

# NICT NEWS

**NICT** 国立研究開発法人  
情報通信研究機構

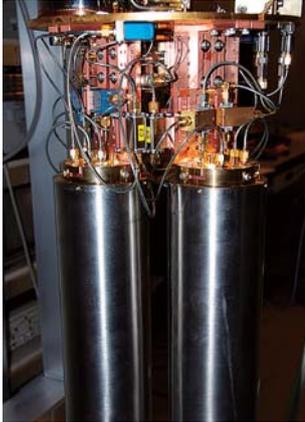
No.465 AUG 2017



FEATURE

未来ICT研究所が切り拓く  
情報通信技術のフロンティア

## CONTENTS



## FEATURE

## 未来ICT研究所が切り拓く情報通信技術のフロンティア

## 1 INTERVIEW

現行システムの延長線ではない先端技術の確立を目指す  
寶迫 巖

## 4 人工原子と光子の新しい分子状態

量子情報処理へ向けた新たな可能性

仙場 浩一／吉原文樹／布施 智子

6 細胞骨格と分子モーターによる  
ネットワークの動態観察とそのモデル化

鳥澤 嵩征

## 8 生物分子モーターの再デザイン

熱運動の嵐の中で確実に作動する原理を探る

古田 健也

## 10 シリコンCMOS集積回路による300 GHz無線受信機の研究開発

テラヘルツ波による超高速無線通信技術の確立に向けて

原 紳介／渡邊 一世／関根 徳彦／笠松 章史

## TOPICS

## 12 NICTの知的財産⑤

地域見守りシステム —地域コミュニティを活用した検索—

## 13 Awards

## INFORMATION

## 14 「けいはんな学研都市30周年」記念

けいはんな情報通信フェア2017開催のお知らせ

NICT展示施設 Information ④ — 未来ICT研究所(神戸)

表紙写真「希釈冷凍機に組み込まれた超伝導量子回路用マイクロ波測定系」

超伝導人工原子と光子の新しい状態の解明に用いたマイクロ波測定系。

何本ものマイクロ波同軸ケーブルの配線が見える。測定対象の熱励起を抑えて

マイクロ波光子1個レベルでの精密測定を行うため、超伝導量子回路素子は、

希釈冷凍機の最低温度プレート(約10 mK)に熱接触させて冷却される。

超伝導量子回路は、磁気ノイズに非常に敏感なため、本頁左上の写真のように、

外部磁場の変動をおよそ1/1000に低減する二重磁気シールド(銀色の円筒)

中に設置されている(電波利用管理・試作グループの協力で作製)。

## Interview

## 現行システムの延長線ではない先端技術の確立を目指す



竇迫 巖 (ほうさこいわお)

未来ICT研究所  
研究所長

大学院修了後、日本鋼管株式会社（現JFE）を経て、1996年郵政省通信総合研究所（現NICT）入所。以来、テラヘルツ帯半導体デバイス・各種応用システムの研究開発に従事。博士（理学）。

目覚ましい発展を見せる現在のICT技術。しかし、情報量の爆発的増加に伴う様々なコストの上昇、セキュリティや制御の複雑化など、現行の技術では解決が困難な、多くの課題も顕在化してきている。これらの課題に対し、長期的な視野に立つて革新的なICT技術の研究開発を進めているのが、未来ICT研究所である。神戸と小金井（東京）、2つの拠点で多くの先端分野を手掛ける同研究所の活動について、研究所長の竇迫巖氏にお話を伺った。

#### ■「その先」に向けての布石を打つ

——未来ICT研究所は、その名のとおおり、「未来」に向けて、新たな技術を開拓していくところというイメージです。実際には、どのような体制で、どのような研究分野に挑戦されているのでしょうか。

**竇迫** おおまかに言えば、未来ICT研究所の研究体制は、1つの研究室「フロンティア創造総合研究室」と、3つのセンター「量子ICT先端開発センター」「グリーンICTデバイス先端開発センター」「深紫外光ICTデバイス先端開発センター」から成っています。

これらのセンターは、比較的社会実装に近い、あるいは、社会実装が視野に入る分野を担当しています。もちろんそれは「未来ICT研究所の中では」ということであって、世間的には“まだまだ本格的な実用化には時間がかかる技術”という位置付けであろうと思います。とはいえ、着実に研究成果を積み重ねてきて、例えば、現在焦眉の急である情報セキュリティの強化に画期的な進化をもたらす量子暗号などをはじめ、「使ってみたい」というニーズも出てきています。それら先進の分野を専門に進めているのが先述の3つのセンターです。

一方、ICTの領域のうち、センターより

も更に将来を見越したテーマを扱うのが、フロンティア創造総合研究室です。ここでは数多くのプロジェクトが進められていますが、主なものはバイオICT、ナノICT、超伝導や超高周波などの研究です。それらプロジェクトのすべてが将来的にうまくいくとは限らないものの、あるいは世の中をひっくり返すような大きな変革をもたらす可能性をも秘めたテーマ群であり、ラインナップとしてしっかり持っていることが重要な、まさにフロンティア（最前線）の領域と言えます。

学術的にもハイレベルで、平成28年度のNICTの報道発表のうち、純粋に研究開発に関わる案件では、未来ICT研究所からの件数がおよそ35%を占めています。発表論文数においても、NICT全体の20～25%が未来ICT研究所関連のものです。

——常に新たな技術の「種」を見つけ、育てていくのが使命ということですね。

**竇迫** 今から30年近く前のことですが、当時、「基礎研究ただ乗り論」、つまり日本は海外の基礎研究を利用するだけして、応用研究・商品化ばかり盛んではないかという批判がありました。そうしたなかで、企業を含め、日本でももっと基礎研究に注力しようという動きが盛んになったのです。NICTの前身のひとつであるCRL（通信総合研究所）においても、最先端の基礎研究でプレゼンスを示し、優れた人材を引きつけるとともに将来の種を探そうということで、関西拠点において、今の未来ICT研究所のもとになる研究室が1989年に発足しました。

その時に設定した研究ターゲットのいくつかは、例えば、現在はけいはんな学研都市で行われている自然言語翻訳、大阪大学と共同でセンターを運営している脳情報の研究などのように、拡大・発展し別組織へ

Interview

現行システムの延長線ではない先端技術の確立を目指す

と移っています。同様に、今後もそうした形で、未来ICT研究所から広がっていくものも多く出てくるだろうと考えています。

我々の手掛ける研究のすべてが世の中の役に立つようになるとは思いませんが、ひとつでも大きなインパクトを示し、20年後、30年後に大きな研究分野として育てていけば、未来ICT研究所としての存在価値があったと、振り返って言えるのではないかと思います。

■ デバイス工学、バイオの両面で大きなインパクトを

——特に今後有望と思われる分野、注力している研究課題にはどんなものがありますか？

**寶迫** 我々が今後特に、社会に大きなインパクトを与えていきたいと思っているテーマがあります。

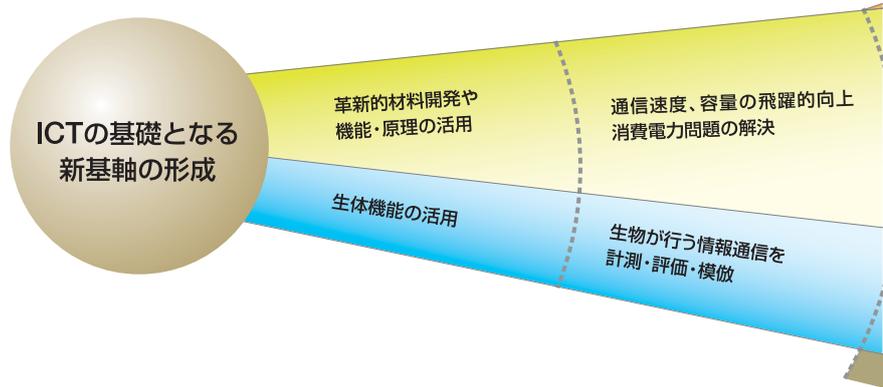
情報通信というのはノードとノードがコミュニケーションを取ることだと考えると、単純に通信だけではなく、情報処理の部分も併せてしっかり考えていく必要があります。情報処理のハードウェアは、これまで「ムーアの法則\*」と呼ばれる成長ペースに沿って回路の微細化が進み、高性能化が図られてきました。しかし、ここへ来て、従来方式での発展は限界が近づき、そろそろ別の原理ののりつものを考えなければいけない時期がきているように思われます。この部分に、未来ICT研究所で培ってきた様々な技術が非常にフィットする可能性があると考えています。

ひとつはデバイス工学的な面です。未来ICT研究所では、光、電子、超伝導など、様々なデバイスの研究開発を手掛けています。そうしたなかで、「何が次世代のデバイスとして最適なのか」という問いの答えになる候補もいくつか浮上ってきていま

\* ムーアの法則  
米国半導体メーカー、インテル社の創業者の一人であるゴードン・ムーアが1965年に出した論文にある、集積回路の複雑さは2年で倍増するという予測。

未来ICT研究所概要

領域融合を活かした、ICTフロンティア領域における新たな情報通信パラダイムの創出を目指します。情報通信における将来的課題を抜本的に解決すると同時に、国際的研究拠点として社会に貢献します。また、産学官一体となった研究連携を促進します。



産学官連携

企業との共同研究

大学等との相互協力

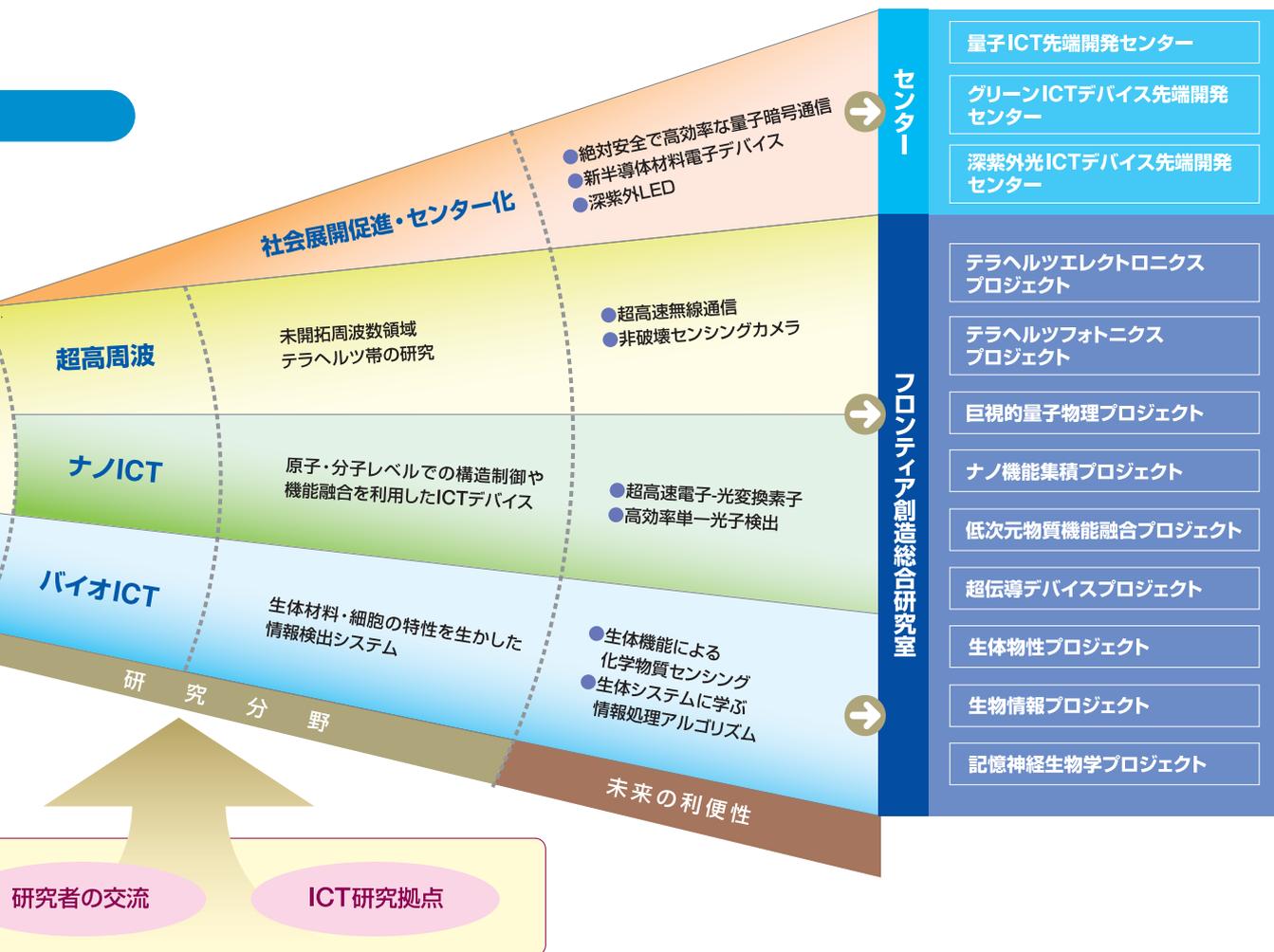
図 未来ICT研究所概要

す。これらを足掛かりに、コンピュータ・エンジニアリングやコンピュータ・サイエンスといった分野にも、新しいネタを提供していきたい。



もうひとつは、バイオ方面からのアプローチです。現在、多層構造のニューラルネットワーク（人間の脳の神経回路の仕組みを模したモデル）を用いた「ディープラーニング」という考え方が注目されていて、実際に成果も上げています。これは元々バイオ的な見地、神経のレイヤの重なり具合などの構造を学んで始まったものと考えられますが、その原理までもしっかり解明されているとは言い難いのが現状です。我々はそれを“わかったうえで進めたい”ですし、また実際に、そういうアプローチが可能であろうと考えています。生物の中には、情報処理の仕組みがたくさん埋め込まれています。それらをつつひとつ解明していくと、いろいろと面白いことができそうです。

一例ですが、これから立ち上げようとしているのが、昆虫の脳の解析です。例



例えばショウジョウバエの脳の神経細胞は約20万個。数百億から一千億個ある人間の脳に比べると5桁ほど小規模ですが、それでいて非常に高機能な動きをします。その働きを原理から解析できれば、様々な興味深い、また有効なシステムの構築が可能になります。

これまでバイオと言えば医学や薬学の分野で注目されることが多かったと思うのですが、このように、今後はますます工学的な面でも「学びの場」になっていくのだろうと考えています。

#### ■個人の発案をいかに上手くミッションにのせるか

——未来ICT研究所は、神戸と小金井の両方に拠点を持っていますが、それぞれの役

割分担はどうなっているのでしょうか。また、将来を見据えた研究テーマはどのように決まっていくのでしょうか。

**寶迫** 神戸はナノICTやバイオ、小金井は超高周波や量子ICTなど、主にテーマで分かれています。これは棲み分けというより、平たく言えば「いる人が違う」程度の話です。

未来ICT研究所の各テーマは、個人ベースの発案に基づいている部分が多い。遠い将来を見据えて、様々な想像を巡らし、どういうものが必要なかを考える。そうした過程で、個人の発案は決して見過ごすことはできません。そこは、NICTの中でも未来ICT研究所のやや独特な部分ではないかと思いますが、だからといって興味の赴くままに研究を進めていいわけでもあり

ません。NICTの使命として、あくまでも「ミッション研究」であることは変わりません。しかも、我々のリソースは決して大きくはなく、研究員の数も2拠点を合わせて百数十名程度。やはり「選択と集中」は必須です。

ただ、未来ICT研究所における選択と集中は、「これをやれ、あれはやらない」ではなく、「どういう未来に向けて進むのか」というイメージを示すことだろうと思います。それによって皆のベクトルが揃っていけば、自然とリソースは集中し、それが限られたものであっても大きなインパクトを生み出すことが可能になります。そうした方向性を示すことが、研究所長としての私の役割でもあろうと思っています。

## 人工原子と光子の新しい分子状態

量子情報処理へ向けた新たな可能性



仙場 浩一 (せんば こういち)

未来ICT研究所  
フロンティア創造総合研究室  
首席研究員

NTT 物性科学基礎研究所及び国立情報学  
研究所量子情報国際研究センターにて量子  
情報、超伝導量子エレクトロニクス  
の研究に従事。2013年にNICT入所。巨視的  
量子物理プロジェクト 主幹。博士(工学)。

吉原文樹 (よしはら ふみき)

未来ICT研究所  
フロンティア創造総合研究室  
主任研究員

布施 智子 (ふせ ともこ)

未来ICT研究所  
フロンティア創造総合研究室  
主任研究員

**本** 研究は、「光と原子の相互作用を極端に強くしたらどうなるか？」という基本的な問いから始まりました。原子と同等の量子的性質を持つ超伝導人工原子と超伝導回路中のマイクロ波光子を使い、極端に強い相互作用を世界に先駆けて実現し、人工原子と光子の極めて奇妙な分子のような状態（基底状態）を見つけました。

### ■物質と光の相互作用と量子性

現代生活では、レーザーをはじめ、至るところで物質と光の相互作用を利用しています。2014年にノーベル物理学賞受賞となった「青色発光ダイオード」も、その一例です。一方、最近、「量子」という言葉をよく耳にします。例えば、レーザー光をどんどん弱くしていくと、光子（光の量子）の性質が現れてきます。また、物質をどんどん細分していくと原子があり、原子の中では、電子のエネルギーは離散的な（量子化されている）ことが知られています。これら光子や電子など量子の持つ特異な性質を利用し、量子通信、量子暗号など従来のICTとは全く異なる原理に基づく量子ICT

が考案され、NICTでも関連分野の研究が進められています。

2014年に始まった「巨視的量子物理プロジェクト」もその一環で、超伝導回路を用いて、物質と光の相互作用の量子的な特性を研究しています。超伝導回路は従来の半導体微細加工技術により作製できるため、数ミリ角の小さなチップ上に、様々な物理系を設計できます。

### ■超伝導人工原子とマイクロ波LC共振回路中の光子の相互作用

今回の研究では、原子のように飛び飛びのエネルギー準位を持つため人工原子とも呼ばれる超伝導磁束量子ビットと、マイクロ波LC共振回路中の光子を用いて、両者の相互作用が非常に強くなるように回路を設計しました（図1）。磁束量子ビットは、その超伝導ループに多数の電子が流れるマクロな（巨視的な）電流状態となるため、原子内の電子が作るミクロな（微視的な）電流状態に比べると桁違いに大きな磁気双極子が生じます。また、量子力学の不確定性原理に基づく零点振動電流が大きくな

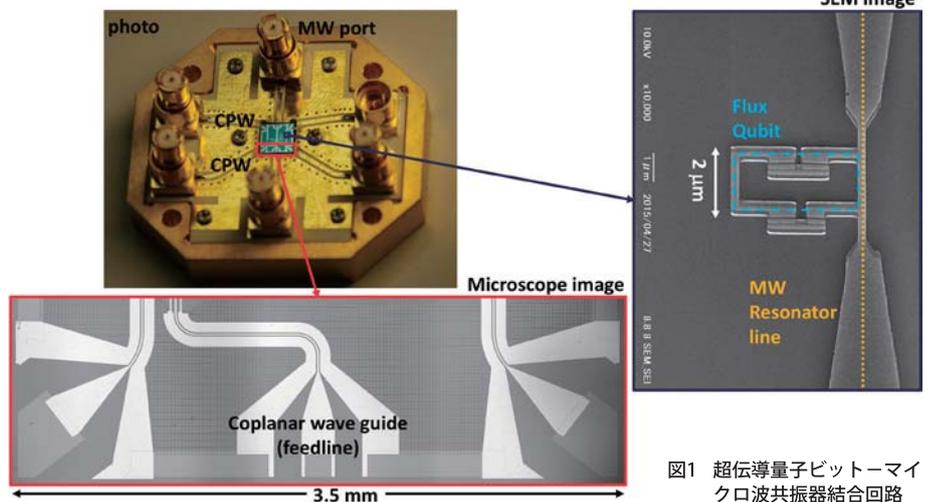


図1 超伝導量子ビット-マイクロ波共振器結合回路

参考文献

1. F. Yoshihara, T. Fuse, S. Ashhab, K. Kakuyanagi, S. Saito and K. Semba, "Superconducting qubit-oscillator circuit beyond the ultrastrong-coupling regime," Nature Physics 13, 44 (2017).
2. 布施智子, 吉原文樹, 角柳孝輔, 仙場浩一, "超伝導人工原子と電磁場の相互作用 ~強結合のその先へ~, "日本物理学会誌 執筆中

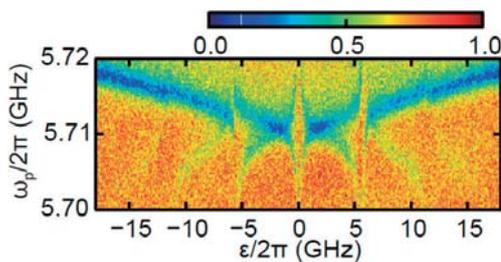


図2 深強結合回路の遷移スペクトル (masquerade mask パターン\*)

横軸は周波数表示された超伝導量子ビットの磁束バイアスエネルギー、縦軸は透過マイクロ波の周波数。青色部分ほど吸収が顕著であることを示す。

\* ペネチア仮面舞踏会の仮面の形に似ていることからの呼称。

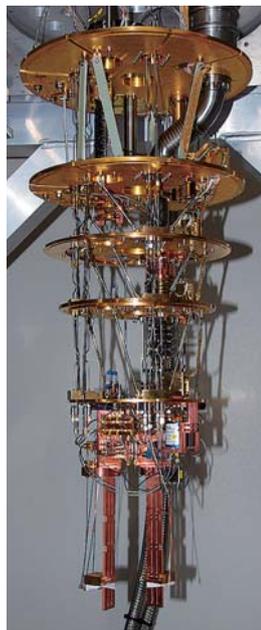


図3 希釈冷凍機 (到達温度 ~ 20 mK)  
下部分350mmはNICT電波利用管理・試作グループの協力を得て作製

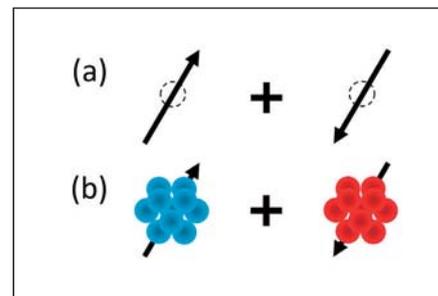


図4 原子-光子結合回路の基底状態  
(a) 結合ゼロの状態 (b) 深強結合状態

るように設計したLC共振回路を用いた結果、量子ビットとマイクロ波光子の相互作用エネルギーが量子ビットやマイクロ波光子自身のエネルギーをも凌駕した「深強結合」状態を世界に先駆けて実現し、その状態の吸収スペクトルの測定に成功しました(図2)。測定は、マイクロ波1光子の吸収が判別できるように、希釈冷凍機を用いて試料を約20 mKに冷却して行いました(図3)。

## ■ 深強結合

深強結合状態では何が起きるのでしょうか？原子-光子結合系の基底状態(最低エネルギー状態)を考えてみます。原子と光子の間に結合がないとき、原子と光子の状態は分けて考えることができます。光子1個1個がエネルギーをもつため光子の基底状態の光子数は0です。原子の基底状態は原子のスピンの上向きと下向きの重ね合わせ状態(スピンは磁気モーメントの向き)で表されます(図4(a))。結合を強くしていき深強結合領域に達すると、基底状態は、青い光子の衣\*をまとった上向きスピンと、赤い光子の衣\*をまとった下向きスピンの重ね合わせ状態となります(図4(b))。すなわち、基底状態の光子数が0でなく、原子のスピンの上向きの際は光子の衣はいつも青、スピンの下向きの際は光子の衣はいつも赤というように、原子と光子の状態の間に強い相関があり、これら

の重ね合わせ状態(原子と光子の量子もつれ状態:「シュレディンガーの猫」と類似した状態)が基底状態となります。

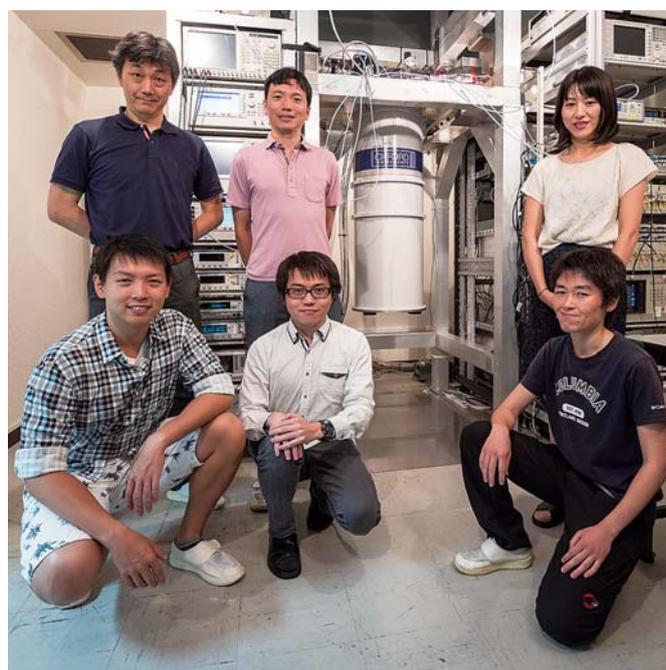
一般に量子もつれ状態は壊れやすいものですが、深強結合状態の量子もつれ基底状態は、励起状態でないためにはるかに安定であると考えられます。

## ■ おわりに

量子もつれは、量子情報処理や量子ICTの重要なリソースですが、最近では、多光

子量子もつれ状態の高感度計測への応用が試みられるなど、基礎科学や計測への広がりも期待されています。見つかったばかりのこの深強結合状態ですが、「シュレディンガーの猫」状態が量子情報処理や高感度計測に応用できるかに関して研究が進行中です。興味のある方は、原著論文<sup>1</sup>または日本語の解説記事<sup>2</sup>をご参照ください。

\* スピンは位相のそろった光子の衣をまとう。上向きスピンがまとう光子の位相を0(青で表す)とすると、下向きスピンがまとう光子の位相は $\pi$ (赤で表す)。



本プロジェクトのメンバー  
前列左から、アオ スチャオ協力  
研究員、米津佐哉協力研究  
員、布施智子主任研究員  
後列左から、仙場、吉原文樹  
主任研究員、星亜希子

## 細胞骨格と分子モーターによる ネットワークの動態観察とそのモデル化



**鳥澤 嵩征** (とりさわ たかゆき)

未来ICT研究所  
フロンティア創造総合研究室  
研究員

大学院修了後、2014年NICT入所。同年4月より現職。タンパク質分子モーター1分子の運動制御メカニズムや集団挙動、細胞骨格と組み合わせた際に創発する空間パターンの研究に従事。CREST「生命動態の理解と制御のための基盤技術の創出」研究員。博士(学術)。

**細** 胞を形作る主要素である細胞骨格の微小管とその上を運動する分子モーターキネシンが、様々なネットワーク構造を作り、大域的な収縮を引き起こす能力を持つことを発見し、さらに、そのダイナミクスを定量的に説明する数理モデルの構築に成功しました。細胞骨格のダイナミクスをin vitro (試験管内) とin silico (計算機内) でシミュレートすることに成功したことで、細胞の機能改変や組織構造変化などを簡潔に行うための技術開発につながるものと期待できます。

### ■細胞の中に見られる様々な形と運動

私たち人間をはじめとする生き物は「細胞」という単位を基本に構成されています。細胞は、その働きや外からの刺激に対する応答の結果としてダイナミックにその形を変え、様々な生命活動を行います。この細胞のダイナミックな構造変化は、アクチンや微小管といった「細胞骨格」と呼ばれるタンパク質フィラメントと、それに結合する様々なタンパク質によって行われています(図1A)。細胞骨格は、重合と脱重合を繰り返すことによってその形や長さを変化させますが、同時にフィラメントに結合するタンパク質の働きによっても変化を生じます。よく知られている細胞骨格の働

きとしては、細胞内での物質輸送時のレールや細胞分裂時に形成される紡錘体(微小管)や収縮環(アクチン)の主要素としてのもものがあげられます(図1B)。それ以外にも、植物細胞や筋細胞、また気管の上皮細胞などにおいては、網の目のように張り巡らされた微小管のネットワーク構造が存在しており、細胞の形態維持などに働いています(図1C)。これまでの流れにおいては、紡錘体などの構造の研究に比べると、ネットワーク構造の形成及びその動態に関する研究はそれほど進んでいないのが現状でした。そこで本研究では、そのようなネットワーク構造のダイナミクスのメカニズムを解き明かすことを目指しました。

### ■2種類の要素の混合のみから創発する 様々なネットワークダイナミクス

実際の細胞の中では、多くのタンパク質が互いに影響を及ぼし合いながら、複雑な生命現象を引き起こしています。そういった複雑さの中からある現象に必要な要素や性質を見出すためには、現象を粗視化してとらえたシステムを再構成することがひとつの手段になります。具体的には、必要と想定される要素のみから構成されたシンプルなシステムを用意し、その網羅的な観察とモデル化を行っていくなかで理解を深め

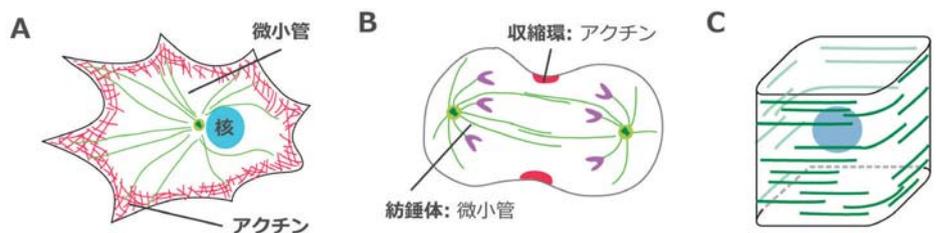


図1 細胞骨格が作り出す様々な構造とその働き

A: 一般的な動物細胞(間期)における細胞骨格(アクチン、微小管)の様子 B: 体細胞分裂時における細胞骨格の様子 C: 植物細胞において見られる微小管のネットワーク構造

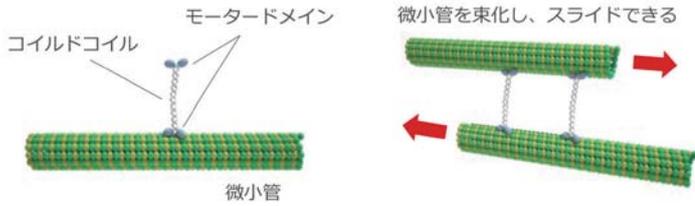


図2 実験に使用した分子モーター(キネシン-5)の構造と機能

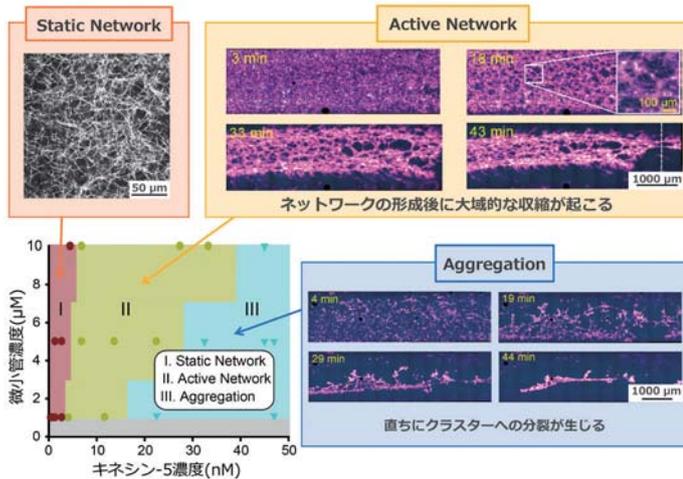


図3 キネシン-微小管混合系から創発した様々なパターンとその要素濃度に対する依存性を示す図

ていくということです。細胞骨格ネットワーク構造の動態を解明するために今回構築したシステムは、微小管とタンパク質分子モーターの一種であるキネシンのみから構成されるものです。キネシンには様々な種類があり、人間には45種類ものキネシン遺伝子が存在していますが、今回使用したのはキネシン-5と呼ばれているものです。キネシン-5は4つのモータードメイン（微小管と結合し、運動を担う主要部分）を持っており、複数の微小管を束ねることでネットワークの形成を誘起することができます。さらに、微小管の上を運動することで、束ねた微小管同士の相対的な滑り運動を引き起こし、ネットワークにダイナミックな変化を誘起することができます(図2)。このような性質を持つキネシン-5と微小管を様々な濃度比で混合し、そこから生み出されるダイナミクスの観察を網羅的に行いました(図3)。図3に示されているように、キネシン-5の濃度が低い場合、ネットワークは形成されるものの全体構造の変化は生じません(Static Network: 静

的ネットワーク)。しかし、キネシン-5の濃度を上げると、微小管ネットワークは形成後にゆっくりとした収縮を始め、やがて一部が崩壊して急激な収縮へと転換が生じます(Active Network: 動的収縮ネットワーク)。キネシン-5の濃度を更に上げると、局所的な強い収縮の結果、様々な大きさのクラスターへと分裂していきます(Aggregation: 凝集体形成)。このようなネットワークの収縮性は、モーターの濃度と力学特性に依存しており、モーターの運動特性を変化させた場合には、均一で小さな星状体構造が観察領域全体に分散して形成されることが確認されました。

### ■ネットワークダイナミクスを説明する数理モデルをつくる

キネシン-微小管混合系におけるネットワークダイナミクスの網羅的な観察に基づき、そのモデル化を通じて現象に本質的な要素の同定を行いました。理論モデルの構築は明治大学理工学部の石原秀至准教授

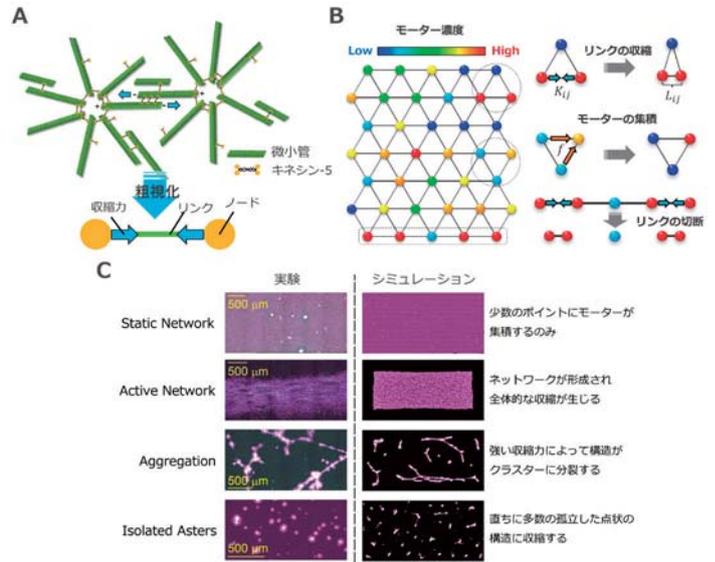


図4 数理モデルの概略と実験との比較

A: ネットワークの粗視化 B: モデルにおける3つの局所ルール C: 実験とシミュレーションの比較

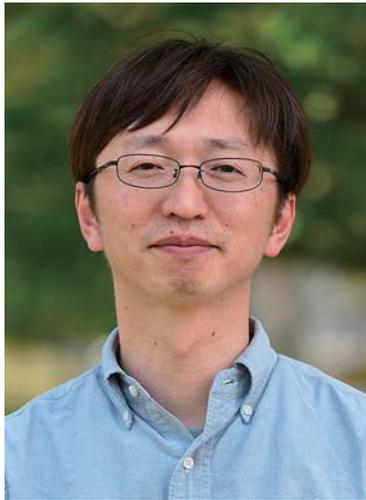
(現東京大学准教授)のグループと連携して進め、3つの局所ルールだけで規定されたネットワークモデルによって、実験で得られた観察(静的ネットワーク、動的収縮ネットワーク、凝集体形成、星状体形成)を再現することに成功しました(図4)。また、モーターの性質を変化させることがネットワーク構造に与える影響についても高い予見性を示すこともできました。

### ■今後の展望

細胞骨格のダイナミクスは細胞の形や振る舞いに影響を与えるだけではなく、細胞集団である組織の形やその機能へも影響を与えるものです。2種類のタンパク質だけからなるシンプルなシステムにおいて、濃度とモーターの性質を改変するだけで細胞骨格の動態を大きく変えられる可能性を示し、その数理モデル化に成功したことで、細胞の機能改変や組織構造変化などを簡潔に行うための技術開発につながるものと期待できます。

## 生物分子モーターの再デザイン

熱運動の嵐の中で確実に作動する原理を探る



### 古田 健也 (ふるた けんや)

未来ICT研究所  
フロンティア創造総合研究室  
主任研究員

大学院博士課程修了後、日本学術振興会特別研究員を経て、2009年NICT 専攻研究員として入所。2013年より主任研究員。新しい生物分子マシンの設計・製造の研究などに従事。博士(学術)。

フロンティア創造総合研究室では、世界で初めて、人為的な設計によって新たな生物分子モーターを創り出すことに成功しました。これは、生物分子モーターの一種であるダイニン\*1の基本構造をベースに、自然界に存在する別の機能モジュールを融合することで実現したものです。さらに、その運動の方向性が逆転した分子モーターの作製にも成功しました。この結果は、ナノメートルスケールでは避けることができない激しい熱運動の中でも効率的に機能する、人工的な分子マシンの設計原理として利用されることが期待されます。

### ■背景

天才少年が操る多数の小さな「マイクロロボット」が一箇所に集合し、大きな構造体を作って街を縦横無尽に動き回る — これは、2014年に公開されたCGアニメーション映画『ベイマックス』の中の一場面です。このように、一つひとつは単純な動きしかできないような小さなマシンを集めることで複雑で大きな仕事をさせる、というアイデアが、従来の人工機械の先を行くものとして描かれるようになってきました。

### ■分子マシンとは?

このようなアイデアは、科学技術の世界にも大きな流れを作りつつあります。実

際、2016年のノーベル化学賞は、化学合成技術を駆使して有機分子にナノメートルスケールのスイッチやベアリングを実装し、極めて小さな分子を操作することで動きや力を作り出す研究に贈られました。このような技術は、まだまだ基礎研究の段階ですが、将来的には現実の社会に大きなインパクトをもたらす可能性を含んでいます。

産業革命以降、人工機械はトップダウンな指揮命令系統に従って間違いなく動くというパラダイムに基づいて作られ、大きな成功をおさめてきました。しかし近年、生物の採用しているアルゴリズムを探ることに注目が集まってきています。例えば、樹木の適応的な形態変化、アリの自律分散システムなどにヒントを得た、多数の素子の分散処理による新たな機械の開発などが活発化しています (McEvoyら、Science 2015など)。これらは、既存のトップダウンなネットワークではピンポイントな攻撃に対して脆弱であることや、ネットワークの大幅な変更が困難であることなどの弱点が次々に明らかになる中で、ボトムアップな生物の生き残り戦略を参考に、対案として考えられてきたものです。

### ■生物は既に超高機能な分子マシンを持っている

生物はアリの社会レベルから、個体、組織、細胞レベルに至るまで、上記のような、

#### 用語説明

- \*1 ダイニン  
細胞内で働く生物分子モーターの一種で、微小管上を運動するタンパク質複合体。リング状のモータードメインを持ち、微小管と結合する部位がそのリングから飛び出ている、明確なモジュール構造になっていることが特徴。
- \*2 ATP加水分解活性  
ダイニンなどの生物分子モーターは、細胞内のエネルギー通貨と形容されるATP (アデノシン三リン酸) を原動力としており、このATPの加水分解に共役した大きな構造変化が一方方向的な運動に重要であると考えられている。

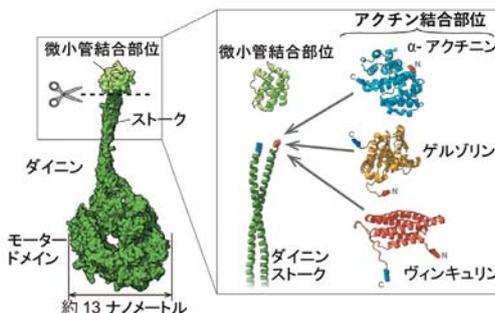


図1 新しく設計した生物分子モーター。ダイニンが持つ微小管結合部位を取り除き、ダイニンのモータードメインとアクチン結合部位を組み合わせた。

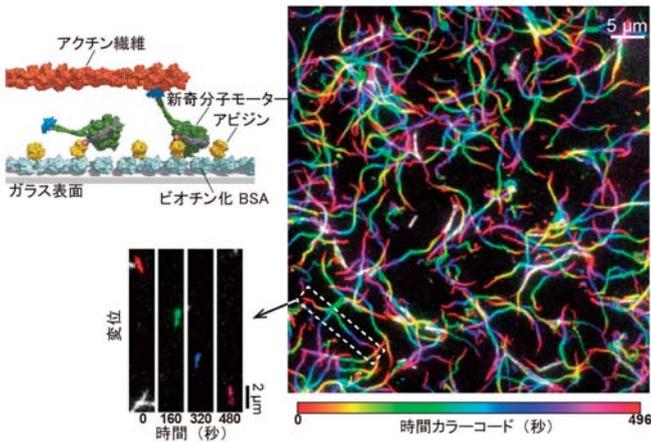


図2 ガラス表面に固定した新奇分子モーターが、アクチンフィラメントを動かす様子を撮影した全反射蛍光顕微鏡による画像。得られた動画を加工し、アクチンフィラメントに時間ごとに異なる色を付け、全てを重ね合わせることで、フィラメントが動く様子を表現した。

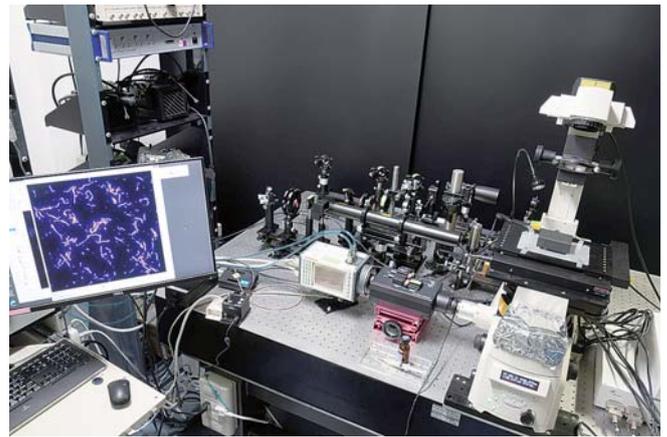


図3 全反射蛍光顕微鏡は、照明光としてガラス面近傍に染み出す近接場光を用いることで背景光を抑え、蛍光一分子を可視化することができる光学顕微鏡

人間から見ると途方もなく高度な分散処理を当然のように行いながら世代を重ねています。細胞レベルでは、筋肉、紡錘体、鞭毛・繊毛の中で、主に生物分子モーターと呼ばれるタンパク質からなるナノメートルサイズの分子マシンが、細胞内に張り巡らされたフィラメントの上を動くことによって、自身の6~8桁も大きいセンチメートルを超える収縮・伸長・振動を伴う協同現象を引き起こしています。当然、マクロな集合体の振る舞いは、1個の分子マシンの性質にその全てがプログラムされています。これは、司令者のいない真にボトムアップな制御であり、人工機械とは対照的であると言えます。

分子マシンの中でも、生物分子モーターは、筋肉の動きや細胞分裂など、生物のほとんどの動きを担う分子マシンで、大きさが数十ナノメートル、つまり、人間の髪の毛の太さの千分の一という驚異的に小さな世界で働いています。それは、水分子が熱運動で動くことによって1秒間に1兆回も衝突してくるような激しく揺れ動く世界であり、生物分子モーターの活動は、言ってみれば竜巻だらけの嵐の中で目的地に向かって車を運転するようなものです。

現状では、このような状況下できちんと働く分子マシンを一から作り上げることはできていません。技術的な困難もありますが、それ以上に、どのようにデザインすればよいか、という、最も基本的な指針すら立てられていなかったからです。人工機械の設計の考え方からは、ランダムな熱運動のようなものは“ノイズ”であり、大きな

エネルギーを投入して抑え込むべきものでしたが、分子マシンのスケールでは、個々の分子に投入できるエネルギーの大きさに対して、熱運動が決して無視できない大きさを持っているのです。

### ■新しい生物分子マシンを創ることで、その設計原理を理解したい

これまでのように、たった1回の生命の歴史の産物である既存の生物分子モーターを分析する研究だけでは、個別の生命活動に適した構造や機能を理解することはできても、ナノメートルスケールにおける一方方向性運動の本質に迫ることは容易ではありませんでした。この原理を明らかにするためには、既存の生物分子モーターの分析に加えて、単純な機能を持つ要素を幾つか組み合わせることで目的とする機能を創り出すような、構成的な研究手法が効果的です。

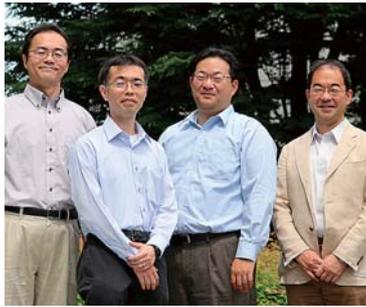
そこで私たちは、生物分子モーターの一種、ダイニンの「エンジン」部分にあたるモータードメインを用い、ダイニンが本来レールとしている微小管というフィラメントとの結合部位を、ダイニンとは無関係なアクチンフィラメントと結合するタンパク質モジュールに置き換えました(図1)。もし、従来考えられてきたように、レールとのインターフェースが、本体部分のATP加水分解活性<sup>\*2</sup>と密接に共役する必要があるならば、全く無関係なアクチン結合部位を導入した場合、簡単に運動能を失うであろうと予想されました。ところが予想に反して、この新奇分子モーターはアクチンフィ

ラメントを滑らかに一方方向に動かすことができたのです(図2)。全反射蛍光顕微鏡(図3)を用いて運動方向と構造との間の対応などの詳細なデータを収集し、そこから得られた知見を基に運動メカニズムを検討した結果、私たちは、これらの生物分子モーターが、熱運動の嵐を乗り越えるためにフィラメントとの結合・解離機能と酵素活性などのタイミングを精密に合わせることで抑え込んでいるのではなく、むしろインターフェースの構造の非対称性に頼るだけ、という単純なメカニズムに基づき、熱運動によるランダムな動きを一方方向に整流することで運動を実現しているという可能性を提案しました。これは、これまで生物分野でしばしば見られた神秘的なメカニズムを排し、単にどのような物質をどのように配置すれば分子マシンとして機能するか、という本質的な設計原理にアクセスできる可能性を示しています。

### ■今後の展望

所望の機能を持った新たな分子マシンを設計する研究は始まったばかりですが、本研究によって既にある程度の指針が示されたと言えます。今後も、生物を動かしている分子マシンをお手本として新しい人工分子マシン作ることとその設計原理を理解し、さらに、生物由来のマシンを凌駕するような自律的で超高機能な分子マシンを創ることを目指します。

## シリコンCMOS集積回路による300 GHz無線受信機の研究開発 テラヘルツ波による超高速無線通信技術の確立に向けて



左から 笠松章史、原 紳介、渡邊一世、関根徳彦

### 原 紳介 (はらしんすけ)

未来ICT研究所  
フロンティア創造総合研究室  
主任研究員

大学院修了後、東京理科大学基礎工学部助教を経て、2013年NICT入所。ミリ波・テラヘルツ波CMOS回路、ナノ電子デバイスの研究などに従事。博士（理学）。

### 渡邊 一世 (わたなべいっせい)

未来ICT研究所  
フロンティア創造総合研究室  
主任研究員

### 関根 徳彦 (せきねのりひこ)

未来ICT研究所  
フロンティア創造総合研究室  
研究マネージャー

### 笠松 章史 (かさまつあきふみ)

未来ICT研究所  
フロンティア創造総合研究室  
上席研究員／副室長

**未**だ周波数割当てがされておらず利用されていない、周波数300 GHz帯の電磁波を用いた超高速無線通信の技術確立に向けて、シリコンCMOS半導体技術による無線通信用集積回路の研究開発に、広島大学・パナソニック株式会社と共同で取り組んでいます。シリコンCMOS集積回路で300 GHz帯を扱ううえで生じる最大発振周波数の課題を、新しく開発した多数の要素回路技術によって克服し、300 GHz帯の無線通信用送受信機を実現するとともに、多値変調方式による高速無線通信の実証実験にも成功しました。

### ■はじめに

電磁波は、周波数の低い、いわゆる「電波」から、周波数の高い「光」まで、様々な産業分野で利用されています。そのうち電波については、関係法令により用途によって周波数が割り当てられています。現在、周波数の低い方からマイクロ波（波長10～1 cm）と呼ばれる最高30 GHzの周

波数帯までが一般に利用されていますが、スマートフォンなどの情報端末の普及により、割当てが可能な周波数が枯渇しつつあります。さらに、近年、IoT（Internet of Things）やビッグデータ、AI（人工知能）による新しい産業構造変革を迎えつつあり、これには無線通信技術が重要な役割を果たします。今後、より大容量の情報を高速で通信可能な無線技術の確立が不可欠であり、そのために新しい電波資源の開拓が必要になっています。

ミリ波・テラヘルツ波は「電波」と「光」の中間に当たる波長10～0.1 mm、周波数30 GHz～3 THzの電磁波であり、未だあまり利用が進んでいないことから「未開拓の周波数資源」と呼ばれています。図1に示すように、周波数182～325 GHzには大気による吸収の影響を受けにくい「大気の窓」と呼ばれる周波数帯があります。また、275 GHzを超える帯域は割当てが決まっておらず、国際標準化機関で利用に関する議論が始まっています。これらの周波数帯で広い帯域を確保し、1回の信号で複数のデータを伝送できる多値変調を用いた無線通信が実現できれば、28 GHz帯の利用を検討している第5世代モバイル通信システム（5G）で期待される通信速度の10倍以上、100 Gbpsを超える高速無線通信が可能になります。このような超高速無線技術が確立することで、図1に示すような応用例が実現できると予想しています。

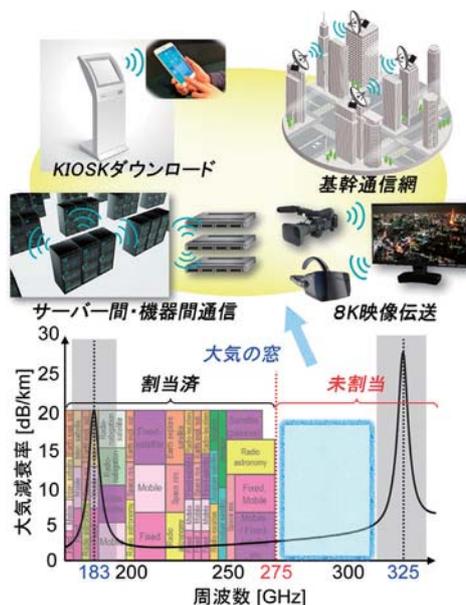


図1 大気減衰率と周波数割当て（下）及び300 GHz帯無線通信の応用例（上）

### ■300 GHzシリコンCMOS無線送受信機

コンピュータなどの情報機器に用いられるデジタル計算処理回路やメモリ回路は、何万、何億個といった非常に多くのトランジスタを数mm角のシリコン上に作り込む「シリコンCMOS集積回路」技術により作られています。テラヘルツ波を用いる超高速無線通信技術を広く普及させるには、無

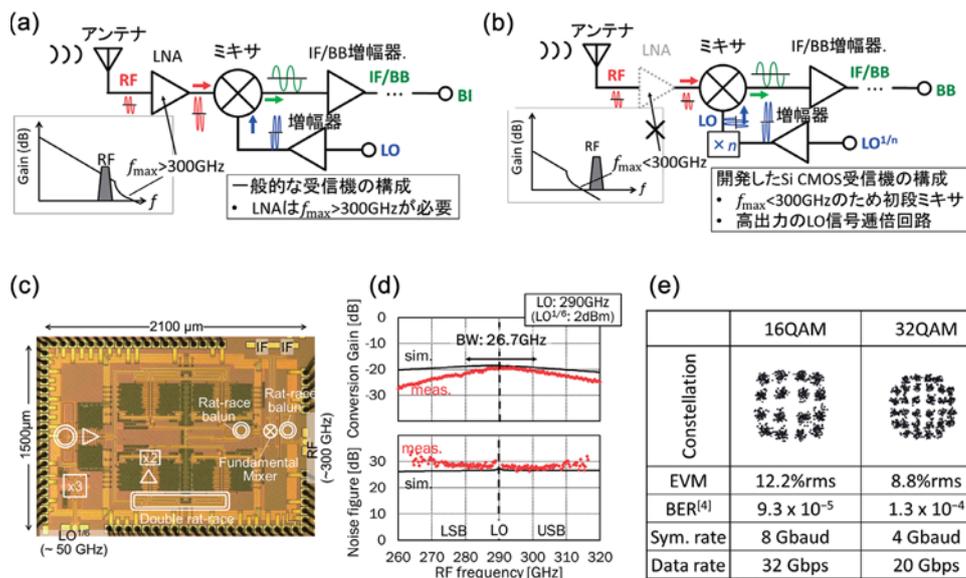


図2 (a) 一般的な無線受信機と (b) 開発した300 GHzシリコンCMOS無線受信機の構成、(c) 無線受信機（シリコンCMOS集積回路）のチップ写真と (d) その性能特性、(e) 無線通信実験におけるコンステレーション（位相図）

線通信用の回路もシリコンCMOS集積回路技術によって作られ、かつ、他のデジタル計算処理やメモリ回路と集積・一体化することが望まれます。しかし、シリコンCMOSトランジスタの最大発振周波数（電力増幅率が1となる周波数： $f_{max}$ ）は現状280 GHz程度であり、私たちが目指す300 GHz帯の無線通信搬送波の周波数に達していません。一般的に、 $f_{max}$ より高い周波数帯域では信号増幅ができないことから、300 GHz帯無線通信システムにおいて信号を増幅する回路である増幅器をシリコンCMOS集積回路技術では設計できないことになります。

私たちは、広島大学 藤島研究室とパナソニック株式会社と共同で、この問題に取り組み、300 GHz帯で動作するシリコンCMOS無線送受信機を開発しました。無線受信機は、無線周波数（RF、ここでは300 GHz帯）の電波を受け取り、情報の復元処理に適した低い周波数に変換しますが、無線受信信号は微弱であり、そのままだと雑音に埋もれてしまいます。そのため、一般的には最初に信号を増幅する構成が利用されますが、シリコンCMOSトランジスタの $f_{max}$ の問題により、300 GHz帯のRF信号を増幅することができません。そこで私たちの手法では、最初に周波数変換器（ミキサ）を配置する構成を採用しました。このミキサはRF信号とその周波数

に近い局部発振器（LO）信号を混合して、数GHzの信号に周波数変換しています。信号を雑音に埋もれないようにするためには、初段ミキサの雑音指数を下げるとともに、変換利得を可能な限り高くする必要があります。300 GHz帯で高い出力のLO信号が必要になります。今回のミキサでは高出力のLO信号を生成できる通倍回路を開発することで、高い変換利得の受信機を実現しました。また同時に開発した300 GHz帯シリコンCMOS送信機と組み合わせて無線通信実験を行い、多値変調方式で32 Gbpsの高速無線通信を実証しました（図2）。

### ■無線送受信機を実現するための要素回路

開発したシリコンCMOS送受信機における300 GHz帯の信号は、回路の最終段で100 ~ 150 GHzの中間周波数（IF）の信号を高い周波数に変換（通倍）することで生成しています。シリコンCMOSトランジスタは300 GHz帯の信号を増幅することができないため、IF帯で高い出力、広帯域・高利得の増幅器が必要になります。増幅器はトランジスタにより構成されますが、1つのトランジスタでは利得と帯域に限界があり、増幅器を多段に縦続接続することにより広帯域化・高利得化が図られます。ただ縦続接続の各段間では、出力と入力

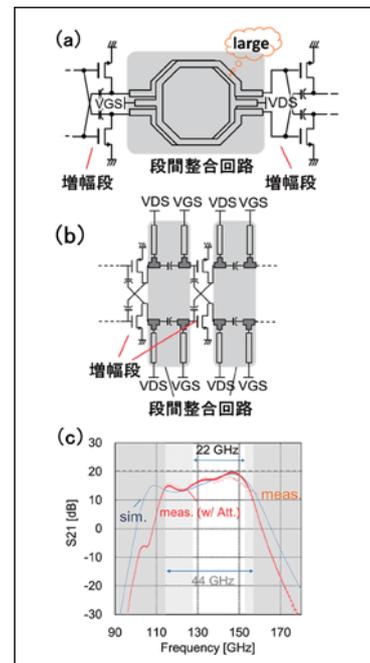


図3 差動入力増幅器の (a) 従来の段間整合回路と (b) 開発した段間整合回路、(c) 開発した増幅器の小信号特性

インピーダンスが異なるため、信号の反射や損失を抑えて伝送をスムーズに行うための整合回路が必要になります。従来技術では、この整合回路の面積が肥大化してしまい、開発や製造コストが急激に高くなります。この問題を解決するために、整合回路を最小寸法まで小型化する回路レイアウト技術を開発しました。この技術により差動入力増幅器の小型化とともに、高い利得性能と広い帯域を実現できました（図3）。高速無線通信を実証したシリコンCMOS無線送受信機は、この技術とともに、通倍器ミキサ、電力分配器・結合器など新たに開発した多数の回路要素技術を応用することで実現しています。

### ■今後の展望

私たちは今後、シリコンCMOS無線送受信機の特性向上とともに関連する基盤・要素技術の開発、さらにはモジュール開発を進める予定です。これにより、シリコンCMOS集積回路による300 GHz帯のテラヘルツ波による超高速無線通信システムの早期実用化を目指します。

本研究の一部は、総務省電波資源拡大のための研究開発「テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究開発—300 GHz帯シリコン半導体CMOSトランシーバ技術—」の一環として実施しました。



## 地域見守りシステム — 地域コミュニティを活用した検索 —

高齢者や児童等の見守り対象の探索は、既にGPSを使ったシステムのビジネス展開がなされていますが、昔ながらの地域コミュニティにIoTを活用することで、更に迅速・確実な見守りができる可能性があります。今後新たに普及が進む無線システムと地域の人的リソースを活用した、協力者募集型の新しい発想に基づく地域見守りシステムをご紹介します。

### ■技術の概要・適用分野等

GPSを使った見守りシステムは、全地球規模で位置を求めることができますが、GPS衛星の電波が届かない屋内ではその位置は分かりません。この問題を克服するための屋内測位ができる各種システム開発がされています。しかし、屋外と屋内ではシステムが異なり、1つのシステムでは解決できませんし、サービスエリアが必ずしも見守りとしての需要や精度と一致していません。

この見守りの仕組みは、予め地域見守りコミュニティ参加者を募ることで検索協力対象者として登録され、日頃の行動情報を記録しておきます。そして見守り対象者の探索が必要になったときに、このデータを利用して検索協力対象者それぞれの行動予測を行います。さらに、検索協力対象者の現在位置から検索協力要請者を絞り込み、検索協力要請者のリアルタイム行動予測から、見守り対象者に遭遇する可能性情報を検索協力要請者に提供します。このように、状況に応じた捜

索協力要請者を選ぶことと、見守り対象者に遭遇する可能性情報を提供することで、検索協力要請者の負担を軽減し、見守り対象者探索の可能性を高めています。見守り対象者を発見した場合は、家族や捜査協力参加者に発見情報を通知します。

### ■利用・応用・連携先の探索

この見守りシステムでの位置情報や通信方法は、今後全国的に普及が見込めるWi-SUNを使うことを想定しています。位置情報は、到達距離の短いWi-SUNのビーコンを受信すれば、屋内外を問わず当該Wi-SUN無線機の設置場所付近にいるとしています。このためGPS等を使った測位をしなくても、ある程度の見守り対象者の位置を把握でき、かつ、電池駆動に頼らざるを得ない見守り対象者に持たせる機器の小電力・小型化ができます。NICTでは、この技術の有効性を検証するための実証実験を計画しています。本技術に興味をお持ちの企業等がありましたら、下記連絡先までお問い合わせください。



図 地域見守りシステムのイメージ

### 〈特許情報〉

公開番号：特開2017-116980（平成29年6月29日）  
 発明の名称：地域見守りシステム

### 〈連絡先（問合せ等）〉

イノベーション推進部門 知財活用推進室  
 E-mail: ippo@ml.nict.go.jp  
 TEL: 042-327-6950 FAX: 042-327-6659

## Awards

文部科学大臣表彰は、科学技術に関する研究開発、理解増進等において顕著な成果を収めた者に授与されます。市村学術賞は、大学及び研究機関で行われた研究のうち、学術分野の進展に貢献し、実用化の可能性のある研究に功績のあった技術研究者またはグループに贈呈されます。

## 文部科学大臣 科学技術分野の文部科学大臣表彰

## 平成29年度 科学技術賞・若手科学者賞

Development Category,  
Prizes for Science and Technology  
and The Young Scientists' Prize

## 科学技術賞 研究部門

## 佐々木 雅英 (ささき まさひで)

未来ICT研究所  
主管研究員

## 藤原 幹生 (ふじわら みきお)

未来ICT研究所 量子ICT先端開発センター  
研究マネージャー

## 受賞の言葉

この度は、このような栄誉ある賞を受賞させていただき光栄に存じます。ともに研究開発に携わってきたNICT内外の多くの関係者を代表して受賞させていただきました。これまで総務省、NICTの歴代幹部、上司の方々のご支援・励ましを受け、素晴ら

しい仲間とともに、世界に誇る恵まれた環境で基礎から応用にわたる研究開発に取り組ませていただきました。これからも素晴らしい仲間たちと、ひとつでも多くの夢を形にしていきたいと思っています。



## data

- 受賞日：2017年4月11日
- 受賞内容：量子情報通信の実証とその応用に関する研究

## 若手科学者賞

## 山下 太郎 (やました たろう)

未来ICT研究所 フロンティア創造総合研究室  
主任研究員

## 受賞の言葉

NICTで取り組んできた超伝導単一光子検出器 (SSPD) に関する研究成果を評価していただき大変光栄に思います。SSPDは既に、量子科学やライフサイエンス、宇宙応用等幅広い分野で注目されている技術で、今後

も更なる性能向上により応用展開の拡大が期待されています。いつも支えてくれる家族や研究室の同僚、共同研究者の方々に感謝するとともに、これからも超伝導量子デバイスの研究に邁進したいと思います。



## data

- 受賞日：2017年4月11日
- 受賞内容：超伝導光子検出器の高度化とその量子及び生命科学応用の研究

## 公益財団法人新技術開発財団

## 第49回 市村学術賞貢献賞

49<sup>th</sup> The Ichimura Prize in Science  
for Distinguished Achievement

## 西本 伸志 (にしもと しんじ)

脳情報通信融合研究センター  
脳情報通信融合研究室 主任研究員

## 受賞の言葉

動画視聴時等の自然で複雑な視聴覚体験下におけるヒト脳神経活動を解析する枠組を構築したこと、またその枠組の実社会における応用の可能性を示したことが評価され、名誉ある賞をいただけることになりました。

これまで数々のご指導をくださったみなさま、陰に陽にご支援をくださった多くの

みなさまに深く感謝いたします。これを励みとして、今後も良い研究を進めていけるよう精進してまいります。

## data

- 受賞日：2017年4月26日
- 受賞内容：脳情報のモデル化とデコーディング技術の開発とその実用化

## 第49回 市村賞贈呈式



中央が西本伸志、右は西本夫人

「けいはんな学研都市30周年」記念

# けいはんな情報通信フェア2017

10月26日(木)  
13:00~17:00

10月27日(金)  
10:00~17:00

10月28日(土)  
10:00~16:30

会場 けいはんなプラザ(京都府相楽郡精華町光台1-7)  
ATR(京都府相楽郡精華町光台2-2)

WEB <http://khn-fair.nict.go.jp/>

## ■基調講演 10/26(木)

・山極 壽一氏(国立大学法人京都大学 総長)

### 「AIにはできない人間の幸せ」

—ゴリラから見たコミュニケーションの進化と人間社会の未来—

## ■NICTの技術講演 10/27(金)

・西塚 直人(NICT電磁波研究所 宇宙環境研究室研究員)

### 「宇宙天気予報の機械学習を用いた技術開発と実用化に向けて」



南極デー  
10/28(土)

<講演>

・本吉 洋一氏

国立極地研究所教授・広報室長、第58次南極地域観測隊隊長

・浦塚 清峰

NICT電磁波研究所統括、第27次南極地域観測隊

## NICTの主な展示

- ・言葉の壁をなくす多言語音声翻訳アプリVoiceTra®
- ・音声対話ロボット
- ・カンボジア語音声認識
- ・みんなの自動翻訳@TexTra®
- ・同時通訳
- ・WISDOM® X と対話システム WISDOM® ちゃん
- ・DISAANA®(対災害SNS情報分析システム)とD-SUMM®(災害状況要約システム)
- ・精華くるりんバスロケーションシステム、他

開設60周年を迎えた南極昭和基地との中継、装備品や氷等の展示、南極ゆうびん、南極を舞台にした『映画ドラえもん のび太の南極カチコチ大冒険』の上映を行います。

## NICT 展示施設 Information ④

# 未来ICT研究所

[http://www.nict.go.jp/advanced\\_ict/access.html](http://www.nict.go.jp/advanced_ict/access.html)



職員や研究者によるハンドメイドの展示物を通して、研究内容を紹介しています。小規模でアットホーム感にあふれた、居心地のよい展示室です。

■開館時間…8:30~17:00

■休館日…土日祝日、年末年始

■場所…兵庫県神戸市西区岩岡町岩岡588-2

■連絡先…078-969-2100

■入場料…無料

※駐車場あり。見学は随時受け入れています。

※NICT展示施設4か所をご案内するシリーズの最終回です。



Dr.KARCと未来さんがデザインされた来所記念スタンプを押そう!

## 展示室入口



未来ICT研究所のキャラクター、Dr.KARC(ドクター・カーク)と未来(みく)さんがお出迎えます。子どもから大人まで親しみやすく、分かりやすい展示を心がけています。

## 研究紹介タッチパネル



展示室内に設置してあるタッチパネルで、未来ICT研究所の研究室及びセンターの紹介を見ることができます。研究内容や報道発表等、研究の今を分かりやすく紹介しています。

## 高機能ICTデバイス分野



超高速、低消費エネルギーで動作する超小型光変調器や電源不要で演算機能も有する視覚センサーなど、革新的な通信デバイスを生み出す有機EOポリマーやバイオ材料のバクテリアオロドブシンを展示しています。



NICT NEWS No.465 AUG 2017

編集発行  
国立研究開発法人情報通信研究機構 広報部  
NICT NEWS 掲載 URL <http://www.nict.go.jp/data/nict-news/>

〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1  
TEL: 042-327-5392 FAX: 042-327-7587  
E-mail: [publicity@nict.go.jp](mailto:publicity@nict.go.jp)  
URL: <http://www.nict.go.jp/>  
Twitter: @NICT\_Publicity

ISSN 1349-3531 (Print)  
ISSN 2187-4042 (Online)

(再生紙を使用)

