸化ガリウムは、コスト面で実用に適さないダイヤモンドを除けば、同じ耐圧で見た場合、もっとも電力ロスが少ないパワーデバイスになりうる。

Q：パワーデバイス開発をめぐる現在の課題は何ですか。

東脇：半導体といえばシリコンが有名です。しかし、シリコンを使った半導体デバイスは、これまでその性能に関して改良に改良を重ねられてきましたが、徐々に限界が見えてきています。そのため、パワーデバイス応用に関しては、新しい素材として炭化ケイ素 (SiC) や窒化ガリウム (GaN) を使った半導体トランジスタおよびダイオードの開発が現在盛んに進められています。ただ、解決しなければならない根本的な課題も多く、まだまだ実用化には時間がかかると思われます。

そこで、次世代パワーデバイス材料がはっきりと定まらない今のうちに、有望な新しい素材を提案し、研究開発を進め、この分野に一石を投じたいと考えていました。そしてある時、酸化ガリウム (Ga₂O₃) に注目しました。

Q：なぜ酸化ガリウムに注目したのですか。

東脇：酸化ガリウムは、大きなバンドギャップを有する物質です。バンドギャップとは、物質の性質を決める最も基本的なパラメーターの1つです。バンドギャップが0の物質は金属で、値が大きくなれば絶縁体になります。それら2つの中間に相当する物質が、半導体になります。

多くの種類の半導体の中でも、一般的にバンドギャップが小さければ小さいほど、その内部に存在する電子を高速に動かすことができます。

例えばパソコンのCPUに、バンドギャップが小さく、内部の電子速度が高い半導体材料を用いることができれば、動作周波数が上がり、高性能化につながります。反対に、バンドギャップが大きくなればなるほど、大きな電圧・電流が扱えるようになります。こうした点から、非常に大きなバンドギャップを持つ酸化ガリウムは、パワーデバイス応用に有望な材料の1つであると言えます。また酸化ガリウムは、ドーピングと言って、半導体素材にわずかな不純物をまぜ加えることで、電流の伝達を担うキャリア（電子）の濃度を広い範囲で制御することができます。

このように、酸化ガリウムは、半導体として材料的に優れた特性もっています。その特性を利用して、電子デバイス以外にもいくつかの利用法が考えられます。例えば、ディスプレイなどに用いられる透明導電膜です。また、窒化ガリウムのLED構造を酸化ガリウムの基板上に作製することで、自動車用ヘッドランプなどに応用可能な高出力LEDライトが作製可能です。その他にも、深紫外線は太陽光にはほとんど含まれていないので、強い日差しの中でも炎を検出する火災警報器のようなデバイスにも応用できます。

しかし、これほど優れた特性を有しているにもかかわらず、酸化ガリウムについては数十件ほどの基礎的な論文が、過去に報告されているだけでした。そのため、実際に酸化ガリウムを使用した電子デバイスに関

しては、私たちの研究開発が世界的に見ても初の試みとなりました。

Q：他の半導体素材と比較して、どのような点で酸化ガリウムは優れていますか。

東脇：パワーデバイスとしてその半導体材料がどれほど適しているかを評価する指標である「バリガ性能指数」を見積もってみると、酸化ガリウムはシリコンに比べ3000倍以上、窒化ガリウムや炭化ケイ素に比べ少なくとも数倍程度以上の性能があることがわかります。

図1に示すように、バリガ性能指数の逆数をグラフ化すると、耐圧と抵抗の関係が見てとれます。高電圧を制御する電子機器内でパワーデバイスを用いる場合、半導体デバイスの耐圧を高めようとする、それに伴い内部抵抗値も上がってしまいます。当然、抵抗が高いと発熱量が増加し、大きなロスとなってしまいます。同じ電圧での利用を考えた場合、酸化ガリウムデバイスならば、窒化ガリウムや炭化ケイ素デバイスの10分の1程度の抵抗値となり、そのぶん高効率化が可能です。

現在、窒化ガリウムや炭化ケイ素は、パワーデバイス開発で先行しています。しかし、ここまで述べてきた材料的特徴から、後発である酸化ガリウムにも性能面で十分競争できる実力があるのです。

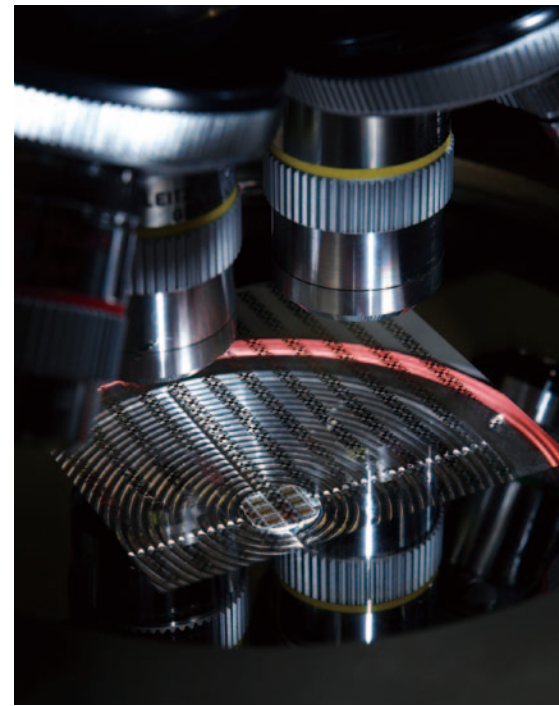
Q：確かに性能は優れていますが、コストの面はいかがでしょう。

東脇：単結晶の酸化ガリウム基板作

製には、融液成長法という製造コストが安い方法を採用することができます。融液成長法は、材料を熱で溶かして、その溶けた材料に種結晶を接触させて、冷却しながら引き上げるというものです。現在、大量生産されているシリコンおよびサファイア基板と原理的にほぼ同じ製法です。この融液成長法は、窒化ガリウムや炭化ケイ素では使えないため、より高温、高圧などの厳しい条件を必要とする製造法に頼らざるを得ません。そのため、製造コストの点からも、酸化ガリウムは、窒化ガリウムや炭化ケイ素よりも有利な特性を備えていることとなります。

この融液成長法が使えるメリットはコストだけに留まりません。まず、融液成長法を使うことで大面積基板を作ることができます。現在のところ、直径2インチ(約5cm)の基板まで作製できており、今後2~3年のうちに面積的に約10倍の6インチ(約15cm)まで拡大していくことが可能と考えています。6インチまで基板サイズを拡大できれば、現在では使われなくなり、放置されている旧世代シリコンデバイス、集積回路の生産ラインを転用することが可能となります。結果、新規にラインを導入するための莫大な設備投資が必要ないため、企業の参入がより一層進んでいくでしょう。ほかにも、基板生産時のエネルギー消費が抑えられることや、原料効率が低いというメリットもあります。

現在、共同研究を行っている企業の試算では、今後量産体制が進め



フォトリソグラフィーによる酸化ガリウムトランジスタのパターニング工程。

ば、6インチ基板を1万円ほどのコストで作製できると予想しています。同サイズの炭化ケイ素基板の場合、大量生産が進み、どんどん価格が下がったとしても、せいぜい10万~20万円程度までしか安くならないと予想されます。窒化ガリウムでは、現状このような大面積単結晶基板は実現すらしていません。実際、パワーデバイス作製にかかるコストの約6割が基板の価格で決まるので、酸化ガリウムは価格面で他の材料に対して強い競争力を持ち、将来的に市場を席巻できる可能性が高いのです。たとえ性能が高くても、価格が高ければ市場では相手にされませんから。

Q：酸化ガリウムのパワーデバイスはどのようなところで利用されるのですか。

東脇：酸化ガリウム製品が市場に始まるよりも、ライバルの炭化ケイ素や窒化ガリウム製品が先に市場に

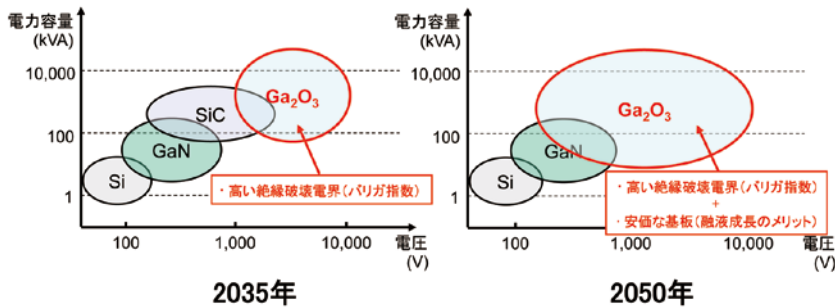


図2 各種半導体材料の用途、市場の住み分け予想図。

登場することになると考えられます。そのため、まずはそれらの製品が得意とする用途、分野を避け、酸化ガリウム製品の市場投入は高耐圧・大電流の製品から始めることになると思います(図2左)。具体的には、変電所や電車などのインフラ系が最初の応用先として挙げられます。パワーデバイスの大きな市場の1つである電気自動車やハイブリット車応用は、中耐圧(100~1000 V)領域に相当し、市場投入当初からの酸化ガリウムデバイスのターゲットではありません。しかし、モータードライブには大電流を要すること、価格を低く抑える必要があること、高い信頼性が要求されることなどから、他の材料では全ての要望を満たすことが難しいのが現状です。そのため、将来的にはこの自動車分野への応用も、酸化ガリウム製品が市場の中核になると期待しています。

また、太陽光発電の高効率化にも、酸化ガリウムデバイスは役立てられると思います。大型の太陽光発電設備には高耐圧のインバーターと一緒に、それを制御するドライバー回路が使われています。しかし、現状のシリコンインバーターおよび、その回路では、高温環境下では安定動作が困難です。そのため、日がさんと照りつける発電に適した場所において、発電装置内部に設置される

インバーター、ドライバー回路ともに冷却しなければなりません。つまり、せっかく発電した電力の一部は、これらの冷却に回す必要が生じてしまい、全体として考えた場合は、大きなロスとなります。一方、酸化ガリウムデバイスは、材料特性から高温環境下でも問題なく動かすことができるので、大型太陽光発電施設などの用途にも適しています。

どんなに遅くても2050年には酸化ガリウムデバイス、製品の大量生産体制が整い、価格面でも他の半導体ライバル製品に勝てるようになると考えられます。そうすれば、需要が多い中耐圧・中電流領域でも、広く酸化ガリウム製品が利用されるようになり、その市場は爆発的に拡大すると予想しています(図2右)。

Q：酸化ガリウムは優れた素材であるのに、誰も半導体デバイスにしようとできてこなかったのはなぜでしょうか。

東脇：「バンドギャップが大きい」と、「キャリア濃度が制御可能」という条件が整っていれば、私は十分デバイス化する意味があると思います。しかし、多くの研究者は、優れた素材であることを知識として持っていますが、実際にデバイスとして動作したことがない材料を扱う挑戦的な研究に関してはリスクが高く

やりたがりません。やはり、デバイスが動かなかつたら何の成果にもならないというリスクは、研究者にとって二の足を踏ませることになるのではないのでしょうか。新しい材料の場合、いくら材料特性が素晴らしく、研究を重ねても、実際にデバイスとして使えないという事態は十分起こりうることです。そのため自分自身のポリシーとして、実際にデバイスとして作り上げ、その動作を実証することは、研究者として大きな意義がある仕事と考えています。

Q：実証実験ではどのようなことが分かりましたか

東脇：実証実験は、(株)タムラ製作所、(株)光波とNICTの3者共同で行いました。タムラ製作所と光波において、融液成長法により酸化ガリウム単結晶基板を作製し、NICTではその基板をトランジスタに加工して、デバイス特性の評価を行いました(図3)。

パワーデバイスはスイッチとして利用されることが一般的で、いかにゲート電圧によってドレイン電流量をコントロールできるか、いかにドレイン電圧をかけてもその電流をオフ(遮断)し続けることができるかの2つが重要な評価ポイントになります。

世界で初めての実証実験の結果は、自分でも驚くべきものでした。初回から完璧にトランジスタとして動作しており、250V以上のドレイン電圧を印加するまで壊れることなく、その電流をしっかりとオフできていた

のです。実際にトランジスタ作製プロセス中は、初めての試みなので、ゲート電圧によるドレイン電流の変調ができれば、たとえオフしなくても十分ぐらいに考えていました。

実際オフ耐圧250Vという値は、他の半導体を用いた場合、かなり複雑なデバイス構造にすることによって初めて得られるものです。このような非常にシンプルなトランジスタ構造であるにもかかわらず、高いオフ耐圧が得られたことは、酸化ガリウムの持つ材料的ポテンシャルが、私たちの予想を大きく上回る優れたものであると気づかせてくれました(図4)。

また、トランジスタではスイッチをオンした時どれだけ電流を流せるか、オフした時どれだけ電流漏れを防げるかという、オンとオフの比率が重要です。実用化には通常 10^6 程度の比率が必要ですが、この単純なトランジスタですでに 10^4 という値が得られています(図5)。この状態から、実用化に必要なオン/オフ比までの改善は、既存の半導体デバイ

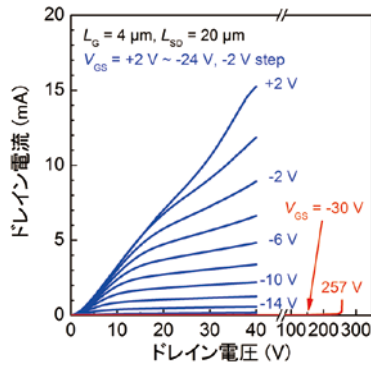


図4 酸化ガリウムトランジスタの電流・電圧出力特性。トランジスタとして完璧に動作している。また、オフ時の耐圧性能に相当する最大オフドレイン耐圧は257V(赤線)と優れた性能を示した。

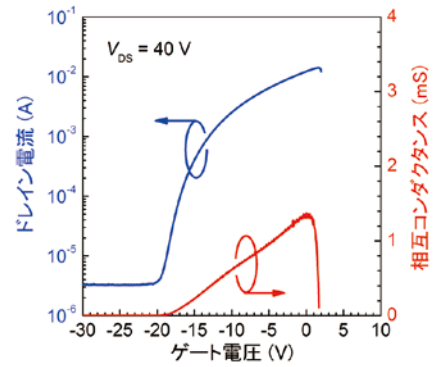


図5 酸化ガリウムトランジスタの伝達特性。オフ時リーク電流が非常に小さいため、スイッチング応用で重要となるオン・オフ比が10,000程度と非常に大きく取れている

スのこれまで長年にわたる研究開発の歴史の中で蓄積されてきたノウハウを利用することで、比較的簡単にできると考えています。

実証実験のこうした結果は、酸化ガリウムの材料特性の高さによるものです。その後の実験においても、現在まで我々の期待を裏切らない優れた特性が次々に得られてきています。今後は、実際に炭化ケイ素や窒化ガリウムデバイスが絶対に届かない領域に相当する、理論性能限界を超えるデバイス特性を達成することができるよう、プロセス、構造なども順次改善していきたいと考えています。

Q：今後の展望についてお聞かせください。

東脇：幸い、研究開発における最大のボトルネックになると思われていたトランジスタ動作実証は、早期に果たすことができました。今後、産業化に向けた3つのステップが存在すると考えています。

第1に、トランジスタを動かしたといってもMESFETという一番シンプルな構造のトランジスタでの実証でしたので、今後より実用的なMOSFETの作製、動作実証をできるだけ早く、2年以内にも行いたいと考えています。

次に、5年をめどに実用化に向けた多岐にわたる技術の開発を、外部との連携を強化することで実施します。このステップでは、電機メーカーや自動車メーカー、装置メーカーなどを巻き込んだ大規模コンソーシアムによる国家プロジェクトを立ち上げ、開発を加速し、早期産業化を目指します。

そして、2020年にはサンプル出荷のための小規模生産に取り組み、2025年には本格的な量産体制に入ることを目標としています。

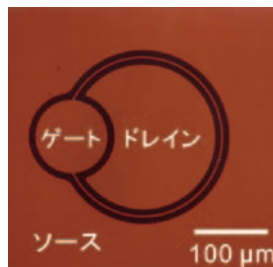
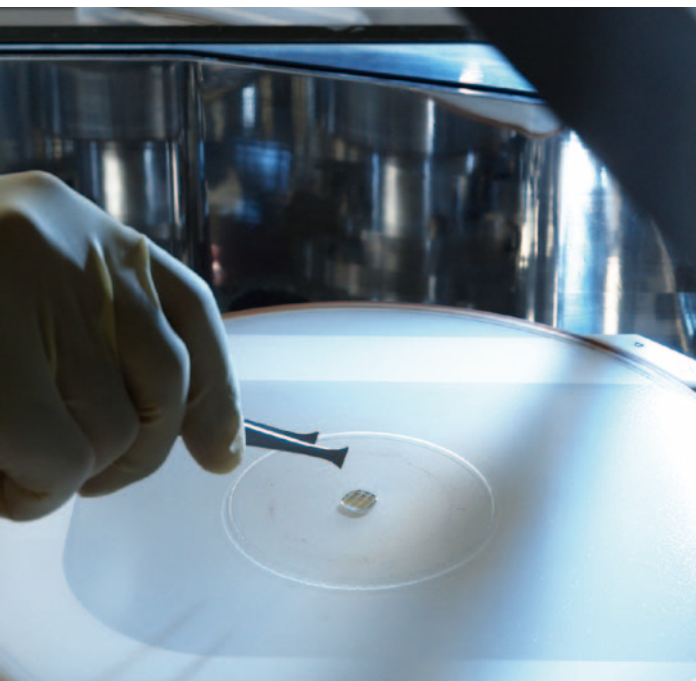


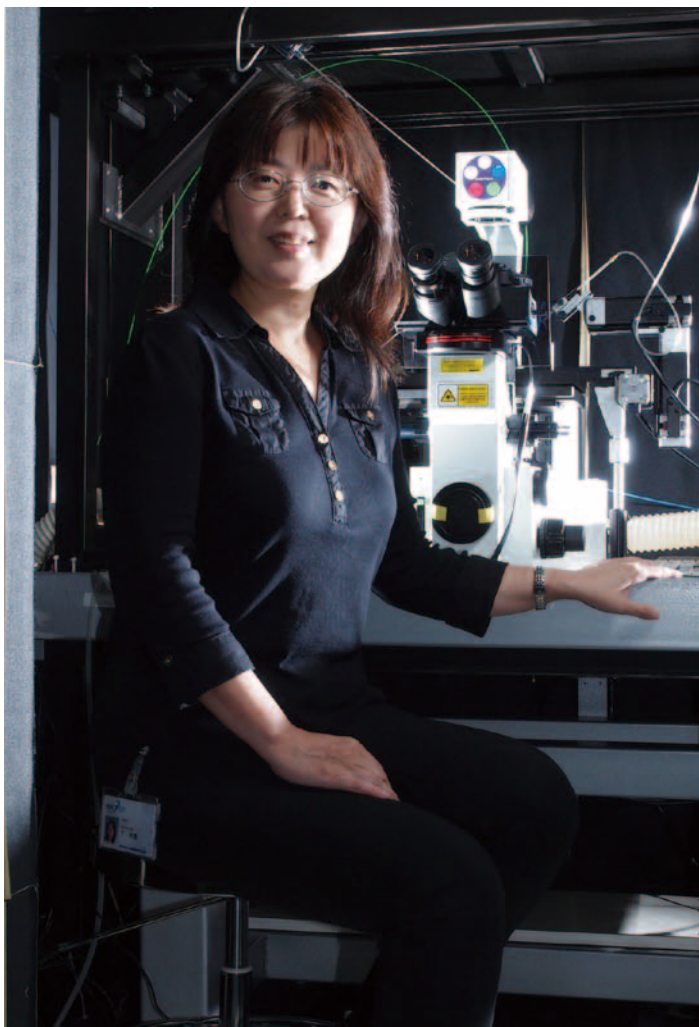
図3 実際に作製した酸化ガリウムトランジスタの光学顕微鏡写真。

ソース、ドレイン電極作製のための前処理工程。

染色体間コミュニケーションの巧妙な戦略

相同染色体の認識と対合に関する RNA

生物は 40 億年の進化の過程で、私たちの想像をはるかに超える“巧妙”な仕組みを取り入れて進化してきました。有性生殖時に起きる「相同染色体」間の遺伝子交換もその1つです。対をなす相同染色体同士が、どのようにお互いを見つけ出し、さらになぜ隣り合うように並ぶことができるのか、私たちの研究グループでは、その仕組みを解明しつつあります。



研究の背景

真核生物が地球上で生き延び、大きく繁栄できたのは、環境の変化に適応し、また、病原菌の進入や感染との果てしない戦いを通して無限ともいえる多様性を獲得したからです。そして、生物の多様性を生み出し、ひいては進化をもたらすのが有性生殖です。有性生殖を一言でいえば、それは個体間の情報交換です。生物の情報はすべて遺伝情報として染色体DNAに書き込まれており、良い情報、つまり生きていくために役立つ遺伝情報をより多く持っている生物が結果的に生き延びるチャンスが増えます。有性生殖につながる細胞分裂は「減数分裂」で、動物でいえば卵子や精子をつくる際の細胞分裂です。減数分裂では、性の異なる個体間で染色体DNAの

バイオICT研究室
主任研究員

丁 大橋

Ding Daqiao

博士 (理学)

学歴

1991年、東京大学大学院理学研究科博士課程修了

略歴

1992年から郵政省通信総合研究所（現NICT）研究員、1995年より主任研究員。

研究分野

細胞生物学、分子生物学

近況

カメラを持つ京都歩きにはまっています。京都のお寺や庭園、山の美しさには毎回感動させられます。毎週末に京都へ行くのは大変なので、すぐに出かけることのできる近くの植物園で花や昆虫を接写して、生き生きした生物の精巧な造形美や自然の美しい色彩に感動しています。

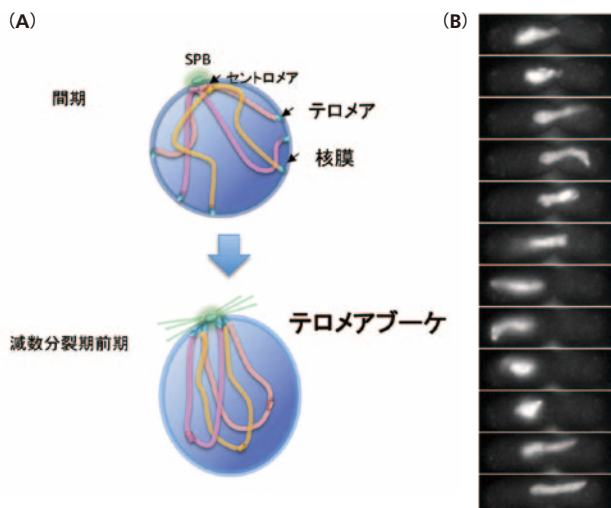


図1 減数分裂期前期の核における染色体のテロメアブーケの形成 (A) と核運動 (B)。

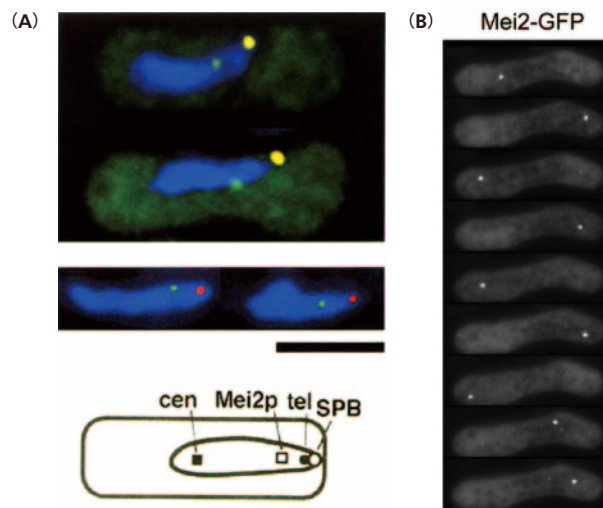


図2 減数分裂期前期の核に見える1つの Meiosis 2 ドット。(A) Meiosis 2-GFP (緑) と染色体 (青)、SPB (黄) またはテロメア (赤) の3重染色 (Yamashita et al. 1998 Cell より転載)。(B) 生細胞にある Meiosis 2-GFP ドット、核運動とともに動く。

交換・混合が行われ、その結果、生物が遺伝子を通して多様性を獲得し、種の繁栄と保存を守ってきました。

私たちの細胞には、父母それぞれから受け継いだ2セット(23本×2)の染色体があります。対をなす同じ番号の染色体が相同染色体です。減数分裂においては、相同染色体の間で遺伝子交換(相同組換え)が行われます。遺伝子交換をする前に、相同染色体がお互いに相手を見つけて、隣り合うように並びます。私たちの研究グループでは、この相同染色体が空間的に近く並ぶ仕組みを解明しつつあります。

それは、相同染色体が並び合うことが、テロメアブーケの形成に大きく依存していることを発見したからです。生きている細胞で染色体の挙動を可視化すると、染色体の末端(テロメア)が近接したテロメアブーケ(テロメアを束ねた花束)と呼ばれる特殊な染色体配置が形成されます(図1A)。続いてテロメアを先頭にする核の往復運動が起こり、まるで縄跳びの縄の両端を一緒に

握って左右に振るように相同染色体を速やかに空間的に近づけます(図1B)。その過程で、SUN/KASHタンパク質複合体や微小管、ダイニンモーターなどが、テロメアを核膜上で動かす中心的な役割を果たしていることを、私たちの研究グループが明らかにしました。しかし、ある染色体が、たくさん(ヒトの場合は全部で46本)ある他の染色体の中から、どのような仕組みで自分と同じ配列をもつ相同染色体を見分けて横に並ぶか(対合するか)はわかりませんでした。私たちは、最近になって、この謎を解く糸口が非コードRNAであることを見つけました。

きっかけは核の中で光る1つのドット

酵母のような単細胞生物からヒトのような高等動物まで、生命活動を支える基本的な分子反応の大半は同じ働きをすることから、基礎研究の分野ではモデル生物を使用することが普通です。私たちはそのモデル生物の1つである分裂酵母を研究に用

いています。

分裂酵母にはMeiosis 2という減数分裂を制御するタンパク質が存在し、そのタンパク質は減数分裂期前期に、*sme2*遺伝子座という染色体の決まった場所にドット状の集積体をつくります。しかし、細胞には相同な*sme2*遺伝子座が2つあるにもかかわらず観察されたMeiosis 2集積体(ドット)はほとんどの場合、1つしかありません(図2)。この観察結果から、相同染色体上の*sme2*遺伝子座がいつも同じ場所に位置(局在)する、つまり対合しやすいことが示唆されました。

それを確かめるために、*sme2*遺伝子座の近くにGFP蛍光タンパク質が結合できるDNAタグ(特殊なDNA反復配列)を挿入し、生きている細胞が減数分裂するときの対合を調べました。その結果、*sme2*遺伝子座はこれまでに調べたほとんどの染色体領域よりも高い対合頻度を示すことがわかりました(図3)。さらに、*sme2*遺伝子を別の染色体に移すと、元の場所での対合頻度が減

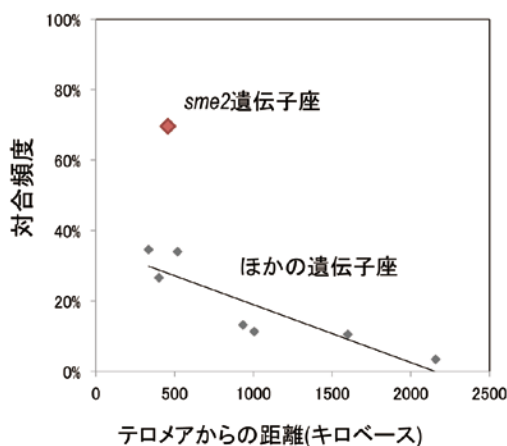


図3 減数分裂期前期の *sme2* 遺伝子座の対合頻度、つまり共局在頻度は、ほかの遺伝子座よりはるかに高い。

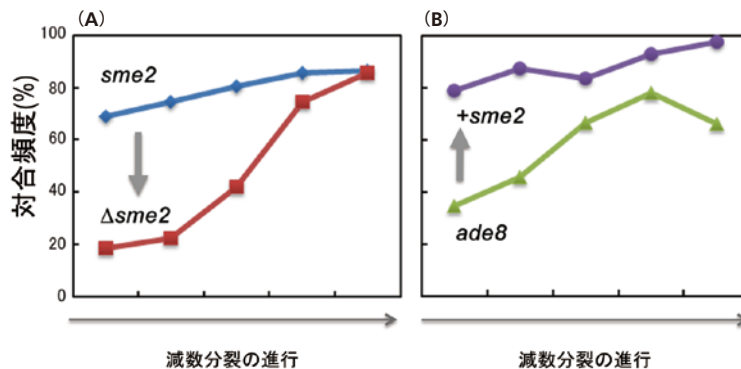


図4 対合頻度は *sme2* の存在に依存する。*sme2* を破壊すると、対合頻度が減少する (A)。また、*sme2* をほかの遺伝子座に挿入すると、挿入部位の対合頻度が上昇する (B)。

少し、移された場所の対合頻度が上昇したことから、*sme2* 遺伝子座が相同染色体の対合を強く促進することが分かりました (図4)。また、*sme2* 遺伝子座による対合はテロメアブーケの形成と核運動に依存することも分かりました。

これらの結果から、テロメアブーケの形成と核運動によって相同染色体が近接した位置に配置され、次に *sme2* 遺伝子座の働きによって相同染色体が対合することが推測できるようになりました。

染色体の相互認識を担う非コードRNA

それでは、なぜ *sme2* 遺伝子座は高い対合頻度を示すのでしょうか。*sme2* 遺伝子はタンパク質の設計情報を持たない *meiRNA* という非コードRNAを産生します。DNA情報に基づいてRNAが合成されることを転写といいます。*sme2* 遺伝子を制御するDNA配列に変異をいれて *meiRNA* の転写を阻害すると対合頻度が減少することから、*sme2* 遺伝子からつくられる *meiRNA* が対合促進に必須であることが分かりました。さらに、相同染色体の一方

だけからの転写では対合促進が起こらないことから、相同染色体の双方からの *meiRNA* 転写が対合に必要であることも分かりました。

meiRNA の局在を可視化すると、Mei2 タンパク質と同じ染色体上の *sme2* 遺伝子座に集積していることが分かりました (図5)。Mei2 ドット形成も実は Mei2 タンパク質が *meiRNA* に結合するためです。また、*sme2* 遺伝子の末端を欠損させると、*meiRNA* が *sme2* 遺伝子座に留まることができなくなり、対合も阻害されることから、*sme2* 遺伝子座に集積する *meiRNA* が、相同染色体を見分けて優先的に対合を引き起こす原因であることが明らかになりました。

RNAを利用する染色体認識の利点

染色体上に蓄積する非コードRNAが染色体の認識に寄与するという私たちの発見は、相同染色体認識のメカニズムを世界で初めて提示したものです。対合すべき相同染色体を識別するために、損傷が致命的なエラーにつながる2コピーしかないゲノムDNAそのものではなく、DNAをテンプレート(鋳型)にして

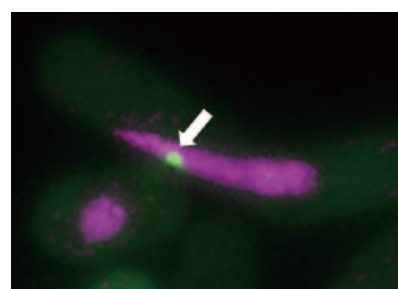


図5 GFPで可視化した *meiRNA* ドット(矢印)とDNA(マゼンタ)の二重染色。

多数のコピーが合成できるRNAを利用することは、非常に合理的だと考えられます。染色体上のいくつかの場所でこのような非コードRNAの集積があれば、バーコードのように識別しやすい特徴を染色体に与えることができます。相同染色体の認識を効率よく実現できるようにした染色体の“コミュニケーション戦略”と考えられます。

地球上で40億年をかけて進化してきた生物には、人間がとても想像できないような巧妙なメカニズムが無数にあります。そのメカニズムを解明し、学習、研究して人間に役立つ技術へ応用することが、私たち科学者や技術者の使命だと考えています。なお、この成果は国際的科学誌「Science」2012年5月11日号に掲載されました。

鞭毛・繊毛運動の動力源を探る

鞭毛ダイニンの構造変化を3D解析

生物細胞が液体のなかを動くときに使用する鞭毛・繊毛。その動きを創り出しているタンパク質が「ダイニン」です。未来 ICT 研究所では、ダイニンが力を発生するとき、どのような構造変化を起こしているかを探ってきました。そして、ダイニン頭部の3次元構造変化を明らかにすることに成功しました。



研究の背景

生物はゾウリムシやミドリムシのような単細胞生物でも、化学物質や光など細胞の周囲の環境を感知し、鞭毛・繊毛の波打ち運動をコントロールして望む方向に進むなど、それぞれの細胞が情報処理し、出力する能力があります。出力を担う細胞器官の1つである鞭毛・繊毛は、細胞から“曲げろ”、“伸ばせ”といった指令を受けなくても自律的に時間空間的に整った波打ち運動をします。

鞭毛・繊毛運動のコントロールには、カルシウムイオン濃度の上げ下げ、リン酸化カスケードなどの細胞内情報伝達が使われ、鞭毛・繊毛がそれに反応することで運動がコントロールされます。ダイニンというモータータンパク質が鞭毛・繊毛運動の動力源です。鞭毛のダイニンには、自身にかかる抵抗を感知して出

バイオ ICT 研究室
主任研究員

榎原 斉

Sakakibara Hitoshi

理学博士

学歴

1991年、名古屋大学大学院理学研究科分子生物学専攻博士課程修了

略歴

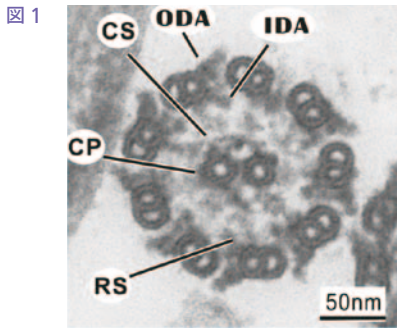
1991年、郵政省通信総合研究所（現NICT）郵政技官、同10月研究官。1995年に同主任研究官、2004年に主任研究員となり現在に至る。

研究分野

生物物理

近況

昨年の12月に息子が生まれました。最近、毎朝10分間くらい息子を肩車して散歩することを楽しんでいます。今（9月の下旬）は、あぜ道にたくさん咲いた彼岸花がとてもきれいです。



クラミドモナス鞭毛軸系の横断面
CS: 中心梢、ODA: ダイニン外腕、
IDA: ダイニン内腕、CP: 中心対微小管、
RS: ラジアルスポーク

力を変化させ、振動を発生する能力があることが知られており、自律的波打ち運動に大きく関与すると考えられています。ダイニンの振動発生機構、鞭毛・繊毛の自律的波打ち運動の発生機構には、タンパク質素子の力学センシングおよび出力調節などにおける未知の仕組みがあると考えられ、それらを明らかにすることで、新たな技術抽出に成功する可能性が高いと思われます。

私たちは、鞭毛運動の最も基本になるダイニン分子が動きを作り出す仕組みを明らかにしようと考え、ダイニンが力を発生するときに、どのような構造変化を起こすかを解析してきました。最近、鞭毛ダイニンのモーター活性の中心、ダイニン頭部の3次元構造変化を初めて明らかにすることができました。

鞭毛・繊毛の構造とはたらき

生物が細胞単位で液体に力を及ぼすとき、鞭毛・繊毛を使います。鞭毛と繊毛は基本的には同じもので、細胞から1、2本生えているときは鞭毛、多数生えているときは繊毛と呼びます。

図1は鞭毛の研究によく使われる生物、クラミドモナスの鞭毛軸系横断面の電子顕微鏡像です。鞭毛の中

心(鞭毛軸系)は、2本の中心対微小管を9本の周辺微小管が取り囲む「9+2」と呼ばれる構造で、直径約150nm(ナノメートル)です。この複雑で精巧な構造は200種以上に及ぶタンパク質でできています。

軸系横断面をみると、それぞれの周辺微小管からは隣接する周辺微小管に向かって2つのダイニン腕が突出しています。このダイニン腕を形成している鞭毛ダイニンが、ATP(アデノシン三リン酸)を加水分解して得たエネルギーを使い、隣の周辺微小管のB小管との間に“ずり”を発生することが鞭毛運動の原動力です。鞭毛の外側に位置するダイニン外腕は、モーター活性の中心であるダイニン重鎖を3個持つ外腕ダイニン1種類で形成されています。

ダイニン内腕は構成が少し複雑で、ヘテロダイマーの内腕ダイニン1種(内腕ダイニンf)とモノマーのダイニン6種類(a、b、c、d、e、g)を含みます。そのうち私たちは、内腕ダイニンc(以降ダイニンc)に注目しています。ダイニンcは、運動活性が高いことと、ヘッド1個とテール1本の単純な構造であるため、電子顕微鏡による構造解析が比較的容易であることが注目する主な理由です。

ダイニンの構造変化

ダイニンは、多様な機能を持つATPase群であるAAA+タンパクの1つとして分類されます。ダイニンはおよそ4500のアミノ酸残基からなります(図2(A)参照)。そのN末端1/3はテールと呼ばれ、ダイニ

ンはここで足場に固定されます。残りの2/3の領域が微小管の滑り運動の発生を担うモーター領域です。モーター領域には6つのAAAドメインがあり、6量体のリング構造をとります。テールと最初のAAA1をつなぐ構造はリンカーと呼ばれ、AAAリングを横断します。AAA4のC末から長さ約20nmのストークと呼ばれる突起が突き出しています。その先端が、ダイニンの動きと同期して、タンパク質レール、微小管と相互作用します。

私たちは、2003年にネガティブ染色電子顕微鏡法と単粒子画像解析法を使い、力発生^(注)する前後の状態に固定したダイニンcの構造を比較し、ダイニンが力発生するとき、AAA1を起点にしてダイニンヘッドがテールに対して約26度回転することを明らかにしました^{*1}(図2

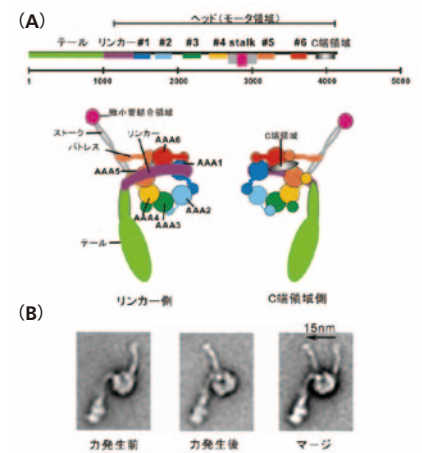


図2 力発生時の内腕ダイニンc構造変化。(A)内腕ダイニンc構造の模式図。(B)ネガティブ染色電子顕微鏡法によって明らかになったダイニンヘッドの回転。

(注) 力発生: ATP加水分解反応とカップルして微小管との結合が離れおよび構造変化が起こり、ダイニンは微小管上を進みます。ATP分解産物のADPとリン酸を結合したダイニンが微小管と相互作用すると、ADPとリン酸を放出すると同時に微小管と強く結合、そしてダイニンが大きく構造変化してダイニンは力発生します。

(B))。

ダイニン構造変化の3D解析

ネガティブ染色電子顕微鏡法は、重金属でタンパク質分子を染色するため、コントラスト比の高い分子像を得ることができます。しかし、試料を乾燥して電子顕微鏡観察するので、試料が変形する可能性があります。そこで、より自然に近い構造を知るため、染色していない試料を急速凍結することにより氷包埋(こおりほうまい)し、水溶液中の構造を保ったまま液体窒素温度で観察するクライオ電子顕微鏡法が使われます。

その氷包埋試料を±60度、2度刻みで傾斜させながら電子顕微鏡像を取得し、3D像を再構成するクライオ電子線トモグラフィ技術を使い、鞭毛内でのダイニン力発生時の構造変化を観察することに成功しました^{※2}(図3)。その結果、ネガティブ染色電子顕微鏡法で観察されたように、鞭毛内でダイニンはテールに対してヘッドが回転することが確認されました。ところが、それまでレバーアームをスウィングさせるようにストロークを使いその先に結合した微小管に力を伝えると考えられていましたが、そのような動きは見られず、力発生前後で微小管上を平行に約8nm移動していました。結論として、鞭毛内でダイニンは、ヘッドが回転しながらストロークを巻き取るように動き、まるでウィンチのようにはたらくことが分かりました(図3(C))。

同じ場面を60回以上撮影するクライオ電子線トモグラフィでは、試

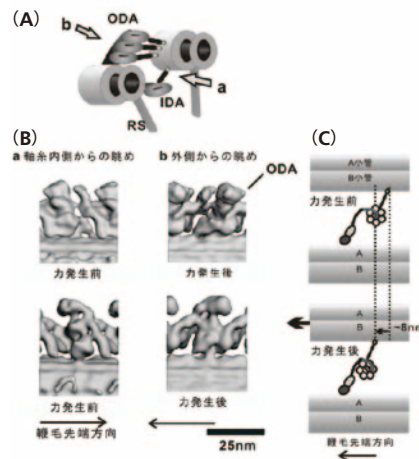


図3 体内における鞭毛ダイニンの構造変化。(A)に眺めた方向を示した。(B)は力発生前後の外腕、ダイニンのトモグラム。(C)は鞭毛軸系上におけるダイニンヘッドの動き。

料損失を防ぐために電子線照射量を低くします。そのため、解像度の点でやや劣ります。そこで今回、1場面、1~2枚、高電子線量で撮影した多数のダイニンc分子像を使い、それぞれの像の形状の関連から投影角度を決定し、ダイニンcヘッドの詳細な3D構造を再構成しました。その結果、ダイニンcの3D構造を約2nmの分解能で再構成することに成功しました^{※3}(図4)。

リンカーは力発生前では位置が一定でないため、平均像がかすれて消えていました。しかしながら、リンカーの存在確率の高い場所を求めると、リンカーがAAA1近くで屈曲してリンカーの先を大きく動かす様子がわかります(図4(B))。力発生後には、リンカーがAAAリングを横断する像がはっきり観察できます。力発生後では、リンカーとテールの継ぎ目付近とAAA4ドメインとの結合が示唆されました(図4赤矢印)。力発生前にはそのような結合は見られず、かわりにリンカーの起点付近でAAA2ドメインと相互作用が示唆され(図4青矢印)、力発生時にリンカーとAAAリングとの

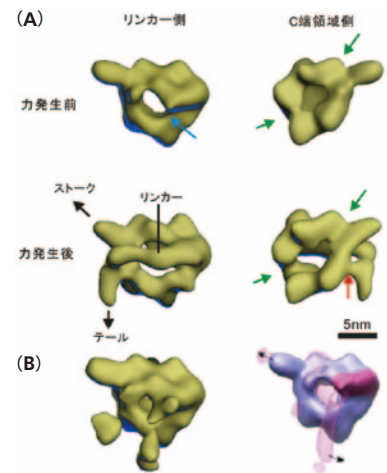


図4 内腕ダイニンcヘッド構造の3D再構成。(A)は力発生前後のダイニンcヘッドの構造。(B)は力発生前の状態のリンカーの位置。左が閾値を下げた像で、右が画像分散よりもめたリンカーの位置を示す。

相互作用が組み変わることが示唆されました。また、AAAリングの形態の変化も観察できました。力発生後と比較して力発生前はコンパクトで、力発生後に見られるAAA1とAAA2、AAA5とAAA6の2つの隙間が力発生前には見られませんでした(図4緑矢印)。

このように、力発生時のダイニンヘッドの立体的な形態変化が明らかになりました。特にリンカーは力発生に大きく関与するので、その動きが明らかになったことは、意義が大きいと考えられます。

研究の展望

最近、力発生後の細胞質ダイニンの結晶構造が決定され、ダイニンの構造変化を原子座標のレベルで議論することが可能になってきています。しかし、力発生前の状態ではテール位置は一定でないため、結晶化はかなり困難であると予想されます。クライオ電子顕微鏡法観察と合わせることで、ダイニンの力発生機構の理解がより深まると期待されます。

※1 Nature 421, 715-718 (2003)

※2 Nat. Struct. Mol. Biol. 17, 761-767. (2010)

※3 Structure. 20, 1670-1680. (2012)

TOPICS

報道発表「超小型テラヘルツ波プローブの開発に成功」

超高周波 ICT 研究室はスタック電子株式会社と共同で、テラヘルツ波技術分野において、超小型テラヘルツ波プローブの開発に世界で初めて成功しました。この小型プローブの開発により、従来のテラヘルツ波検出システムに比べて大幅な小型化を実現しました。

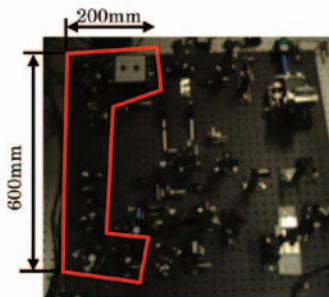
近年、非破壊・非接触測定が可能なテラヘルツ波を用いた分光技術が注目されています。従来のテラヘルツ波計測システムは非常に大型であったため、測定環境が整備された実験室でのみ行われていました。本プローブの実用化により、作業現場での測定や今まで測定ができなかった場所での測定が可能になります。さらに、小型化されたことで、測定したい箇所の直近までプローブを近付ける

ことができ、余計な光学系を介さずに測定ができるため、空間分解能の向上も期待されます。

今後、さらにセンサの高感度化・広帯域化を行うとともに、当機構で開発した超短パルス光源を用いたテラヘルツ波源と組み合わせることにより、テラヘルツ分光システムの構築を目指します。また、今回開発したテラヘルツ波プローブは超小型であるため、ロボットアームに搭載したり、一列に多数並べてリニアアレイセンサを構成することにより、遠隔での測定や広範囲の測定、製造ラインでの検査への応用が期待されます。

従来のテラヘルツ波の検出系

赤枠で囲んだ部分でテラヘルツ波の検出を行っている。



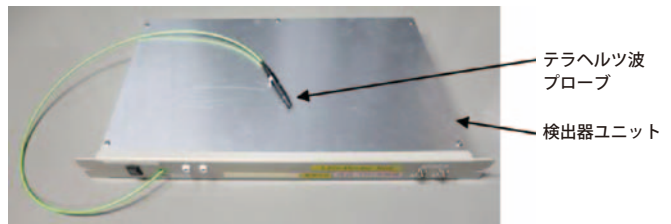
今回開発した超小型テラヘルツ波プローブ

直径 10mm、長さ 60mm のペン型 (1 円玉と比較)



今回開発したテラヘルツ波検出システム

テラヘルツ波プローブと検出器ユニットにより構成され、検出器ユニットには、主に光学素子と光検出器が内蔵されている。



詳細 URL : <http://www.nict.go.jp/press/2012/09/24-1.html>

「第 5 回 未来 ICT 研究所 研究交流会」開催 (第 1 回 ユニバーサルコミュニケーション研究所 合同研究交流会)

7 月 19・20 日の 2 日間、未来 ICT 研究所とユニバーサルコミュニケーション研究所は、機構役職員の研究交流・相互理解を促進し新たな研究シーズ／連携を創出することを目的とした合同研究交流会を開催しました。複数の研究所が合同で研究交流会を開催するのは初の試みです。ポスター総数は 112 点、参加者総数は 216 名を数えました。



閉会の挨拶 (宮原理事長)

会場では、研究所 / 部門の壁を越えた議論が盛んに行われました。超臨場感と脳情報通信の分野を越えた議論からは、新たな共同研究の可能性も生まれました。今回得られた知見を今後に活かし、また、このような機会を広げることで、新たな連携の発掘と発展を目指す方針です。



口頭発表会場の様子



ポスター発表の様子

「未来 ICT 研究所施設一般公開 2012」開催 ～情報通信の未来を体感しよう!!～

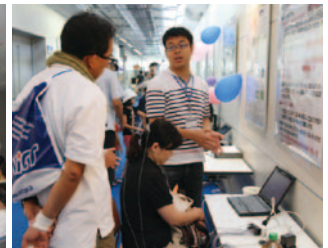
未来 ICT 研究所 (神戸) では、日ごろの研究活動の紹介、近隣の方々との交流、科学技術に興味を持っていただくことを目的として、毎年夏に施設の一般公開を開催しています。本年は 7 月 28 日 (土) に開催しました。当日は晴天に恵まれ、597 名の来場者がありました。

各研究グループのブースでは、趣向を凝らした体験型の展示を行いました。また、今回で 5 回目となる一般向け研究講演会では、ナノ・バイオ・脳の研究分野の紹介から最先端研究の報告まで、身近な事例を用いて解説しました。午前・午後の 2 回の講演とも会場は満席となり、講演後の質疑応答では、和やかな雰囲気の中、積極的な質問が行われ、講演とともに研究者との直接の対話を楽しんでいただきました。

未来 ICT 研究所では、来年夏にも一般公開を開催する予定です。またのお越しを心からお待ちしています。



講演会会場の様子



プロジェクトブースの様子。脳波を測り脳の状態を知る実験。

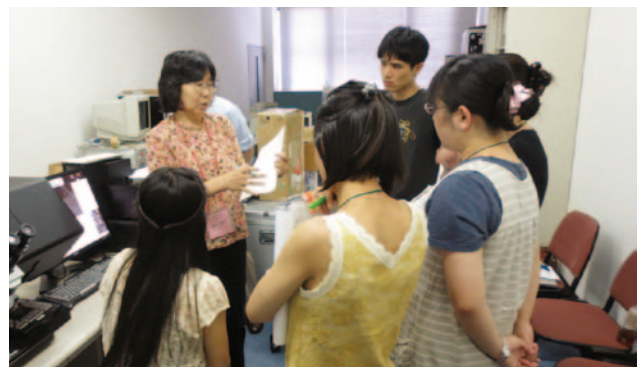
「第 19 回 細胞生物学ワークショップ」開催

バイオ ICT 研究室は、未来 ICT 研究所 (神戸) において 8 月 6 ～ 11 日の 6 日間、「第 19 回細胞生物学ワークショップ」(主催: NICT、大阪大学大学院、北海道大学) を開催しました。本ワークショップは、若手研究者のバイオイメージング技術修得の促進を目的としており、毎年 8 月に基礎～中級コースを未来 ICT 研究所で、9 月に中級～上級コースを北海道大学で行っています。今回は、全国から選抜した大学院生と若手研究者を合わせて 19 名が参加しました。

講師は、平岡泰主管研究員、原口徳子上席研究員を含めた大学や企業の研究者・技術者など約 60 名。

参加者は最先端の蛍光顕微鏡装置を実際に使用して、細胞内の生体分子のダイナミクスを解析するために必要な蛍光顕微鏡の基礎と方法論を、講義・実習を通して学びました。

人材育成の観点から、研究成果の社会への還元と関連研究分野への貢献として、今後もこのワークショップを継続して実施していく予定です。



実習の様子



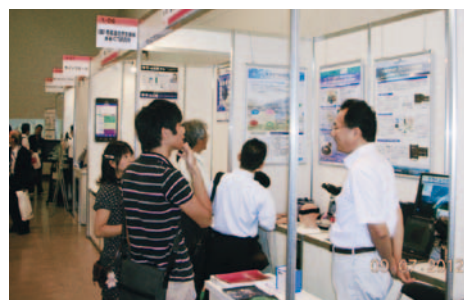
講義の様子

「国際フロンティア産業メッセ 2012」に出展

2012 年 9 月 6 日 (木)、7 日 (金) の 2 日間、神戸国際展示場において開催された「国際フロンティア産業メッセ 2012」(主催: 兵庫県ほか) に出展・展示を行いました。2 日間の来場者数は約 1 万 5000 人。

当機構のブースでは、ワイヤレス脳波計による日常環境下での脳幹部活動の計測を行なったほか、テラヘルツカメラと光ナノアンテナの実機を展示しました。研究成果、アウトカム、研究所紹介などをパネルや実機で紹介するとともに、研究担当者がブース内で説明を行い、情報発信と技術交流を行いました。

未来 ICT 研究所は、今後も本展示会を通じて、地域における情報発信と技術交流を進めていきます。



NICT 展示ブースの様子

展示内容: ワイヤレス脳波計 (実機展示)、光ナノアンテナ (実機展示)、テラヘルツカメラ (実機展示)、未来 ICT 研究所の紹介

未来 ICT 研究所 STAFF 総覧

研究所付	大岩 和弘	研究所長	理学博士	
	竇迫 巖	副研究所長/室長	博士(理学)	
	王 鎮	主管研究員	工学博士	
	柳田 敏雄	主管研究員	博士(工学)	
	平岡 泰	主管研究員	理学博士	
	原口 徳子	上席研究員	医学博士	
	韓 太舞	R&Dアドバイザー	博士(工学)	
	小川 博世	客員研究員	工学博士	
	村田 勉	主任研究員	博士(薬学)	
	企画室 (神戸)	久保田 徹	室長	博士(工学)
		澤井 秀文	総括主任研究員	工学博士
		宮内 哲	総括主任研究員	医学博士
		兵頭 政春	専門推進員	博士(工学)
		金釘 敏	グループリーダー	—
		五十川 知子	主任	—
黒田 康徳		一般職員	—	
片桐 祥雅		主任研究員	工学博士	
寒 重之		特別研究員	博士(学術)	
猪木 誠二		有期技術員	博士(工学)	
鳥居 信夫		有期技術員	博士(医学)	
大山 良多		有期技術員	—	
高橋 恵子		有期技術員	—	
井上 孝弘		有期技術員	—	
相田 有実		有期補助員	—	
企画室 (小金井)	小倉 基志	主幹	—	
	秋葉 誠	専門推進員	理学博士	
	広瀬 信光	専門推進員	博士(工学)	
	井口 政昭	有期技術員	—	
	鈴木 与志雄	有期技術員	—	
	ナノ ICT 研究室	大友 明	室長	Ph.D.
		寺井 弘高	研究マネージャー	博士(工学)
		田中 秀吉	研究マネージャー/専門推進員	博士(物理学)
		照井 通文	主任研究員/専門推進員	博士(理学)
		井上 振一郎	主任研究員	博士(工学)
		笠井 克幸	主任研究員	博士(工学)
		川上 彰	主任研究員	博士(工学)
		三木 茂人	主任研究員	博士(工学)
		山田 俊樹	主任研究員	博士(工学)
		山下 太郎	研究員	博士(理学)
梶 貴博		研究員	博士(工学)	
梶野 顕明		研究員	博士(工学)	
丘 俊		研究員	Ph.D.	
牧瀬 圭正		研究員	博士(理学)	
水沼 達郎		研究員	博士(理学)	
瀧 直樹		特別研究員	—	
松田 真生		特別研究員	博士(理学)	
青木 勲		有期技術員	—	
今村 三郎		有期技術員	工学博士	
上田 里永子		有期技術員	—	
富成 征樹		有期技術員	—	
三木 秀樹		短時間技術員	薬学博士	
バイオ ICT 研究室		小嶋 寛明	室長	博士(工学)
		小林 昇平	主任研究員	博士(工学)
		楠原 齊	主任研究員	理学博士
		田中 裕人	主任研究員	理学博士
		近重 裕次	主任研究員	博士(理学)
		丁 大樹	主任研究員	博士(理学)
		山田 章	主任研究員/専門推進員	理学博士
		岩本 政明	主任研究員	博士(理学)
	小川 英知	主任研究員	博士(バイオサイエンス)	
	平林 美樹	主任研究員	博士(工学)	
	清水 洋輔	研究員	博士(農学)	
	西浦 昌哉	研究員	博士(学術)	
	古田 茜	研究員	博士(理学)	
	古田 健也	研究員	博士(学術)	
	松田 厚志	研究員	博士(理学)	
	山本 孝治	研究員	博士(理学)	
	岡正 華澄	有期技術員	—	
	小坂田 裕子	有期技術員	—	
	穂谷 知子	有期技術員	—	
	荒神 尚子	有期技術員	—	
	堤 千尋	有期技術員	—	
	森 知栄	有期技術員	—	
	吉越 麻喜	有期技術員	—	
	長瀬 有紀	有期補助員	—	
	福田 紀子	有期補助員	—	
	樋口 美香	有期補助員	—	
	高村 佳美	有期補助員	—	

脳情報通信 研究室	梅原 広明	室長	博士(理学)
	井原 綾	主任研究員	博士(保健学)
	加藤 誠	主任研究員	博士(医学)
	成瀬 康	主任研究員	博士(科学)
	藤巻 則夫	主任研究員	工学博士
	Peper Ferdinand	主任研究員	Ph.D.
	Leibnitz Kenji	主任研究員	理学博士
	劉 国相	主任研究員	博士(工学)
	安藤 博士	主任研究員	博士(工学)
	黄田 育宏	主任研究員	博士(理学)
	下川 哲也	主任研究員	博士(工学)
	鈴木 隆文	主任研究員	博士(工学)
	鈴木 秀明	主任研究員	理学博士・博士(情報学)
	春野 雅彦	主任研究員	博士(工学)
	山本 知幸	主任研究員	博士(学術)
	劉 健勳	主任研究員	工学博士・博士(情報学)
	真 高志	研究員	博士(工学)
	篠崎 隆志	研究員	博士(科学)
	丹羽 真隆	研究員	博士(情報科学)
	Hanay Yusuf Sinan	研究員	Ph.D. (Electrical and Computer Engineering)
	松本 敦	研究員	博士(心理学)
	森戸 勇介	研究員	博士(理学)
	渡邊 言也	研究員	博士(神経科学)
	早川 友恵	招聘専門員	博士(心理学)
	真 深 歩	招聘専門員	博士(工学)
	瀧山 健	特別研究員	—
	糸井 誠司	有期技術員	—
	野界 武史	有期技術員	博士(工学)
	植田 智洋子	有期補助員	—
	麻田 美由紀	有期補助員	—
今水 寛	副室長	博士(心理学)	
内藤 栄一	研究マネージャー	博士(人間・環境学)	
Benjamin John SEYMOUR	特別招聘研究員	Ph.D. (Neurological Sciences)	
杉本 徳和	研究員	博士(工学)	
水口 暢章	研究員	—	
Ganesh Gowrishankar	専門研究員	Ph.D.	
吉岡 利福	専門研究員	—	
山岸 典子	短時間専門研究員	Ph.D.	
玄 相良	招聘専門員	博士(工学)	
池上 剛	専門調査員	博士(教育学)	
中野 直	専門調査員	—	
古川 友香	専門調査員	—	
蔡 暢	有期補助員	博士(工学)	
Matthew Joseph de Brecht	有期補助員	博士(情報学)	
眞 道 巖	副研究所長/室長	博士(理学)	
笠松 章史	研究マネージャー	博士(工学)	
関根 徳彦	主任研究員	博士(工学)	
東 隆 正高	主任研究員	博士(工学)	
安田 浩朗	主任研究員	博士(工学)	
小川 洋	主任研究員	博士(工学)	
Mikhail A Patrashin	主任研究員	博士(工学)	
諸橋 功	主任研究員	博士(工学)	
酒瀬川 洋平	研究員	博士(工学)	
浜崎 淳一	研究員	博士(理学)	
山下 良美	専門研究員	—	
遠藤 聡	特別研究員	理学博士	
大島 孝仁	特別研究員	博士(工学)	
岸川 諒子	特別研究員	—	
岸本 直	特別研究員	博士(理学)	
佐々木 公平	特別研究員	—	
原 紳介	特別研究員	博士(理学)	
藤代 博記	特別研究員	博士(工学)	
堀部 雅弘	特別研究員	博士(工学)	
松井 敬明	特別研究員	—	
三村 高志	特別研究員	工学博士	
杉浦 洋平	短時間補助員	—	
佐々木 雅英	室長	博士(理学)	
早坂 和弘	研究マネージャー	博士(理学)	
武岡 正裕	主任研究員	博士(工学)	
藤原 幹生	主任研究員	博士(理学)	
和久井 健太郎	研究員	博士(工学)	
金 鋭博	研究員	博士(工学)	
Hugo Benichi	研究員	博士(工学)	
玉木 潔	特別研究員	博士(理学)	
衛藤 雄二郎	特別研究員	博士(理学)	
伊藤 寿之	有期技術員	博士(地球環境科学)	
佐々木 悦郎	有期技術員	—	

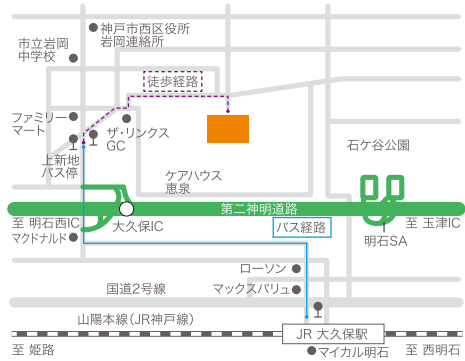
超高周波 ICT 研究室 (小金井)

量子 ICT 研究室 (小金井)

(2012年9月1日現在)



独立行政法人 情報通信研究機構
未来 ICT 研究所
 〒 651-2492 兵庫県神戸市西区岩岡町岩岡 588-2
 TEL:078-969-2100 FAX:078-969-2200
 〒 184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1
 TEL:042-327-7429 FAX:042-327-6961
 E-mail:karc@ml.nict.go.jp
 http://www.nict.go.jp/advanced_ict



兵庫県神戸市
 未来 ICT 研究所への
 アクセス