

KARCFRONT

未来 ICT 研究所ジャーナル

Vol. **23**
2012
SPRING



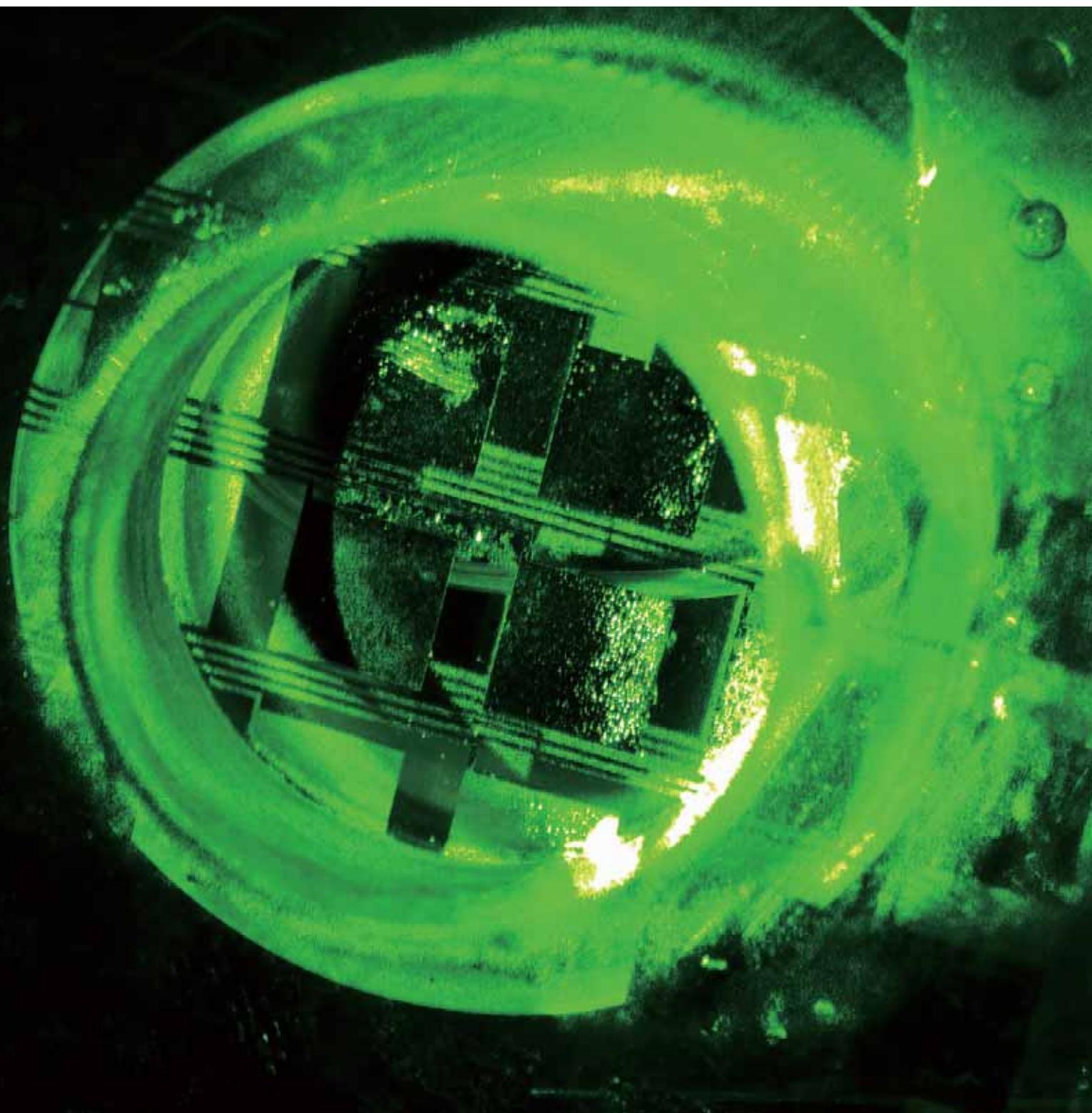
特集: ナノ・バイオ融合

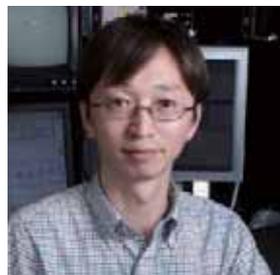
ナノ・バイオ融合が見据える未来

高度好塩菌から視覚機能をつくり出す

クローズアップ研究者

分子モーターの研究から生物の柔軟な情報処理の仕組みを探る
ナノ・バイオ融合領域での生体分子 ICT デバイスを目指して





Contents

特集：ナノ・バイオ融合1 3



ナノ・バイオ融合研究が実現する
未来型ICT基盤技術

ナノ・バイオ融合が 見据える未来

研究マネージャー 田中 秀吉 理学博士(物理学)

特集：ナノ・バイオ融合2 7



バクテリオロドプシン薄膜を用いた
バイオメテックセンシング

高度好塩菌から 視覚機能をつくり出す

主任研究員 笠井 克幸 博士(工学)

TOPICS 10

フォトニックデバイスラボ成果報告会開催 / 報道発表「酸化ガリウム(Ga_2O_3)トランジスタ」を世界で初めて実現! / 第11回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議「nano tech 2012」出展報告 / 第4回サイエンスフェア in 兵庫出展報告 / 報道発表「繰り返し運動の上達には、“時々”目を使うのがコツ!」 / 受賞報告

クローズアップ研究者1 12



分子モーターの研究から 生物の柔軟な 情報処理の仕組みを探る

古田 健也 博士(学術)

クローズアップ研究者2 14



ナノ・バイオ融合領域での 生体分子ICTデバイスを目指して

春山 喜洋 修士(工学)

未来 ICT 研究所 STAFF 総覧 16

ナノ・バイオ融合研究が実現する
未来型 ICT 基盤技術

ナノ・バイオ融合が 見据える未来

未来 ICT 研究所では、ナノ ICT とバイオ ICT の分野融合によるプロジェクトを推進しています。2つの領域を融合することによってどのような新しい研究を生み出そうとしているのか。ナノ ICT 研究室の田中研究マネージャーにうかがいました。



Q：プロジェクトが立ち上がった背景を教えてください。

田中：近年のICT技術の急激な発達のおかげで私たちは利便性の高い便利な生活を得られるようになってきましたが、その一方で、通信の情報量の増大やそれに起因するエネルギー問題、災害時における対応など多くの課題も指摘されています。このような問題は今後いろいろな局面で顕在化することが予測されます。その根本的な解決には既存の技術の延長ではなく、新たな発想やコンセプトに基づきいわゆるパラダイムシフトが必要であると考えています。そのひとつの方向性がナノとバイオの分野融合です。

例えば、有限の温度の下ではすべての事象が温度スケールと同程度のばらつき(熱ゆらぎ、ノイズ)を内包することが知られています。正確に情報を伝え合うために、この温度で規定され

ナノICT研究室
研究マネージャー

田中 秀吉

Tanaka Shukichi

理学博士(物理学)

略歴

1996年 名古屋大学大学院理学研究科(物理)博士課程修了、日本学術振興会特別研究員、佐賀大学理工学部助手、同助教授、ジュネーブ大学固体物理学研究科研究員を経て、2002年に通信総合研究所(現NICT)に入所し現在に至る。

研究分野

固体物性、強相関電子系、超精密計測技術、ナノプロセス技術、分子ナノデバイスの開発

近況

よい季節になってきたので、趣味の園芸活動にそろそろ本腰をいれようかと思っています。これもいわゆる「ナノ・バイオ」です。

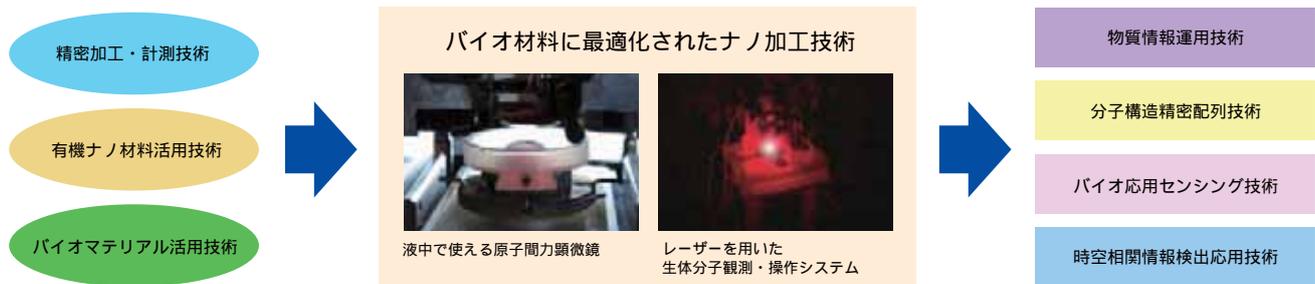


図1 ナノ・バイオ融合プラットフォームの概要

る「ノイズ」に負けないような強いシグナルやエネルギーを送りあう、ノイズやゆらぎを力技で押し切るというのが情報を確実に伝え合うための一般的な戦略ですが、その一方で、生物の情報伝達や認識能力に目を移すと、信号エネルギーを増強して熱ゆらぎやノイズに打ち勝つのではなく、むしろそれらをうまく利用することによって伝達効率や確度を上げています。そこに、ネットワークやデバイスに負荷をかけずに情報を伝える手法や高感度な環境センシング、脳の中のメカニズムを利用したような効率のいい情報処理やネットワーク制御システムにたどり着くヒントがあるのではないかと、考えられるようになりました。

これらのシステムや構造を構成する要素を解明し、利用可能な形で再構成する技術をつくり上げることができれば、生物の感覚システムや脳の中の思考のシステムを「モノ」として示せるのではないかと考えています。そのためには、生物のからくりを解明する「バイオ」と、究極的な精度で物質構造や機能を制御する「ナノ」が相補的に協力することが重要となります。

ただ、ナノとバイオの協力といっても、一般の研究機関では、ナノならばナノ構造をつくる研究に特化する、バイオならば生体機能の解明に特化するというように、研究を狭い領域に限定してしまう傾向があります。一方、われ

われ未来ICT研究所では、どちらの領域にもICTに役立てるという共通の目標、強いドライブフォースがあり、研究協力における垣根はありません。その強みを生かし、具体的なアクションとするために、2011年度からの中期計画では、バイオとナノの融合研究を具体的に領域化して進めていくという方針が決まったわけです(図1)。

Q: バイオ素材はどのようなところが優れているのですか。

田中: 従来型の電子的なメカニズムで動作する素子は高い性能のものがいくつもつくられています。効率が適度な機能という点では、バイオの巧みさも侮れないことがわかってきました。

センシングや情報伝達という観点からバイオの巧みさを理解するうえで重要なポイントはだまかに言って3つあります。

1つ目は、情報が物質に乗っていることです。一般に情報通信は電気信号で情報を伝えますが、バイオではホルモンやDNAのように物質の構造や組み合わせそのものが情報です。物質が相手に届きさえすればフルセットの情報が相手に確実に伝わるので、ノイズやゆらぎと張り合う必要がありません。むしろ、熱ゆらぎで適度にかき混ぜてくれる方が検出や伝達が促進されます。

2つ目は、抗体反応に見られるような分子レベルでの高い物質選択性です。

相補的に結合する、すなわち情報を受け取る相手が特異的にあらかじめ決まっているので、混信することがありません。

3つ目は、質ではなく量で機能を高度化していることです。情報を検出したり、受け取ったりする受信側に注目すると、どの受信器官の中にも受信ユニット(シグナル受容体)がたくさんつまっています。それらを構成するバイオ素材やひとつひとつのシグナル受容体それだけを見れば単機能で貧弱ですが、それらが大量に集まり機能を補い合うことでシステム全体としての高度なパフォーマンスを実現しています。

典型的な例として人間の嗅覚をあげることができます。人間の鼻は10万種類の匂いをかぎ分けることができます。しかし、嗅覚デバイスである嗅球にある分子受容体ユニットは388種類しかありません。これらは、それぞれが特定の匂い分子と結合してシグナルを発生するので、シンプルに考えれば388種類の匂いしか認識できないはずですが、実際には10万種類以上の匂いを認識できることが知られています。これは、嗅球上に配置されたきわめて多数の分子受容体ユニットがお互いに「かかわりあい」を持ちながら協調し、匂いシグナルを構成する分子の情報を時空相関パターンとして認識しているからです。

また、視覚や触覚にも隣接する感覚

モジュールの相関をうまく使ってシステムとしてのパフォーマンスを向上させる仕組みがあることがわかっています。従来型の電子センサが素子そのものをハイスペックにすることで検出パフォーマンスを上げようとするのとは対照的です

Q：具体的には、どのようにして感覚システムをナノテクで再構築するのですか。

田中：生物のメカニズムを情報処理や通信に利用するためには、それらが検出し伝達している情報を何らかの形で外部に取り出す必要があります。これらは基板やインタフェースを介して電気信号や光信号で取り出すことになると思われますが、触媒や酵素などを利用した化学反応によるシグナル増強も検討する必要があります。また、個々の受容体分子ユニットを整然と配列して協調動作させる技術も必要となります。これらの部分は、これまで私たちがナノテクノロジー研究で培ってきた、基板加工や微小電極作製、分子配列制御などのノウハウが役に立ちます。デバイスの素材や調整にかかわる部分はバイオのノウハウがあるので、これらを組み合わせて形にしていこうと考えています。

例えば、ナノICT研究室の笠井主任研究員は、古細菌から得たバクテリオロドプシンという光感受性膜タンパク質を使って演算機能を持つ光センサをつくらうとしています。そのタンパク質を抽出し機能調整する技術はバイオであり、これらを基板上の電極上に整然と配列する技術はナノです。そし

て、そのシステムを制御するアーキテクチャは脳情報となるかもしれません。

この部分は、これから蓄積していかなくてはならない技術要素がたくさんあります。未来ICT研究者のアイデアと技術を結集して、これまでになかった革新的なものを開発していきたいと思えます。

Q：ナノ・バイオ融合分野ではほかにどのような研究を進めていますか。

田中：DNAそのものをセンサとするセンシングとDNAによる精密構造作製、この2つに力を入れています。

DNAは、特定の塩基配列が作り出した物質により、他の配列を読ませたり、読ませなくしたりすることができます。この促進や阻害をつかさどる物質を検出し、コントロールできれば、外部からリアルタイムにDNAの構造をつくりかえることができます。これをうまく使うと、目的の物質ができたか、ある特定の構造ができて、それをもとに別の物質ができるという、ナノレベルの連鎖反応をDNAによってコントロールできます。

これらはセンサやアクチュエータの基本メカニズムとして活用できるのではないかと期待しています。

また、これまでのナノの研究では、分子を精度よく並べることができる一方、その空間精度を保ったまま大きくすることがコストや作業時間の面で困難でしたが、DNAを使えば、これも比較的簡単にこなせます。DNAは分子レベルでプログラミングできるので、構造をコントロールしやすく、二重らせん構造はもちろんタイルのような構造

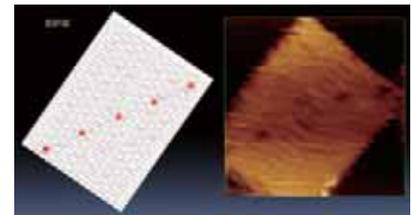


図2 DNA造形による origami シートの作成事例。約 70×90 nm のシート状の DNA origami。左の設計図に示した赤丸の部分に特定のマーカーが突出するように設計されており、右の FM-AFM 観察像で実際にその部分に目的とするナノスケール構造が形成されていることが確かめられた。

をつかって基板上に大量に敷き詰めることもできます。この技術を DNA 造型といい、ナノスケールの空間精度を維持したまま、ミクロンスケールの構造をつくり上げることを可能にする技術です。

例えば、図2のようにDNAでまず足場をつかって、その特定の場所に目印となるマーカー構造をつけておきます。並べようとする分子ユニットにこれと選択的に結合するカウンターをつけておけば、後は部品を混ぜ合わせるだけで各ユニットを基板上に精密に配置することができます。ただ、ここには生物特有の問題が絡んできます。いろいろな反応が並行して進みます。その中でエネルギー的に一番安定な構造ができるため、いろいろな候補の中でどれができるかは、やってみなければわからない部分もあります。ですから、つくることも重要ですが、実際にできたものを見て確かめることも重要となります。

Q：どのように生体分子を見るのですか。

田中：生体分子は、私自身の研究テーマでもある、液中動作が可能な周波数変調方式の原子間力顕微鏡(FM-AFM)で見ることができます。DNA造型によるナノ構造が設計通りにできたかどうか、FM-AFMで観察して実際に確か

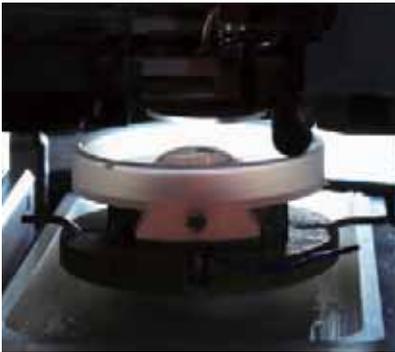


図3 溶液中での高分解能観察に用いる原子間力顕微鏡のステージ部分。カンチレバーの先にある非常に小さな針を自己励振させた状態で、液滴の中に設置した観察対象に近づけると、探針先端と試料表面との距離によって自己励振周波数が変化する。これを精密に検出し画像化することで試料表面の原子スケールの凸凹を読み取る。

めることができます。なぜ液中にこだわるかというと、バイオのサンプルはほとんど溶液を介してその構造がつくられ、維持されるからです(図3)。

ところが、これまでのナノテクプロセスの多くは超高真空環境での作業が必須であり、溶液があってはだめでした。それをなんとか溶液の中でできるようにと開発を進めてきたのが、この観察手法です。

DNA造型の研究において、DNAの

タイルはあくまで足場にすぎず、そこからさらに反応を進めていかなければなりません。これを途中で真空に入れてしまうと、DNAは水分を失ってミイラ化し本来の性質を失ってしまいます。液中ならば元の性質や構造を維持したまま観察できますし、さらに材料を追加して、反応の続きを追いかけることも可能です。

このような先端的な計測手段があると、いろいろな研究機関から、これを使って手持ちのサンプルを測りたいという申し出が多くあります。ナノ・バイオの世界は自分たちだけですべて見渡せるほど狭くはないので、こういった協力をきっかけに新たな共同開発テーマの研究が始まることもあります。

Q：将来に向けてどんな目標を立てていますか。

田中：生物の感覚や機能に即したもの

で特定の事象をセンシングしたとき、いったいどういった情報が収集されるのか、情報をどう統合処理すれば、生物の持っている高度な情報処理能力や効率性を模倣できるのか、その本質は何なのか、どうすればそれらを漏れなく他者に伝えることができるのか、といった部分に重点を置いています。センサやデバイスをつくることそれ自体を大目的にしているわけではありません。

生体のからくりを探索し再構成していく過程で得られたアイデアや技術から、シリコンなどの非バイオ素材を使って新しいデバイスを組んでもいいのです。あくまで、そこにあるメカニズムは何なのか、それをどう活かしていくかを考えて、材料が無機か有機かバイオかといったことにはこだわらず、研究開発を進めていきたいと考えています。

「ナノ・バイオ ICT シンポジウム 2012」を開催

未来 ICT 研究所は、2012 年 2 月 15 日に、東京ビッグサイト(東京都江東区)で「ナノ・バイオ ICT シンポジウム 2012」を開催しました。NICT の熊谷 博理事の開会挨拶、ナノ ICT 研究室の田中秀吉研究マネージャーによる主旨説明に続き、所外からのゲストを含む 7 人の研究者が最新のナノ・バイオテクノロジーについて講演を行いました。

このシンポジウムは、毎年 NICT が出展している世界最大のナノテク展示会「nano tech 2012」に合わせて開催されたこともあり、ナノとバイオの融合による新しい ICT 技術に興味をもつ企業や研究機関からの参加者で満席の盛況でした。

「私自身も講演内容をわくわくしながら聞いた」と閉会挨拶で大岩和弘所長が述べたとおり、さまざまな視点で展開されているナノ・バイオの最先端研究についての講演は聞き応えがあり、講演後の質疑応答も活発に行われました。



講演リスト

第一部 基調講演

法政大学生命科学部教授 川岸郁朗 氏
「生物のインテリジェントセンシング機能
～細菌がもつ多機能環境応答センサーのしくみを探る～」

第二部 バイオのからくり

大阪大学大学院医学系研究科教授 岡村康司 氏
「細胞膜蛋白質による膜電位変化のセンシングと情報転換」
奈良女子大学生生活環境学部准教授 才脇直樹 氏
「脳機能計測を用いた触感インタフェースの開発」

第三部 バイオに学びバイオで測る

福井大学遠赤外線領域開発研究センター教授 谷正彦 氏
「テラヘルツ帯振動分光で探る有機・生体分子のダイナミクス」
未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室主任研究員 笠井克幸 氏
「バクテリアオロドプシン薄膜を用いたバイオメテック光センシング」
未来 ICT 研究所バイオ ICT 研究室主任研究員 山田 章 氏
「バイオ機能を再構築して使う」

第四部 バイオメテックシステムによる高機能センシング

未来 ICT 研究所企画専攻研究員 片桐祥雅 氏
「非線形生物システムに学ぶマイクロインテリジェンスと応用」

バクテリオロドプシン薄膜を用いた
バイオメテックセンシング

高度好塩菌から 視覚機能をつくり出す

未来 ICT 研究所は、新たにナノ・バイオ融合領域を立ち上げました。生物のセンシング機能をナノテクノロジーで再現するという大望のもと、視覚機能を有するバイオメテックセンシングは重要なコア技術です。ICT での活用が期待されるロボットの眼への応用を目指して、バクテリオロドプシンを使った新たな視覚機能を研究開発しているナノ ICT 研究室の笠井主任研究員を訪ねました。



Q：バクテリオロドプシンとはどんなものですか。

笠井：アフリカ・セネガルのレトバ湖に生息している高度好塩菌が光エネルギー変換のために使っている紫色の物質です。動物の視細胞にあり視神経に信号を伝える役目をもつロドプシンという物質によく似ているため、バクテリオロドプシン(bR)と呼ばれています(図1)。



図1 精製したバクテリオロドプシン

ナノICT研究室
主任研究員

笠井 克幸

Kasai Katsuyuki

博士(工学)

略歴

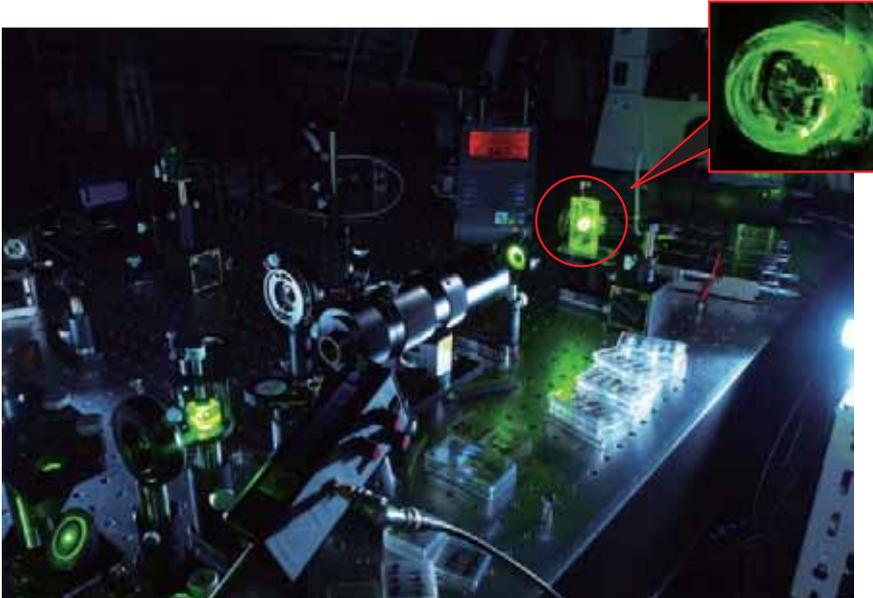
1984年、大学院修士課程修了後、郵政省電波研究所(現NICT)入所。鹿島支所衛星管制課第4管制係勤務を経て、1991年より関西先端研究センター(現未来ICT研究所)に勤務、現在に至る。その間、1988～89年宇宙開発事業団客員開発部員、1994～96年フランスLaboratoire Kastler Brossel, ENS et UPMC客員研究員。2002年レーザー学会業績賞・論文受賞。

研究分野

バイオエレクトロニクス、非線形光学、レーザー制御、量子光学

近況

某コーヒー博物館にて、コーヒー博士に認定されました。次はコーヒーマイスターにチャレンジできればと思います。朝はやっぱり缶コーヒーですよ。



bRのセンサはレーザー光の検出にも使える。その実験の様子。

bRには、光が当たるとプロトン(H⁺イオン)を菌の体外にはき出し、光が消えるとプロトンを吸い込む「プロトンポンプ」という機能があります。つまり、光が当たると電流が流れ、消えると逆向きに流れるのです。ヒトの網膜にあるロドプシンにも同じ機能がありますが、ヒトのロドプシンは一度光に当たると分解してしまい、元に戻るのに時間がかかります。しかし、bRは分解せずに光化学反応サイクルが回って再生するため、実用的にもより使いやすい物質と言えます。

高度好塩菌から精製したbR溶液は、電流を通すガラス(ITOガラス)の上で薄膜にすると、光を検知して電流を発生させるセンサになります(図2)。薄膜をつくるには、ディップコート法という、bR溶液からITOガラスを引き上げるときの表面張力によって薄膜にす

る方法を使っています。ディップコート法は、引き上げる速さによって自由に厚さが調整でき、bRの分子も一定程度整列させることができます(図3)。

Q : bRのセンサはどのようなことに利用できるのですか。

笠井: 私はbRがロボットの眼に応用できると期待しています。ロボットは30年後には一家に1台設置されるほど普及する可能性があります。今から30年前、パソコンがこれほどまでに家庭に普及するとは思いませんでしたから、十分あり得る話だと思います。

特に、日本は高齢化が進み、介護に大きな負担がかかるでしょう。高度な人工知能を搭載した介護ロボットが登場するにはまだまだ時間がかかると思いますが、ICTを使ってリモートコントロールで介護をしたり、ふだんの生

活を見守ったりすることは現実味を帯びてきています。リモートコントロール時にも、ロボット自身が自分で判断して目の前の障害物や危険を避ける必要があります。それには、視覚の情報をもとにした自律型の瞬時の運動制御が必要なので、視覚-運動制御機能をもつセンシングシステムはとても重要なコア技術になるはずで

Q : bRは視覚センサとしてどのようなところが優れているのですか。

笠井: bRを利用した視覚センサは、エッジ(輪郭)やコントラストの変化の検出が得意です。これまで主に使われてきた視覚センサとしてCCDやCMOSのイメージセンサがありますが、それらは検出したイメージを平面の1枚絵としてしか認識できないため制御に用いる演算処理を必要とし、すでにあるロボットでは階段の縁を認識するための処理がうまくできずに上り下りにも苦労しています。その点、bRのセンサならば、エッジやコントラストの変化を瞬時に見つけ出し、凹凸でつまずくことはありません。このように、光の信号を捉えて画像化する機能だけでなく、視覚の情報をもとに行動や運動を制御することも、視覚の重要な機能なのです。

例えば、昆虫は外の世界をきわめて

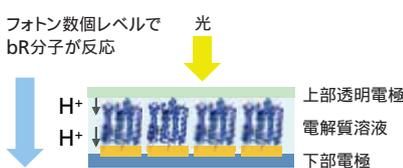


図2 bRを利用した視覚機能センサの概念図



引き上げ中のITO膜付きガラス基板

図3 ディップコート法。ゆっくり引き上げるほど薄い膜になる。(紫色はbR溶液)

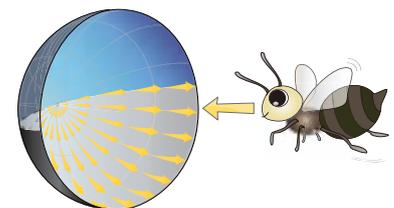


図4 地平線へ向かって飛んでいる昆虫が見ているオプティカルフロー

粗い像でしか見ていないのですが、オプティカルフローと呼ばれる像の流れのパターンを検出して即座に運動を制御しています。ハエが俊敏にハエタタキを避けられるのも、このオプティカルフローを利用しているからなのです。実際に、欧米では無人航空機や月着陸船の研究開発においてオプティカルフローを利用して低空飛行のときに障害物を避ける技術に応用しようとしています。それには超高性能なイメージセンサと高速のコンピュータを使って演算させていますが、それを使ってもなお演算に時間がかかり消費電力も非常にかかってしまう上に、ある程度の搭載スペースを必要とするそうです。

また、オプティカルフローを検出できる視覚機能センサは、それ1つでいくつかのセンサをまかなえる可能性を秘めています。現在、自律移動型のロボットは、画像化のためにイメージセンサを、奥行きなどの情報を集めるためにレーダーを、角度や角速度を検出するためにジャイロ스코プをそれぞれ運動制御のために積んでいます。しかし、昆虫はこれらの器官をもっていないのに、オプティカルフローによって行動や運動の制御をしています(図4)。

私はbRにもオプティカルフローを検出する能力があると考えています。これができるようになれば、低コストで自律移動型ロボットの運動制御のための視覚機能センシングシステムを提供できるようになります。さらに、搭載スペースを必要とする高速のコンピュータも必要ありませんし、そのうえ、センサ自体は電源を必要としないので、一家に1台置けるようなバッテ

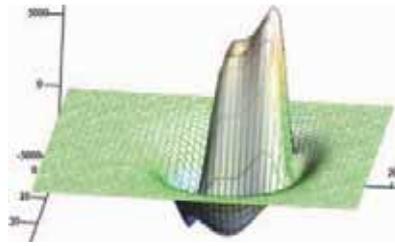


図5 bRを利用した新たな視覚機能をもつセンサで右へ移動するオブジェクトを見たときのシミュレーション。進行方向が強調され、移動方向が瞬時に認識できる。(Simulation by Prof. Aida and Dr. Katagiri)

リー駆動の介護用ロボットには最適な低コストの視覚・運動制御システムの構築が期待できるのです。

bRには、もう1つバイオ材料として優れたところがあります。それは廃棄しても地球環境に悪影響を及ぼさない点です。これからの産業は廃棄のことも考え、環境に負荷を与えるものであってはならないと思います。bRのみならず、バイオ材料ならば持続可能な開発が期待できます。

Q：これまでの研究でどれだけの性能が実現されていますか。

笠井：人間の眼と同じような構造のものをbRでつくれば、人間の眼と同じような応答ができるのではないかと考えました。

人間の網膜は興奮領域と抑制領域に分かれており、これらをうまく使うことによってコントラストの変化やエッジを検出しています。これをヒントに、bR薄膜を興奮領域と抑制領域に分け、それぞれ光が当たったときに逆の方向に電流が流れるようにしました。このセルの上でエッジを動かしたとき、抑制領域ではマイナスの電流が流れ、興奮領域に入るとプラスのほうにシフトすることを確かめました。このセルは人間の視覚の細胞に相当するため、適切に配置することによって人間の眼に近いものがつくれます。現在、アレ

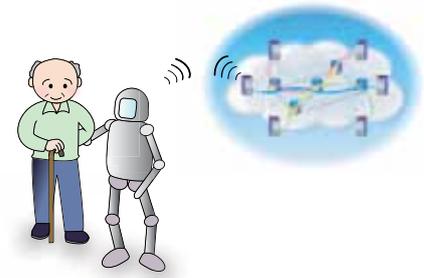


図6 ICTを用いた介護ロボットによる安心な老後生活

型の作製に向けて実験を繰り返しています。

さらにこのセルに使うbRとして、特性の違うものを組み合わせることによって、演算処理をしなくても物体の移動方向の先端が強調されて検出できることが、シミュレーションからわかってきました(図5)。この新たな視覚機能を実用化できれば、介護ロボットの眼として、信号制御に直接利用できるようになると思います。

Q：これからのバイオセンシング技術の展望についてお聞かせ下さい。

笠井：日本のロボット技術はかなり優れているので、ロボット技術とバイオセンシング技術、ICT技術を組み合わせさせて産官学で連携していければと思っています。

例えば、パソコンをインターネットにつなぐとき、標準化された規格があります。同様に、ロボットを各家庭からインターネットにつなごうとすると、ロボットICTの標準化技術が必要になってくると思います。こういう場面では、国の政策が必要になってくる部分もあるので、NICTが関わっていく必要性はとても大きいと考えています。バイオメトリックセンシング技術でICTを用いた介護ロボットが各家庭に普及して、安心な老後生活が迎えらることを期待しています(図6)。

TOPICS

フォトニックデバイスラボ成果報告会開催

2012年2月9日、10日の2日間、NICT小金井本所にて未来ICT研究所と光ネットワーク研究所を中心にフォトニックデバイスラボ（PDL）を活用した共同研究等成果の報告会を開催しました。外部利用者、内部利用者、外部アドバイザーなど約100名の参加者がありました。会場ではポスターや実機など27件の成果が報告され、外部アドバイザーからは「総じて優れた研究成果を得ていると認められる」との講評をいただきました。



左上：左から、NICT 光通信基盤技術研究室 川西哲也 室長、元・NICT 上席研究員 板部敏和氏、東京工業大学 井筒雅之 特任教授、(独)宇宙航空研究開発機構 片山晴善 開発員(説明中)
 右上：東京工業大学 小山二三夫 教授
 左：会場の様子

フォトニックデバイスラボ (PDL) は、広く産学官の皆様方と連携して、次世代、次々世代の情報通信システム実現の鍵となる、新しいタンジブル光技術の研究開発に挑戦していくための、これまでにない、開かれた研究拠点に育てたいと考えております。施設・設備の維持管理を確実にし、内外の研究者の皆様が思う存分活用できるよう、準備を進めています。また、広く共同研究のご提案を募っております。

共同研究の提案募集のご案内ページ
http://pdl.nict.go.jp/joint_research.html

報道発表「“酸化ガリウム(Ga₂O₃)トランジスタ”を世界で初めて実現！」



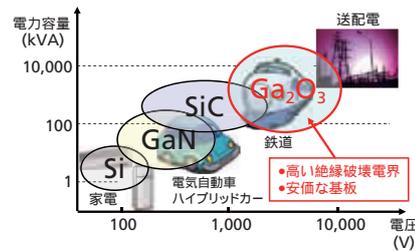
東脇正高主任研究員

2012年1月5日、超高周波 ICT 研究室の東脇正高 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 (Ga₂O₃) 単結晶基板を用いたトランジスタを開発し、その世界初の動作実証に成功したことを報道発表しました。

今回、新ワイドギャップ半導体材料である「酸化ガリウム (Ga₂O₃)」を用いたトランジスタの開発に成功したことにより、今後、優れた物性を生かした Ga₂O₃ デバイスに関する研究開発が世界的に広がると予想されます。高性能 Ga₂O₃ パワーデバイス、グローバルな課題である省エネ問題に対して直接貢献するとともに、日本発の新たな半導体産業の創出という経済面での貢献も併せて期待されます。近い将来、送配電、鉄道といった高耐圧から、電気、ハイブリッド自動車応用などの中耐圧、さらにはエアコン、冷蔵庫といった家電機器などの

低耐圧分野も含めた、非常に幅広い領域での応用が見込まれます。

この研究成果は、米国物理学会誌『Applied Physics Letters』にて2012年1月4日オンライン公開されました。また、2012年1月6日日経産業新聞(10面)ほか7紙(うち3紙は1面)に掲載されたほか、2012年1月19日日経産業新聞では現在活躍する研究者を取り上げるコラム『先端人』にて、本人とその研究について紹介されました。



近未来における各種半導体トランジスタの住み分け

受賞報告



受賞者：春野 雅彦
 脳情報通信研究室 主任研究員
 受賞名：日本神経回路学会論文賞
 授与団体：日本神経回路学会



受賞者：王 鎮 主管研究員(中央)
 三木 茂人 ナノ ICT 研究室 主任研究員 (左)
 藤原 幹生 量子 ICT 研究室 主任研究員 (右)
 受賞名：第3回応用物理学会超伝導分科会論文賞
 授与団体：公益社団法人 応用物理学会超伝導分科会



受賞者：山下 太郎
 ナノ ICT 研究室 研究員
 受賞名：第31回応用物理学会 講演奨励賞
 授与団体：公益社団法人 応用物理学会

第 11 回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議「nano tech 2012」出展報告

未来 ICT 研究所は、2012 年 2 月 15(水)～ 17 日(金)に東京ビッグサイトで開催された世界最大級の先端技術展である「nano tech 2012」(来場者数は約 45,000 人)に出展しました。

未来 ICT 研究所のナノ ICT 研究室有機ナノデバイス研究グループを中心に、未来の光通信に資する有機電気光学デバイスの作製から実証へ至る最新の研究紹介、また、脳・バイオテクノロジー分野からは、情報通信への利用に関する研究を紹介しました。

開催初日には、「ナノ・バイオ ICT シンポジウム～バイオに学ぶ未来 ICT 型センシングテクノロジー～」を未来 ICT 研究所の主催で開催し、企業のマネージャーや研究者、大学関係者を中心に 62 名の参加がありました。本シンポジウムでは、生物が持つインテリジェントなセンシング機能やこれらを利用したセンシングデバイスに注目し、最前線で活躍する研究者から現在の技術トレンド



展示ブースの様子



ナノ・バイオ ICT シンポジウムの様子

についてご講演いただき、来るべき未来型 ICT 社会に向けての技術革新について議論しました。

本シンポジウムの開催によって、NICT が目指す未来型 ICT センシングの概念や当該研究領域における NICT のビジョンやプレゼンスを示すことができたものと考えます。

第 4 回サイエンスフェア in 兵庫出展報告

2012 年 2 月 5 日、神戸国際展示場において、第 4 回サイエンスフェア in 兵庫が開催され、当研究所も出展しました。本発表会は、高校を対象として、プレゼンテーション能力の育成や、生徒・教員の交流を通じた研究活動の拡大・充実を目的として開催されました。

熱心にブースを回る高校生の姿から、彼らの科学への関心の高さをうかがい知ることができました。このような貴重な機会を利用して、当研究所の活動や先端の科学技術について紹介することは、将来を担う人材の育成という観点からも、重要な社会貢献につながると確信しました。

報道発表「繰り返し運動の上達には、“時々”目を使うのがコツ！」



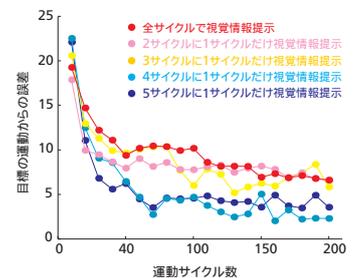
池上剛専門調査員

2012 年 1 月 17 日脳情報通信研究室 池上剛専門調査員らは、視覚的情報に基づいてリズムカルな反復運動(周期運動)を学習する場合、運動の視覚的情報を常に与えられるよりも、数往復に 1 回だけ与えられる方が、むしろ学習の到達度(上手さ)が向上することを報道発表しました。これは、東京大学大学院 教育学研究科および株式会社 国際電気通信基礎技術研究所(ATR)との共同研究の成果です。今回の成果は、スポーツの練習法やリハビリテーション手法に対して実践的な示唆を与えます。

この成果は、米国神経科学学会誌『The Journal of Neuro-

science (ニューロサイエンス)』2012 年 1 月 11 日号に掲載されました。

また、この報道発表の内容は、2012 年 1 月 24 日の日経産業新聞(10 面)ほか 3 紙に掲載されました。



様々な視覚フィードバック条件下における学習成績

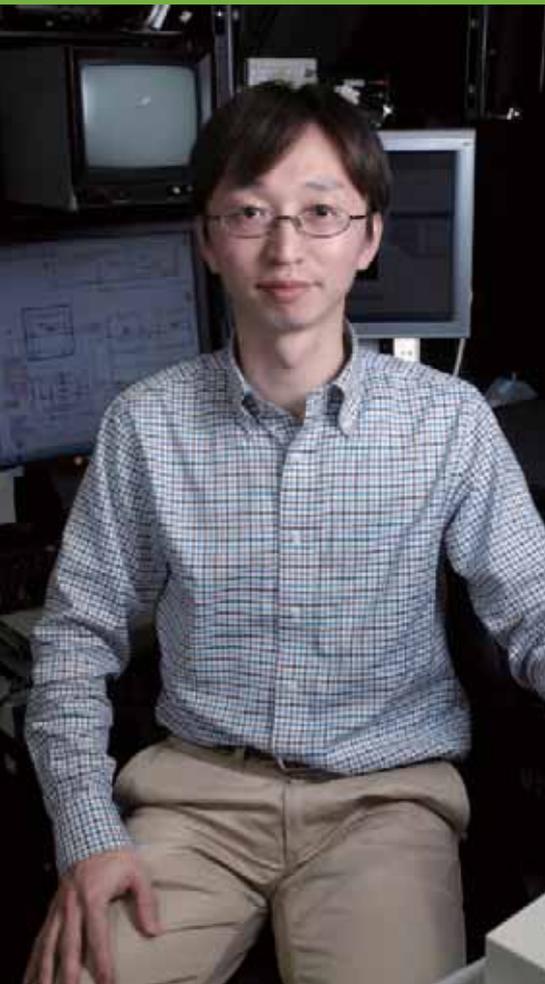
第 57 回前島密賞受賞

第 57 回前島密賞の贈呈式が、2012 年 3 月 16 日メルパルク東京において挙行され、未来 ICT 研究所から、佐々木雅英 量子 ICT 研究室長 および 藤原幹生 同主任研究員が共同受賞しました。前島密賞(昨年度までの前島賞から改称)は、財団法人通信協会が主催し、通信事業の創始者、前島密の功績を記念し、昭和 30 年度以来毎年、通信事業の進歩発展に著しく寄与した者に贈呈されます。

佐々木雅英 室長と 藤原幹生 主任研究員は、従来限界を超える低電力・大容量の量子通信の新原理(量子符号化利得と量子重ね合わせ制御)とその実現法を發明し、実験チームを率いて世界に先駆けて実証しました。さらに、高速でかつ完全秘匿性を持った量子暗号ネットワークの基本設計を行い、国際的な産学官連携プロジェクトを組織して、試験運用システム「東京 QKD Network」を構築し、完全秘匿動画伝送を世界で初めて実現し、革新的な量子情報通信ネットワークの姿を社会に示したことが評価されました。



表彰を受ける佐々木雅英室長(右)と藤原幹生主任研究員(左)



バイオICT研究室
研究員

古田 健也

Furuta Ken'ya

博士(学術)

学歴

2008年 東京大学大学院総合文化研究科博士課程修了

職歴

2008年 東京大学大学院総合文化研究科日本学術振興会 特別研究員PD
2009年 現職

近況

ギターやオーディオいじりが好きだったのですが、子供が生まれてからはほとんど触っていません。子供が成長して、一緒にギターを弾いたりアンプやスピーカーを作ったりする日が来るのを心待ちにしています。

分子モーターの研究から 生物の柔軟な 情報処理の仕組みを探る

研究の背景

人類がこれまで行ってきた情報通信は、ノイズに負けないように大きなエネルギーを投入して信号を送り、受け取る側が一定の閾値以上の信号を情報として受け取る、という単純なものでした。しかし、資源が有限であることが叫ばれている現代では、手遅れになる前に効率の良い新たな情報通信の仕組みを研究しておく必要があります。

生物が驚異的に小さいエネルギー消費量で情報通信・処理を行っていることはよく知られていますが、生物はそれだけにとどまらず、自己組織化、自己複製、柔軟性といった、人工機械がいまだに実現できていない高度な情報処理を、当然のように日々行って世代を重ねています。このような機能がどのような仕組みでなされているのかを理解し応用できれば、人類の発展にとって大きなブレイクスルーになるはずです。では、これらの仕組みを理解するにはどのようにアプローチしたらよいのでしょうか？

階層構造と研究対象

生物システムはいくつかの階層に分けて考えることができます(図

1)。どの階層も本質的には同様の原理で動作していると予想されます(フラクタル性)。つまり、仕組みを理解するには、どの階層について調べても同じと言えますが、実験的にアプローチしやすいのは下の方の階層です。なぜなら、実験科学にとって初期条件を決めることは必須の要件だからです。実際に、細胞から個体へと階層を登っていくにつれて、

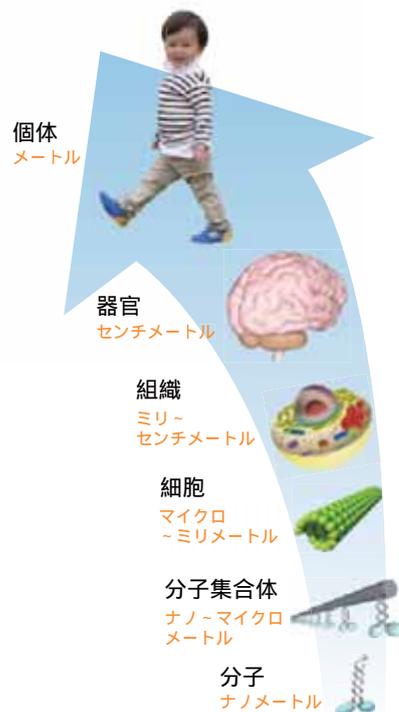


図1 生物の階層構造

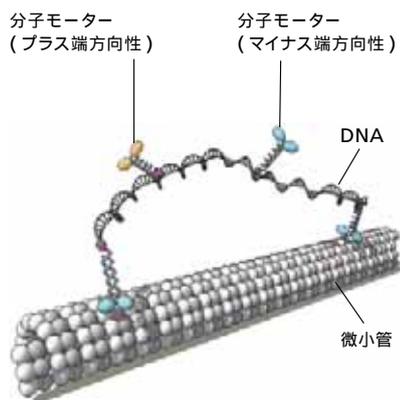
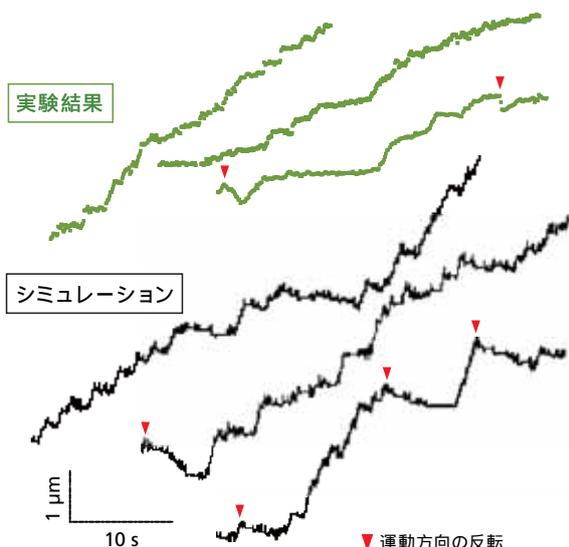


図2 分子モーターによる両方向輸送システム



(左)再構成された両方向輸送システムの模式図。2つの異なる方向性の分子モーターが微小管との結合・運動・解離を繰り返し、確率的に両方向に運動する。(右)微小管上での自発的な運動の軌跡を記録した実験結果(緑)とシミュレーション結果(黒)の例。軌跡の横方向は時間、縦方向は微小管の位置を表す。両者ともに確率的な運動方向の反転が見られる。

初期条件の統一が現実問題として難しくなっていきます。

そこで私は、生物を構成する機械の一番小さな単位と言えるタンパク質分子と、これが複数集まった時の振る舞いという2つの階層に絞って、ボトムアップ的なアプローチで研究を進めることにしました。この2つの階層間の関係を理解することが、システム全体の設計原理の解明につながると考えたからです。ここでは、「分子が複数集まった時の振る舞い」を研究する意義と方法について概説します。

細胞内の情報伝達

私は、生体分子機械の中でも分子モーターと呼ばれる機械に注目しています。分子モーターは細胞内に数多く存在し、細胞内の情報物質や建築材を常に必要な場所に輸送しており、細胞内の非平衡性を保つ(生きる)ために欠くことのできない存在です。これらは細胞内の高速道路のような構造物(微小管)に沿って動く言えば自動車のような分子で、道路の上り方向と下り方向に輸送する分子がそれぞれ別々に存在します。

奇妙なことに、細胞内では、人間が採用している方法とは異なり、上り方向と下り方向に向かう異なる種類の車が1個の荷物に混在して結合し、これが道路の上を頻繁に行ったり来たりしながら目的地に到着するという、一見、非常に非効率的な輸送方法をとっています。細胞がこのような不思議な輸送方法を採用しているのはなぜでしょうか？

生体分子機械が集まった時の機能を理解する

答えはまだ得られていません。答えの1つとして、輸送方向を常に反転させることで誤配送を訂正するという機構が考えられます。

しかしそれだけではなく、このような積極的なゆらぎは、相対的に大きなノイズに対して頑強な、自律分散型の新しい情報処理系の特徴を表している可能性もあります。この考え方は、生物が実際に結果を出していることから大きな説得力を持っています。

近年発達してきた1分子計測技術によって、生体分子の機械としての側面が明らかになってきました。し

かし、実際にはこれらは集合体として働いているので、これを実験的に再構成する研究がいま世界各地で始まっています。生体分子が集まった状況では、生体分子が持つ相互作用の非線形性によって分子間に強い協同性が現れ、各分子の足し算で考えられる以上の質的な飛躍を伴うケースがしばしば観察されてきました。これを理解するにはナノメートルレベルの精密さで集合体を再構成する必要があります。

小さな生体分子には、初期条件を合わせて実験できるというメリットがある反面、その小ささからくる技術的な難しさというデメリットもあります。私は最近、DNAナノ構造体を用いた自己組織化によってこの問題を解決し、決まった数の分子モーターによる両方向輸送をガラス基板上で再構成することに世界で初めて成功しました(図2)。

今後、この集合体を、様々な形状を持ったネットワーク回路の上で走らせることによって、積極的なゆらぎの意味を理解し、生物が採用している柔軟な情報処理機構の設計原理に迫りたいと考えています。



ナノICT研究室
技術員

春山 喜洋

Haruyama Yoshihiro

修士(工学)

学歴

2009年3月 大阪市立大学大学院工学研究科
前期博士課程化学生物系専攻修了
2011年4月 大阪市立大学大学院工学研究科
社会人後期博士課程化学生物系専攻

職歴

2009年4月 株式会社ハイテック入社
2009年6月 独立行政法人情報通信研究機構在

近況

週1日程度ですが職場の皆さんと楽しみながらフットサルをしています。気分転換にもなりますし、いろんなグループの方ともコミュニケーションが取れるので、仕事上でも非常に役に立っています。しみじみとスポーツっていいなと思う今日この頃です。

ナノ・バイオ融合領域での 生体分子ICTデバイスを目指して

研究の背景

昨今のエネルギー・環境・資源にかかわる問題の解決策として、光を高効率に利用する技術の開発が進められています。一方、生体内では人工的にはとても到達できない高い量子収率で光変換が行われていることが知られています。そこで近年、生体内で分子認識や感光機能を持つ生体分子をバイオ素子として利用して、スイッチングやセンシングに応用する動きが出てきました。バイオ素子は、自己組織化や自己修復性など他にはない優れた機能を備えており、またレアメタルやレアアースといった希少資源を使わずに汎用資源だけで構成できるので、環境への負荷を抑制することもできます。

このバイオ素子の機能を直接利用するかあるいは模倣することで、従来の人工デバイスとは異なる新奇な性能や機能を持つナノバイオデバイスを創出できる可能性があります。私は、ナノテクノロジー分野ならびにバイオテクノロジー分野の技術を駆使し、バイオ素子を用いた高効率かつ革新的なデバイスの構築に貢献できるよう研究を進めています。

バクテリオロドプシン (bR) とは?

微生物や植物などの生体内にはいろいろな種類のエネルギー

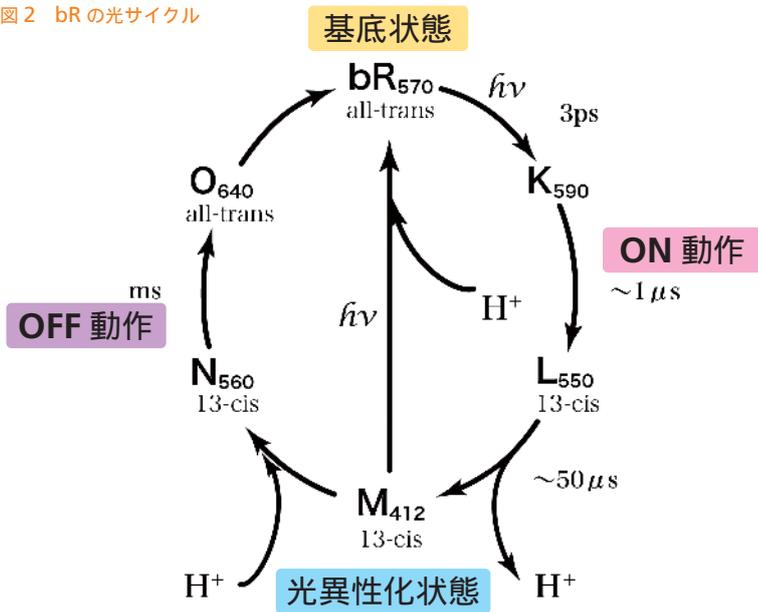
輸送系があります。その中の1つに光エネルギーを利用して生体膜の内外にプロトン(H⁺)濃度勾配をつくり出すバクテリオロドプシン (bacteriorhodopsin: bR) という物質があります。バクテリオロドプシンは古細菌(Archae)に属する高度好塩菌 *Halobacterium salinarum* 由来の膜タンパク質で、bR1分子を単量体とし三量体(図1)を単位とした六方晶系の二次元結晶として膜中に存在しています。

光は、bRに結合したレチナールという色素によって受容されます。bRという名称は、生物の網膜にある視物質ロドプシンと立体構造ならびに光反応の初期過程が似ていることに由来しています。bRに光が照射されると、bR中のレチナール分子が光を吸収し *all-trans* 型から *cis* 型へと構造変化します(図2)。これがレチナールの周辺を取り囲むタンパク質の構造変化を引き起こ



図1 バクテリオロドプシン (bR)

図2 bRの光サイクル



し、5つの反応中間状態 (K、L、M、N およびO) を経て光照射前の状態に戻ります。この光サイクルで1つの水素イオン (H^+) が細胞質側から細胞外側へと一方向に輸送されます。またbRはとても丈夫なタンパク質であり、一度光を当てても分解せずに光サイクルによって元の状態に容易に戻せるので、光に対する応答性の変化を利用したデバイスの素子としても注目されています。

ナノバイオデバイスへの応用

bRを電極に固定し電解質溶液を

封入した電気化学セルに光を照射すると、ON/OFFの光量に変化があったときのみ応答して、プロトン (H^+) 輸送による光電流が発生します (図3)。私は、この現象をスイッチング・センシングデバイスに応用する研究を進めています。発生した光電流というのは電源なしで使えるため環境にやさしい動画検出センサーとして応用できるし、さらにはロボティクスの分野ではロボットに搭載するセンサー「ロボットビジョン」への適用なども実現可能です。

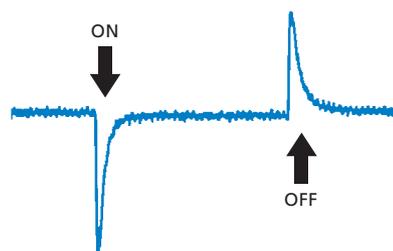


図3 バクテリオロドプシンの光応答

そこで私は、ナノテクノロジー分野においては、微細化パターンニング技術および配向制御などの基盤技術の研究も進めています (図4)。またバイオテクノロジー分野では遺伝子操作によって異なる特性を持つbRを創製し、既存のものと組み合わせることによって新しい電子的・光学的機能を持つ素子の構築を進めています。これらのナノとバイオの融合領域は、ナノバイオデバイスの高性能化・高感度化につながるだけでなく、今後の光センサー、光メモリーをはじめとする新奇デバイスへの応用に向けて、非常に重要な研究分野になると考えられています。

今後の研究展開

バイオ素子は、高い環境順応性を持つ極低消費エネルギーの分子機械として、バイオテクノロジー分野のみならず様々な分野において注目されています。私は、この研究が私たちの社会・ライフスタイルをより安心・安全・快適なものに変えていけるような新しい革新技术・システムの構築につながっていくものと考えています。

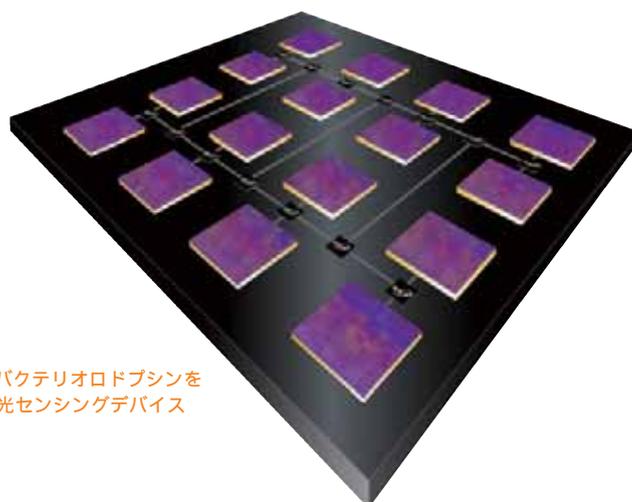


図4 バクテリオロドプシンを用いた光センシングデバイス

未来 ICT 研究所 STAFF 総覧

研究所付	大岩 和弘	研究所長	理学博士	
	轟迫 巖	副研究所長 / 室長	博士(理学)	
	王 錦	主管研究員	工学博士	
	柳田 敏雄	主管研究員	博士(工学)	
	平岡 泰	主管研究員	理学博士	
	原口 徳子	上席研究員	医学博士	
	韓 太舜	R&Dアドバイザー	博士(工学)	
	村田 勉	主任研究員	博士(薬学)	
	企画室 (神戸)	久保田 徹	室長	博士(工学)
		澤井 秀文	総括主任研究員	工学博士
		宮内 哲	総括主任研究員	医学博士
		片桐 祥雅	主任研究員	工学博士
		中尾 正史	主任研究員	工学博士
		山田 順一	専門研究員	工学博士
		江田 英雄	招聘専門員	博士(工学)
小川 誠二		招聘専門員	Ph.D.(化学)	
齋 重之		特別研究員	博士(学術)	
金釘 敏		グループリーダー		
山本 俊太郎		主任		
五十川 知子		主任		
黒田 康徳		職員		
鳥居 信夫		有期技術員	博士(医学)	
猪木 誠二		有期技術員	博士(工学)	
大山 良多	有期技術員			
高橋 恵子	有期技術員			
相田 有実	有期補助員			
企画室 (小金井)	小倉 基志	主幹		
	秋葉 誠	専門推進員	理学博士	
	広瀬 信光	専門推進員	博士(工博)	
	井口 政昭	有期技術員		
	鈴木 与志雄	有期技術員		
	ナノ ICT 研究室	大友 明	室長	Ph.D.
		寺井 弘高	研究マネージャー	博士(工学)
		田中 秀吉	研究マネージャー / 専門推進員	理学博士(物理学)
		照井 通文	主任研究員 / 専門推進員	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)
		川上 彰	主任研究員	博士(工学)
		三木 茂人	主任研究員	博士(工学)
		山田 俊樹	主任研究員	博士(工学)
		山下 太郎	研究員	博士(理学)
丘 俊		研究員	Ph.D.	
桜瀬 圭正		研究員	博士(理学)	
梶 貴博		研究員	博士(工学)	
水沼 達郎		研究員	博士(理学)	
瀧 直樹		特別研究員		
松田 真生		特別研究員	博士(理学)	
今村 三郎		有期技術員	工学博士	
青木 勲		有期技術員		
上田 里永子		有期技術員		
富成 征弘		有期技術員		
三木 秀樹		短時間技術員	薬学博士	
バイオ ICT 研究室		小嶋 寛明	室長	博士(工学)
		山田 章	主任研究員 / 専門推進員	理学博士
		丁 大橋	主任研究員	博士(理学)
		小林 昇平	主任研究員	博士(工学)
	柳原 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)	
	岩本 政明	主任研究員	博士(理学)	
	小川 英知	主任研究員	博士(バイオ工学)	
	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 健也	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)	
	Molnar Monika	特別研究員	Ph.D.(Biology)	
	吉雄 麻喜	有期技術員		
	荒神 尚子	有期技術員		
	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		
	堤 千尋	有期技術員		
	森 知栄	有期技術員		
	高村 佳美	有期補助員		
樋口 美香	有期補助員			
長瀬 有紀	有期補助員			
福田 紀子	有期補助員			

脳情報通信 研究室	梅原 広明	室長	博士(理学)
	Peper Ferdinand	主任研究員	Ph.D.
	加藤 誠	主任研究員	博士(医学)
	藤巻 剛夫	主任研究員	工学博士
	井原 綾	主任研究員	博士(保健学)
	劉 国相	主任研究員	博士(工学)
	Leibnitz Kenji	主任研究員	理学博士
	成瀬 康	主任研究員	博士(科学)
	鈴木 秀明	主任研究員	理学博士・博士(情報学)
	劉 健勳	主任研究員	工学博士・博士(情報学)
	下川 哲也	主任研究員	博士(工学)
	春野 雅彦	主任研究員	博士(工学)
	黄田 育宏	主任研究員	博士(理学)
	鈴木 隆文	主任研究員	博士(工学)
	山本 知幸	主任研究員	博士(学術)
魏 強	研究員	博士(工学)	
森戸 勇介	研究員	博士(理学)	
福崎 隆志	研究員	博士(科学)	
寺園 淳子	研究員	博士(工学)	
松本 敦	研究員	博士(心理学)	
東 高志	研究員	博士(工学)	
Hanay Yusuf Sinan	研究員	Ph.D.(Electrical and Computer Engineering)	
渡邊 吉也	研究員	博士(神経科学)	
早川 友恵	招聘専門員	博士(心理学)	
眞溪 歩	招聘専門員	博士(工学)	
足立 進	特別研究員	博士(工学)	
糸井 誠司	有期技術員		
野尻 武史	有期技術員	博士(工学)	
藤田 美由紀	有期補助員		
植田 智津子	有期補助員		
今水 寛	副室長	博士(心理学)	
内藤 栄一	研究マネージャー	博士(人間・環境学)	
杉本 徳和	研究員	博士(工学)	
水口 暢章	研究員		
Ganesh Gowrishankar	専門研究員	Ph.D.	
吉岡 利福	専門研究員		
山岸 典子	短時間専門研究員	Ph.D.	
SEYMOUR Benjamin John	特別招聘研究員	Ph.D.(Neurological Sciences)	
玄 相良	招聘専門員	博士(工学)	
池上 剛	専門調査員		
中野 直	専門調査員		
吉川 友香	専門調査員		
蔡 楠	有期補助員	博士(工学)	
Matthew Joseph de Brecht	有期補助員	博士(情報学)	
轟迫 巖	副研究所長 / 室長	博士(理学)	
笠松 喜史	研究マネージャー	博士(工学)	
関根 徳彦	主任研究員	博士(理学)	
東隆 正高	主任研究員	博士(工学)	
安田 浩朗	主任研究員	博士(工学)	
小川 洋	主任研究員	博士(工学)	
Mikhail A Patrashin	主任研究員	博士(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)	
浜崎 淳一	研究員	博士(工学)	
山下 良美	専門研究員		
松井 敬明	特別研究員		
三村 高志	特別研究員	工学博士	
遠藤 聡	特別研究員	理学博士	
佐々木 公平	特別研究員		
岸本 直	特別研究員	博士(理学)	
杉浦 洋平	短時間補助員		
量子 ICT 研究室 (小金井)	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)
	藤原 幹生	主任研究員	博士(理学)
	和久井 健太郎	研究員	博士(工学)
	Hugo Benichi	研究員	博士(工学)
	金 鋭博	研究員	博士(工学)
	玉木 潔	特別研究員	博士(理学)
	佐々木 悦郎	有期技術員	

(2012年4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 KARIC FRONT

No.23 2012年5月21日発行 発行/大岩 和弘 編集/久保田 徹



兵庫県神戸市
未来 ICT 研究所への
アクセス