

情報通信の
未来をつくる
研究者たち

第Ⅲ章

未来ICT基盤技術

大岩和弘
竇迫 巖
武岡正裕
佐々木雅英
大友 明
王 鎮
成瀬 康
今水 寛
平林美樹
岩本政明



量子・超高周波・ナノ・バイオ研究による 先端技術確立を目指して



大岩 和弘 (おおいわ かずひろ)

未来 ICT 研究所
研究所長

甲子園を目指した高校時代の野球を引きずりつづけ「メタボの冷や水」ならぬ草野球に興じる。最近はバットではボールが打てなくなり、面積の広いラケットを頻繁に使うようになった。主戦場も球場からコートに移行中。

「未来 ICT 基盤技術の研究開発は、将来の情報通信技術の基礎となる新概念の創出と新たな道筋を開拓するものです。現行技術の延長ではない革新的機能や原理応用によって ICT の性能と機能の飛躍的向上を目指します。」

はじめに

クリックひとつで地球の反対側の情報に一瞬にしてアクセス、クラウドコンピューティングで大量データをいつでもどこでも容易に操作するなど ICT の技術革新によって私たちの生活は大変便利で豊かになりました。社会活動が情報通信ネットワークへ依存する度合は高まるばかりです。2010 年に新たに生まれたデジタル情報は 1,200 エクサバイトを超え、新規のデータ量は 2 年ごとに 4 倍に増えているといわれています。このため、情報通信機器の消費電力の大幅増加やセキュリティの脆弱性、ネットワーク制御の複雑化等の課

題が今後生じることが予想されています。コミュニケーション技術の観点からの課題は、ユーザにとって意味のある情報と単なるデータとが区別されずに情報提示が行われていることが挙げられます。技術開発が進んでいるヒューマン・マシン・インターフェースにおいても、利用者の状況によっては一層使いづらい場合もあるかもしれません。

明日の未来のために

このような情報通信技術の課題の解決を目指した研究開発として、NICT では 2020 年頃の実現を目指した新世代ネットワーク基盤技術やユニ

未来ICT研究所の研究領域

先端ICT分野における探索的研究から実用化研究開発までの融合

- 先端融合領域の国際的研究拠点として、
- ・脳情報通信や細胞・分子センシングなどの未来のコミュニケーション技術の先導的研究開発
 - ・ネットワーク技術のブレークスルーを創出する高性能・高機能デバイスとシステムの研究開発



図1 未来ICT研究所の研究領域

バーサルコミュニケーション基盤技術の研究開発に取り組んでいます。この新たな情報通信技術でさえも、飽くことのない人間の知識欲や好奇心による情報量の増大に将来窮する場面が出てくることでしょう。2020年以降に顕在化するであろう課題を見据えて、未来ICT基盤技術として、ICTの能力、安全性、利便性を大きく発展させていくことと、新たなICTの開発を着実に今から進めていくことが、私たち未来ICT研究所に求められています。

未来ICT研究所

未来ICT研究所では、5つの研究室(超高周波ICT、量子ICT、ナノICT、バイオICT、脳情報通信)を結集、これまでに培ってきた競争優位の研究開発力を活かして情報通信技術のブレークスルーにつながる技術シーズを創出し、芽吹かせ、社会展開可能な苗木まで一貫して育てることができると研究体制を構築しました。

超高周波ICT研究室

超高周波ICT研究室では、光と電磁波の境界領域に位置するテラヘルツ帯の電磁波に関する研究開発を進めています。様々な分野での応用が期待されているテラヘルツ帯デバイスの研究開発に私たちはいち早く取り組み、基盤技術を確立してきました。100Gbpsにも及ぶ高速・大容量通信を可能にするテラヘルツ帯の電磁波を使って数十Gbps帯域幅の無線通信技術確立するアクセス系の研究開発を進めています。波長の短さを活かすことで、送受信のアンテナサイズを小さくすることができます。装置の小型化・軽量化のニーズに対応できるのです。これに加えて、NICTで開発したテラヘルツ帯デバイス作製技術を中心に、超高周波デバイスの開発環境を整備しています。ここでは、テラヘルツ分光やイメージングなど全てを1ヶ所で試すことができる世界で唯一の開発環境を提供しています。減衰

明日の未来のために

未来ICT基盤技術

安心・安全で ユーザーに優しく 地球に優しい情報通信技術へ

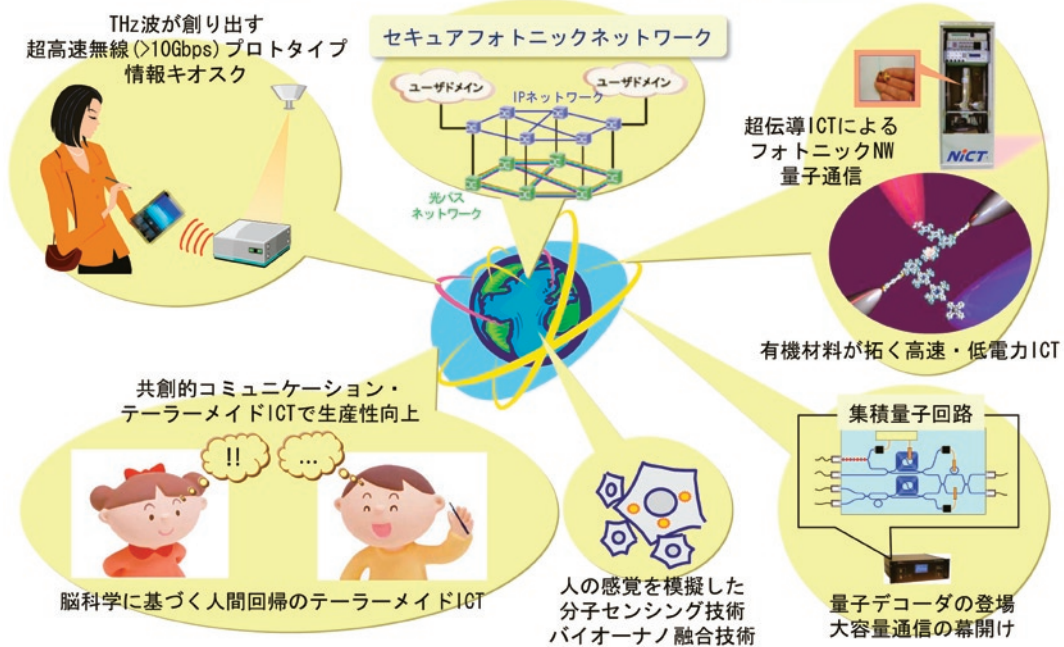


図2 未来ICT基盤技術が創り出す将来技術

が早いテラヘルツ帯の電磁波の研究開発には、あらゆる素子を1つのパッケージの中に作り込むことが必要です。ユーザがすぐに利用できる研究開発施設を整備することによって、企業・大学研究室でのテラヘルツ研究開発を支援し、この技術の実社会への展開を後押しします。

量子ICT研究室

量子ICT研究室は量子力学効果を応用して情報通信における絶対安全性、あるいは究極の大容量化を実現することを目指した量子暗号技術と量子ノード技術の研究開発を推進しています。量子暗号技術は量子力学の原理によって、伝送途中の盗聴を完全に検知するシステムです。都内に敷設されたネットワークの上に量子暗号の鍵配送ネットワーク試験システム、

東京 QKD ネットワークが稼働しています。この東京 QKD を使って、約 45km 離れた拠点間での動画伝送の完全秘匿化に成功しています。この東京 QKD ネットワークを更に改良することで、実用に耐え得る信頼性の確保と低コスト化、さらに現代暗号技術との相補的組み合わせによって、ニーズとコストに応じたセキュリティシステムの構築を目指しています。量子ノード技術では、これまでの伝送容量限界を超える量子の復号原理を検証し、実証してきました。この技術をチップの上に小型化して安定動作させることを目指した研究開発を進めています。

ナノICT研究室

ナノICT研究室では、既存デバイスでの実現が難しい、高速化と低消費電力化を両立する技

術の確立として、有機材料を用いた ICT 素子を構築しています。有機材料には、高効率・高速動作、低コストの利点があります。これまでに、電気光(EO)特性の高い有機材料を開発してきました。この材料の性能をさらに向上させ、ポリマーの中に織り込んで配向させる技術を開発することで、現有の材料の2倍以上のEO効果を持つ有機材料を作り上げ、高速光変調器の実現を目指しています。

ナノ ICT 研究のもう1つの柱は超伝導技術です。私たちは20年の長い時間をかけて、窒化ニオブの薄膜形成技術を確認し、高周波特性に優れた超伝導技術を生みだしました。量子暗号技術のキーデバイスとなっている単一光子検出器(SSPD)がその代表です。光キャビティ*の導入やSSPDのアレイ化によって、検出効率を50%にまで向上させ、カウントレートもGHz帯まで向上させます。高性能化したSSPDは、様々なアプリケーションで使われることになります。

● バイオ ICT・脳情報通信研究室

トップクラスの国際誌に掲載された研究成果の数々は、バイオ ICT 研究室の存在を輝かせています。細胞生物学・生物物理学分野での重要な成果を発信し続けてきた同研究室は、この研究に磨きをかけるとともに、応用に向けた研究開発を始めています。ナノテクノロジーと生体分子操作技術を融合した分子センサー、分子信号処理の研究開発を進めています。

脳情報通信研究室では、将来、ICT分野で重要な位置を占める脳機能研究について、情報通信技術との融合を目指した研究を推進しています。情報の受け手や送り手の主体が人間の脳であることを考えれば、情報をより正確に伝えて人間同士のコミュニケーションを快適かつ効率的に行うためには、脳における情報処理を知ることが大事だとわかります。人間の脳活動の非侵襲

計測法に特徴を持つこの研究室は、機能的磁気共鳴画像法や脳磁場計測装置を駆使してコミュニケーション技術の視点から脳機能研究を進めるユニークな存在です。研究開発が長期にわたる脳機能研究は、情報通信技術分野においては国立研究機関であるNICTが中心となって進めるべき研究です。一方で、研究分野が多岐にわたる脳機能研究を単一研究機関だけで実施することには限界があります。そこで私たちは総合大学との研究協力関係、脳情報分野で高い開発力を持つ企業との連携を進め、平成23年度に脳情報通信融合研究(CiNet)をスタートさせました。

私たちの脳は、わずかな情報を使って予測を瞬時に行います。このようなひらめきに似た予測はどのようなメカニズムで起こっているのでしょうか。データを点として扱わず、多様な結び付けを行うことで予測を行っている脳の情報処理の仕組みは、その解明自身が情報通信技術への大きな貢献となるでしょう。チャレンジングな研究課題ですが、情報科学と脳・神経科学が成熟してきた今こそ、脳科学と情報科学の融合的研究を進める絶好の時期なのです。

● おわりに

前述のとおり、未来 ICT 研究所では、テラヘルツ帯の電磁波を使った情報キオスク技術や量子情報通信、量子暗号技術、さらには高速低消費電力の有機 ICT などを開発していきます。脳を中心としたコミュニケーション技術の大きな変革を狙う研究開発もあり、まさに明日の未来のための研究開発を進めているのです。

用語解説

* 光キャビティ

光を閉じ込める(共振させる)ために、2枚の鏡を向かい合わせて作る構造。2つの鏡の間の距離が光の波長の整数分の1のときに、光を閉じ込めることができる。検出効率の大幅な改善を可能にする構造です。

超高速無線通信や 未踏センシングへ向けて

「超高速無線や非破壊検査・分析の新しい方法を実現するための手段として、テラヘルツ帯電磁波の利用のための研究開発を行っています。」

寶迫 巖 (ほうさこ いわお)

未来 ICT 研究所 副研究所長
超高速無線 ICT 研究室 室長

1988年東京大学教養学部基礎科学科卒。1993年同大学院博士課程了(理博)。同年日本鋼管(株)入社。LSI製造技術の研究に従事。1996年郵政省通信総合研究所(現NICT)採用、テラヘルツ帯の検出器、光学薄膜、レーザ、イメージングシステム、分光システム、超高速無線等の研究に従事。

はじめに

最近、「テラヘルツ波」という言葉を耳にする機会が増えたように思います。この言葉は周波数で言えば100GHz～10THzの電磁波を指す場合が多く、それはちょうど、電波と光の境界領域にある電磁波という意味でもあります。ちなみに電波法には「『電波』とは、三百万メガヘルツ以下の周波数の電磁波をいう。(第二条第一号)」とあります。三百万メガヘルツは3THzを指していますので、法律上の電波と光の区切りもこの周波数領域にあることが分かります。

近年、電子デバイスの微細化に基づく高速化が進み、数百GHz辺りまでのローノイズアンプが開発されつつあります。半導体レーザでは、テラヘルツ帯で動作可能な量子カスケードレーザ



(THz-QCL: Terahertz-Quantum Cascade Laser) が 2004 年に初めて実現され、その後、動作温度の高温化が進み現在では 200K 程度となっています。また、超短パルスレーザ(中心波長: 780nm、パルス幅 < 100fs^{*1}) で電界が印加されたキャリア寿命が短い半導体(低温成長 GaAs など) を励起し、発生したキャリア(電子) がごく短時間だけ実空間を運動することにより、ピコ秒(10⁻¹²s) 程度のパルス幅を持つモノサイクル電磁波パルスを発生させることができるようになってきました。このモノサイクル電磁波パルスには、100GHz 以上数 THz までの範囲の周波数成分が含まれるため、テラヘルツ帯分光分析の道具としてよく用いられています。この方法は THz-TDS(Terahertz Time-Domain Spectroscopy) と呼ばれています。さらにこの電磁波パルスを用いた測距技術が実現されており、光の領域(赤外線~X 線) では可視化できない複合材料(プラスチック、セラミックス、紙、布など) を用いた構造体の内部構造の調査などに用いられ始めています。

● 超高速無線通信への挑戦

超高周波 ICT の研究開発では、自らデバイス開発やシステム開発(THz-TDS システムやその要素技術、カメラ技術等) を行うだけでなく、数十 Gbit/s 以上の超高速無線やテラヘルツ帯でのみ実現可能な「未踏センシング」応用を目指した応用開発や様々な応用が実用化される際に必要となる技術基盤の開発(周波数標準、パワー標準、計測手順の標準化) も行っています。これらの開発は NICT 内の多くの研究室、NICT 委託研究、総務省の電波利用料財源による研究開発との連携によって進められているものです。

「超高周波搬送波による数十ギガビット無線伝送技術の研究開発(電波利用料 R&D、2011-2015、NTT/Fujitsu-Lab/NICT)」では、

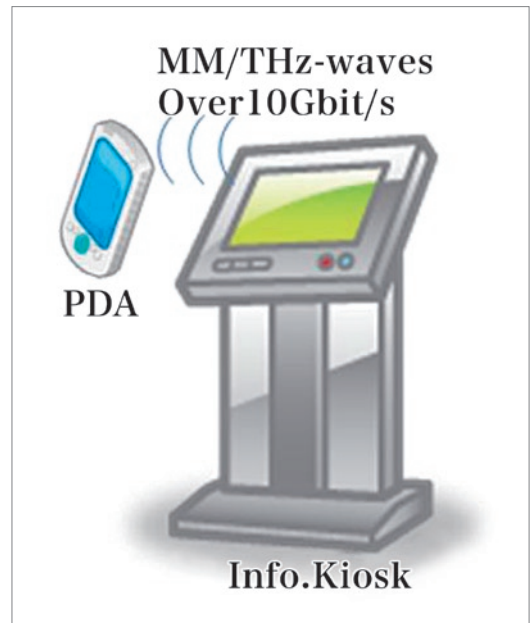


図1 キオスクダウンロードモデルの概念図

300GHz 帯の搬送波を用い、ネットワーク情報端末(Info. Kiosk) から数秒内で Blu-ray Disc に記録されている動画等の大容量データ相当(1 層 25GB) を携帯情報端末(PDA: Personal Digital Assistant) にダウンロードできるようなハードウェアの開発(図 1 参照: キオスクダウンロードモデルの概念図) を目指しています。PDA に装備されるメモリは大容量化が急速に進展しているため、このような超高速無線リンクの実現は今後必須のものとなると予想されます。この他にも様々な超高速無線応用が提案されつつあり、近い将来、人々の生活スタイルを大きく変える要因となるとの予想も出てきています。

光ネットワーク(有線) との連携技術としては、光信号の変調フォーマットを変えることなく無線伝送する技術の開発を実施しています。現状では無線区間は W バンド(75-110GHz) を用いていますが、20Gbit/s 以上伝送ができることが実験的に示されています(p.26-29 参照)。光ネットワークの伝送容量が増加することに対応する

には、より高い周波数のテラヘルツ帯を使うことになると考えています。

● 未踏センシングへの挑戦

テラヘルツ帯の特徴には大容量特性の他に、分子や分子間結合(水素結合、ファンデルワールス結合)に特有な吸収があることや、非極性



図2 液体窒素冷却THz-QCLシステム

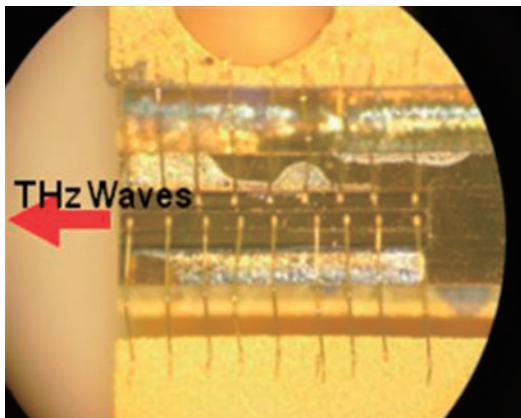


図3 QCLチップ写真

物質(プラスチック、セラミックス、紙、布、煙など)に対してある程度の透過性があることが挙げられます。また波長は 3mm ~ 30 μ m であるため、可視光カメラと同程度のレンズ径(開口)で、数 cm ~ 数 mm 程度の空間分解能を実現できる点も実用上重要な特徴です。そのため、バイオメディカル・薬学応用、複合材料開発での材料評価、様々な対象に対する非破壊検査などの応用が提案されています(p.246-249 参照)。これらの応用開発を支え実用化を促進するため、実時間イメージングの基盤技術としてテラヘルツ帯カメラ及びイメージング時の照明用となる高輝度光源として THz-QCL システム(図 2, 3)をそれぞれ開発して来ています。両者を組み合わせたイメージングシステムを利用して、火災時に発生する煙の中を可視化する技術のデモが東京理科大学火災科学研究センター実験棟を利用して 2011 年 2 月に行われました。この研究では煙中の有害ガスをテラヘルツ波でリモート検出する技術も開発しており、そのデモも同時期に実施しています。これらの技術開発やデモの詳細は YouTube*2 を参照してください。

THz-TDS の高精度化・ロバスト化・可搬化を目指した超短パルス光源の開発も基盤技術の開発として実施しています。NICT で開発したマッハーツェンダー変調器による平坦光コム発生技術を応用し、100fs 級の超短パルス光源を実現しようとするもので、この光源を用いることによって、THz-TDS が高精度化・ロバスト化・可搬化され様々な応用シーンに適用できると考えられています(図 4)。

● おわりに

テラヘルツ帯の開拓では、デバイス技術の完成度が低いいため、それ自身が研究対象です。デバイスの研究開発と同時に無線通信や様々な



図4 可搬型THz-TDSの予想図

センシング応用を開発して行く必要があります、研究遂行上の困難さは高いと言えますが、その分、研究成果が現実の応用に直結しています。今後の発展性は非常に大きく、やり甲斐のある内容だと言えるでしょう。

* 1 フェムト秒(10^{-15} 秒)

* 2 www.youtube.com/user/tokyouiversityTHZ

究極の光通信技術を目指して

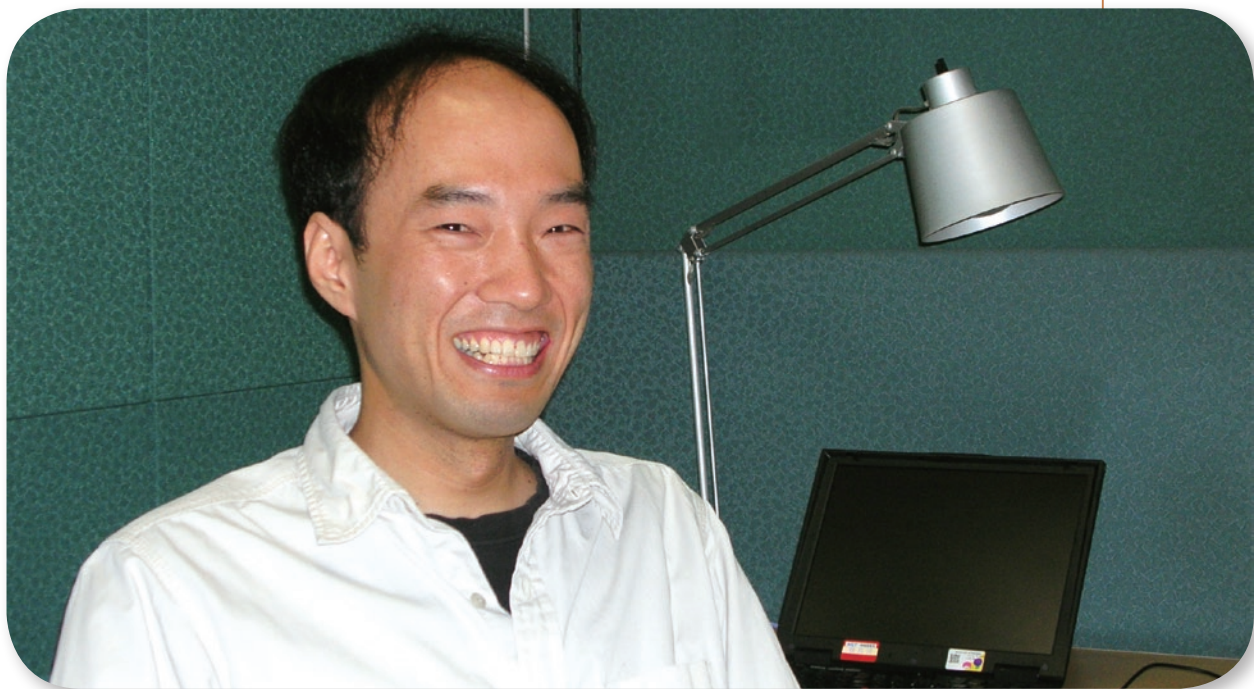
—現代光通信の限界を超える量子受信機—

武岡 正裕 (たけおか まさひろ)

未来 ICT 研究所
量子 ICT 研究室 主任研究員

大学院修了後、2001年に入所。以来、量子情報理論、量子光学などの研究に従事。日本物理学会若手奨励賞、文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞。2011～2012年に総務省へ出向。趣味はチェロの演奏など。音楽で学んだ感覚を研究に活かしたいと思っています。

「光通信の性能を物理的に許される極限まで高めることを目指し、最新の物理学である量子力学の理論を駆使した『量子情報通信』の研究に取り組んでいます。」



● はじめに

光通信の性能は、0, 1の信号を識別する際のビット誤り率と、その後の誤り訂正によって決まります。ビット誤り率は光源や受信機で生ずる雑音を除去することで小さくできますが、それでも原理的に消せない雑音、「量子雑音」が存在します(図1)。

量子雑音は、物理の基本原則である「量子力学」に基づき光が持っている基本的な性質です。その影響は、通信路の伝送損失が大きく、また信号密度が高くなればなるほど相対的に顕著に現れてきます。従来の光通信理論では量子雑音は制御不可能とされ、現在実用化されている光通信の最新方式でも、「ショット雑音」と呼ばれ除去できないものとされています。

一方、1960年代にレーザーが発明され、光通信への応用が検討され始めたころ、一部の研究者の間では、光通信と量子力学を融合するための先駆的な理論研究が進められ、量子雑音を適切に制御することで、ショット雑音を超えてビット誤り率を極限まで低減できる可能性が指摘されていました。しかし当時は技術的な問題もあり、こうした研究は今日に至るまで理論研究のレベルにとどまっていました。NICTでは、近年の光検出技術や量子物理学の急速な発展を利用してその実現に向けた研究にいち早く取り組み、世界で初めて光通信のショット雑音限界を破ることに成功しました。

● 光信号の識別と量子雑音

現在最新の光通信方式である「コヒーレント光通信」では、レーザー光の波の大きさ(振幅)やタイミング(位相)を変えて情報を載せ、受信側ではそれらの値を直接測り情報を取り出しています。

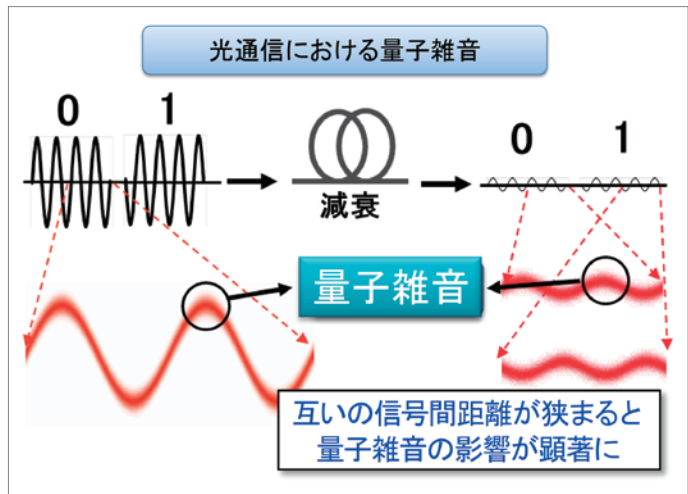


図1 光通信における量子雑音

量子雑音をただの雑音とみなす現在の光通信理論では、これは最適な受信方法です。このときの受信誤り率の限界が「ショット雑音限界」または「標準量子限界」と呼ばれるもので、特に光信号が微弱な領域では通信性能を大きく制限します。

この限界を超えるには、量子雑音をマイクロレベルで制御して検出する必要があります。原子などマイクロの世界の物理を記述する量子力学によれば、物質の状態は「波動関数」で表現されます。波動関数が何かという説明はさておき、特徴的なのは、その状態を測定するとき、測定の方法(どのようなパラメータを測定するか)によって状態の性質の見え方が大きく異なってくるという点です。また、一度測定を行うとその影響により波動関数の状態は変化してしまいます。このため物質(波動関数)の全像を一度の測定で見ることができず、影絵のように見ている方向(選んだ測定方法)からの断片的な情報だけしか測れないのです。図2左に、光通信の場合の例を示します。光信号の波動関数を干渉計で測定すれば波としての位相の性質が現れ、一方、エネルギーを測れば強度(光子の数)の性質が現れます。そして、それぞれ状態の性質は異なって見えますが、いずれの場合も量子雑音の影響が強く現れ、信号識別にはショット雑音の限界が課されてしまいます。

量子受信機の実現

ではショット雑音限界を超えるためにはどうすればよいのか？それには量子雑音の影響が最も排除されて見える最適方向から、波動関数の測定を行えばよいのです。このように量子力学的に最適化された測定を行う装置が「量子受信機」です(図2中及び右)。この最適化された測定は、理論的には数式できれいに書き下せますが、強度や位相の単純な測定ではないため、物理的にどう実現するかは非常に難しい問題です。NICTでは、そのような測定を光の干渉(波の制御)と光子検出(粒の測定)を組み合わせることで近似的に実現できる新しい受信法を提案しました(図3参照)。さらに独立行政法人産業技術総合研究所の最新の光子数識別器(超伝導転移端センサ)を導入した量子受信機を構築し、平均光子0.2個という極めて微弱な信号の送受信において、世界で初めてコヒーレント光通信のショット雑音限界の壁を打ち破ることに成功しました。1960年代の理論的な予想から半世紀後に、ようやくその正しさが実験的に証明されたこととなります。

今後の展望

本成果の意義は、まずは基礎科学の進展に寄与する点です。一方、今の通信事業者は光子レベルの微弱な信号で通信をしているわけではなく、そんな研究が必要なのか疑問に思われるかもしれません。しかし、例えば衛星通信では、通信距離が極端に長く中継増幅も出来ないため、受信側に到達する信号は極端に減衰します。実際、最近の人工衛星-地上間のフィールド試験では、受信器に到達する信号の光子数は100個以下にまで減衰されています。今後、衛星光通信の適用範囲が拡大し、例えば月-地球を結ぶ通信などを行う場合、さらに光子数の少ない信号を受信・識別する必要が生じるでしょう。また地上においても、一部の基幹ネットワークでは通信の大容量化に伴い光ファイバーが溶け出す限界近くまで光信号が詰め込まれており、ビットあたりの光電力(光子数)を極限まで下げることは重要な課題になっています。今回実現した量子受信機に、さらに量子的な誤り訂正の概念を取り入れると、限られたエネルギーの信号で物理的に許される究極の通信容量を達成できることが理論的に知られています。このような装置「量子復号器」の実現には、より本質的

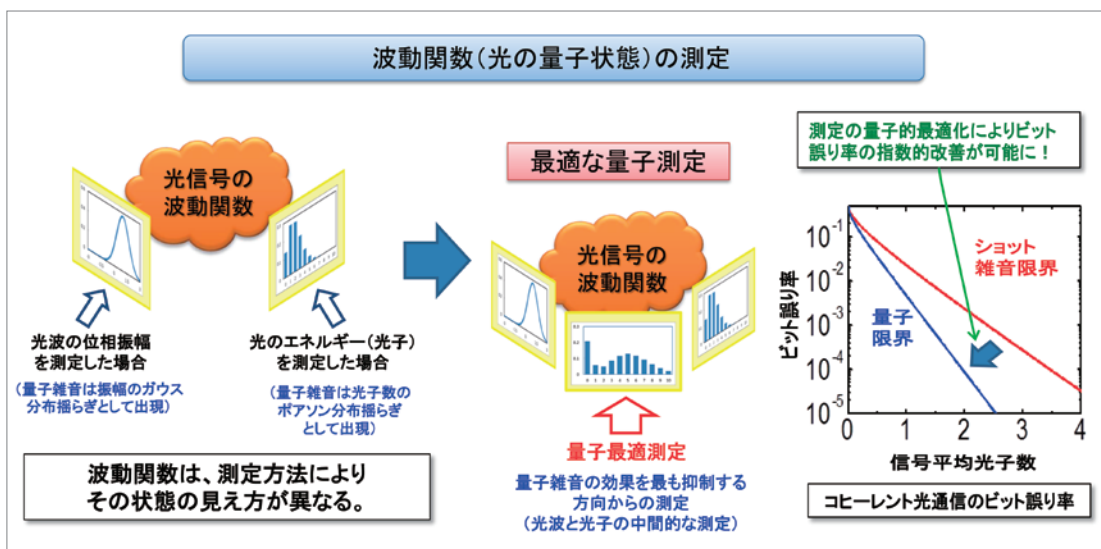


図2 波動関数(光の量子状態)の測定

に光の波動関数を制御しなければならず、それには実験物理やデバイス技術の大きなブレイクスルーが必要です。今後ますます増大する通信の大容量

化・省エネルギー化の要求に 20 年後 30 年後も応えていくため、このような革新的な技術の実現に向けた研究をこれからも続けてまいります(図 4)。

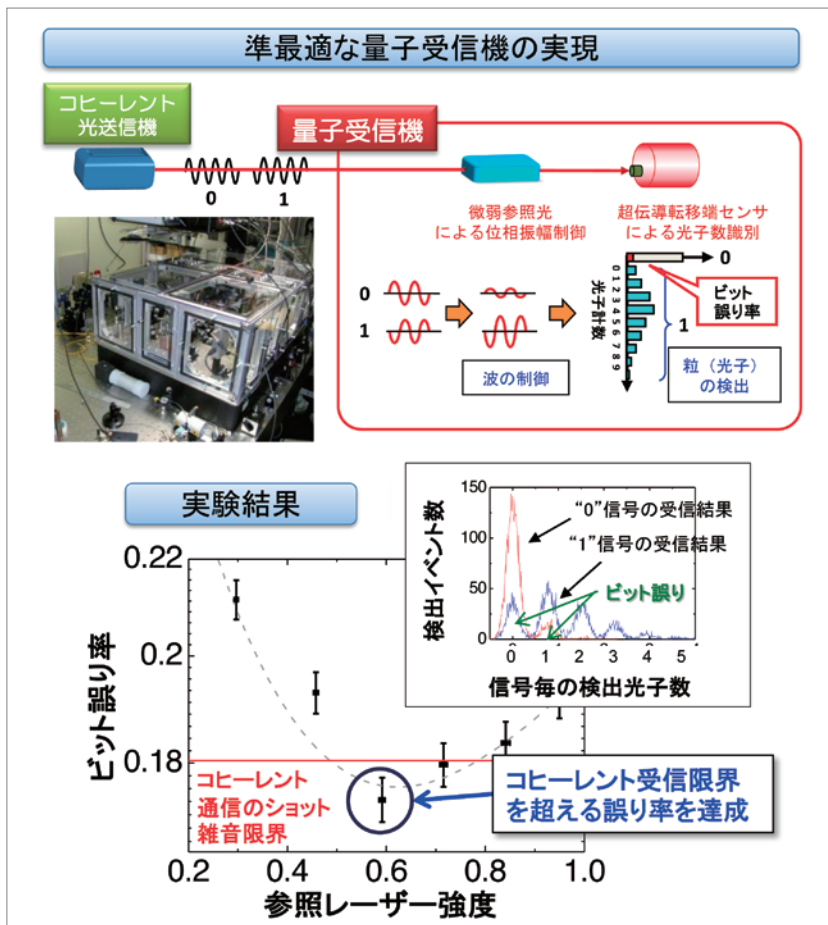


図3 準最適な量子受信機の実現

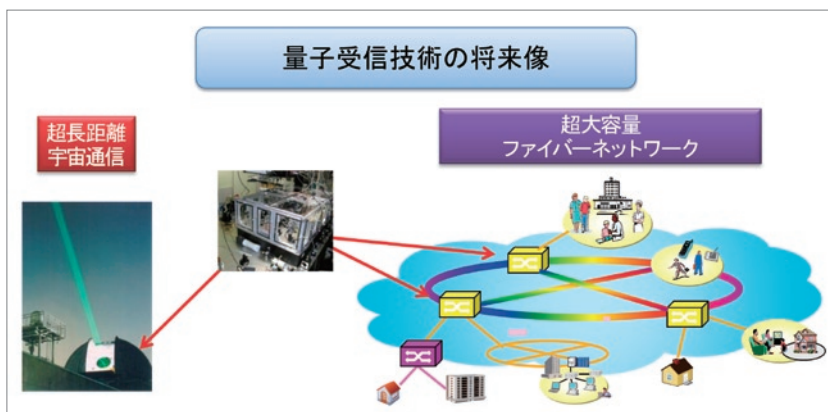


図4 量子受信技術の将来像

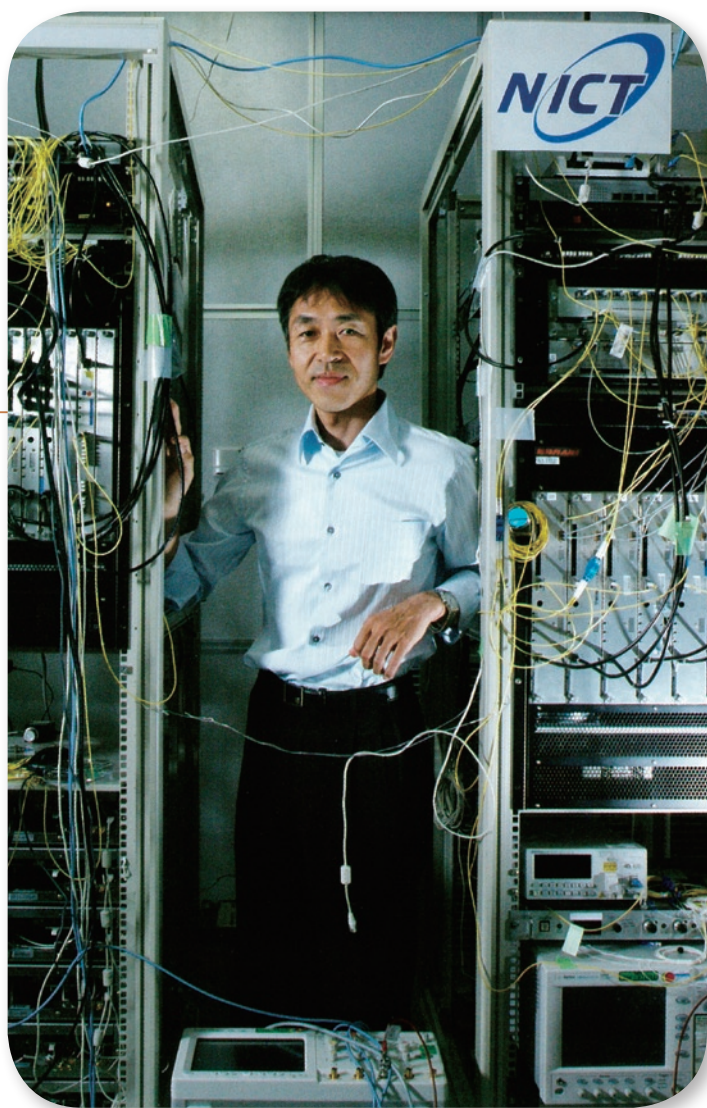
限りなく速く、 そして絶対安全な通信に向けて

佐々木 雅英 (ささき まさひで)

未来 ICT 研究所
量子 ICT 研究室 室長

1992年、大学院博士課程修了後、日本鋼管株式会社(現在のJFEホールディングス)入社。1996年、郵政省通信総合研究所(現NICT)入所。それ以来、量子情報通信の研究開発に従事し、2011年量子ICT研究室室長に。6階にある私たちの研究室では、窓から見える景色の半分以上が空です。遠くまで広がる大きな空を臨みながら、はるか未来を見据えた研究に日々励んでいます。

「量子情報通信は、盗聴不可能な暗号通信(量子暗号)や、低電力・大容量通信(量子通信)を実現する技術として期待されています。長期に亘り情報通信社会を支えるための必須の技術となるでしょう。」



● 量子通信の源流

量子通信の源流は1960年のレーザーの発明まで遡ります。それまで通信は電波を利用して行われていましたが、レーザーに使う光の粒子のエネルギーは、周波数が電波に比べ10万倍あり、温度に換算すると光子1つで1万度くらいに相当します。光が粒子であるという量子効果が顕在化するとともに、電波よりもっと大きな情報量を伝送できるだろうというアイデアがあって、そこから少しずつ量子通信は発展しました。ただ、当時はまだ光ファイバが実用化の段階にはなく、物理学の理論的な学問でしかありませんでした。

しかし、1980年代に入って、量子通信は非常に大きな転換点を迎えます。完全に盗聴を見破る量子暗号が発明されたり、光子だけでなく原子や分子を操る技術が実現されたことで、量子計算などあらゆる情報通信に量子効果を利用するという量子情報技術のアイデアがどんどん生まれるようになりました。量子暗号の発明は偶然で、1982年にIBMの物理学者のチャールズ・ベネットとモンリオール大学の暗号学者ジル・ブラサルがプエルトリコのプールで偶然出会って、何気ない会話から量子暗号が生まれたと言われています。1984年の国際会議で彼らが発表した最初の量子暗号プロトコルは、BB84と名付けられました。しかし、しばらくは大して注目されていませんでした。ところが、1994年に米ベル研究所のピーター・ショアが「量子コンピュータが実現すれば、現在の暗号はすべて破られてしまう」という理論を発表したことで、量子情報技術研究が一気に広がりました。量子暗号は量子コンピュータでも破れない究極の暗号として一気に注目されるようになりました。ちょうど冷戦

が終結した頃で、核による抑止力から、情報通信技術でいかに優位に立つかということが国家の存亡を左右する時代になっていたため、現代暗号を解読する量子コンピュータをどの国よりも先に持とう、あるいはより安全性の高い量子暗号技術を獲得しようという話になり、学術研究というより国家戦略として研究開発が行われるようになりました。

我が国でも、2000年に科学技術振興事業団(現在の(独)科学技術振興機構)が、量子暗号のプロジェクトを採択し、当時の郵政省でも量子暗号や大容量化に向けた量子通信の研究開発をプロジェクト化して、2001年に通信総合研究所(現在のNICT)で量子情報通信の本格的な研究開発が始まりました。

● 量子暗号の暗号化技術

量子暗号は、量子鍵配送とワンタイムパッド(鍵を毎回使い捨てで一度きり使って暗号化する)という2つのステップがあり、量子鍵配送では「0」と「1」のランダムな数列を使った鍵を作り、送受信者以外には絶対傍受されない状況で共有します(図1)。データに鍵を足し算して送信し、受信したデータにもう一度鍵を足せば元のデータに

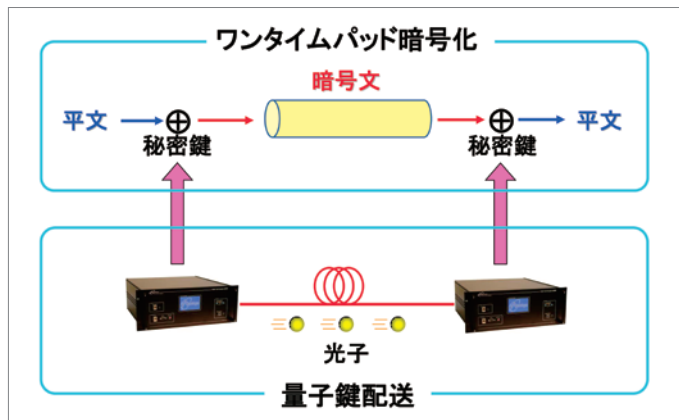


図1 量子暗号における操作の概要図
 量子鍵を共有していなければ、たとえデータを傍受できたとしても元のデータに戻すことはできない。

戻るといふ、極めて単純な方式です。量子暗号では傍受されれば必ず分かり、更に同じ状態での複製が不可能という特性を持っているので、安全な暗号が可能となります。

現在の暗号化技術でも鍵は使われていますが、単純な足し算ではなく素因数分解を使った複雑な仕組みを使っており、めったに解けるものではありませんが、コンピュータの能力が上げれば解けるようになります。1つの暗号化方式が破られるまでの平均寿命は、約13年とされています。量子暗号は、理論上こうした問題はありませぬ。

量子暗号の利用用途

量子暗号は原理的に盗聴できない究極的暗号ですが、性能はまだ低く、敷設ファイバ50kmで秘密鍵の生成速度が数100kbpsでMPEG4の動画データをワンタイムパッド暗号化できるレベルです。1対1でこの程度の距離で厳格に管理し

た秘匿通信をしたいという用途に特化されます。国家機密や個人の生命にかかわる医療情報の安全な通信などが用途として想定されます。欧米ではすでに製品も市販されています。購入しているのは研究機関がほとんどですが、一部は銀行などにも納入されています。

日本では、2001年から日本電気株式会社(NEC)と三菱電機株式会社(三菱電機)、日本電信電話株式会社(NTT)が、また、2011年からは新たに株式会社東芝(東芝)も加わってNICTからの委託や共同研究で量子暗号技術の開発を行っています。特に、NICTが有する光テストベッドJGN-Xを用いて、都市圏敷設ファイバで量子暗号ネットワークを構築し長期運用試験を行っています。図2は2010年末時点でのネットワーク構成を示したものです。図3は実際の量子暗号装置の一部です。2010年10月に公開した実験では、6カ所の拠点を結んで量子暗号ネットワークを構築し、途中で高度な

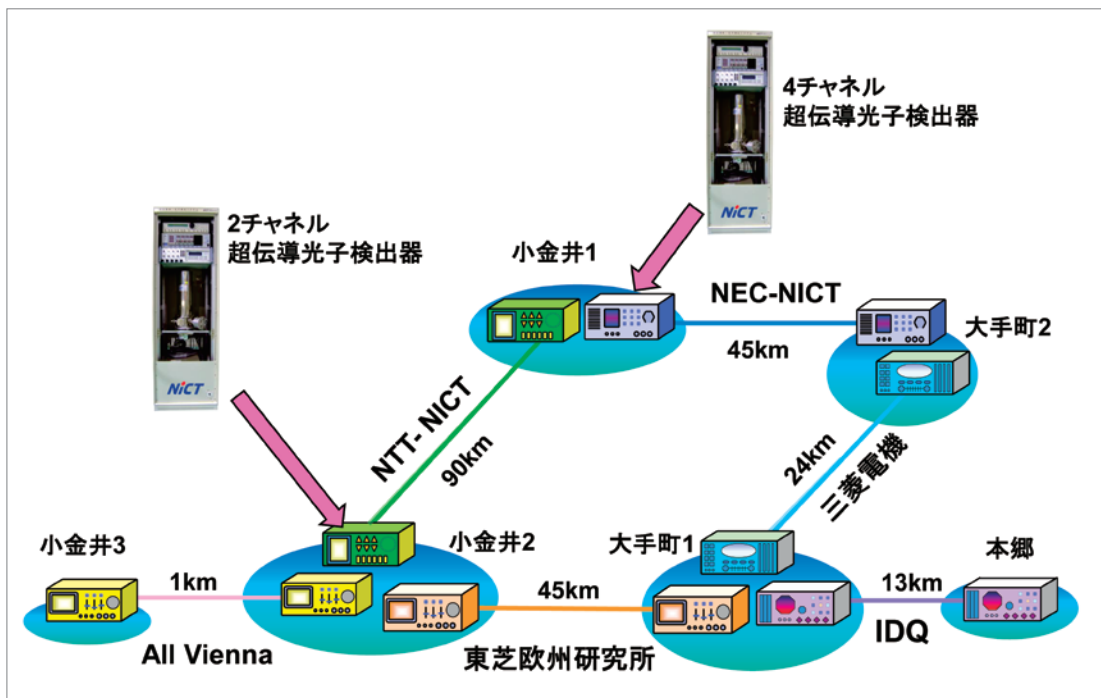


図2 2010年10月に行われた実験。各ノードに配置された量子暗号装置は、既存の光回線で繋がれている。

傍受装置を配置し、「実際に傍受されたことが分かるか」、「傍受されたら別の経路に迂回させられるか」、「その間データは途切れることはないか」、といった試験を行いました。2015年頃には、実際のネットワーク環境で利用する計画で技術のブラッシュアップが進んでいます。ただし、一般のユーザーが量子暗号を利用するようになるためには、伝送距離や伝送速度の課題があるため、まだ10年以上はかかるだろうと思われま

● 大容量化に向けた量子通信の必要性

実利用に近づいた量子暗号に比べ、大容量化に向けた量子通信はまだ基礎研究の段階です。今の光通信は、光パルスの有無で「0」と「1」の信号を表し光をエネルギーの塊としてしか制御していません。しかし、光を波と考えた場合、波と波がぶつくと波が強くなったり弱くなったりと相互に作用し、このような性質まで使うと、今の光通信よりもはるかに多くの情報量を伝えることができるようになります。さらに、光は波であると同時に粒子でもあり、光子としての性質を制御することで、与えられた送信エネルギーを最も効率よく使い、今よりも遙かに多くの情報を伝送する量子通信が可能になります。実現には受信側で光子を制御し、光子1個1個から最大の情報を取り出せる量子受信器の開発が必要です。まだ実験室での原理実証の段階であり、今後多くの未踏技術の開発が必要ですが、実現の暁には通信のほか計測技術にも革命をもたらすと期待されています。

現在、誰もが使っている携帯電話も、元々の理論は1948年にクロード・シャノンが発表した、「0」と「1」で画像や音声などの情報を送るための「情報理論」が最初で、当時はどうやって実現すればいいのかが全く分からない状態でありました。シャノンが予言した通信性能に到達したの

は、最近のことです。現実が理論に追いつくためには、約半世紀ほどかかったことになります。量子通信が実際の我々の生活に使われ世の中を変えていくのにも半世紀はかかるでしょう。半世紀後の社会はおそらく現在想像もできないような新機能を自在に使いこなしているかも知れません。その夢を1つひとつ見つけ出していこうと思います。今日も産学官連携で研究開発に取り組んでいます。



図3 量子暗号ネットワーク監視装置
一般に普及するためには、小型化する必要がある。

超高速光通信への扉を開く、 高機能フォトリソグラフィ

—光変調・光スイッチをさらに高速で低消費電力に—

「有機電気光学ポリマーは、情報通信の超高速化と省電力を実現する材料として期待されています。超高速光変調器や光スイッチなどの実現に向けた取り組みを紹介します。」

大友 明 (おおとも あきら)

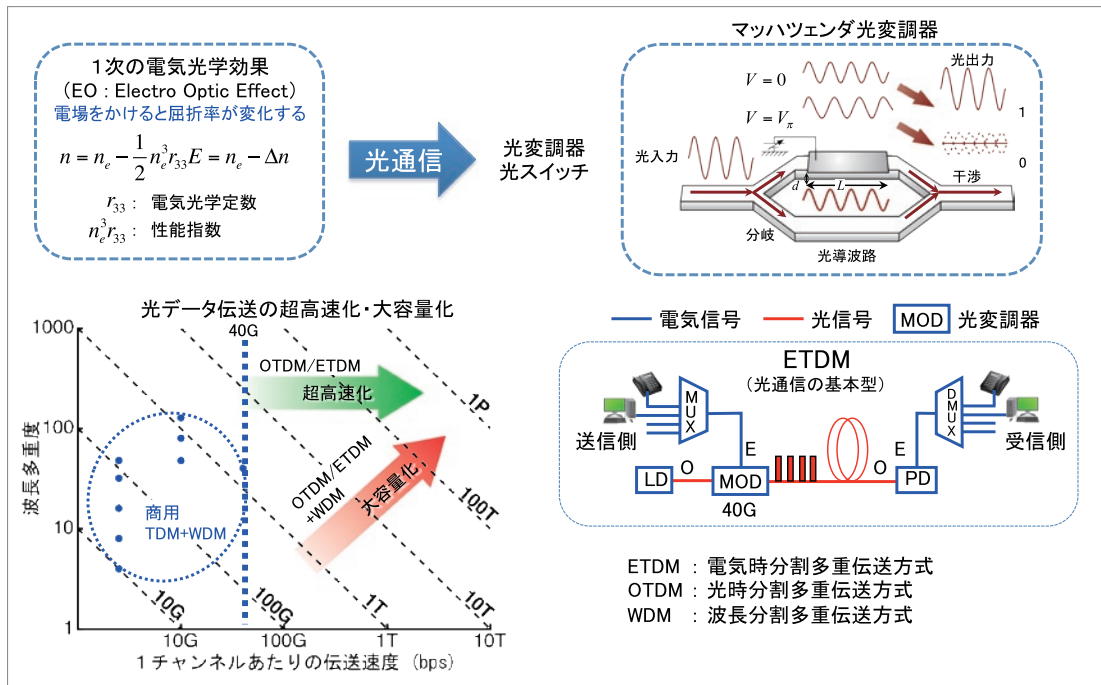
未来 ICT 研究所
ナノ ICT 研究室 室長

夜空に天の川が流れる田舎で育ち、高校までサッカーで鍛えた体力には自信あり。でも今では愛犬との散歩が唯一の運動で衰えるばかり。日本代表の試合は深夜でも熱いエールを送り、近所迷惑と妻に叱られること度々。大学から自動車に興味を持ち 86 でラリーに興じる。現在の愛車は A4 クワトロ。

はじめに

いつでもどこでも誰とでもコミュニケーションを可能にした情報通信技術(ICT)は、今や私たちの暮らしにとって不可欠な社会基盤の1つになっています。情報通信ネットワークの発達の原動力となったのが、光通信技術の高速化と大容量化です。近年の通信量の増加傾向は、今後さらに加速すると予測されており、光通信技術のさらなる高速化と大容量化が求められています。しかし、情報通信システムが消費する電力は、既に無視できない存在となっており、消費電力の削減も同時に行うことが必須となっています。また、膨張し続け制御不能になりつつあるネットワークを根本から見直す動きが、NICTの推進する「新世代ネットワーク」を始めとして世界中で活発化しています。





で非常に大きな屈折率変化を示しますが、応答速度は遅くミリ秒程度です。LNに代表される無機誘電体結晶は、イオンの変位に起因する効果でEO効果は小さいですが高速変調が可能です。しかし、GHzを超えるマイクロ波領域では屈折率が大きいために光パルスとの速度差が生じ、動作速度は10GHz程度が限界とされてきました。それでも最新のデバイス技術では、導波路構造の工夫により40GHz程度まで高められています。LN変調器の高速化は既に限界に達しています。有機色素分子は、 π 電子^{*2} 応答による電子分極に起因する効果で、最も高速でかつ比較的大きなEO効果が期待できます。近年の通信容量のさらなる拡大の要求や、情報処理装置の高速化におけるチップ内光配線が必須の課題となってきたことに伴い、小型で低電力駆動の超高速光変調器が求められるようになり、有機EO材料の研究開発が活性化してきています。NICTでも屈折率変化がLNの2倍を超える材料の開発に成功しています。

EO色素分子の基本構造は、図3に示すように、電子供与基(ドナー)と電子受容基(アクセプター)を π 共役でリンクした内部分極構造です。内部分極が大きい分子は高いEO効果を示すことから、EO色素分子の開発では、ドナー/ π 共役/アクセプターの部位ごとに優れた特性を持つ構造を見出す努力が成されてきました。これまで、 π 共役とアクセプター構造については、大きなEO効果をもたらす構造が

見出されていますが、ドナー構造については、30年近く続くEO分子研究の間、大きな進展は見られていませんでした。NICTでは、ある構造をドナー構造に加えることで、EO効果を増強させる方法を見出しました。シンプルな方法です。ほとんどの分子に適用可能であり、特に基になる分子のEO効果が大きい程、増強効果が大きくなる傾向にあります。有機EO分子を用いて光変調器を作製するには、ポリマー中にEO色素分子を分散、配向^{*3}して導波路構造を作製します。ポリマー中の有機EO分子濃度と配向度が高い程EO効果が高くなりますので、分子の配向度を高めることも研究課題の1つとして取り組んでいます。今後は、独自に開発した高性能のEOポリマーを用いて変調器構造を作製し、超高速の光変調技術の研究を進めていきます。

● 有機EOポリマーの耐久性は？

私たちの身近にある有機物は日光に当たると色が褪せたりすることから、一般的に有機色素は光に弱いとされています。有機色素の退色のメカニズムは主に酸化によるものです。空気中の酸素分子は安定でありそのままでは有機物との反応性は低く、いわゆる活性酸素種の状態になることで強い酸化作用を生じます。光励起で生成される活性酸素種で主なものは、オゾンと一重項酸素^{*4}です。一方、酸素分子がオゾンや一重項酸素になるには紫外線や可視光

の様に約1eVよりも高いエネルギーの(1.27 μ mよりも波長の短い)光が必要です。光通信には波長1.3 μ m帯から1.55 μ m帯の赤外光を用いていますので、この光でオゾンや一重項酸素を直接発生することはありません。しかし、光強度が高くなると2光子吸収により一重項酸素を発生する可能性がでてきます。通常の光変調

材料	液晶	無機誘電体結晶	有機色素分子
共鳴	配向分極 (双極子・分子回転)	イオン分極 (格子振動)	電子分極 (電子遷移)
電気光学効果 r(pm/V)	非常に大きい > 10,000	小さい 32	大きい > 150
屈折率変化 Δn	$10^{-2} - 10^{-3}$	$10^{-4} - 10^{-5}$	$10^{-3} - 10^{-4}$
応答速度 (sec)	遅い $10^{-3} - 10^{-6}$	速い 10^{-10}	非常に速い 10^{-14}
応用	空間位相変調器 (プロジェクター、モニター)	高速光変調器 ~40Gbps	超高速光変調器・スイッチ > 100Gbps

図2 代表的な電気光学材料の比較

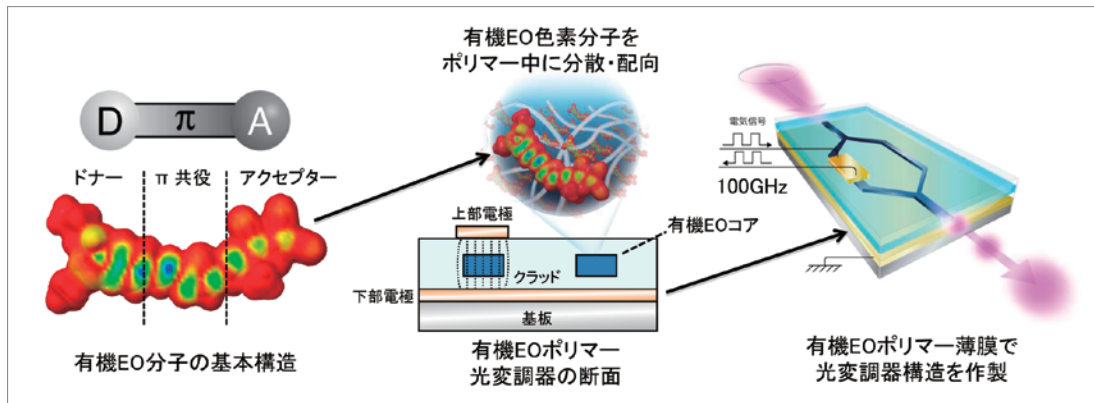


図3 有機EOポリマー光変調器

に用いられる光強度は問題がないレベルですが、今後導入が進む多値変調技術ではレーザー光が高出力化していくことから、酸素の影響を除外する研究も必要になってきます。

熱安定性については、EO色素の分解温度は200℃以上であり、デバイス作製プロセスにおいての問題はありません。しかし、EOポリマーはガラス転移温度以上になると配向が緩和しEO効果を失活^{*5}してしまいます。開発したEOポリマーのガラス転移温度は現在のところ135℃程度ですので、通常の使用環境では問題にはならないものの、大規模サーバー等の発熱環境下で長期の信頼性を確保するために、有機EOポリマーの熱安定性向上にも取り組んでいます。

● さらに未来へ向けて

有機材料のEO効果は、理論的にはさらに大きな値が得られると見積もられており、NICTでは有機EO材料の開発を今後も続けていきます。有機ポリマー材料は、フレキシブルで他のデバイスと融合しやすいことも特徴の1つです。NICTでは、精度の高いシリコン加工技術を用いたフォトニックナノ構造と組み合わせることにより、光制御デバイスのさらなる低消費電力化やマイクロサイズまでの超小型化、光バッファなどのオンチップ化に及びまで、未来のフォトニックネットワークを支える

キーデバイスを創る研究開発も行っています。

有機物は軽く、宇宙線の影響も受け難い材料ですので、衛星や惑星探査機等への搭載にも適しています。加えて有機物は、炭素、水素、窒素、酸素、硫黄などの汎用元素を用いて様々な機能をつくりあげることが出来る安価な材料ですので、資源確保が容易なレアメタルフリーの機能材料として、広範な応用展開が期待できると考えています。

用語解説

*1 マツハツェンダ

L.Mach と L.Zehnder によって 1891 年にほぼ同時に考案された干渉方法で、同一の光源から出た光を 2 つに分けて別々の光路を通した後重ね合わせるシンプルな構成であることから、光導波路での構築が容易です。

*2 π電子

分子の二重結合は結合軸に沿ったσ結合と直交したπ結合とからなり、π結合上の電子をπ電子と呼びます。二重結合と単結合が交互に連なったπ共役構造を持つ分子では、π電子は非局在化しており分子全体に広がっています。

*3 配向

分子の向きをそろえること。ポリマー中の色素はばらばらな方向を向いているため、色素の集合体であるポリマーのEO効果は相殺してしまいます。電場をかけ分子を一方にそろえることにより、ポリマーのEO効果を発現させることができます。

*4 一重項酸素

基底状態の酸素分子は、共有する電子のスピンの向きがそろった三重項状態にあり、一重項酸素は、基底状態より0.98eVエネルギーが高い励起状態の酸素分子で、電子のスピンの向きが反対になっています。一重項酸素は、光励起により直接発生することではなく、光励起された色素の三重項状態を介して生成されます。

*5 失活

ガラス転移温度以上になるとポリマーが柔らかくなり分子が動きやすくなるため、分子がバラバラな方向を向いてしまうことで、ポリマーのEO効果が失われます。

高感度・高速超伝導 ナノワイヤ単一光子検出器

—マルチチャンネルシステム開発と量子情報通信応用—

「超伝導窒化ニオブ(NbN)を用いた高感度・高速ナノワイヤ単一光子検出システムを開発し、通信波長帯において世界最高性能の達成と量子情報通信などの応用へ展開しています。」

王鎮 (ワン チン)

未来ICT研究所
主管研究員

学生の頃から巨視的量子現象である超伝導に魅せられ、約30年間一筋にやって来ましたが、まだ分からないことが多い。NICTに入所してから始めたテニスはなかなか上達しないけど、部員の少ない未来ICT研究所では貴重な戦力となっています。最近、15年以上疎遠になっていた二胡を再び手に取り、稽古に励んでいます。

● 研究の背景

量子暗号や量子情報通信技術の実現には、高感度、高速かつ低雑音で単一光子を検出する技術の開発が1つの鍵となっています。光子検出器としては、光電子倍增管(PMT)、SiやInGaAs/InPなどの半導体材料を用いたアバランシェフォトダイオード(APD)がすでに開発され、通信波長帯(波長: 1,550nm)ではInGaAs/InP半導体APDが主に使用されています。しかし、半導体APDは材料及び検出原理により検出効率や動作速度などが制限され、量子情報通信技術を実現するために光子検出技術のブレークスルーが必要とされています。そのため、我々は半導体APDと全く異なる材料と原理で動作する超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SNSPD)の研究開発を行ってきました。



なぜ超伝導？




SNSPD は、巨視的な量子現象である超伝導がもたらした高速な電子・フォノン相互作用と極低温で動作するため、通信波長帯において PMT や半導体 APD の性能をはるかに凌駕するポテンシャルを有しています。また、SSPD の波長感度領域が極めて広く、素子 1 つで Si-APD と InGaAs/InP-APD の感度領域を全てカバーできます。さらに、SNSPD は APD のようなゲート同期動作が不要であるため、実用化の際にシステムの構築も容易とであるなど非常に大きなメリットがあります。表 1 では、各種光子検出器の性能を比較しています。SNSPD は、他の光子検出に比べて暗計数率が極めて低く、トータル性能を表す指標である性能指数が現時点でも既に 100 倍高く、研究開発の進展によりさらに性能向上が期待されています。

マルチチャンネル SNSPD システム開発

SNSPD では、超伝導ナノワイヤにおける超伝導状態から常伝導状態に移行する際に生じた急激な抵抗変化を利用して光子検出を行っています。

その性能を左右するキーテクノロジーとしては、高品質・極薄超伝導薄膜の作製、ナノワイヤ微細加工、入射光子と素子の高効率結合などが挙げられます。また、実用化のために、マルチチャンネル検出システムの開発が必要不可欠です。我々は、基礎研究で蓄積してきた NICT 独自の高品質窒化ニオブ(NbN)超伝導薄膜作製技術とナノ微細加工技術を駆使して、厚さ 5 nm 以下、線幅 80 ~ 100 nm のナノワイヤ単一光子検出素子(図 1)の作製に成功しました。また、光ファイバにより入射した光子を検出素子に効率良く結合させるために、光ファイバと SNSPD 素子の実装技術を開発し、ミクロンオーダーの精度で光ファイバと素子を合わせることを可能にしました(図 2)。さらに、実用化を目指して、無冷媒かつ家庭用 100V 電源で駆動可能な小型可搬式ギフォート・マクマホン(GM)冷凍機を用いたマルチチャンネル SNSPD システムを開発しました(図 3)。開発したマルチチャンネルシステムには、光ファイバを実装した SNSPD パッケージ 6 個を実装しており、同時に 6 チャンネルの光子検出が可能となっています。図 4 は 1,550nm 通信波長帯において測定した 6 チャンネル検出器のシステム検出効率と暗計数率です。全てのチャンネルは暗計数率

表1 通信波長帯光子検出器の性能比較

波長: 1,550nm				
検出器	検出効率 (%)	暗計数率 (c/s)	カウントレート (MHz)	性能指数 $\times 10^3$
 PMT	2	2×10^5	10	1
 InGaAs/InP APD	20	10×10^3	100	2
 SNSPD (NICT)	20	100	100	200

性能指数 = 検出効率 × カウントレート / 暗計数率

100c/s(カウント/秒)において20%を超える高い検出効率を示しています。表2に、システム仕様・性能をまとめています。現時点では、量子検出効率が20%、動作速度が100MHz、暗計数率が100c/sなど世界最高性能を達成しています。

量子情報通信応用

我々は、開発したマルチチャンネルSNSPDシステムを用いて、2007年にけいはんな地区において量子暗号鍵配送(QKD)のフィールド実験を行い、実際の敷設光ファイバで世界最長距離(97km)かつ最高速(10 kbits/s/photon)で量

子暗号鍵配送に成功しました。また、2010年には東京QKDネットワークに2台のSNSPDシステムを導入し、都市圏敷設光ファイバ網で世界初の量子暗号通信によるテレビ会議の実現に貢献しました。

今後の展望

SNSPDによる単一光子検出技術は、将来の量子情報通信技術を支えるコア技術として、実用化に向けた研究開発が始まったばかりです。現在、この技術は半導体APDを超える性能を示しており、素子の改良とシステムの最適化を図ることにより、更なる性能アップが期待できます。

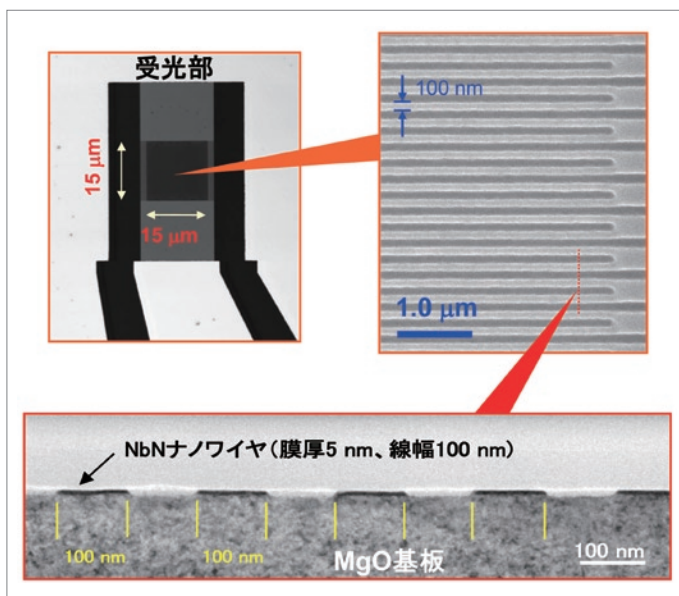


図1 窒化ニオブSNSPD素子とナノワイヤ受光部の電子顕微鏡写真

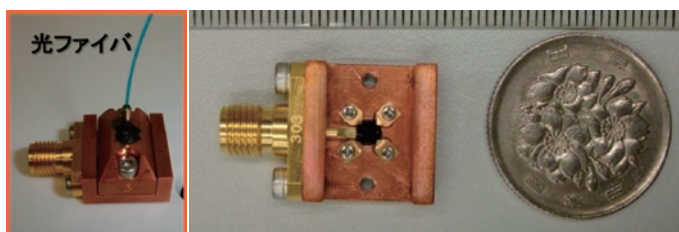


図2 光ファイバを実装したSNSPDパッケージ



図3 マルチチャンネルSNSPDシステム

今後、この技術は、光子検出器として、量子情報通信分野だけではなく、量子光学、宇宙物理学、生体質量分析、新薬開発、低エネルギー粒子検出など様々な分野への応用が可能と考えられることから、その実現に向けて我々はチャレンジを続けていきます。

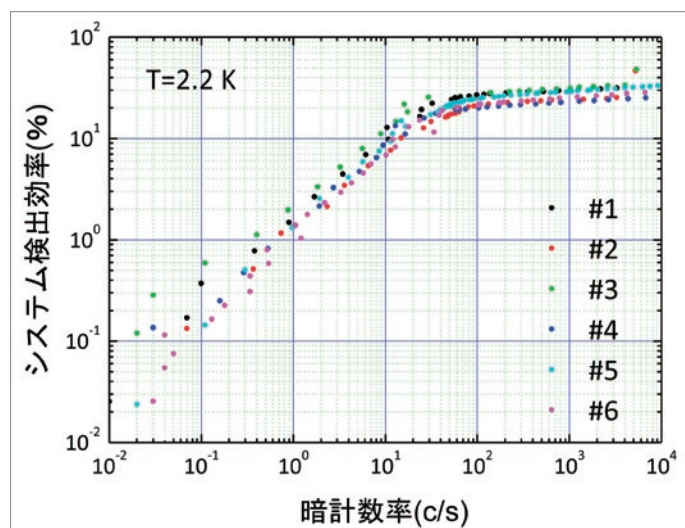


図4 1,550nm波長帯におけるマルチチャンネルSNSPDシステムの検出効率と暗計数率

表2 マルチチャンネルSNSPDシステム仕様・性能

チャンネル数	6
システム検出効率	20%
暗計数率	100 c/s
応答速度	100 MHz
ジッター	100 ps
動作温度	2.5 K
冷凍機消費電力	1.2 kW
サイズ	H175 x W57 x D65 (cm)

脳とICTの融合： 脳情報通信技術の確立に向けて

—真に伝えたい情報を伝える未来のICT技術—

「私たちは、脳から情報を取り出しそれを通信することにより、より自由なコミュニケーションを実現するというあたかもSFのような世界の実現を目指した研究を行っています。」

成瀬 康 (なるせ やすし)

未来ICT研究所
脳情報通信研究室 主任研究員

子供のころからパソコン好きの理系でありながら、歴史や経済にも興味があり、研究の道に進むか金融の道に進むかを悩んだほど。研究者になった今も、読書といえばビジネス書や歴史書が多い。歴史や経済を学ぶ過程で人の心理への興味が生じて脳研究を開始し、今に至る。趣味は職場の人と行うフットサルと飲み会。ビール腹撃退の為にスポーツジムにも通ってます。

はじめに

脳情報通信技術というのは、脳から情報を取り出し、それを通信することにより、言語等にとらわれることなく、より自由な、よりスムーズなコミュニケーションを実現することを目指す未来の情報通信技術です(図1)。例えば、アニメや映画のガンダム、攻殻機動隊やマトリックスなどで描かれているような世界の実現を目指す技術といえます。しかし、脳情報通信技術に関する研究は始まったばかりですので、このような世界の実現はまだまだ先の話ではありますが、目指すイメージはつかんでいただけないかと思います。私たちは、脳情報通信技術の確立を目指して様々な角度から脳についての研究を行っています。



● 脳情報を高精度に抽出する新しい手法

脳情報通信技術の実現のために、まず、はじめに確立するべき技術は、精度良く、容易に脳情報を取り出すことができる技術です。そこで、私たちは、比較的簡単に測ることができる脳波、特にアルファ波に注目し、脳波に適した信号処理手法を開発しました。脳波の信号は複雑であることから、これまでの手法では精度の良い脳情報を抽出することができませんでした。私たちは脳波における実験的研究及び数理モデル的研究の成果から得られた知見をもとに脳波に適した確率モデルを構築し、ベイズの定理を利用して脳情報を抽出するとい統計的手法を構築しました。この手法の概要は図2に示すように、まず、脳波に含まれる雑音成分を軽減しつつアルファ波を抽出し、それを振幅、位相に分解します。脳の状態が変化した場合、振幅や位相の状態が変わるため、その状態変化を検出することで脳の状態変化が起こったタイミングを見つける

というものです。脳の今の状態を検出できるという技術を発展させることでたとえば、与えられた情報を受け手が正しく分かったかどうかをその人の脳活動の状態を調べることで定量化することができると考えられます。現在は、より簡単に脳波が測れる脳波システムの開発も併せて行っており、精度良く、容易に脳情報を取り出すことができる技術を日々、向上させています。

一方、この取り出した脳情報から、その人が何を思ったか、どう感じたか、どう考えているのか、といったその人の脳の状態に関する情報を取り出すためには、脳内の情報処理・情報通信メカニズムを解明する必要があります。脳科学的、工学的、医学的といった多角的なアプローチを利用して、取り出した脳情報から、脳の状態に関する情報を取り出し、脳情報通信技術の実現を目指しています。



図1 脳情報通信技術の一例

● 脳情報通信融合研究のスタート

脳情報通信技術を確立するためには、前述のように、非常に様々な分野と融合する必要があります。現在、NICTでは、脳情報通信技術の確立を目指すために、これまでの脳科学に情報工学等の様々な分野を融合させた、脳情報通信融合研究をスタートさせました。この脳情報通信融合研究には、①ここところのコミュニケーションを脳機能から科学する Heart to Heart Science (HHS)、②脳に学ぶ情報ネットワーク技術を創成する Brain-Function installed Information Network (BFI Network)、③ここところを機械につたえる技術を確認する Brain-Machine Interface (BMI)、④これらを支えるための脳計測技術

を確認する計測基盤技術、の4つの柱があります(図3)。前述した研究内容は、この枠組みにおいては計測基盤技術に含まれるものであり、今後、これを利用することにより、HHS、BFI Network、BMI研究を加速し、脳情報通信技術の確立を目指したいと考えています。

また、脳情報通信技術ができてしまうと心が読まれてしまいそうで怖いと考えられる方も多くいらっしゃるかと思います。私たちは、何を伝えて何を伝えるべきではないかという倫理・安全面も研究と同時に検討しております。そのような倫理面への取り組みの1つが、NICTの研究者が委員として参加していた総務省における「脳とICTに関する懇談会」の最終取りまとめにまとめられております。

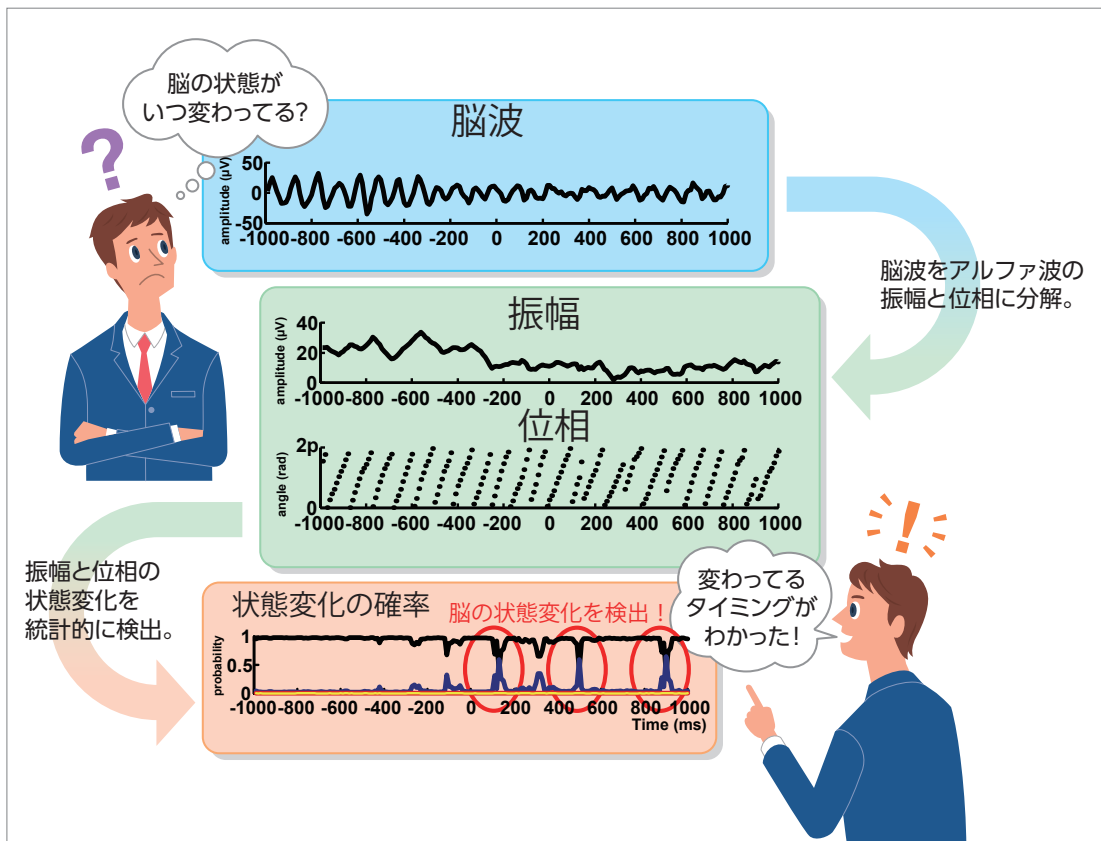


図2 私たちが構築した統計的手法を用いた高精度脳情報抽出法の概要

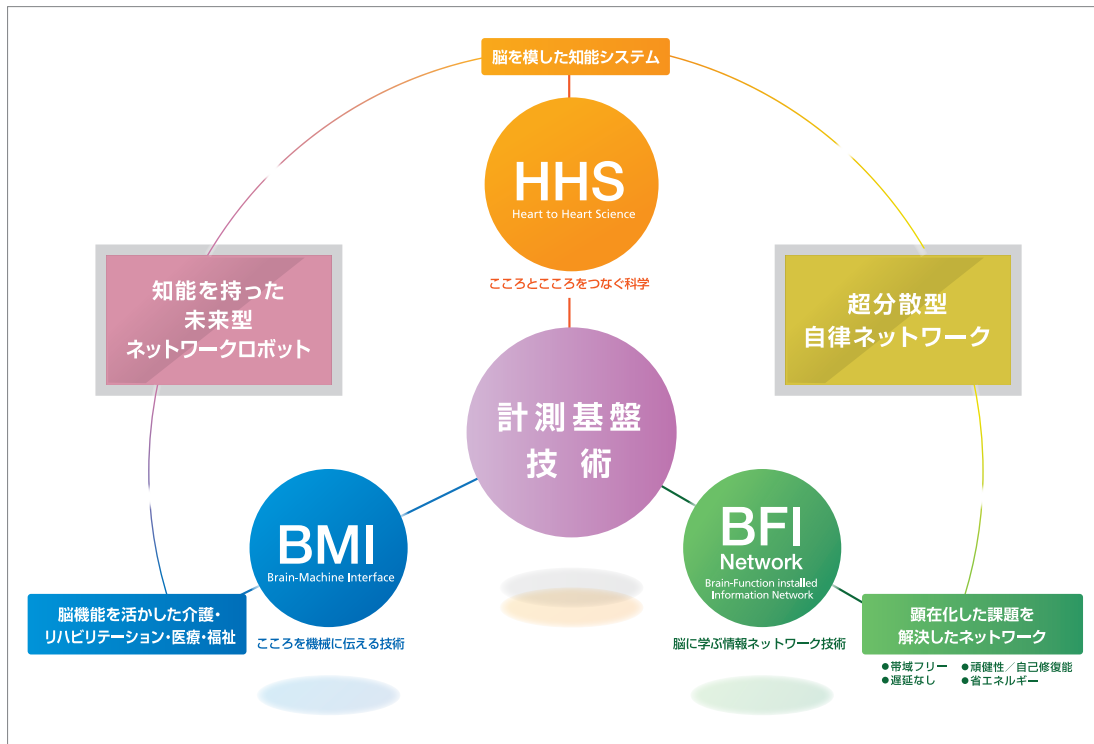


図3 脳情報通信融合研究の概要

● 今後の展望

脳情報通信技術に関する研究は始まったばかりであり、実現にはまだ時間がかかります。しかし、中長期的な視点のもと、脳情報通信融合研究という新しい枠組みを利用して脳情報通信技術の確立を目指します。私たちはこの技術を、まずは、高齢者や体の不自由な方のよりよいコミュニケーション手段として提供し、将来的には、すべての方の生活に役立つものにしていきたいと考えています。

思い通りに操作できる ブレイン・マシン・インターフェイスに 大きく前進

－脳活動から早い運動をなめらかに再現－

「脳の外に置いた磁場センサーで脳活動を計測、手の動きに関する重要な情報を効率的に選び出して、早い運動をそのまま滑らかに再現することに成功しました。」

今水 寛 (いまみず ひろし)

未来 ICT 研究所
脳情報通信研究室 副室長

専門は実験心理学。不可思議なヒトの行動に、合理的な理由を見いだすとき、心の底から面白いと思います。趣味という程ではありませんが、料理を楽しんでいます。毎年クリスマスにはローストチキンを焼きます。段取りと思い切りが重要なのは料理も実験も同じです。鍋の蓋を開けると、解析結果を見るときの高揚感も似ています。料理は9割成功するが、実験は9割失敗します・・・



● 背景

人間の脳活動から運動を再構成する技術は、ブレイン・マシン・インターフェイス(BMI)の基礎技術として注目されています。特に、脳を傷つせずに計測(非侵襲計測)した脳活動信号を利用して再構成することは、BMIが、広く一般に使われるための重要な鍵とされています。私たちと(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)脳情報解析研究所の佐藤雅昭所長らは、手の速い運動(運動時間約0.4秒)を、非侵襲で計測した脳活動から滑らかに(0.02秒おきに)再構成することに成功しました。本研究は、ユーザーをトレーニングすることなしに、普段、運動を行っているときの自然な脳活動から、手の運動に関係する脳情報を効率的に抽出し、自然で滑らかな運動を高い精度で再構成できることを世界で初めて示しました。この成果は、BMIが医療応用だけでなく、情報通信のための自然で使いやすいインターフェイスとして、広く一般に使われる道を切りひらくと考えられます。

脳活動から運動を再構成する技術は、脳に電極を挿すなどの侵襲的な方法で、主に米国の研究者が成功をおさめましたが、手術やウィルス感染の危険性などから、近年では、非侵襲で計測した脳活動を利用する研究が盛んになってきています。従来の非侵襲的な手法では、脳波でコンピュータカーソルを操作する研究がよく知られていますが、これはコンピュータに読み取りやすい脳波パターンを生じさせるように、ユーザーを長期間訓練する必要がありました。訓練を必要とせずに速い運動を再構成した例はこれま

でありましたが、頭の外に設置したセンサーで計測した信号をそのまま使っていたため、脳のどの部分から発生した信号であるかを正確に特定できず、手の運動に関連する脳活動を効率的に抽出することは難しい状況でした。

● 実験と解析

本研究では、人間が指先をさまざまな方向に素早く動かしているときの脳活動から、指先がどこにあるかを、0.02秒の時間間隔で予測(再構成)しました。私たちは、速い運動に関連する脳活動を計測するために、高い時間解像度で計測可能な脳磁計(MEG: Magnetoencephalography)を利用しました(図1)。MEGは、神経細胞が活動することで生じる微細な磁場の変化を検出する装置です。しかし、MEGは、頭の外に置いたセンサーで磁場を計測するため、受信した信号が脳のどの場所から発生したものであるか、正確に知ることはできません。また、センサーの信号は、さまざま

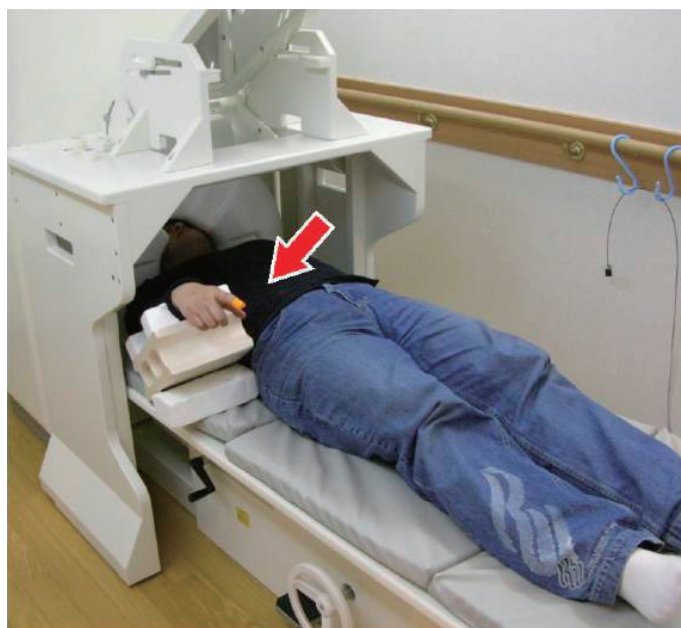


図1 MEG装置の外観と、これを使った実験風景。矢印は人差し指の先端を示す

な脳の部位から発生した信号が入り混じっている(図 2A)ので、手の運動に関連する脳活動を効率的に選び出すことは難しいのです。そこで、まず、センサー信号を脳表面上の電流信号(皮質電流)に変換する関数(逆フィルター)を推定しました(図 2B)。逆フィルターの計算には、佐藤所長らが開発した「階層変分ベイズ法」を用いました。この方法は、脳の血流の変化を、優れた空間解像度で計測できる機能的磁気共鳴画像(fMRI)のデータも補助的に用い、数ミリメートルの精度で、センサー信号から信号源である皮質電流を計算できます(図 3 オレンジの矢印)。この方法で変換した皮質電流を利用すれば、手の運動に関連する信号を選択的に抽出して、高い精度で運動を再構成することが期待できます。実際、佐藤所長らが開発した「スパース推定法」を用いて、皮質電流の中から重要度の高いものを選び出し、選び出された皮質電流の重み付き総和(図 3 緑の矢印の線形予測モデル)で手先の位置を予測したところ、センサー信号をそのまま使う場合よりも、高い精度で予測することができました。

● 研究の意義

これまでの非侵襲 BMI は、脳活動のパターンから運動の種類を識別したり、数力所の標的の中から、どの標的に手を伸ばすかを当てることなどが主流で、人間の速い動きをそのまま再構成しようとする試みは少ない状況でした。速い動きを滑らかに再構成することで、ユーザーが「自分自身が操作している」という主体感・操作感を増すことができます。遠隔地からロボットアームを制御する場合など、そのような感覚は不可欠です。

● 今後の展望

本研究では、脳活動をオフラインで解析・再構成しましたが、今後はリアルタイムで運動を再構成することに取り組んで行きたいと思います。同様の手法は、イメージしたときや動かす前の脳活動から再構成することにも利用できる可能性があり、意図しただけで自在に操作できるインターフェイスの開発に繋がると期待されます。現代の情報端末は次第に操作が複雑になり、操作方法をマスターできないひとはますます情報が

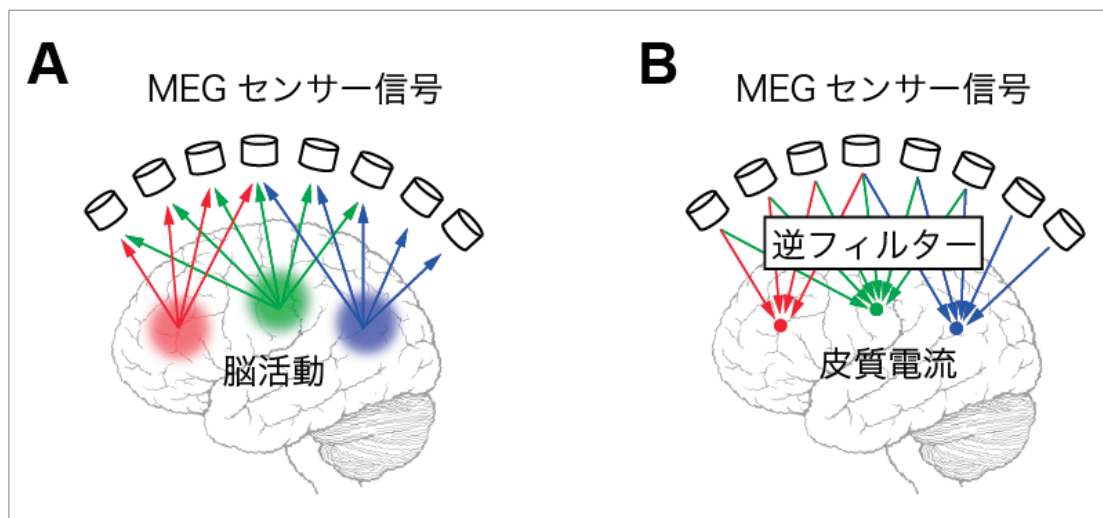


図2 MEGのセンサー信号にはいろいろな部位の脳活動信号が混在 (A)。センサー信号から脳活動を推定する逆フィルター (B)

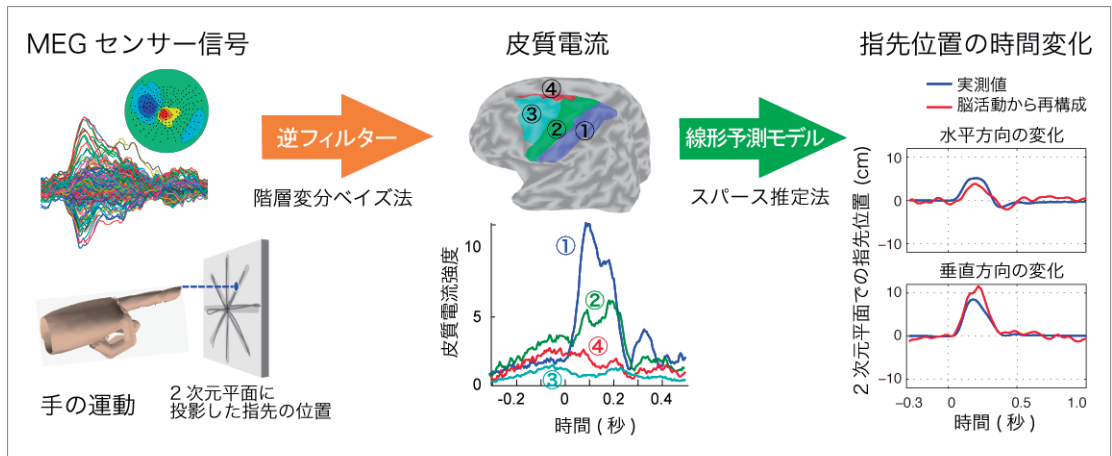


図3 手先の運動を脳活動から再構成する手法の概要

ら遠ざかってしまうという情報格差が問題になっています。意図しただけで自在に操作できるインターフェイスは、そのような問題の解決に役立つと考えられます。

DNAナノ構造体でつくる 分子ロボットを利用した アンビエントセンサーネットワーク

「複雑な生命維持活動を実現するソフトウェア、ハードウェア一体型のインテリジェントな情報素子であるDNAを利用した未来ICT技術の開発を行っています。」

平林 美樹 (ひらばやし みき)

未来ICT研究所
バイオICT研究室 主任研究員

私たちの脳は、DNAが造りだした究極のコンピュータです。その潜在的な能力を最大限に発揮するには、右脳と左脳をバランスよく活性化させることが重要であると考え、右脳への刺激を求めて、最近日本画を始めました。目覚めた脳と旺盛な好奇心を学際領域の研究に活かして、夢はノーベル賞のグランドスラムです。

● 研究の背景

私たちは、「細胞や生体分子システムの優れた機能を利用した情報通信の新概念につながる萌芽的な要素技術の開発研究」の一環として、プログラムに基づいて自律的に環境をコントロールすることができる生体材料で造られたセンサーロボットに関する研究を行っています。

ここでいうロボットとは、人間に代わって与えられた作業をこなす装置または、生物のような形や機能を持つ人工物を指します。私たちが目指すのは、ナノ/マイクロ世界の分子通信物質や環境シグナルをセンシングし、それらの情報に基づいて、微小世界の状態を自律的に管理することができるインテリジェントなDNAナノマシンです。例えば、微小世界の住人である微生物は、



放射性物質のような環境汚染源の除去や、農作物の品質や生産性の向上を可能にする様々な能力をもっていることが知られています。ナノロボットが作るセンサーネットワークを利用して、微小世界をコントロールすることで、そこに生きる微生物の多彩な能力を活かして、エネルギー、農業、漁業、医療などの分野で現代社会が抱える問題を解決し、次世代の安心・安全で快適な生活の実現に貢献することが可能になります(図1)。

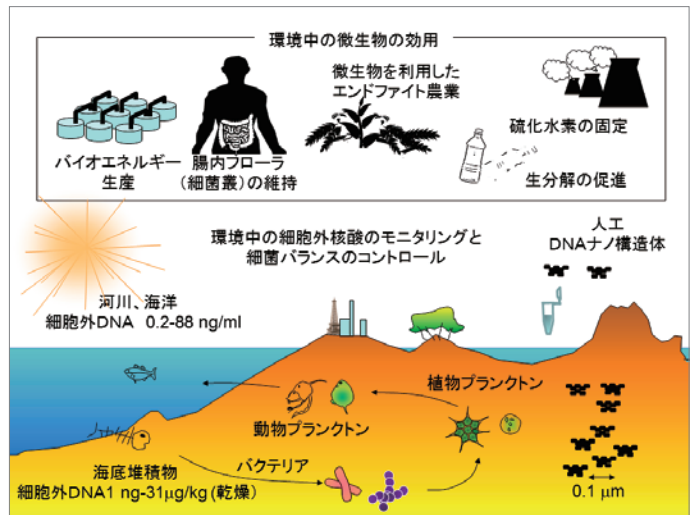


図1 DNAセンサーネットワークとマイクロワールド

● センシングターゲット

ここで紹介する DNA センサーロボットのセンシングターゲットは、生細胞が生産した核酸分子(DNA/RNA)です。核酸分子は、細胞内だけでなく、血液などの体液中や、私たちをとりまく海洋や湖沼などの環境中にも広く存在しています。細胞外の核酸分子は、細胞の崩壊によって放出されるだけでなく、細菌の増殖時期の一定期間や、他生物との相互作用あるいは、細菌同士の分子通信によって分泌されることが知られています。こうして生じた核酸分子は、環境中に蓄えられると共に、細菌により再び細胞内に取り込まれて、貧栄養条件下での栄養源、変異を起こした遺伝子の修復等に用いられます。細胞外に存在する核酸分子のうち、血液などの体液中に含まれる RNA は、細胞内の様子を反映して存在量が変動することから、生体内の生物学的変化を把握するための指標(マーカー)として診断に用いられています。

DNA センサーロボットは、このように生命活動の状態を反映する核酸分子をセンシングして

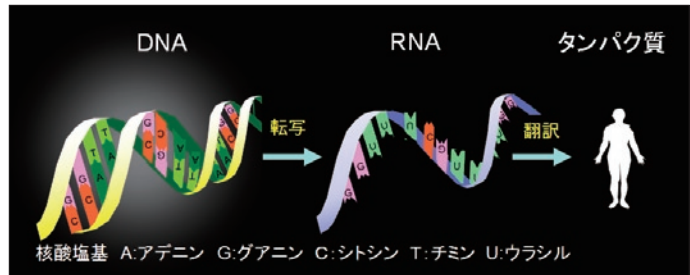


図2 遺伝情報伝達の流れ

細胞内の状態を報告したり、環境中にプールされている特定の配列を回収してまわったり、細胞内で核酸分子の変動を監視して、細胞の状態をコントロールするように設計することが可能です。

● DNA を利用した遺伝子スイッチ

DNA は、「タンパク質をコードする塩基配列プログラム」からなるソフトウェアと「プログラムを実行して複雑な生命維持活動を実現する」ハードウェアの両者の機能を併せ持つインテリジェントな情報素子です。生命の設計図となる遺伝情報は「複製」により DNA から DNA へ、「転写」により DNA から RNA へ、「翻訳」により RNA からタンパク質へと伝えられます(図2)。生命活動は、この「転写」と「翻訳」のタイミングを制御すること

で実現されています。これまで、このような制御はタンパク質が行っていると考えられていましたが、近年タンパク質をコードしていない核酸配列が積極的に関わっていることが明らかになってきました。たとえば、DNAを構成する4つの核酸塩基アデニン(A)、グアニン(G)、シトシン(C)、チミン(T)のうちGに富んだ配列は、図3左に示すような立体的な四重鎖が連なるグアニン四重鎖(G_4)とよばれる構造をとって、転写酵素の認識配列であるプロモータ配列に転写酵素が近づけない状態を作ること、「転写」のタイミング制御を行っていると考えられています(G_4 スイッチ)。 G_4 構造のオン/オフの切替えは特定のイオンを利用するなどして行われます。

一方、DNAセンサーロボットが搭載しているのは、人工的に設計されたトリプルクロスオーバー(TX)タイルを利用した人工遺伝子スイッチ(TXスイッチ)です。TXタイルは三段構造をもったDNAモチーフです。図3右にTXスイッチをDNA上に構成した例を示します。TXタイルがネットワークを形成しているときは、三段構造の

二段目の配列には、転写酵素が近づくことができないため、ここにプロモータ配列を配置することにより、 G_4 スイッチ同様、転写機能をオフにすることができます。TX構造のオン/オフの切替えは環境中の情報分子(ここでは細胞が生産する核酸分子)のセンシングにより行います。

機能設計

TXスイッチは、プロモータの下流に、RNAアプタマーをコードした配列を組み込むことにより、アプタマーが持つ様々な機能を実装することができます。アプタマーとは、ターゲット分子と特異的に結合して、様々な機能を発揮する核酸等から成る機能性分子です。例えば、ターゲット分子の持つ蛍光を増幅したり、毒性を弱めるなどの機能を実現することができます。また天然 G_4 スイッチと違って、人工TXスイッチは、TX構造のオン/オフの切替えに、システムの目的に合ったセンシングターゲットを使用できるように設計することが可能です。

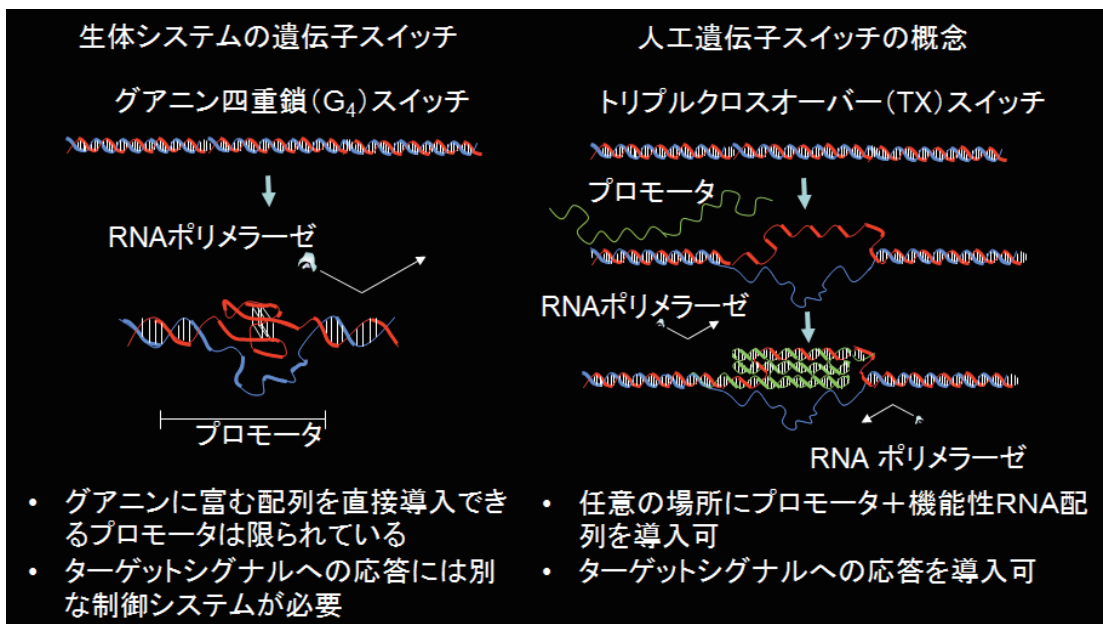


図3 人工遺伝子スイッチ

図4にTXスイッチを搭載したシステムの例を示します。ここでは、TXモチーフは、4本の短い一本鎖DNAが自己組織化により相補鎖を交換して三段構造を作っています。次に末端に相補配列を持つモチーフ同士が結合して、ナノ構造体ネットワークを形成します。この集合体は、RNA/DNA シグナルをセンシングターゲットとして、これを認識すると構造変化を起こし、モチーフに組み込まれたプロモータ領域にRNAポリメラーゼとよばれる転写酵素が作用できる状態になります。その結果プロモータ下流に組み込まれたRNA アプタマー配列の転写が開始されます。これが転写スイッチONの状態、オフになるまで繰り返し転写が実行されます。このアプタマー配列にMG(マラカイトグリーン)アプタマーとよばれる配列を採用すると、センシング結果をMGの蛍光増加の有無により可視化することができます。その他の目的に応じた新しい機能をもったアプタマーは、人工進化とよばれる方法により、ランダム配列のプールから取り出してくることができます。また人工材料と違って、複製、修復、再生といった機能も実装可能です。

DNAはこのように、機能や構造の設計が容易で、複雑な生命活動を実現することができる優れた能力を持ったインテリジェントマテリアルです。これらの特性を十分に活かすことにより、情報通信の新概念につながる新しいナノセンサーネットワークの構築が可能になると考えられます。

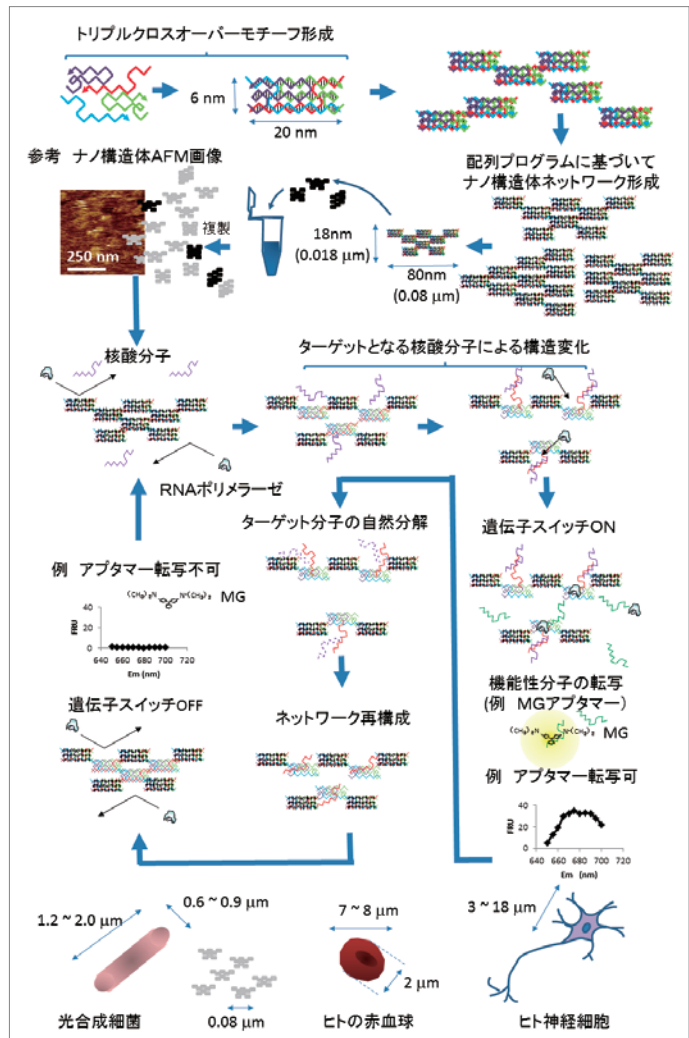


図4 センサーロボットのイメージ

今後の展望

アンビエントセンサーネットワーク社会は環境中に埋め込まれたアンビエントインテリジェンス(環境知能)が、自身でセンシングした情報を利用して、私たちの暮らしを豊かにする様々なサービスを提供してくれる社会です。生体材料の特性を生かした人工DNAナノ構造体を、ミッションを遂行する能力と判断力を持つインテリジェントロボットへと機能強化することで、本格的なアンビエントネットワーク社会が訪れると期待されます。

2種類の遺伝情報を使い分けて生きるテトラヒメナ

—単細胞生物の高度な生存戦略—

「巧妙な生存戦略を駆使して力強く生きる単細胞の微生物。彼らが持つユニークな生物システムは、様々な技術応用の可能性を秘めています。ここでは、その一例を紹介します。」

岩本 政明 (いわもと まさあき)

未来 ICT 研究所

バイオ ICT 研究室 主任研究員

大学院博士過程修了後、米ハワイ大学博士研究員を経て、2004年、特別研究員(JST)としてNICTに入所。現在は主任研究員。博士(理学)。子供の頃から自然と生き物が好きで、それが高じていつの間にか生物の研究者になっていました。研究以外の趣味は、釣り、川遊び(ガサガサ)、自然観察(野鳥など)、水族館巡り、他。

● 生物システムに学ぶには、まず生物を知ることから

今日、情報通信分野に限らず、さまざまな領域で、生物の特性を応用した技術開発が行われています。生物が持つ自律性、頑強性、環境適応性、情報処理能力、自己修復および自己複製能力など、そのいずれもが新技術を開発する際のお手本となり得ます。生物は、進化の過程でこれらの特性を獲得し、生存競争を通じて、それらに修正を加え、より良いものを作り上げてきました。その中には、人間が到底考えつかないような奇抜なシステムが無数に存在しています。そこから人間にとって有用なものを効率的に抽出するためには、まず対象となる生物をよく理解することが必要です。



私が研究対象としているのは、テトラヒメナ (*Tetrahymena thermophila*) という単細胞生物です(図1)。「単細胞」とは、俗に単純なものを形容する言葉として使われますが、それは誤りで、実際のところ、多くの単細胞生物はとても複雑な細胞の構造と機能を持っています。ヒトの場合、60兆個もの細胞の共同作業で行っている個体としての生命活動を、たった1個の細胞で行っているのですから彼らが複雑なのは当然といえます。また、動物の細胞が体内という安定な環境にあるのと違い、単細胞生物は激変する環境下で生活しています。そのような過酷な環境で生存競争を勝ち抜いてきた彼らは、とりわけ優

れた環境適応性と頑強性を持つ、細胞進化におけるひとつの頂点を極めた存在であるということが出来ます。

● 独特な方法で遺伝情報を使用・継承する
テトラヒメナ

生物がもつ遺伝情報は、DNAとして細胞核の中にしまい込まれています。DNA鎖の本数は生物種によって異なりますが、細胞核内のひと揃いのDNA鎖のセットをゲノムと呼びます。細胞をコンピューターと見なした場合、細胞核はハードディスク*1、ゲノムは情報ということになります。ハードディスク内の情報は使えば使うほど、損傷、すなわちDNAに傷が入ります。細胞はこれを修復する機能を持っていますが、間違っ修復されたり、修復できなかった箇所が蓄積してくると、細胞コンピューターは正常に作動しなくなります。これが細胞老化であり、また時には制御が効かなくなって、ガン化してしまうこともあります。遺伝情報を傷つけないためには、遺伝情報を使わないことが得策ですが、生命活動を行う以上そのようなことはできません。

ところが、テトラヒメナはそれを実現しているのです。彼らはゲノム(情報)を重複させ、それらを2種類の細胞核(ハードディスク)に分けて保

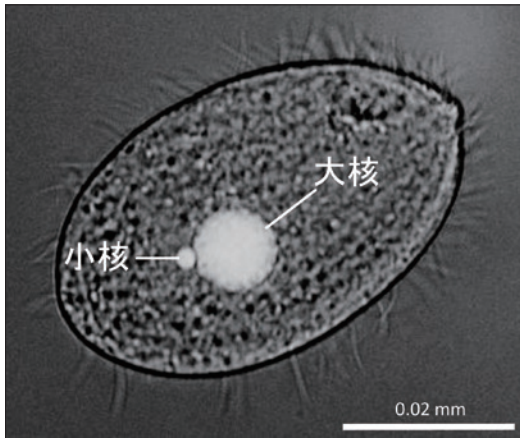


図1 繊毛虫テトラヒメナ (*Tetrahymena thermophila*)
大核と小核という2種類の細胞核をもつ。DNAを特殊な色素で染めて可視化した。

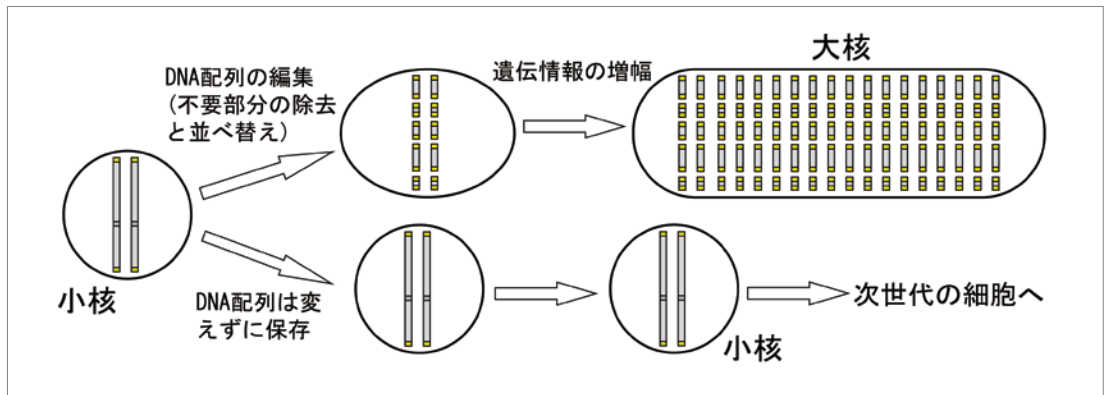


図2 編集と増幅によって形成される大核のゲノムDNA
もとは1つの小核から新たな大核と小核が作られる。各DNAの末端にはテロメア*2 (黄)が存在する。

持するという方法を獲得しました(図1)。一方を生命活動に使用し、他方は通常は使用せずバックアップとして保存しています。使用されるゲノムは、大核に包含されており、遺伝情報を効率よく大量に取り出すためにDNA配列は編集され、かつ数十～数百倍に増幅された状態になっています(図2)。この大核ゲノムは、日常的に使用されますが、一世代で使い捨てられます。片や小核のゲノムは、高度に圧縮された状態で、通常の生活では使用されません。しかし、いざという時(具体的には、栄養が無くなってしまった時)にそれは使われます。栄養が枯渇すると、彼らは異性細胞と交配^{*3}して子孫を作りますが、子孫細胞の新しい細胞核を形成するために小核ゲノムが使われるのです。

● 2種類のゲノム情報にアクセスするシステムに明確な違いが存在

テトラヒメナは、1台のコンピューター(細胞)に2種類のハードディスク(細胞核)を搭載してい

るわけですが、ハードディスク内のゲノム情報にアクセスするためのオペレーションシステムはどうなっているのでしょうか。我々は、テトラヒメナの特異な遺伝情報制御を可能にしている分子基盤はそこにあると考え、この仕組みを明らかにするための研究を行っています。細胞核は、核膜により細胞質と仕切られ、区画化された構造になっています(図3)。核膜には核膜孔と呼ばれる穴があいていて、細胞質から核内へのアクセスと、核内から細胞質への遺伝情報の取り出しは、この核膜孔を通して行われます。したがって、核内へのアクセス経路である核膜孔が同じ構造をしているならば、2種類のハードディスクを見分けて、個別に制御することはできません。我々は、核膜孔を形づくっているタンパク質成分を同定し、それらの機能解析を行うことで、2種類の遺伝情報を間違えずに制御する仕組みを明らかにすることを試みました。

核膜孔は、核膜孔複合体という構造体が形づくる穴です(図3)。核膜孔複合体は約30種類の異なるタンパク質が組み合わさって構築され

ています。大核と小核の核膜孔複合体の成分を比較したところ、穴の内側に露出するタンパク質成分の1つであるヌレオポリン98(Nup98)が、大核と小核では全く違ったものであることが分かりました(図3)。Nup98は、細胞質と細胞核の間で行われる双方向の物質輸送に必須の機能性タンパク質です。テトラヒメナの場合、大核の核膜孔に存在する大核型Nup98は、小核へ運ばれるべき物質が誤って大核内へ侵入することを阻止し、同様に、小核のNup98は、大核物質が小核へ侵入することを阻止していることが分かりました(図4)。このようにし

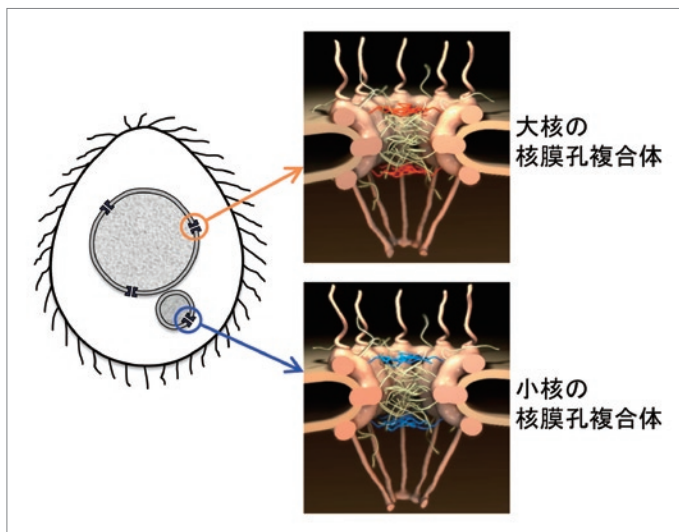


図3 テトラヒメナの核膜孔複合体とNup98

大核、小核とも二重構造の核膜(グレー部分)によって細胞質と仕切られている。右側のモデル図はともに上側が細胞質、下側が核内。大核のNup98をオレンジ、小核のNup98を青色で表わす。

て、それぞれのゲノムの制御に関わる因子は、正しい細胞核へと正確に運び分けられていることが明らかになりました。テトラヒメナは、核内へのアクセス経路に構造的な違いをつくり、それを利用して、2種類のハードディスク内の遺伝情報を巧みに制御していたのです。

● おわりに

テトラヒメナやゾウリムシなどの織毛虫類は、2～3億年前の琥珀化石から現存種とほとんど変わらない形の見出されています。恐らく、彼らの起源は、そこからさらに数億年をさかのぼることになるでしょう。そんな太古に、彼らがすでに遺伝情報の大量利用とバックアップ構築を両立させたシステムを完成させていたことに驚かされます。そのことは同時に、そのシステムが、彼らを進化の勝者へと導いた堅牢性と柔軟性を持ち合わせた秀逸なものであったことを推測させます。この遺伝情報の使い分けシステムは、生物学的に非常に興味深い現象であるだけでなく、その仕組みを理解することによって、細胞工学的な応用が期待できます。例えば、人工細胞や、DNA コンピューターを搭載したマイクロマシンが作製されるようになれば、それらに異なった情報を含んだ複数のハードディスクを持たせ、使用するディスクと情報を自在に切り替えることができる多機能マシンを設計したり、さらには、使用ディスクが破損した時に、バックアップから自動的に新しいハードディスクを再構築するシステムを持たせたりすることも可能になるかもしれません。

これまで謎とされていた織毛虫が2種類の細胞核に物質を正しく運び分ける仕組みを

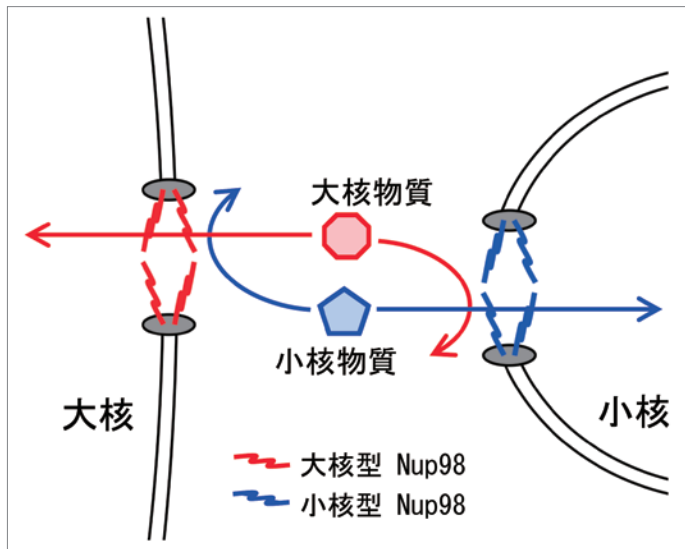


図4 Nup98による誤方向への核内輸送に対する阻害効果

明らかにしたこの研究は、原生動物学研究に大きなブレークスルーをもたらすものとして、2010年度の日本原生動物学会賞を受賞しました。

用語解説

*1 細胞核ハードディスク

細胞核ハードディスク内の遺伝情報は基本的に読み出し専用で、生物が自身のDNA配列に新たな情報を書き込むことはできない。

*2 テロメア

DNAを保護するために末端に存在する特殊な配列領域。大核ではDNAが断片化されているため、テロメアも大量に存在する。テロメア配列はテトラヒメナで初めて発見され、その研究は2009年にノーベル医学生理学賞を受賞した。

*3 交配

単細胞生物の交配は「接合」と呼ばれ、接着した2つの異性細胞間で、遺伝情報(細胞核)の交換が行われる。接合後は2つの細胞由来の遺伝情報が混ざり合った新たな遺伝型の細胞となり、新しい世代がスタートする。