

# KARCFRONT

未来 ICT 研究所ジャーナル

Vol. **27**  
2013  
AUTUMN

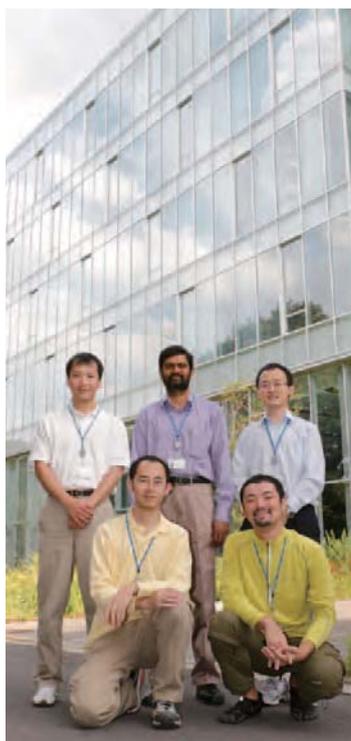
特集：NICT フェローに聞く

鞭毛・繊毛の華麗な動きに魅せられて

特集：外国人研究者に聞く（座談会）

外国人研究者から見た未来 ICT 研究所





NICT フェローに聞く ..... 3



鞭毛運動の再構築を目指す

### 鞭毛・繊毛の 華麗な動きに魅せられて

情報通信研究機構フェロー

主管研究員 大岩和弘 理学博士

特集：外国人研究者に聞く（座談会） ..... 8



### 外国人研究者から見た 未来 ICT 研究所

丘 偉 研究員

ダイワシガマニ・キルシナムルティ 主任研究員

金 鋭博 研究員

ワン マンホイ 研究員

ミハイル・パトラシン 主任研究員

TOPICS ..... 14

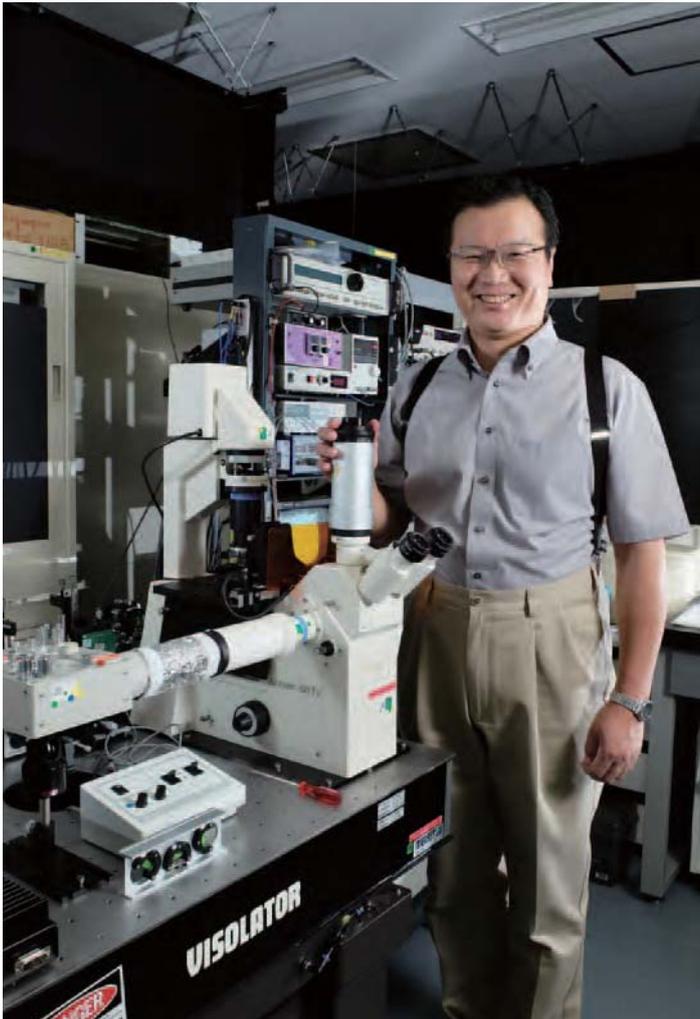
上海微系統情報技術研究所 (SIMIT) と「ジョイント研究プログラムに関する覚書」を締結／関西3拠点合同研究交流会を開催／未来 ICT 研究所 2013 施設一般公開を開催／報道発表：“酸化ガリウム (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) MOS トランジスタ” を世界で初めて実現！～日本発、“革新的次世代半導体パワーデバイス” の実用化に道～／報道発表：“量子を使い光信号を遠隔地点で増幅・再生”～量子通信を長距離化する新しい「中継増幅技術」の実証に成功～／受賞報告——東脇正高総括主任研究員が【企業・産学部門】第 27 回独創性を拓く先端技術大賞特別賞、石井智ナノ ICT 研究室研究員が【学生部門】第 27 回独創性を拓く先端技術大賞フジテレビジョン賞

未来 ICT 研究所 STAFF 総覧 ..... 16

鞭毛運動の再構築を目指す

## 鞭毛・繊毛の華麗な動きに魅せられて

私たちの体を作っている細胞をはじめ、原生動物から哺乳類、昆虫まで多くの細胞は繊毛・鞭毛と呼ばれる細胞小器官を持っています。この繊毛・鞭毛を長年にわたって研究し、今年4月からNICTフェローになられた大岩主管研究員に、これまでの研究成果と今後の展望を述べていただきました。



### はじめに

ゾウリムシの“毛”とか精子の“しっぽ”と俗に呼ばれる細胞小器官、繊毛・鞭毛が私の研究対象です。この細胞小器官は、細胞が地球上に出現したのとはほぼ同時期に細胞が獲得したもので、私たちの体を作っている多くの組織の細胞が、この細胞小器官を持っています。この繊毛・鞭毛の機能不全は、様々な疾病に関与していることも明らかになってきました。とくに医学分野では、繊毛症として重要な研究対象になっています。

### マイクロマシン「繊毛・鞭毛」

原生動物から哺乳類、昆虫まで、繊毛・鞭毛の基本構造は共通です。運動性の鞭毛は9本の周辺微小管が

情報通信研究機構フェロー  
未来ICT研究所主管研究員

## 大岩和弘

Oiwa Kazuhiro

理学博士

### 略歴

東京大学大学院理学系研究科博士課程修了(理学博士)。帝京大学医学部講師を経て、1993年通信総合研究所(現NICT)に入所。主任研究員、生体物性研究室長、バイオICTグループリーダー、未来ICT研究所所長などを経て現職。平成12年度から兵庫県立大学連携大学院教授、平成24年度から博士課程教育リーディングプログラム担当。第23回大阪科学賞(平成17年度)、平成21年科学研究費補助金優秀審査員表彰。

### 研究分野

タンパク質モーター、特にダイニンの単一分子計測や構造解析、および分子通信技術の研究開発。

### 近況

マネジメント職から研究現場の第一線に復帰、視力の衰えを実感しながら、卒研究生と実験装置の構築に忙しい日々を過ごしています。

2本の中心微小管を取り巻く「9 + 2」構造と呼ばれる基本構造を持っています。この骨格構造は軸系と呼ばれ、およそ250種類のタンパク質から構成されています。

鞭毛の屈曲運動を引き起こすのは、周辺微小管の一方の側面に規則的に並んでいるダイニン腕と呼ぶ構造が、ATP（アデノシン三リン酸）の加水分解と共役した大きな構造変化を起こすことで、隣り合う微小管との間に“ずり”を生じ、これが鞭毛の屈曲になります。このダイニン腕を構成している主要なタンパク質がタンパク質モーター・ダイニンです。

私たちは、スイスのポールシェラー研究所の石川尚先生と協力して、クライオ電子線トモグラフィを使って鞭毛軸系の構造を解析しました。直径150nmの軸系の中には構成タンパク質が高い密度で詰め込まれ、しかも周期的配列が整然と保たれていました。さらに、X線による軸系の線維回折により、ダイニン腕が微小管の構造周期8.3nmの倍数で周辺微小管上に配列していることも明らかにしています。整然とした

その構造をみると、軸系は細胞が持つマイクロマシンといえるでしょう(図1)。

### 鞭毛運動の主役、ダイニンの構造

繊毛・鞭毛の原動力は、周辺微小管上のダイニンがATP加水分解に伴って大きな構造変化を示すことで生じます。力の大きさの単位はcgs単位系ではdyn (dyne、ダイン)です。dynはpowerを意味するギリシャ語に由来し、ダイニンはdyne + in (タンパク質名に付ける接尾辞)が示すように、パワーを発生するタンパク質です。

私たちは、このタンパク質を緑藻の一種のクラミドモナスから抽出しています。60リットルの培養液で1000億個の細胞を培養し、遠心操作で細胞を回収してから鞭毛を単離します。さらにそこから高塩濃度溶液でダイニンを抽出します。その収量はわずか10-30μgしかありません。それでも電子顕微鏡観察や単分子計測には十分な量です。

タンパク質の分子構造変化を調べる最も強力な方法のひとつが電子顕

微鏡による観察です。しかし、タンパク質は水素・炭素・窒素・酸素などの原子が主成分なので、電子密度は高くはありません。電子線が素通りしてしまうので、タンパク質だけではコントラストの高い電子顕微鏡像は得られません。そこで、砂浜に足跡をつけるのに似た手法で像のコントラストを向上させます。重金属原子を砂に見立て、観察試料支持膜の上に砂浜を作ります。そこにダイニン分子を押し付けると、ダイニン分子表面の凸凹が砂の上に残ります。この凸凹を電子顕微鏡で観察します。この手法を陰染色法と呼びます。英国リーズ大学のバージェス(Burgess)博士と私たちは、陰染色法による電子顕微鏡像をさらに画像処理して、ダイニン分子の構造を2nmの精度で明らかにしました。

私たちが最も興味を持っているのは、ATPの加水分解前後にダイニン分子がどのような構造変化を示すかということです。パワーストロークを行う前の状態とパワーストローク後の状態を実験的に作り出して、それぞれの状態の分子像を詳細に比較検討した結果、分子全体で約15nmにも及ぶ大きな構造変化がダイニンの分子内で生じていることを明らかにできました。この結果をもとに、私たちはダイニンのパワーストロークモデルを提唱しました。

次に、ダイニン分子の3次元情報を得るために、試料を氷埋して観察するクライオ電子顕微鏡観察を行いました。その際、この分野で実績のあるリーズ大学の研究グループの力

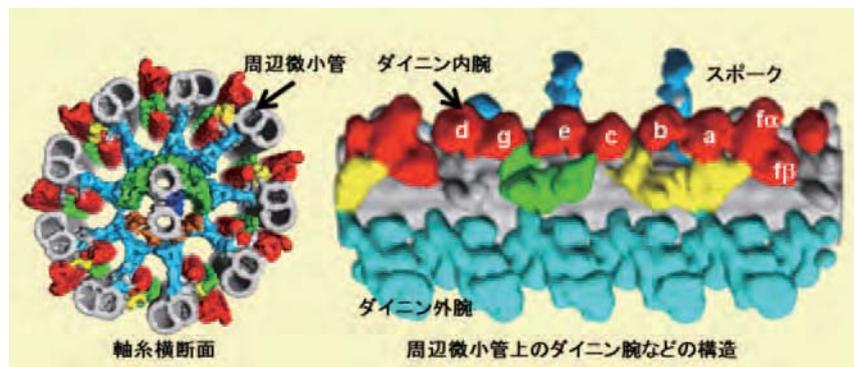


図1 電子線トモグラフィが明らかにした軸系の構造 (ポールシェラー研究所・石川尚博士の好意による)。

を再び借りることにしました。しかし、この研究は苦勞の連続でした。電子線は氷埋試料を通り抜けてしまうため、ダイニン分子の裏と表の判別がたいへん難しいのです。最初の分子モデルの構築を間違えると、実物のミラーイメージ（鏡像）の3次元像が得られてしまう可能性があります。注意深く解析を進め、早い時期に、ATPが無い状態のダイニン分子の構造を明らかにすることができました。

しかし、パワーストローク前の状態であるダイニン分子の構造解析は困難を極めました。当初はKARCで調整した試料をドライアイスで保存し、これを英国まで空輸していたのですが、幾度となく試料が凝集体を作ってしまったのです。「保冷状態が悪いのではないか」との議論から、あらためて液体窒素に試料を入れた状態で英国まで空輸することにしました。簡単に沸騰し揮発する液体窒素を航空機で輸送してもらうにはコンテナが問題でした。探してみるとこのようなコンテナ技術は世の中に存在していたのです。空輸の問題は解決しました。しかし、凝集体形成の問題は未解決でした。「試料の扱いが問題」となって、ダイニンに精通しているバイオICT研究室の榊原齊さんが長期間リーズ大学に出張して、その作業を指導したこともあります。

プロジェクト開始から5年以上を費やしましたが、昨年ようやくパワーストローク前のダイニン分子の全体像が明らかになりました。この

間、競争していた他の研究グループによってダイニン分子のモータ領域の結晶構造が発表されてしまい、先取権の面では悔しい思いもしました。しかし、未だに結晶構造が得られていないパワーストローク前のダイニン分子全体像を3次元的に捉えることができたこの成果は、ダイニンの運動機構解明において重要な位置を占めています（図2、図3）。

### ダイニンの機能

ダイニン分子の機能解析では、*in vitro* 機能再構築技術が力を発揮します。この技術は、精製したタンパク質要素だけを使って生体機能を試験管内で再構築するものです。細胞や細胞小器官（オルガネラ）でのタンパク質同士の相互作用を1つの劇とみなすと、たくさんの登場人物（タンパク質）から少数選び出して、別な場所で劇を演じてもらうようなものです。選んだ登場人物による劇が元の劇のストーリーを再現できていれば、選び出した登場人物たちがこの劇の本質であることがわかります。登場人物1人ひとりの演技をじっくりとみることで、その登場人物の役割や癖が分かります。これは、単一分子計測実験に相当します。

クラミドモナスの鞭毛軸糸では、ダイニン外腕には3種類のダイニン重鎖が含まれ、ダイニン内腕には重鎖1つの内腕ダイニン6種類と、異なる2種類の重鎖を持つ内腕ダイニン1種類が含まれます。それぞれのダイニンは鞭毛運動において異なる役割を果たします。バイオICT研

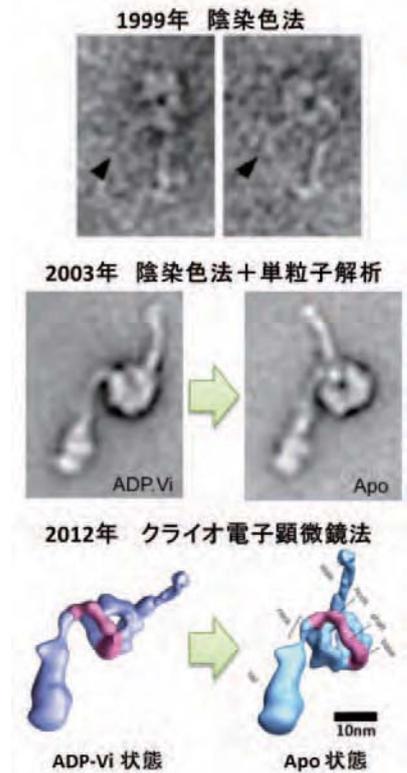


図2 ダイニンの構造解析の進展。陰染色法によって観察したダイニン分子（上段）。陰染色法と単粒子解析を組み合わせたダイニン分子の観察像（中段）。クライオ電子顕微鏡によるダイニン分子全体の3D像（下段）。

究室長の小嶋寛明さんを中心にして、私たちは7種類の内腕ダイニンについて微小管滑り速度、発生する力、微小管上を動く際の歩幅などを計測してきました。その結果、軸糸ダイニンがたった1分子でも微小管上を8nmのステップ幅で連続的に運動できること、自分自身にかかる力学的な負荷が大きくなると微小管から確率的に解離しやすくなることなどを、世界に先駆けて示すことができました。

また、微小管を滑らせる速度に10倍ほどの違いがある2種類のダイニンを選び、*in vitro* 運動再構成実験で共存させて、そこに生じる協働性を評価する実験を行いました。兵庫県立大学の大学院生だった小谷則遠さんの仕事です。

鞭毛の中では異なる運動特性を持つダイニン種が1本の周辺微小管上に共存しています。遅いダイニンが速いダイニンの運動の抵抗になりかねないので、一見、非効率に見えます。しかし、*in vitro*運動再構成実験で調べたところ、微小管の滑り速度が一定の値を超えて速くなると、遅いダイニンの内部抵抗は急に低下しました。これは、遅いダイニンの微小管からの解離が速度依存的・負荷依存的に促進されていることを示しています。軸糸のダイニン種には、鞭毛運動中での働く場面によって、それぞれの最適な機能が発揮されるように自己調整する仕組みが備わっているのです。

### 顕微鏡下の「ナスカの地上絵」

タンパク質モータの運動を再現する*in vitro*運動再構成実験は、機能解析のためだけではなくタンパク質

モータの運動や力を取り出すための基礎技術として使うことができます。力や運動を効率よく取り出すために、私たちは運動方向を人為的に決める方法(制御)を開発してきました。現広島大学の鈴木仁さんやナノICT研究室の川上彰さんとの仕事です。

フォトレジスト膜を用いてガラス基板表面にパターンを描き、そこにタンパク質モータを選択的に吸着させたり、立体的な壁として利用することで、タンパク質フィラメントの運動方向を制御できます。2000年前後に開発したこの技術は現在とても注目されており、論文の被引用件数が著しく伸びています。この技術はタンパク質モータの工学的応用の可能性を示しているからです。

生き物の特徴は自己組織化です。人為的に操作しなくても構造ができることに生き物らしさが現れます。システムの構成要素1つ1つは、シ

ステム全体の状態を知ることはありませんが、隣接した要素間の相互作用だけで高次構造や機能を創り出せるのです。このような自己組織的な挙動を見出す機会が訪れました。基板表面に固定化したダイニンの上を動く微小管が、衝突という相互作用によって自己組織的に大きな構造を創り出したのです。

通常の*in vitro*運動再構成実験では、1本1本の微小管の運動を観察するために、高い倍率の対物レンズを使います。その結果、一度に観察できる視野の大きさはせいぜい50-100 $\mu\text{m}$ 四方です。ある時、観察視野の中に微小管の束が飛び込んできました。何事かと驚き、顕微鏡ステージを動かしながらその後を追いかけてみたのです。すると、しばらく追跡していくと元の位置に戻ってきたではありませんか。この束は円軌道を描いて動いていたのです。低倍率で観察したところ、そこには微小管が描いた壮大な渦模様がありました(図4)。

微小管1本1本の動きに注意を向けすぎていたため、つまり道に転がっている石ころに集中しすぎたために、石ころが集団となって描いていた壮大なナスカの地上絵の存在に気が付かなかったようなものです。

逆説的ですが、この実験系の素晴らしいところは、個々の微小管の運動および衝突時の挙動を精密に解析できることです。このおかげで、現象の背景にある物理的要素を簡潔な数理モデルにすることができました。この数理モデルは、ネマティック



図3 ダイニン分子の模型の深化。陰染色像に基づく模型(左)、X線溶液散乱に基づく模型(中央)、クライオ電子顕微鏡像に基づく模型(右)。

ク相互作用と短時間の記憶（運動方向の偏り）を持つ能動的な粒子が多数存在する系として構築したもので、実験的に得られた微小管の相互作用とその運動特性の測定値をそのまま数理モデルに当てはめると、粒子が十分な数だけ集まると、運動様相の記憶が集団として増強され、空間サイズが1000倍も異なる秩序構造、渦列構造が現れることが分かったのです。数理モデル構築には、愛知教育大学の住野豊氏、東京大学の永井健氏、現・同志社大学の吉川研一氏、CEA-Saclayのユーグ・シャテ（Hugues Chaté）氏の先生方に協力をお願いしました。この実験系の発見とモデル化は、自己駆動粒子一般の集団運動を理解する上で重要なステップとなっています。

### 理解は創ることで進む

イタリアの哲学者ビコー（Giambattista Vico）は、*Verum esse ipsum factum*（the truth is in the made）という言葉を残しています。物理学者のファインマン（Richard P. Feynman）は物事の理解に関する考え方としてWhat I cannot create, I do not understand. と述べてVicoの言葉を換言しました。生命の理解を目指している生命科学は、生命そのものを創り出すことができるのでしょうか。理解は創ることで進むのです。世界中で生命を創る研究が始まっています。

ある種の細菌のDNAを、人工的に作ったDNAですべて置き換えて新たな生命を創り出す研究、微小な

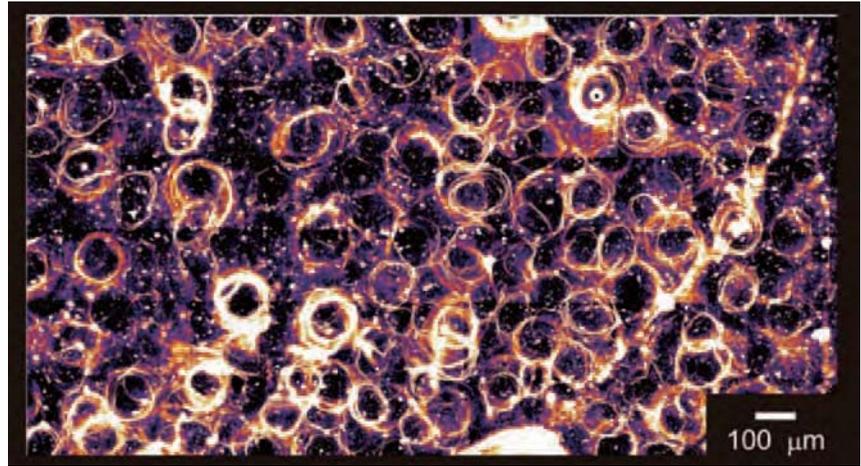


図4 微小管の自己組織化が作り出したメソスコピック渦の格子。

油滴に大腸菌から取り出した細胞質を打ち込み、大腸菌が再び油滴から生まれてくることをもくろんだ挑戦的な研究などがよく知られています。人工的に生命を創る研究は長く研究者の興味を引き付けてきましたが、技術の進歩によってこれが挑戦可能な時期に入ってきていると感じます。

一方で、生命機能の一部を創り出す研究は長い歴史を持っています。私たちが用いている*in vitro*運動再構成実験は、この源流となる技術です。グリセリンや界面活性剤で細胞膜を取り除いた筋線維や精子にATPを添加することで、収縮させたり遊泳させたりする脱膜モデルと呼ばれる技術があります。精製したタンパク質要素を試験管内で混ぜ合わせることでその生理学的機能を再構築する*in vitro*運動再構成実験がこれに続きます。これらは還元論的指向ですが、現在の研究はより複雑な秩序を作り出す方向です。

生命科学の研究課題は、要素還元論的研究の方向に加えて、これら要素の細胞内での振る舞いや、要素の集合体である細胞などの挙動を持つ複雑さを維持しながらも、物理的考

察の実証を可能とする簡潔性をもった実験系の開発になっています。これまでの生化学研究で仮定されてきた理想的条件（希薄溶液極限に基づく結合の簡単な描像）や反応環境の一樣性の仮定を緩めることによって、細胞機能をより実態に近い形で再現する、要素の組み合わせや構造による束縛、力学要素を取り込んだ高次の再構築が求められています。

鞭毛研究の集大成は、鞭毛運動の再構築です。上述の「生命を創り出す研究」の1つとして、このチャレンジに取り掛かる時期が来ています。これはバイオICT研究室が進めているバイオデバイス開発と同じ方向の研究です。生命機能を人工的に創り得たとき、その機能を理解したと言えるでしょう。また、その過程において得られる知見は広範囲の応用を可能とするでしょう。これから10年、私はこの課題に取り組んでみたいと思っています。

最後に、ここに挙げてきたダイニン研究の多くは、バイオICT研究室・榊原齊さんの貢献なくしては成し得なかったと思います。あらためて感謝します。

# 外国人研究者から見た 未来 ICT 研究所

未来 ICT 研究所には、さまざまな立場で研究する外国人研究者が数多くいます。外国人研究者たちは、どのようなきっかけで未来 ICT 研究所に来たのでしょうか？ どのような毎日を送っているのでしょうか？ 未来 ICT 研究所をどう見ているのでしょうか？ 外国人ならではの意見の数々をうかがいました。



後列左から 丘 偉 研究員、  
ダイワシガマニ・キルシナム  
ルティ主任研究員、金 鋭博  
研究員  
前列左から ワン マンホイ  
研究員、座談会をサポート  
してくれた上村崇史研究員

## 特集：外国人研究者に聞く（座談会）

**Q：**みなさんが未来ICT研究所に来た経緯と、現在の研究テーマを教えてください。

**丘：**私は北京工業大学を卒業後、アメリカのカンザス大学で博士号を取得し、2007年から未来ICT研究所のナノICT研究室に所属するようになりました。そこで研究を始めることになったのが量子コンピュータで、量子情報を扱うために必要な量子ビットを超伝導体でつくることでした。

量子コンピュータとは、量子の「重ね合わせ」という性質を用いるコンピュータです。磁石のSとNを用いて「0」か「1」を表す磁気ビットに比べると、量子ビットは、1ビットで「0」と「1」の2通りを同時に表すことができ、10ビットならば1024通りもの情報を表すことができます。このため、これまでのコンピュータよりもはるかに速く並列計算することができると期待されています。

**ワン：**私の研究分野はパワーエレクトロニクスです。パソコンのアダプタや太陽光発電、ハイブリッド自動車など、幅広い分野で応用が期待できるパワー半導体を開発しています。パワー半導体は、多くの電子製品の中で電気をオン・オフする、いわば「スイッチ」として用いられています。私は香港の高校を卒業してカリフォルニア大学サンタバーバラ校に進学し、博士号を取得しました。その当時はほかの研究をしていたのですが、カリフォルニア大学で東脇正高さん（現 総括主任研究員）に出会い、酸化ガリウムパワー半導体の潜在力

の高さに惚れ込んで研究テーマを変えました。そして、今年の5月に未来ICT研究所に来たのです。

**キルシナムルティ：**インドのチェンナイにあるアンナ大学で博士課程を終えた後、日本に来て13年以上の間、さまざまな研究機関で働きました。大阪大学の産業科学研究所では、朝日一教授の下、7、8年の間、化合物半導体のエピタキシャル成長の研究を行ってきました。朝日教授と同研究所の松本和彦教授に、東脇さんを紹介していただきました。

酸化ガリウムを使ったパワーデバイスという東脇さんの新しいアイデアと仕事にひかれ、酸化ガリウムからなる未来のパワーデバイスの仕事をするために彼のグループに参加しました。

**金：**私は量子ICT研究室の佐々木雅英さんのもとの、単一光子をつくる研究をしています。単一光子は、量子通信に必要なものです。

私は中国の華南師範大学の出身で、東北大学の枝松圭一先生の研究室で博士号を取り、2年前に未来ICT研

究所にやってきました。

**Q：**研究についてももう少し詳しく教えてください。どんな展望をもって研究を進めていますか？

**ワン：**従来のパワー半導体の材料といえばシリコンでした。シリコンは安価ですが、高い温度や高い電圧によってオフ状態が破れる際のしきい値が低いという問題があります。シリコンはすでに改良の余地がないほど材料性能が引き出されており、これ以上の進歩は限界を迎えつつあります。半導体を冷やすという方法もありますが、冷却コストがかかり、環境にもよくありません。

そこで、シリコンに代わる材料として、シリコンカーバイドや窒化ガリウムなどの材料が研究されるようになったのです。その次の世代の高性能な素材でありながらあまり研究されていなかった酸化ガリウムに着目し、実際にデバイス化できることを証明したのが東脇さんでした(図1)。

酸化ガリウムパワー半導体開発の中でも私自身が担当しているの

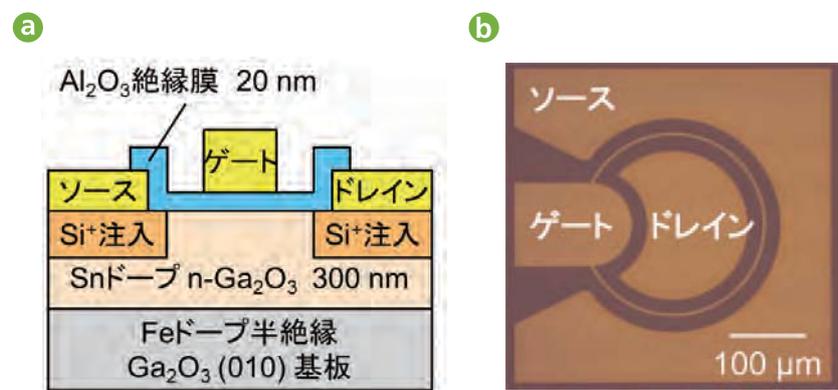


図1 酸化ガリウムを用いたMOSトランジスタの断面模式図(a)と光学顕微鏡写真(b)。このMOSトランジスタは、オン/オフ特性に優れ、耐圧が高く、オフ時のリーク電流も少ない。トピックス(15ページ)も参照。



## ダイワシガマニ・ キルシナムルティ

Daivasigamani Krishnamurthy  
超高周波ICT研究室主任研究員

### 略歴

インド・チェンナイのアンナ大学で博士号を取得。1999年に静岡大学サテライト・ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー・フェローとして来日。古河電工、大阪ガス、大阪大学産業科学研究所を経て、2012年より現職。



## 丘 偉

Qiu Wei  
ナノICT研究室研究員

### 略歴

中華人民共和国北京工業大学卒業。中国計量科学研究院に勤務した後、アメリカのカンザス大学研究助手となり、Ph.D.を取得。2007年より現職。

は、高電力に耐えることができる素子づくりです。シリコン半導体で蓄積されてきた研究をもとに、素子の耐圧化を進めています。私たちの研究は順調に進んでおり、これまでに改良が積み重ねられてきたシリコンパワー半導体よりも酸化ガリウムパワー半導体のほうが優れていることを証明していきたいとがんばっています。

**キルシナムルティ**：私は、酸化ガリウム基板を用いたデバイスの作製や特性評価に関わっており、充実した毎日を送っています。研究に夢中になって時間を忘れることもあります。酸化ガリウムはシリコンと同じように、融液成長法という方法で基板をつくることができます。このため、大きい基板を簡単に、しかも安いコストで得られるのが特徴です。すでに、株式会社タムラ製作所との共同研究により、一定量をつくれるようになりました。これは、他の次世代パワー半導体候補であるシリコンカーバイドや窒化ガリウムでは成功していないことです。酸化ガリウムのパワーデバイス開発はまだ始まったばかりですが、大きな成果を上げることができると思います。

しかし、酸化ガリウムはシリコンが窒化ガリウムに置き換わったさらに後の次々世代のパワー半導体材料なのです。私の研究では、酸化ガリウム基板の上に半導体材料を成長させる方法の開発を行う予定です。

現在、窒化ガリウムは、サファイア基板上に成長させていますが、この方法ではサファイア基板が絶縁的で

あるためLEDの発光特性が制限されてしまいます。半導体にもなり得る酸化ガリウム基板を用いれば、この問題を解決できます。安く大きな基板をつくることのできる酸化ガリウムであれば、価格を下げることもできるはず。さらに酸化ガリウム基板上に酸化半導体も成長できます。酸化ガリウム基板上への半導体材料の成長が、今後、スタンダードになることを期待しています。

**金**：通信技術で重要なのは、いかに正確に多くの情報を効率よく伝送するかと、いかに安全に盗聴されることなく情報を伝送するかです。この要求に応えるのが、量子光学を利用した量子通信です。これまで大きな数の素因数分解が暗号として使われてきましたが、丘さんのされているような研究が進み、量子コンピュータが開発されると、このような暗号は簡単に解かれてしまうと予想されています。ですから、量子コンピュータでさえ解読できない暗号が必要なのです。

そこで期待されているのが、量子の世界の物理法則を用いる量子通信です。量子の世界には不確定性原理といって、ある粒子の位置や速度といった物理量を2つ同時に観測できないという原則があります。この不確定性原理を利用すれば、ハッカーが侵入して、暗号鍵の情報を操作しようとするすると粒子の状態が即座に変わり、もう1つの物理量を観測できなくしてしまえるのです。これを応用すれば、ハッカーが侵入したことを必ずわかるようにしたり、盗聴や

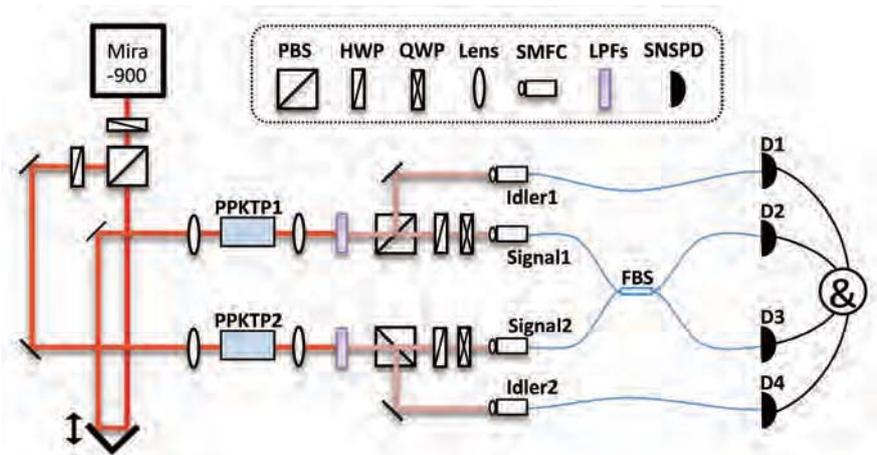


図2 単一光子をつくるための装置。金さんが他のメンバーとともに開発した。偏光ビームスプリッター（PBS）、半波長板（HWP）、1/4波長板（QWP）、シングルモードファイバーカプラー（SMFC）、長波長透過フィルター（LTP）、ファイバービームスプリッター（FBS）などからなる。輝度の高い光子源と超伝導ナノワイヤー単一光子検出器（SNSPD）を用いているのがポイントである。

データ改ざんを見破ることができたりするのです。

この量子通信では1粒1粒の光子に暗号鍵を載せて伝送する必要があるため、光子を1粒ずつ発射する単一光子源を開発しなければなりません。私の研究では、現在、なるべく高精度で高純度な光子を発生する装置を開発しています(図2)。毎日の研究は、たまに数学、たまに実験、たまにシミュレーションという感じ です。

**丘：**未来ICT研究所では、私が入所する5年前から、量子コンピュータを実現するために超伝導量子ビットの研究が行われていました。未来ICT研究所の窒化物超伝導材料技術は世界最高峰の実力があるので、私たちはこの技術を使って量子ビットのコヒーレンス時間の改善をめざしています。まず問題になるのは熱やノイズですが、これは適切な対策を施すことで対応でき、それほど問題ではないということがわかってきま

した。むしろ、根本的な問題は材料です。窒化物超伝導材料は現在広く使われているアルミニウムなどの単元素金属材料に比べて化学的に安定で表面酸化に対する耐性が高いという特長があります。これを超伝導量子ビットに応用することで、コヒーレンス時間を大幅に改善できるという期待があります。

さらに、量子ビットをコンピュータに使うには、量子の状態を変えずに輸送するネットワークも重要になります。将来は、その研究もしたいと考えています。

量子コンピュータ研究は、以前はとても注目を集めており、超伝導量子ビットの分野にも研究資金が潤沢に集まっていたのですが、コヒーレンス時間が思うように改善しないこともあって、一時のブームは過ぎ去りつつあります。しかし、地道な材料研究によりコヒーレンス時間の大幅な改善というブレークスルーを引き起こせば、また超伝導量子ビット



## ワンマンホイ

Wong Man Hoi

未来ICT研究所研究員

### 略歴

アメリカのコーネル大学を卒業後、カリフォルニア大学サンタバーバラ校に進学してPh.D.を取得。同校のプロジェクト研究員、セマテック(アメリカの官民共同による半導体製造技術研究組合)研究員を経て、2013年より現職。



## 金鋭博

Jin Ruibo

超高周波ICT研究室研究員

### 略歴

中華人民共和国河南師範大学卒業、華南師範大学修士課程修了。東北大学に進学して博士(工学)の学位を取得後、グローバルCOE博士研究員を経て、2012年4月より現職。

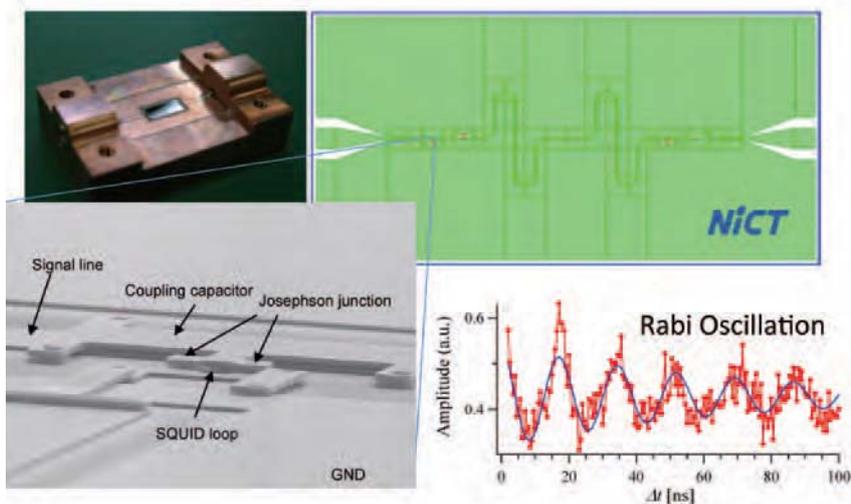


図3 丘さんたちが開発中の超伝導量子ビット。超伝導量子ビットは、インダクタ、キャパシタ、ジョセフソン接合からなる。マイクロ波伝送線路を用いたトランスモン量子ビットを超伝導共振器の中に4個閉じ込めている。

が大きな注目を浴びるのではないかと思います。その時に、大きな研究費の投入が起きることを期待しています。

**Q:** ご自分の国と日本の研究環境ややり方に違いはありますか？ 将来はどうしたいと考えていますか？

**金:** 研究環境は素晴らしいと思いま

す。ただ、仙台に住んでいたときは、中国人の仲間がいたし、下町のような暮らしやすいところにいたのですが、小金井に来てからは少し寂しくなっていました。私は任期付研究員の身なので、どこかの正規研究員になりたいと思っています。中国に戻れば、正規の研究員になれる可能性が高いのですが、こちらのよう

なよい研究所に入れるかどうかは難しいと思います。

**ワン:** 香港には理工系の大学がいくつもあり、世界に流出した優秀な科学者を呼び戻そうとしています。しかし、香港は研究よりも金融や貿易にプライドをもつ都市です。これに対して、日本とアメリカは技術力にとってもプライドをもっています。それを支えている人たちをこれまで見てきて、とても評価しているので、できればどちらかの国でしばらく研究を続けてから、香港に帰りたいと思っています。

**丘:** 中国で研究するのももちろん選択肢のうちの1つです。優秀な学生や政府からの潤沢な資金を確保することができます。今、中国は香港と同じように海外に流出した科学者を国内に呼び戻そうとしています。また、中国は国内の科学アカデミーに莫大な投資をし、学生や研究者を獲得することに力を入れています。

しかし、研究ではアメリカや日本、



座談会に出席できなかった  
パトラシンさんからの寄稿



ミハイル・パトラシン

Mikhail Patrashin

超高周波ICT研究室主任研究員

略歴

ロシアのモスクワ物理工科大学卒業、電波・電子技術研究所にて博士号取得。ロシア科学アカデミー宇宙研究所、郵政省通信総合研究所、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所、情報通信研究機構先端ICTデバイスグループを経て、2012年4月より現職。

私は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所で人工衛星用の赤外（テラヘルツ）検出器を開発していました。NICTに来てからは、テラヘルツイメージングと100GHzを超える周波数での高速通信のための新規デバイスを開発するという貴重な機会をいただいています。

NICTは情報通信技術分野で主要な研究所の1つであり、活気のある研究環境、最先端の設備と機器、日本内外の研究グループとの共同研究の機会に恵まれています。

研究では、テラヘルツおよびミリ波の部品や回路を半導体ナノ構造でつくり、テストしています。デバイスの材料は、分子線エピタキシーで成長させたIII-V化合物半導体です。最近、アンチモンを含むIII-V化合物半導体のユニークな性質を活かして、テラヘルツおよびミリ波の検出器を開発しました。この材料は、高周波数でエネルギー効率がよい電子・光学デバイスをつくるのに特に適しています。

NICTでの研究が完成した後も、高周波電子・光学デバイスのためにアンチモンを含む他の半導体ナノ構造の研究を続けたいと考えています。母国にも外国にもポストはありそうですが、しばらくは現在の研究プロジェクトの目標に向けて集中します。

ヨーロッパがトップを走っているため、私は成熟した技術を中国にもって帰ればと考えて、日本で研究を続けています。実は妻も日本で研究しています。私は神戸で、妻は埼玉なので、なかなかいっしょには過ごせないのですが。

**キルシナムルティ：**しばらくは日本に残りたいのですが、インドに帰り、小さなビジネスを興すか、研究で日本とコラボレートできることを探していきたいと思っています。

インドでは、上司に従うことが大切とされ、それは研究においても同じです。日本では、上司にも自由に

ものが言えるのが魅力的です。また、私のいる研究室では、企業や大学と連携して研究を進めていますが、このような共同研究もインドではあまり行われていないので、ぜひインドに伝えたいと思っています。インドの学生は優秀なのですが、現在はそれをうまく活かすことができていないので、日本の研究のよいところを持って帰って、インドの研究を発展させたいです。

私はこれまで最先端の研究に携わりたいと思ってきました。日本に来てそれを達成できたことに感謝しています。研究を通して、また学生た

ちと議論を重ねたことを含め、日本でのすべてのことが自分を成長させてくれたと思います。

●未来ICT研究所では、外国人研究者向けに日本語教室を開いています。そのときに顔を合わせることも多いという皆さんは、外国人どうしで支え合いながら、研究室に溶け込み、熱心に研究に取り組んでいます。日本での生活についての話や裏話ももっと聞きたかったのですが、研究の話がほとんどでした。未来ICT研究所の研究は、外国人研究者の皆さんによっても支えられているのです。

# TOPICS

## 上海微系統情報技術研究所 (SIMIT) と「ジョイント研究プログラムに関する覚書」を締結

中国科学院 (CAS) 上海微系統情報技術研究所 (SIMIT) と未来 ICT 研究所は、2013 年 7 月 22 日 SIMIT において、「ジョイント研究プログラムに関する覚書」を締結しました。

同覚書は、2013 年 1 月 17 日に未来 ICT 研究所と SIMIT の間で締結した、超伝導、バイオ、テラヘルツ等技術に重点をおいた「情報通信技術分野における研究協力に関する覚書 (MOU)」に基づき、超伝導研究分野を中心としたジョイント研究プログラムを進める内容です。超伝導研究分野においては、2013 年 1 月 31 日、2 月 1 日の 2 日間、「SIMIT-NICT Workshop」を開催し、より具体的な研究連携を進めていました。

今回、本覚書を締結することで、超伝導材料等の機能材料を用いた情報科学研究を活発に行っている国家重点研究室・情報科学機能材料研究室と未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室との間に両者が連携する研究の場を持ち、研究者の人的交流を含めたより効果的な研究プログラムが始まることになります。

今後は、NICT フェローでもあり、7 月より SIMIT に活動拠点を移した王鎮氏を中心とした超伝導研究分野での共同研究を推進するとともに、バイオ、テラヘルツ分野でもジョイント研究プログラムを推進し、人的交流等やワークショップ開催等により研究協力の一層の強化を図っていく方針です。



Xi Wang 所長 (SIMIT)、賈迫巖所長 (NICT)



締結式会場にて王鎮氏 (左右から 5 番目) ほか

## 関西3拠点合同研究交流会を開催

7 月 11 日、未来 ICT 研究所は 6 回目となる研究交流会を開催しました。この交流会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て 2008 年から行っています。本年は、ユニバーサルコミュニケーション研究所 (UCRI)、脳情報通信融合研究センター (CiNet) と合同で「関西 3 拠点合同研究交流会」と銘打ち、この春に竣工した CiNet のビルにおいて開催しました。

ポスター総数は 99 点、参加者総数は 216 名でした。

会場では研究拠点間の壁を超えた議論が盛んに行われました。発表をきっかけに共同研究を加速させた研究や、新たな共同研究に



会場の様子 (上中央：坂内理事長)

つながる可能性も生まれました。今回得られた知見を次に活かし、また、このような機会を広げていくことにより、さらなる連携の発掘と強化・発展を目指します。

## 未来 ICT 研究所 2013 施設一般公開を開催

未来 ICT 研究所 (神戸) では本年の施設一般公開を 2013 年 7 月 27 日に開催しました。当日は晴天に恵まれ、466 名の来場者がありました。来場者の多くは例年人気のクイズラリーに参加し、クイズの順に各研究グループのブースを見学しながら、各グループが趣向を凝らした体験型の展示や研究者たちとの交流を十分楽しんでいました。

今回で 6 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。脳の講演では、実際に脳波を測るデモンストレーションも行いました。会場では、幅広い年齢層の参加者が熱心に聞き入っており、各講演後の質疑応答では、和やかな雰囲気の中、積極的に質問が行われ講演時間が延長する場面も見られました。



展示ブースの様子



講演会の様子 (脳波測定デモンストレーション)

未来 ICT 研究所 (神戸) では、来年夏にも施設一般公開を開催する予定です。皆さまのお越しをお待ちしております。

## 報道発表：“酸化ガリウム (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) MOS トランジスタ” を世界で初めて実現！ ～日本発、“革新的次世代半導体パワーデバイス” の実用化に道～

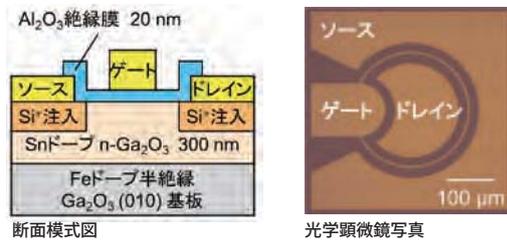
未来 ICT 研究所の東脇正高総括主任研究員は、株式会社タムラ製作所、株式会社光波と共同で、新しいワイドギャップ半導体材料である酸化ガリウム (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) を用いた実用性に優れた MOS トランジスタ (MOSFET) の開発に世界に先駆けて成功しました。

今回開発した新技術の最大のポイントは、イオン注入およびゲート絶縁膜に関する技術です。その結果、非常にシンプルなトランジスタ構造でありながら、デバイス特性は約 2 年前に報告したトランジスタ (MESFET) と比べて大幅に向上しました (表 1)。

この新しい Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOS トランジスタは、そのまま実用可能といえる構造と特性を有しています。そのため、現代の省エネルギー問題に直接貢献することができる新しい半導体デバイス研究開発分野における大きなブレークスルーであると同時に、近い将来の半導体産業のさらなる発展につながることを期待させる成果です。

この成果は、米国ノートルダム大学で開催された国際会議『Device Research Conference (DRC2013)』で発表しました。  
詳細 URL: <http://www.nict.go.jp/press/2013/06/19-1.html>

今回製作した Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOS トランジスタ (MOSFET)



	MOSFET (今回の成果)	MESFET (2012年1月発表)
最大オン電流密度	39 mA/mm	26 mA/mm
オフ電流密度	数 pA/mm 以下 (測定限界以下)	3 μA/mm
耐圧	370 V	250 V
電流オン・オフ比	10 桁以上	4 桁程度

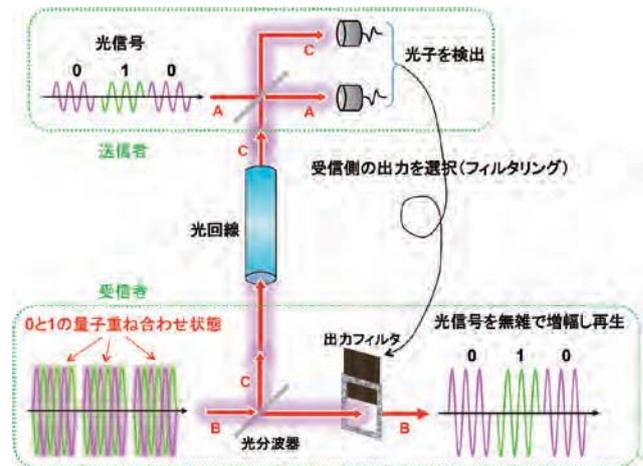
表 1: Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOS トランジスタ (今回) と MESFET (前回 2012 年 1 月) の特性比較

## 報道発表：「量子を使い光信号を遠隔地点で増幅・再生」 ～量子通信を長距離化する新しい「中継増幅技術」の実証に成功～

量子 ICT 研究室はソウル国立大学と共同で、量子暗号などで使われる微弱な光信号を、遠く離れた地点で大きな信号として増幅して再生する新しい方法を考案し、その実証に成功しました。これは、受信側にあらかじめ大きな振幅を持つ「量子重ね合わせ状態」という特殊な光を用意しておき、そこへ送りたい光信号の情報を転写する方式で「量子増幅転送」と呼んでいます。雑音の混入が避けられない従来の光増幅器とは異なり、無雑音の信号増幅が可能です。受信側の「量子重ね合わせ状態」に含まれる光子数を増やすことができれば、量子暗号をどこまでも長距離化できるほか、量子コンピュータの回路の構築にも使える革新的なプロトコルです。

今後、実験系を小型化し、量子暗号、量子コンピュータおよび量子通信を光インフラの上でシステム統合するインターフェース技術の開発につないでいきます。

この成果は、英国科学誌「Nature Photonics」2013 年 6 月号 (電子版: 英国時間 5 月 12 日 (日) 18:00) に掲載されました。  
詳細 URL: <http://www.nict.go.jp/press/2013/05/13-1.html>



量子増幅転送の仕組み

## 受賞報告



(前列中央) 東脇総括主任研究員  
(後列左) ㈱タムラ製作所代表、(後列右) ㈱光波代表

受賞者: 東脇 正高  
総括主任研究員  
受賞名: 【企業・産学部門】第 27 回独創性を拓く先端技術大賞 特別賞  
授与団体: フジサンケイビジネスアイ 先端技術大賞表彰制度委員会

この賞は、現在 (株) タムラ製作所、(株) 光波と共同で進めている「酸化ガリウムパワーデバイスの研究開発」が先駆的かつ優れた成果と評価され受賞となりました。



受賞者: 石井 智  
ナノ ICT 研究室 研究員  
受賞名: 【学生部門】第 27 回独創性を拓く先端技術大賞 フジテレビジョン賞  
授与団体: フジサンケイビジネスアイ 先端技術大賞表彰制度委員会

この賞は、石井智研究員が学生時の成果をもとに発表した論文「ナノスリットからの光の回折: ナノ光学が拓く回折レンズ」が特に優れた論文と評価され受賞となりました。

# 未来 ICT 研究所 STAFF 総覧

研究所付	竇迫 巖	研究所長	博士 (理学)	
	大岩 和弘	NICTフェロー/主管研究員	理学博士	
	王 鎮	NICTフェロー/招聘専門員	工学博士	
	原口 徳子	上席研究員	医学博士	
	東脇 正高	総括主任研究員	博士 (工学)	
	小川 博世	客員研究員	工学博士	
	Daivasigamani Krishnamurthy	主任研究員	Ph.D Materials Science	
	上村 崇史	研究員	博士 (工学)	
	WONG MAN HOI	研究員	Ph.D Electrical and Computer Engineering	
	杉浦 洋平	短時間補助員	—	
	企画室 (神戸)	久保田 徹	室長	博士 (工学)
		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	—	
大山 良多		有期技術員	—	
高橋 恵子		有期技術員	—	
山根 梓		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	—	
超高周波ICT研究室	笠松 章史	室長	博士 (工学)	
	関根 徳彦	研究マネージャー	博士 (工学)	
	安田 浩朗	主任研究員	博士 (工学)	
	渡邊 一世	主任研究員	博士 (工学)	
	小川 洋	主任研究員	博士 (工学)	
	Mikhail Patrashin	主任研究員	博士 (工学)	
	浜崎 淳一	主任研究員	博士 (理学)	
	諸橋 功	主任研究員	博士 (工学)	
	酒瀬川 洋平	研究員	博士 (工学)	
	原 紳介	研究員	博士 (理学)	
	山下 良美	専門研究員	—	
	量子ICT研究室	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)	
韓 太舜		招聘専門員	博士 (工学)	
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		主任研究員	博士 (工学)	
金 鋭博		研究員	博士 (工学)	
佐々木 悦郎		有期技術員	—	
松尾 昌彦		有期技術員	—	

ナノICT研究室	大友 明	室長	Ph.D.
	田中 秀吉	研究マネージャー/専門推進員	博士 (物理学)
	寺井 弘高	研究マネージャー	博士 (工学)
	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)
	三木 茂人	主任研究員	博士 (工学)
	山下 太郎	主任研究員	博士 (理学)
	山田 俊樹	主任研究員	博士 (工学)
	川上 彰	主任研究員	博士 (工学)
	石井 智	研究員	Ph.D.
	梶 貴博	研究員	博士 (工学)
	梶野 顕明	研究員	博士 (工学)
	丘 偉	研究員	Ph.D.
	牧瀬 圭正	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	—
	五月女 誠	有期技術員	—
	富成 征弘	有期技術員	—
	山田 千由美	有期技術員	—
バイオICT研究室	三木 秀樹	有期技術員	薬学博士
	小嶋 寛明	室長	博士 (工学)
	平岡 泰	招聘専門員	理学博士
	山田 章	主任研究員/専門推進員	理学博士
	小林 昇平	主任研究員	博士 (工学)
	榊原 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 大橋	主任研究員	博士 (理学)
	古田 健也	主任研究員	博士 (学術)
	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)
	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	—
梶谷 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	—	
吉雄 麻喜	有期技術員	—	
長濱 有紀	有期補助員	—	
樋口 美香	有期補助員	—	
福田 紀子	有期補助員	—	
高村 佳美	有期補助員	—	

(2013年8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

未来 ICT 研究所ジャーナル KARC FRONT  
No.27 2013年9月30日発行 発行/竇迫 巖 編集/久保田 徹



兵庫県神戸市  
未来 ICT 研究所への  
アクセス