

KARCFRONT

未来 ICT 研究所ジャーナル

Vol. **32**
2015
WINTER



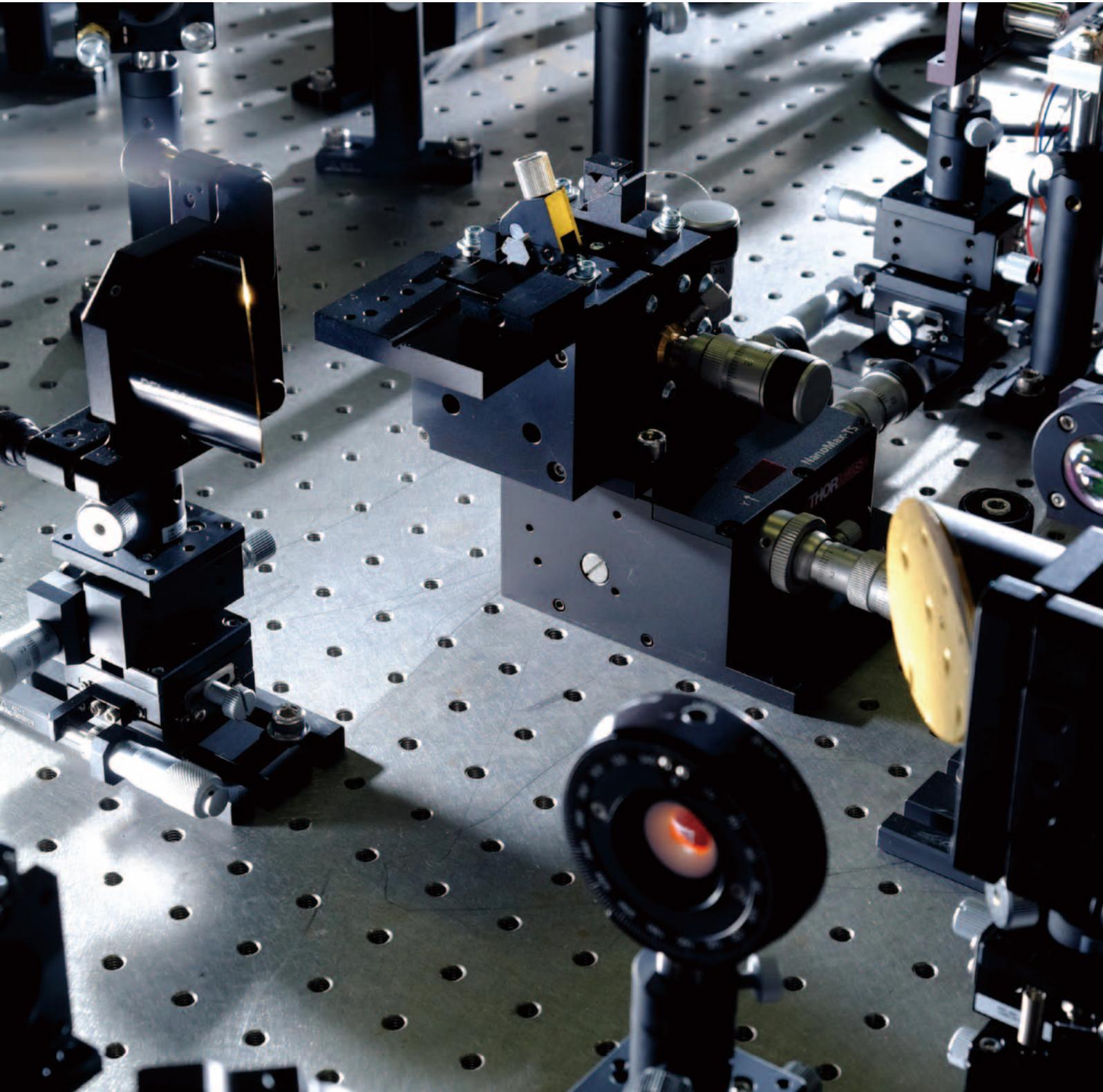
特集に寄せて

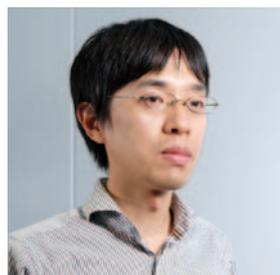
未来 ICT 研究所で芽吹いた成果

特集 実用化に向け芽吹いた期待の研究

細菌を利用した
化学物質センシング技術の開発

先端有機材料での「テラヘルツ波」発生





特集に寄せて 3

未来 ICT 研究所で 芽吹いた成果

企画室 室長 照井 通文 博士(理学)

特集：実用化に向け芽吹いた期待の研究 1 4



生き物が行う分子情報処理・

分子通信技術の理解と応用を目指して

バクテリアを利用した 化学物質センシング 技術の開発

バイオ ICT 研究室

主任研究員 田中 裕人 博士(理学)

特集：実用化に向け芽吹いた期待の研究 2 8



有機非線形光学材料が拓くセンシングと通信の未来

先端有機材料での 「テラヘルツ波」発生

ナノ ICT 研究室

主任研究員 梶 貴博 博士(工学)

TOPICS 12

施設一般公開開催／国際フロンティア産業メッセ 2015 に出展
／第 4 回量子暗号・量子通信国際会議 (UQCC2015) および第
5 回量子暗号国際会議 (QCrypt2015) を開催／第 25 回細胞生
物学ワークショップを開催／ドローンの通信の安全性を強化す
る技術を開発／細胞が備える低栄養環境に応じた節約の仕組
みを発見／受賞報告／nanotech2016 出展告知

未来 ICT 研究所 STAFF 総覧 16

未来ICT研究所で芽吹いた成果 ～「基礎」から「応用」への展開が見えてきた～

企画室 室長

照井 通文

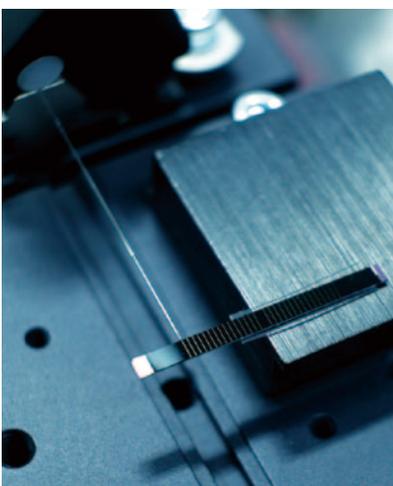
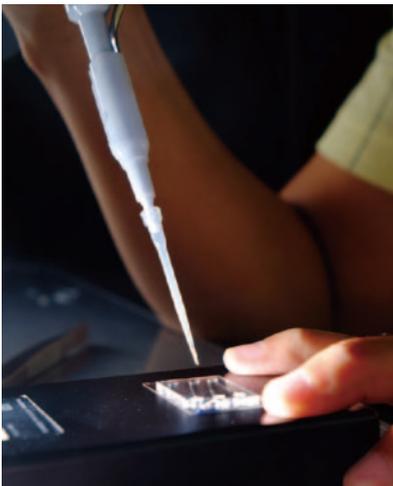
現在の情報通信技術では、いくつかの課題が顕在化しています。ネットワークを流通する情報量の急増、セキュリティの脆弱性、消費電力量の増加、レアメタル・レアアース資源の供給不安、情報リテラシーの低下、ネットワークの複雑化に伴う厳密制御の限界などです。

これらの課題に対してはさまざまな研究が進められていますが、未来ICT研究所の立ち位置は、既存技術の延長線上にはない革新的な情報通信技術の開発を進めるもので、それによりブレークスルーをもたらすことを目指しています。具体的な研究としては、未開拓周波数領域の開拓と活用、光ファイバ通信の大容量化のための新機能デバイスの開発と高機能光制御技術の開発、究極の安全性を持つ暗号技術を実現するための量子効果の応用といった取り組みがあります。加えて、情報通信機器の消費エネルギー低減のために、量子情報通信の実現や超伝導材料・有機材料を利用した新規デバイスの開発も行っています。さらに人にとって、より柔軟性・効率性・自律性を持つ情報通信ネットワーク実現のために、生命に学ぶバイオコミュニケーション技術の研究開発を進めています。

これらの研究を推進するために、これまでに数多くの優れた実績を挙げてきた4つの研究室(超高周波ICT、量子ICT、ナノICT、バイオICT)を結集し、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作り出し、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研究体制を構築しました。

今回は種々ある研究の中から、成果が芽吹いて応用展開が見えつつある事例を紹介します。実用という点ではまだ少し先かもしれませんが、逆に最も熱い状態にあると言えます。1つはバイオ材料を用いたセンシングの成果で、バイオ材料の潜在能力の高さが伺えるものです。もう1つは有機材料を用いたデバイス開発で、超高周波の活用に展開が期待される成果です。

私どもは情報通信技術の既存概念や理論的限界を打破し、未来の情報通信の基盤技術の創出に取り組んでいますが、今回の特集でその一端を読み取っていただければ幸いです。



生き物が行う分子情報処理・
分子通信技術の理解と応用を目指して

バクテリアを利用した 化学物質センシング 技術の開発

生き物は、環境に存在する化学物質の影響を受けながら生命活動を維持しています。この生き物と化学物質のかかわり合いを利用して、微生物（生き物）を使ったセンシングの研究が進められています。



はじめに

生き物は化学物質分子をやり取りし、細胞内・生体内・生体間で、シグナル伝達や情報通信を行っています。こうした化学物質分子を使った情報のやり取りは、「分子情報通信」とも呼ばれています。分子情報通信を基盤にして生命活動を維持している生き物は、環境に存在する化学物質から影響を受けながら生活しています。

技術の進歩とともに、私達の周りの環境には様々な化学物質が存在するようになりました。こうした環境に存在する化学物質は、生き物に様々な形で影響を与えます。化学物質が生き物へ及ぼす影響は多岐にわたるため、化学物質種の同定と定量評価や、またその生物活性をクラスタリング(カテゴライズ)することは、近年ますます重要になってきています。私達は、「生き物が化学物

バイオICT研究室
主任研究員

田中 裕人

Hiroto Tanaka

博士(理学)

略歴

1998年、大阪大学大学院基礎工学研究科物理系博士後期課程修了。科学技術振興機構研究員を経て、2009年 情報通信研究機構入所、現在に至る

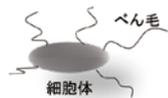
研究分野

バクテリア(大腸菌)を用いた化学物質センサーの開発

近況

美味しいご飯を食べながら、美味しいお酒を飲むのを楽しんでいます。バクテリアのセンシングに負けないよう、味覚と嗅覚を鍛えています。

大腸菌の構造:
直径2μm程度の細胞体に
複数のべん毛が生えている



大腸菌の機能:
好きな物が濃い所に向かう
高感度な化学物質検出器

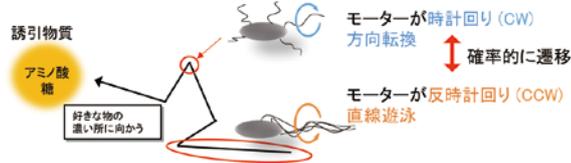


図1 バクテリア(大腸菌)の構造と走化性(化学走性)応答微生物の大腸菌は、直径2μm程度の単細胞生物である。1つの細胞に、化学物質の検出デバイスから応答出力デバイスまでを、パッケージ化した素材(モデル生物)と言える。好きな化学刺激(誘引物質)が増えると直線遊泳をし、嫌いな化学刺激(忌避物質)が増えると方向転換をする。その結果、誘引物質の濃い所に向かう。

質から影響を受けるのであれば、生き物を化学物質のセンシングに使えないものか?」と考え、化学物質のセンシングに微生物を使える可能性を検討してきました。

化学物質にはキラル(光学異性体)を持つものも多く、物質種の同定と定量評価においては、元素種や電荷量だけでなく立体構造も含めて同定することが、その化学物質の影響を評価する上で重要な要素となります。なぜなら、立体構造の違いで、化学物質が生き物へ与える影響が異なることが稀ではないからです。

古くから人間は、こうした化学物質の検出に生き物を利用してきました。カナリアを使って炭鉱の有毒ガスを、魚を使って水質汚染を評価してきました。生き物を使うことで、生物に対する影響(生物活性)を評価し、化学物質の検出に利用してきたのです。しかし、こうした生き物の利用では、影響を与える化学物質を絞り込むことが難しいため、原因物質を推定する難しさが問題となります。例えば、炭鉱のカナリアが戻ってこなかった場合、その原因が、「酸素不足で窒息したのか?」「一酸化炭素で中毒死したのか?」、その死に至る原因を特定するのが困難というわけです。このような「原因特定」に関しては、生き物を使った化学物質検出デバイスの場合、一般的に困難

を伴います。なぜなら、生物が化学物質を検出した結果としての応答は、たいていの場合、単純化された表現になることが多いからです。炭鉱のカナリアの場合は、「カナリアが戻ってくるか、こないか」と単純化されるのです。

生物活性によって環境を評価することは、もちろん非常に有効ですが、さらに一歩進んだ技術の発展を目指して、私達は、微生物(バクテリア、ここでは大腸菌)を使って環境に存在する化学物質を同定する、「化学物質センサー」の開発に取り組んでいます。生物活性だけでなく、化学物質を同定することでそれが新しい化学物質評価の軸になることが期待されます。

大腸菌を工学応用するためにクリアすべき課題

大腸菌の誘引物質刺激に対する応答を定量測定するには、クリアすべき大きな課題が3つありました。

1つ目は、大腸菌に個性があることです。同じ遺伝子構成を持つ大腸菌でも、その内部における遺伝子発現量によって異なった個性を持ちます。この個性があるため、同じ誘引刺激を与えても、1個1個の大腸菌の応答出力がばらつきます。つまり、1個1個の大腸菌の応答出力をトレースするだけでは、応答出力カデー

タのばらつきによって解析が困難になります。

2つ目は、計測デバイスの開発でした。大腸菌は、その細胞内部のシグナル伝達経路に関わる中間応答出力などを計測する手法もあるのですが、私達の選択はシグナル伝達経路の最終応答出力である、べん毛回転でした(図1)。べん毛回転運動はテザードアッセイを行って観察します(図2)。この場合、大腸菌細胞体は物理的に回転運動をしており、溶液交換で入力化学物質を与える際の流速によって、その回転運動が止まってしまいます。回転が止まると、データ取得ができないので、溶液交換中でも継続してデータ取得を可能にする計測デバイスが必要でした。

3つ目は、大腸菌集団の入出力関係データを解析するための解析手法がないことでした。「入力化学物質の種類と濃度をコントロールして、出力応答を計測する」というのが、これまでの生物学が得意としてきた研究手法ですが、センサーとして工学応用をする場合、必要なのは『計測された出力応答から入力を推定する』ことなのです。まさに、これまでの生物学研究とは逆向きの解析となり、その手法がありませんでした。

これら3つの課題は、「応答出力の定量計測」、「安定な溶液交換による入力」、「入出力関係の解析」についての研究開発になります。

クリアすべき課題への挑戦

1つ目の課題、「大腸菌の個性に

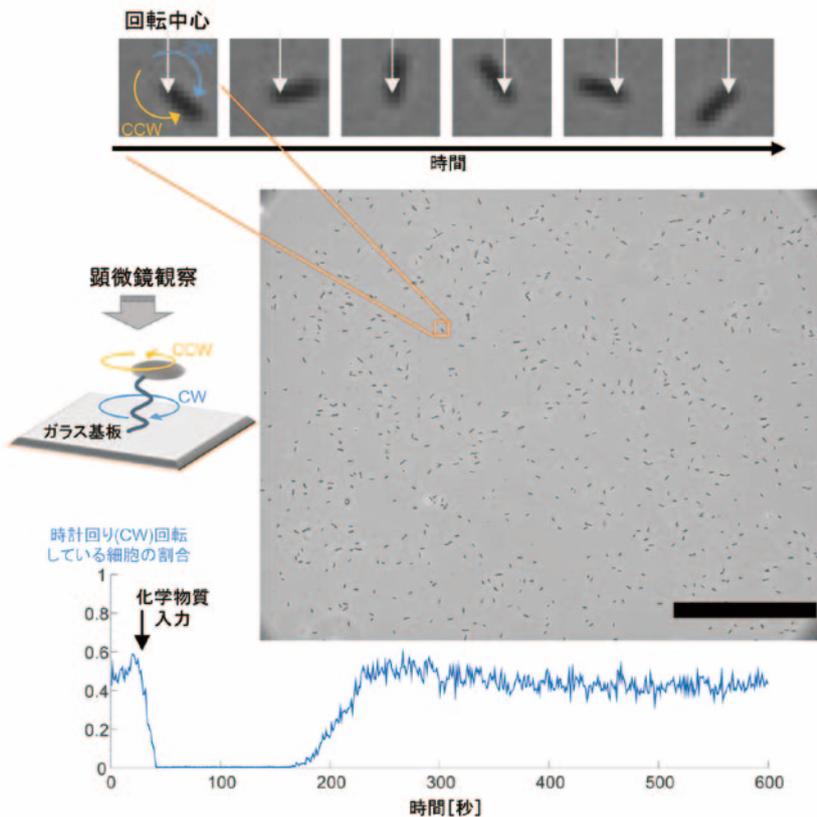


図2 バクテリア(大腸菌)の回転運動の観察
1本のべん毛でガラス基板に吸着した大腸菌細胞の回転運動を顕微鏡を使って観察する(図は位相差観察像)。1つ1つの細胞の回転運動は、時計回り(clockwise; CW)と反時計回り(counter clockwise; CCW)を、確率的に切り替えている。細胞集団を観察し、時計回りをしている細胞の割合を計測する。黒矢印の位置で化学物質を入力すると、時間の経過とともに時計回りの割合が変化する。スケールバーは100μm。

溶液交換の簡易性を損なわず、溶液交換中でも継続してデータが取得できる計測デバイスを作製しました。

3つ目の課題、「大腸菌集団の入出力関係データを解析するための手法の構築」についてですが、従来の生物学研究とは逆向き指向の解析手法の構築となります。センサーとして工学応用するためには、未知の入力に対する応答出力を計測し、その応答出力から入力(化学物質)を推定する必要があります。測定された入出力関係に統計的処理をして、応答出力の特徴から入力刺激を推定するアルゴリズムの構築が必須になります。私達は、応答出力(図2)の特徴量を数値化し、入出力関係を統計処理しました。統計処理に関しては、機械学習(人間が自然に行っている学習と同じような機能をコンピュータで実現しようとする技術・手法)の手法を取り入れ、統計解析手法を開発しました。

よる応答出力のばらつき」についてですが、この課題をクリアするには個性を消す操作、つまり応答出力データとして集団平均を計測するのが有効となります。しかし、100個レベルの大腸菌集団の回転運動をまとめて計測する技術は、それまでありませんでした。私達は、まず高速ビデオと自作プログラムにより大腸菌集団の応答出力データを計測するシステムを開発しました。図2に計測の様子を示します。1個の大腸菌の応答出力は回転運動として計測されます。広い視野で大腸菌集団を観察し、その回転の集団平均を自動的に算出します。この計測システムの開発によって、ばらつきの少ない大腸菌集団の入出力関係データを大

量に取得することが可能になりました。

2つ目の課題、「溶液交換中でも継続してデータ取得を可能にする計測デバイス」についてですが、この課題をクリアするには、溶液交換時の流速を制御(遅く)することが有効です。私達は、PDMS(polydimethylsiloxane)を使い、実験チャンバーの流路形状を工夫することでこの課題をクリアしました。

図3 細胞を使った化学物質種同定の概念図
例えば、利き酒を細胞のレベルにまで落とし込むことに相当する。利き酒では、ヒトは学習経験を使って、飲んだお酒の銘柄を推定する。微生物を使った化学物質種の同定では、訓練用データと機械学習を使って、未知入力を推定する。生き物から分子情報処理の技術を学び、テクノロジーとして応用する。

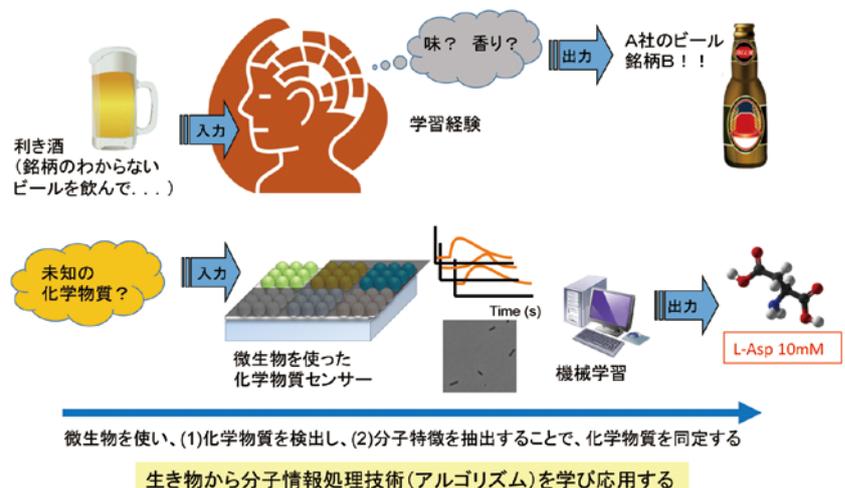
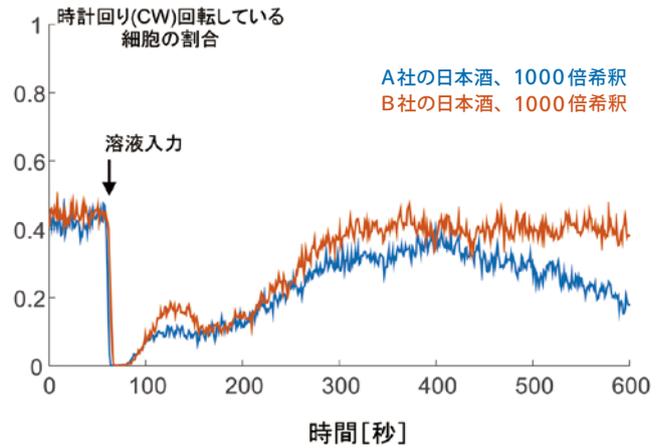


図4 応用例と今後の展望

1種類の大腸菌に、A社の日本酒（青線）と、B社の日本酒（赤線）を与えたときの、応答出力。ともに1000倍に希釈した溶液を入力。1000倍に希釈した日本酒の味をヒトが識別することは困難だが、大腸菌は、その違いを認識して異なる応答出力を示す。応答出力の違いが何に由来するかは現段階では不明だが、微生物を使って高感度な識別を実現することが期待される。



入出力関係データの計測と解析、これはともに未開拓の領域であり、まさに開拓しながら研究を進めてきました。計測によってデータ数を増やし、解析手法を改良し、開発した解析手法によって得られた結果を、再び計測手法の開発にフィードバックするのです。計測と解析の両輪がうまくかみ合って回り、計測装置と解析手法の開発に成功し、応答出力から入力刺激（化学物質）を同定（識別）することが可能になりました。

大腸菌を利用した化学物質の同定（識別）と化学物質センサーの構築

出力応答からの化学物質の同定について、ここでは詳細な記述は省きますが、概念的には、人間の行う“利き酒”を大腸菌に行ってもらっているイメージです。利き酒ならぬ、“利き化学物質”というわけです（図3）。“利き酒”の手順を考えてみると、①未知の液体を口に入れ、②味を感じてこれまでの学習経験のギャラリーからマッチングを検索し、③お酒の銘柄を推定する。人間が行う利き酒を、機械学習という手法を用い、大腸菌を使って再構築するわけです。つまり、“利き化学物質”の手順概要は、①未知の化学物質を検出して、②出力応答を機械学習によって訓練データギャラリーからマッチングを検索し、③化学物質の物質種を推定することを行っているわけです。

現在、使用する細胞の種類を増や

すことで、識別できる化学物質種の拡大と混合溶液の識別に取り組んでいます。混合溶液の代表の1つともいえる“日本酒”を大腸菌センサーに与えてみた結果が図4です。異なる2種類の日本酒を1000倍に希釈して、大腸菌センサーに与えると、見事に異なる応答出力を示します。現在は、1種類の大腸菌を使用しているために分解能不足で、この違いが何に起因するのかまでは言及できませんが、将来、言及できるようになるものと期待しています。

生物学的意義

ここまで、工学的な視点から大腸菌を使った化学物質センサーの構築を紹介しました。ここでは簡単に、この研究の生物学的意義にも触れておきます。

これまで、大腸菌では化学物質の分子情報は、細胞表面の受容体が「好きな刺激か、嫌いな刺激（化学物質）か？」を判別していると考えられてきました。「好きな物質」の中で種類を判別しているとは考えられていませんでした。ここで示した誘引物質が識別可能であることは、この従来からの考えに一石を投じることとなります。ここで示したように、データ駆動的に大腸菌のシグナ

ル伝達処理に迫ることで、生物学に新たな切り口をもたらすことも期待できます。

今後の展望

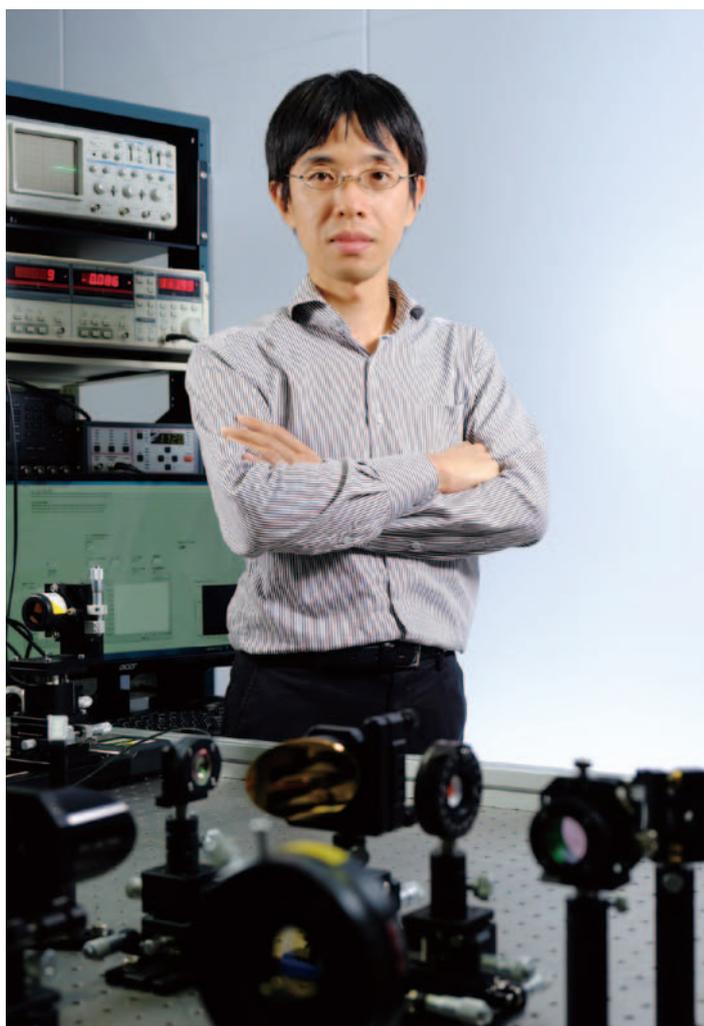
ここで紹介した化学物質センサーの工学的応用として、「香り・味」センサーへの応用などが期待されます（図4）。こうした応用を目指すには、検出対象の化学物質種の拡張が課題となります。化学物質の同定だけでなく、生き物を利用し化学物質の“生物活性”という視点から物質を評価することにより、ヒトの感性に近いセンサーの構築などが期待されます。

また、研究の背景の節でも触れましたが、生物が化学物質を検出した結果としての応答は、単純化された表現になることが多々見られます。そうした意味で、生き物は複雑な情報を上手に単純化する情報処理法を持っていることが期待されます。こうした情報処理手法を学ぶことで、複雑な情報から必要な部分を抽出する情報処理法の開発も期待されます。分子情報処理・通信において、生物が行っている情報単純化のアルゴリズムを学んで応用する、情報処理技術の「バイオミメティクス」が期待されます。

有機非線形光学材料が拓くセンシングと通信の未来

先端有機材料での「テラヘルツ波」発生

非接触でのセンシングや超高速の無線通信を可能にする「テラヘルツ波」の利用を加速することで、これまでにない安心・安全で快適な ICT 社会が実現します。私たちは、“有機非線形光学ポリマー”という先端有機フォトンクス材料とそれらを用いたデバイスの開発を進めることで、革新的な小型テラヘルツ光源などの実現を目指しています。



未来ICT社会でのテラヘルツ波利用

次世代の安心・安全なICT社会では、様々なセンサー端末から収集したデータを活用することで、社会活動を効率化したり、社会の危険をいち早く検知したりすることがますます重要になります。カメラ画像や位置情報といった従来型のセンシングデータに加えて、身の回りに存在する様々な「もの(物質や生体物質など)」に関するセンシングデータを利用できるようになれば、より快適で効率的な社会が実現するとともに、社会における危険の検知の精度が大きく向上するものと期待できます(図1)。

テラヘルツ波は、電波と目に見える光の中間に位置する周波数の電磁波(おおよそ $0.1 \times 10^{12} \sim 10 \times 10^{12}$ ヘルツ(0.1~10THz))で、電波のような物体を透過する性質に加えて、光波のように物体と相互作用をする性質をもっています。そのため、テラヘルツ波を用いることで、物体内

ナノICT研究室
主任研究員

梶 貴博

Takahiro Kaji

博士(工学)

略歴

2009年、大阪大学大学院基礎工学研究科博士後期課程修了後、グローバルCOE特任助教を経て、NICTに入所。2015年5月より現職。

研究分野

有機光デバイス、テラヘルツ分光、レーザー光化学

近況

旅行、登山、自転車、写真、尺八演奏などを中心に趣味を拡大中です。

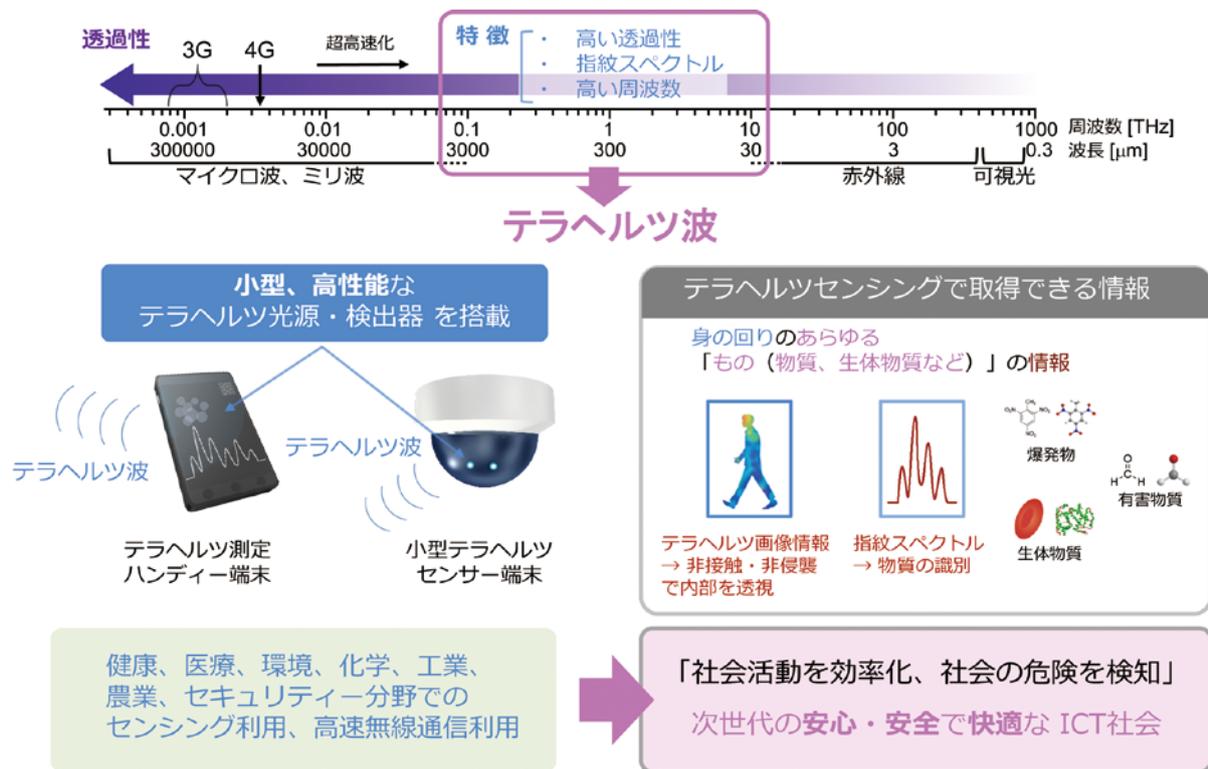


図1 未来 ICT 社会でのテラヘルツ波利用

部の非接触・非侵襲でのイメージングが可能になるとともに、物質（分子）固有の振動や回転に由来する「指紋スペクトル」から物体がどのような物質で出来ているかを識別することが可能になります。さらに、テラヘルツ波の特徴として、人体にとって安全な電磁波である点があげられます。

これらの性質から、テラヘルツ波は、セキュリティーや健康、医療、環境、化学、工業、農業分野などでのセンシング利用が期待されています。また、電波よりも高い周波数をもつテラヘルツ波は、超高速無線通信での利用が期待されています。

テラヘルツ波の利用が社会で広がるためには、従来は大型で手軽に持ち運ぶことができなかったテラヘルツ測定装置を大幅に小型化、高性能化することが鍵となります。テラヘルツ波は、多くの場合、レーザー光を波長変換することで発生させま

す。しかし、現在のところ、波長変換の効率がきわめて低いため、テラヘルツ測定装置には大きくて高出力なレーザー光源を搭載せざるを得ず、装置が大きくなっていました。テラヘルツ測定装置の小型化のためには、波長変換の効率を向上させることが重要なのです。また、現在の多くのテラヘルツ測定装置は、測定可能なテラヘルツ領域が低周波の領域(0.1～4THz程度)に限られています。しかし、これよりも高い周波数の領域には、物質(分子)に特徴的な多くの振動モードが存在します。そこで、テラヘルツ光源や検出器をより広帯域化することが、物質の識別の精度を高めることにつながります。

テラヘルツ波の発生と検出の方法

テラヘルツ波を発生させたり検出したりする代表的な方法としては、非線形光学材料を用いる方法や光伝

導アンテナを用いる方法があります。非線形光学材料を用いる方法は、特に、高周波(広帯域もしくは超広帯域)のテラヘルツ波の発生や検出、高強度のテラヘルツ波の発生において頻繁に用いられています。

非線形光学材料を用いたテラヘルツ波の発生では、2つ以上の波長成分を含む強いレーザー光を非線形光学材料に照射します。このとき、光差周波混合という2次の非線形光学効果により2波長のレーザー光のエネルギー(周波数)差に対応したテラヘルツ波が発生します。2波長の連続発振のレーザーを照射することで、単一周波数のテラヘルツ波が発生します。一方、パルスのレーザー光には様々な周波数の光が含まれるため、発生するテラヘルツ波にも様々な周波数が含まれることになり、広い周波数成分を含む広帯域テラヘルツ波を一度に発生させることができます。

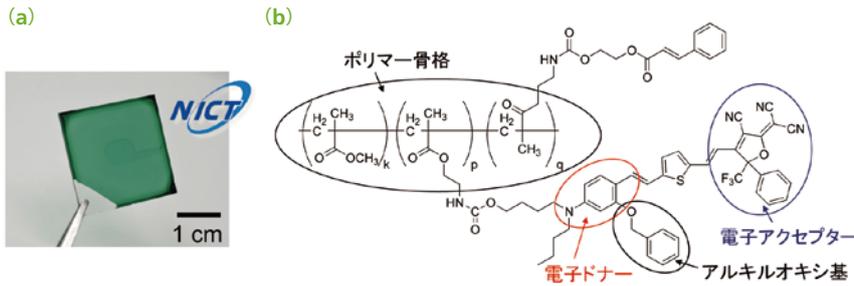


図2 (a) ITO基板上に塗布した非線形光学ポリマー、(b) 非線形光学ポリマーの化学構造の例

		テラヘルツ帯域	屈折率 n_o, n_{THz}	電気光学定数 r (pm/V)	THz発生 性能指数	微細加工
非線形光学 ポリマー		0.1 - 20 THz以上	~1.7, ~1.7	100以上	8900以上	◎
ニオブ酸リチウム (LiNbO ₃)		0.1 - 2 THz	2.2, 4.96	32	1500	
テルル化亜鉛 (ZnTe)		0.1 - 4 THz	2.83, 3.16	4	160	△
DAST (有機結晶)		0.3 - 16 THz	2.13, 2.26	47	5600	

図3 テラヘルツ波の発生や検出に用いられる非線形光学材料の比較

テラヘルツ波の検出に関しても、非線形光学材料の2次非線形光学効果を利用した電気光学サンプリングと呼ばれる方法などが利用されています。

別の原理に基づく単一周波数のテラヘルツ光源として、エレクトロニクスの技術に基づいたテラヘルツ量子カスケードレーザーの開発が進められています。テラヘルツ量子カスケードレーザーは、電流注入によってテラヘルツ波を直接発振できることに加えて、高出力という利点があります。現在、冷却器が不要な小型光源の実現に向けて研究が進められています。

非線形光学ポリマーを用いたテラヘルツ技術

私たちは、テラヘルツ波の発生や検出に用いる新しい非線形光学材料として、非線形光学ポリマーという先端有機フォトニクス材料の開発を進めています(図2)。

私たちは、これまで、高性能な非線形光学色素の開発を行ってきました。非線形光学色素は、電子ドナーと呼ばれる電子を押し出す性質をもつ部分と電子アクセプターと呼ばれる電子を引き付ける性質をもつ部分、それらをつなぐ π 共役系によって構成されます。私たちは、この電子ドナー部分にアルキルオキシ基という官能基を付与することで、非線形光学特性の指標となる超分極率と呼ばれる値がこれまでの非線形光学色素に比べて1.3から1.4倍程度大きくなることを見出しました。

このような非線形光学色素とポリマー(有機分子の重合体)からなる非線形光学ポリマーは、テラヘルツ波の発生や検出のために従来用いられているニオブ酸リチウム(LiNbO₃)やテルル化亜鉛(ZnTe)などの無機の非線形光学結晶やDASTなどの有機の非線形光学結晶と比較して、大きな電気光学係数(>100pm/V)をもち、材料の屈折

率の効果を考慮したテラヘルツ波の発生に関する性能指数についても、従来の材料の値を大きく上回ります(図3)。また、ニオブ酸リチウムやテルル化亜鉛などの無機結晶材料では、結晶格子の振動による影響で、発生したテラヘルツ波が高周波領域で吸収されて失われてしまうことが発生するテラヘルツ波の帯域を狭める要因となっています。一方、非線形光学ポリマーは、テラヘルツ領域の広範囲にわたって吸収係数が比較的小さいことから、超広帯域(0.1~20THz)でのテラヘルツ波の発生や検出が可能になります。

そして、高効率なテラヘルツ波の発生のためには、入射するレーザー光と発生するテラヘルツ波の速度が一致していることが重要になります。これを位相整合といいます。ニオブ酸リチウムなどの無機結晶では、光領域での屈折率とテラヘルツ領域での屈折率が大きく異なるため、位相整合の達成には、周期構造を導入したり、結晶への光入射の角度やレーザーパルスの波面の角度を調整したりするなどの工夫が必要でした。一方、非線形光学ポリマーは、光領域での屈折率とテラヘルツ領域での広範囲にわたる屈折率がほとんど同じであるため、位相整合を容易に達成することができます。

さらに、無機・有機の非線形光学結晶材料は、微細加工が難しいことから、光の閉じ込めによりテラヘルツ波の発生効率を高めることができる導波路デバイスなどの作製が容易ではありませんでした。非線形光学

ポリマーは、微細加工プロセスによる導波路デバイスの作製が容易であるため、テラヘルツ波の発生効率を飛躍的に高めたデバイスを実現できます。

1.5μm帯レーザーを用いたテラヘルツ波の発生

小型のテラヘルツ光源の実現には、波長変換デバイスに加えて、もともとなるレーザー光源が小型であることが重要です。私たちは、小型半導体レーザーや小型ファイバーレーザー（エルビウムドープファイバーレーザー）で発振が可能であり、様々な光通信技術が利用可能な波長である1.5μm帯のレーザー光を用いたテラヘルツ波発生デバイスの開発を進めています。

私たちは、電圧を印加することで非線形光学色素の向き（配向）をそろえた非線形光学ポリマー膜を作製し、波長が800nmでパルス幅が100fs（フェムト秒、 10^{-15} 秒）のフェムト秒チタンサファイアレーザーを照射することで、テラヘルツ波が発生することを確認しました（図4）。さらに、フェムト秒チタンサファイアレーザーからのレーザー光を光パラメトリック増幅により波長変換することで発生させた波長1.5μmのレーザー光を照射することで、テラヘルツ波を発生させることに成功しました。使用した非線形光学ポリマーは、波長1.5μm付近では、非線形光学色素による吸収がほとんどないことから、光吸収によるレーザー光の損失なしに材料の厚

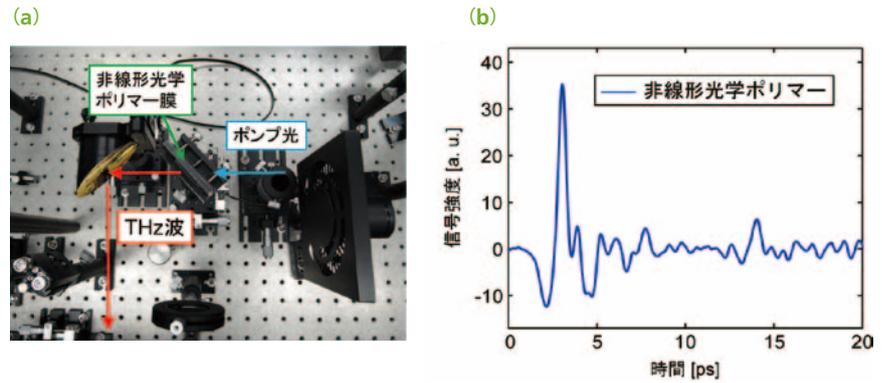


図4 (a) テラヘルツ波発生の評価装置、(b) 非線形光学ポリマーから発生したテラヘルツ波の時間波形

みに比例したテラヘルツ電場強度が得られることが分かりました。

より小型で低出力のレーザー光源を用いたテラヘルツ波の発生を実証するため、パルス幅100fsの1.5μm帯小型エルビウムドープファイバーレーザーを用いた実験を進めました。その結果、1.5μm帯レーザーを用いた弱ポンプ光強度条件下での非線形光学ポリマーからのテラヘルツ波の発生に成功しています。

テラヘルツ波の発生効率をさらに高めるために、微細導波路構造を用いたテラヘルツ波発生デバイスの開発を進めています。さらに広帯域でのテラヘルツ波の発生に向けて、よりパルス幅の短い1.5μm帯超短パルスファイバーレーザーを用いた実験を進めています。

今後の研究展開

高性能なテラヘルツ装置の実現に向けて、デバイスの開発だけではなく、非線形光学ポリマー材料の開発が重要になります。現在、非線形光学ポリマーのポリマー骨格として、ポリメタクリル酸メチルを用いています。しかし、ポリメタクリル酸メチルのメチル基などの振動や回転に由来する吸収ピークがテラヘルツ領

域に存在することが、これまでの研究で明らかになっています。発生したテラヘルツ波の吸収ロスをさらに減少させるため、テラヘルツ領域に吸収をもたないポリマー材料を用いた非線形光学ポリマーの開発を進めています。

また、テラヘルツ波の発生効率をさらに高めた新規デバイスの開発が重要です。私たちのグループでは、超高速光変調器の実現に向けて有機・シリコンハイブリッドデバイスの開発を進めていますが、この技術を応用することで、さらに高効率なテラヘルツ波発生デバイスを実現することができます。また、テラヘルツ波の検出器に関しても、非線形光学ポリマーを用いたデバイスにより、検出感度の大幅な向上が実現できます。

このように、私たちは、材料とデバイスの両面から研究開発を進めることで、これまでになかった小型で高性能なテラヘルツデバイスの実現を目指しています。これにより、テラヘルツ波のセンシング利用と無線通信利用の社会普及が大きく進展し、これまでになかった安心・安全で快適なICT社会が実現するものと期待しています。

TOPICS①

一般公開、国際フロンティア産業メッセ

施設一般公開開催

未来 ICT 研究所（神戸）では平成 27 年度の施設一般公開を 7 月 25 日（土）に開催しました。当日は晴天に恵まれ、503 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、クイズの順に各展示ブースを見学しながら、研究員が趣向を凝らして作成した体験型の展示や研究者達との交流を十分に楽しまれた様子でした。

8 回目となる一般向け講演会では、身近な事例から最先端の研究までを解説しました。今回は、本研究所のナノ・バイオの研究内容に加え、平成 26 年に本研究所内に設置されたフェーズドアレイ

気象レーダ・ドップラライダー融合システムに関連して、電磁波計測研究所センシングシステム研究室の久保田実室長が講演も行いました。講演は午前・午後の 2 回開催しました。会場は両講演とも満席となり盛況でした。

未来 ICT 研究所以外からは、総務省近畿総合通信局、脳情報通信研究センター、電磁波計測研究所、アマチュア無線記念局からの参加もありました。

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。皆様のお越しをお待ちしております。

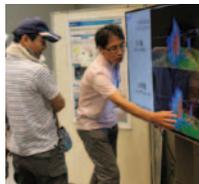
展示ブースの様子



外部からの参加



総務省近畿総合通信局



電磁波計測研究所



アマチュア無線記念局



脳情報通信融合研究センター

第 8 回研究講演会の様子



新時代の超伝導デバイス
～究極の情報通信を目指して～
山下 太郎
ナノ ICT 研究室 主任研究員



脳が記憶をつくる瞬間をとらえる
～食べる司令細胞で、
世界で初めて記憶を“見る”～
吉原 基二郎
バイオ ICT 研究室 主任研究員



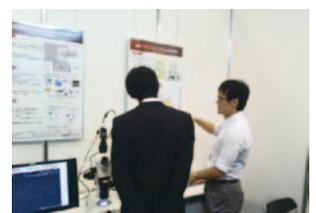
ゲリラ豪雨の予測を目指して
～気象観測レーダの最前線～
久保田 実
電磁波計測研究所
センシングシステム研究室 室長

国際フロンティア産業メッセ 2015 に出展

9 月 3 日（木）、4 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 2015（主催：国際フロンティア産業メッセ 2015 実行委員会）」に出展・展示を行いました。「国際フロンティア産業メッセ 2015」では、兵庫県を中心とした様々な分野にわたるものづくり企業や最先端の研究機関の集積の強みを活かした次世代成長産業の創出・育成を図るため、産業全体への高い波及性と大きな成長が期待される各種分野で基調講演、各種セミナーや交流会が行われました。2 日間の来場者数は約 29,000 人以上でした。

当機構ブースでは、バイオ ICT 研究室の微生物を使った化学物質センシングシステムの開発を出展しました。研究成果、アウトカム、

研究所紹介などをパネル、実機で紹介するとともに、研究担当者がブース内において説明を行い、情報発信と技術交流に努めました。未来 ICT 研究所では今後も本展示会を通じ、地域における情報発信と技術交流を進めていく方針です。



NICT ブースの様子

TOPICS②

国際会議

第4回量子暗号・量子通信国際会議 (UQCC2015) および 第5回量子暗号国際会議 (QCrypt2015) を開催

9月28日～10月2日、東京、一橋講堂で第4回量子暗号・量子通信国際会議 (UQCC2015、9月28日午前)、第5回量子暗号国際会議 (QCrypt 2015) を開催しました。本会議は総務省、文科省の後援を得て、情報通信研究機構、国立情報学研究所、電気通信大学が主催し、大学、研究機関、企業および省庁から334名(うち海外から183名)の参加がありました。

UQCCは、NICTが中心となり日本で開催してきた国際会議で、

2007年、2008年、2010年に次ぎ第4回目となります。QCryptは、各国持ち回りで毎年開催する量子暗号分野最大の会議です。2011年以降、チューリッヒ、シンガポール、ウォータールー、パリで開催され、2015年は東京に招致しUQCC2015と併設開催しました。量子ICT分野の主要研究者、暗号分野の代表的研究者が結集して最新の成果を発表し、今後の分野連携に関して活発かつ具体的な討論が行われました。

第4回量子暗号・量子通信国際会議 (UQCC 2015) の様子

量子暗号、量子通信技術の現状と将来ビジョンが体感できるよう、ステージデモやビデオ上映を中心に発表を行いました。量子鍵配送 (QKD) 装置やネットワーク化のための鍵管理エージェント、応用例として電子カルテシステムを舞台上に組み上げ、ライブデモを行いました。



QKD 受信機 (東芝製: 白布上) と鍵管理サーバ (NICT ロゴの青色ラック)



会場の様子

第5回量子暗号国際会議 (QCrypt 2015) の様子

量子暗号と現代暗号の分野横断の議論を活性化させるため、重要テーマについて4件のチュートリアル講演を選び、このほか招待講演10件、寄稿講演26件、ポスター発表113件、ホットトピック3件、およびデモ展示10件の発表、議論が行われました。



基調講演を行うジザン教授 (U. Geneva)



ポスターセッションの様子

第25回細胞生物学ワークショップを開催

バイオICT研究室では、未来ICT研究所(神戸)において7月27日～31日の5日間、第25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、基礎～中級コースを未来ICT研究所で、中級～上級コースを北海道大学にて行っています。今回は、全国から選抜した大学院生と若手研究者あわせて19名が参加しました。

講師は、松田厚志主任研究員、原口徳子主任研究員、平岡泰招

へい専門員を含めた大学や企業の研究者・技術者など約40名でした。

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の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、研究成果の社会的還元と関連研究分野への貢献として、今後も継続して実施していく予定です。

TOPICS③

報道発表

©未来 ICT 研究所は下記のような研究成果を報道発表を通じて発信しました。詳細は、URL をご覧ください。

[報道発表 平成27年9月28日] <http://www.nict.go.jp/press/2015/09/28-1.html>

ドローンの通信の安全性を強化する技術を開発 ～量子鍵配送ネットワークからドローンに暗号鍵を供給し、安全な飛行制御通信を実現～

NICT は、株式会社プロドローン（プロドローン、代表取締役：河野 雅一）および株式会社サンエストレディング（サンエストレディング、代表取締役：坂野 良行）と共同で、ドローンの飛行制御通信の安全性を強化する技術を開発しました。真性乱数を共通の暗号鍵としてドローンと地上局間で安全に共有し、制御通信をパケットごとに暗号化することで、制御の乗っ取りや情報漏えいを完全に防御します。さらに、複数の暗号鍵をドローンに搭載し、対となる暗号鍵を複数の地上局に量子鍵配送ネットワークで配送することに

より、複数の地上局間で安全に飛行制御を引き継ぎながら、ドローンを広域で飛行誘導するセキュア制御通信技術を開発し、その実証実験に成功しました。

上記技術の商品化については、乱数生成器を地上局に導入し、ユーザ・機器認証を経て暗号鍵をドローンに供給し、地上局間では手渡しで鍵配送を行う飛行誘導システムを2年後に予定しています。

※ 本研究開発の一部は、総合科学技術会議・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) の支援を受けています。

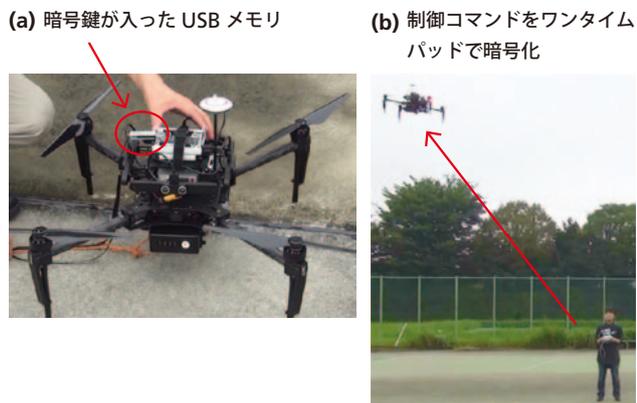


図1 暗号鍵（真性乱数）の供給とワンタイムパッド暗号化による飛行制御

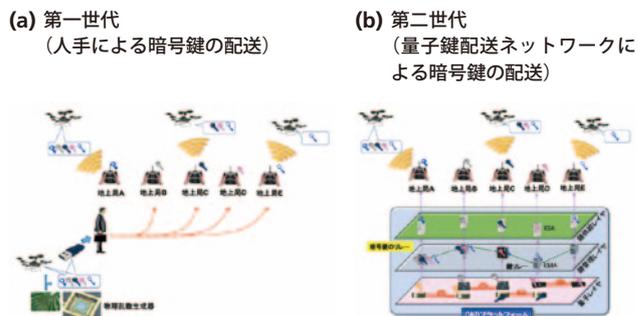


図2 研究開発を進めているドローン広域セキュア制御通信システム

[報道発表 平成27年10月27日]

細胞が備える低栄養環境に応じた節約の仕組みを発見 ～遺伝子発現レベルの高精度の計測により実現～

NICT は、未来 ICT 研究所において、分裂酵母細胞を増殖可能なぎりぎりの低窒素環境で培養した時に、リボソームタンパク質遺伝子の発現レベルの割合が培養環境に応じて変動することを発見しました。

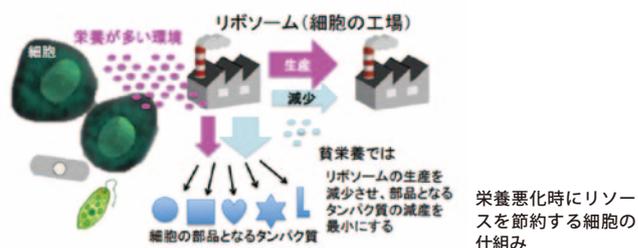
細胞内のタンパク質は全てリボソームという工場で作られますが、リボソーム自身もタンパク質なのでリボソームで作られます。したがって、細胞は、リボソームで「リボソームタンパク質（工場に相当）を作るか」、「非リボソームタンパク質（製品に相当）を作るか」、その配分を決めなくてはなりません。今回の発見から、細胞は栄養が豊かな時は大量の「工場」を作りますが、栄養が減少しリソースが減少すると、「工場」を大きく減少させ「製品」を小さく減少させることでその配分比率を変え、タンパク質合成に必要なリソースの節約と細胞の増殖を両立させていることが明らかとなりました。

この知見は、生物が環境適応する過程において、限られたリソースを効率よく配分し、増殖を自律的に最適化する能力の一端を明らかにしたものです。リソースが減少した時に、それを効率的に配分

する生物の仕組みの理解は、災害時などにおける、電力や電話回線、インターネットなどのリソースを効率的に配分するシステムの開発につながるものと期待されます。

本研究は、大阪大学大学院情報科学研究科村田正幸教授らとの共同研究によるものです。

なお、本研究の成果は、2015年10月21日に国際的科学誌「Scientific Reports」オンライン速報版で公開されました。



TOPICS④

受賞、展示会案内

受賞報告

本受賞は、IEEE（米国電気電子学会）のMTT-S (Microwave Theory and Techniques Society) が主催している、無線インテグレーション技術の国際会議において発表した研究成果が、優れた業績であると認められたものです。

本成果は、総務省から受託している電波資源拡大のための研究開発の課題「テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究開発 -300GHz帯シリコン半導体 CMOS トランシーバ技術-」のなかで、原紳介主任研究員を中心に広島大学と共同で取り組んでいる研究です。

本受賞は、2015年応用物理学会春季学術講演会で発表した「TiNバッファ層上のNbNトンネル接合の作製と評価」が高く評価されたものです。

受賞者：原 紳介主任研究員、渡邊 一世主任研究員、関根 徳彦研究マネージャー、笠松 章史室長(以上 NICT) 片山光亮、高野恭弥、吉田毅、天川修平、藤島実(以上 広島大学)
受賞日：平成 27 年 8 月 27 日
受賞名：RFIT Award
授与団体：2015 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology



受賞者：牧瀬 圭正、寺井 弘高
受賞日：平成 27 年 4 月 1 日
受賞名：2015 年応用物理学会春季学術講演会 Poster Award
授与団体：公益社団法人応用物理学会



nanotech2016 出展告知

未来 ICT 研究所は、2016 年 1 月 27 日～29 日に東京ビッグサイトで開催される国際ナノテクノロジー総合展・技術会議に出展します。

展示ブースでは、未来の光通信に資する「有機光電変換素子」などのナノデバイス技術について、材料から作製、実証へ至る最新の技術を紹介いたします。

さらに、バイオテクノロジー分野から情報通信への利用に関する研究、ミリ波・テラヘルツ波の通信技術などの最新の未来基盤技術研究開発の展示を行います。

また、研究開発だけでなく、情報通信研究機構の社会還元促進部門から、技術移転の紹介展示も行います。

な今回は「未来 ICT シンポジウム 2016 ～材料・機能から始まる技術革新～（1 月 27 日（水）13:10 開演 於 会議棟 102 室、聴講無料）」を展示会の連動企画として開催します。



昨年の様子

未来 ICT 研究所 STAFF 総覧

研究所付	寶迫 巖	研究所長	博士(理学)	
	久保田 徹	副研究所長	博士(工学)	
	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	
	小川 博世	客員研究員	工学博士	
	企画室 (神戸)	照井 通文	室長	博士(理学)
横田 和之		グループリーダー	—	
五十川 知子		主任	—	
牧瀬 圭正		専門推進員	博士(理学)	
大山 良多		有期技術員	—	
高橋 恵子		有期技術員	—	
井上 晶子		有期補助員	—	
大内 留美		有期補助員	—	
神田 由香里		有期補助員	—	
佐伯 香住		有期補助員	—	
寺本 智香		有期補助員	—	
山根 梓		有期補助員	—	
企画室 (小金井)		小倉 基志	マネージャー	—
		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)
		鈴木 与志雄	有期技術員	—
		川瀬 典子	有期技術員	—
	佐藤 曉洋	有期補助員	—	
	八代 祐子	有期補助員	—	
	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)	
	齋藤 伸吾	主任研究員	博士(理学)	
	超高周波ICT 研究室	古澤 健太郎	主任研究員	博士(工学)
諸橋 功		主任研究員	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)	
Patrashin Mikhail		主任研究員	博士(工学)	
浜崎 淳一		主任研究員	博士(理学)	
原 紳介		主任研究員	博士(理学)	
小川 洋		主任研究員	博士(工学)	
酒瀬川 洋平		研究員	博士(工学)	
董 銳冰		研究員	博士(工学)	
山下 良美		専門研究員	—	
三村 高志		統括特別研究員	工学博士	
遠藤 聡		特別研究員	理学博士	
岸川 諒子		特別研究員	—	
藤川 紗千恵		特別研究員	博士(工学)	
藤代 博紀		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	—	
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(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(工学)
		和久井 健太郎	主任研究員	博士(工学)
		朱 金曉	研究員	博士(工学)
		金 銳博	研究員	博士(工学)
		占部 伸二	招聘専門員	工学博士
		韓 太舜	招聘専門員	博士(工学)
	伊藤 寿之	有期技術員	博士(地球環境科学)	
	北村 光雄	有期技術員	—	
	都筑 織衛	有期技術員	—	
	松尾 昌彦	有期技術員	—	
	南 恵子	有期補助員	—	
	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)	
	綿澤 佳徳	研究マネージャー	博士(工学)	
	寺井 弘高	研究マネージャー	博士(工学)	
	ナノICT 研究室	笠井 克幸	主任研究員	博士(工学)
梶 貴博		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)	
丘 偉		研究員	Ph.D.	
富成 征弘		研究員	博士(工学)	
宮嶋 茂之		研究員	博士(工学)	
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	—	
塩地 雅之		有期技術員	—	
三木 秀樹		有期技術員	薬学博士	
山田 千由美		有期技術員	—	
横濱 秀雄		有期技術員	—	
高木 良博		専門調査員	—	
岡部 久美		有期補助員	—	
瀧岡 美佐		有期補助員	—	
上月 真紀子		有期補助員	—	
高木 佳寿代		有期補助員	—	

バイオICT 研究室	小嶋 寛明	室長	博士(工学)	
	榊原 斉	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)	
	櫻井 晃	研究員	博士(生命科学)	
	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)	
	原口 徳子	主任研究員	医学博士	
	平林 美樹	主任研究員	博士(工学)	
	松田 厚志	主任研究員	博士(理学)	
	吉原 基二郎	主任研究員	博士(理学)	
	板倉 由季	研究員	博士(科学)	
	佐川 貴志	研究員	博士(生命科学)	
	清水 洋輔	研究員	博士(農学)	
	鳥澤 嵩征	研究員	博士(学術)	
	古田 茜	研究員	博士(理学)	
	山本 孝治	研究員	博士(理学)	
	平岡 泰	招聘専門員	理学博士	
	岡正 肇澄	有期技術員	—	
	小坂田 裕子	有期技術員	—	
	菟谷 知子	有期技術員	—	
	荒神 尚子	有期技術員	—	
	佐橋 律子	有期技術員	博士(学術)	
	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	—		
田中 美佳子	有期補助員	—		
グリーンICT デバイス先端 開発センター	東脇 正高	統括／先端開発センター長	博士(工学)	
	上村 崇史	主任研究員	博士(工学)	
	片桐 祥雅	研究マネージャー	工学博士	
	Daivasigamani Krishnamurthy	主任研究員	Ph.D Materials Science	
	中田 義昭	主任研究員	博士(工学)	
	小西 敬太	研究員	博士(工学)	
	WONG MAN HOI	研究員	Ph.D Electrical and Computer Engineering	
	佐村 秀夫	招聘専門員	工学博士	
	深紫外光ICT デバイス先端 開発センター	井上 振一郎	統括／主任研究員／先端開発センター長	博士(工学)
		Hao GuoDong	研究員	博士(工学)
谷口 学		有期技術員	—	
中屋 晃成		有期技術員	—	
仙場 浩一		上席研究員／室長	博士(工学)	
巨視的 量子物理 プロジェクト室	吉原 文樹	主任研究員	博士(工学)	
	布施 智子	研究員	博士(理学)	
	星 亜希子	有期補助員	—	

(2015年10月1日現在)



国立研究開発法人 情報通信研究機構

未来 ICT 研究所

〒651-2492 兵庫県神戸市西区区岡町岡 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.32 2015年12月15日発行 発行/寶迫 巖 編集/照井 通文