

**特集 I**  
**生物の情報伝達機能を解析し  
 情報通信分野に活かす**

**特集 II**  
**生体内での分子のブラウン運動を情報通信分野に応用**

クローズアップ研究者

ネットワーク情報学とバイオインフォマティクスの交叉

劉 健勤 工学博士・博士 (情報学)

繊毛虫の特殊性を利用した細胞内の情報と  
物流を制御するシステムの研究

岩本 政明 博士 (理学)

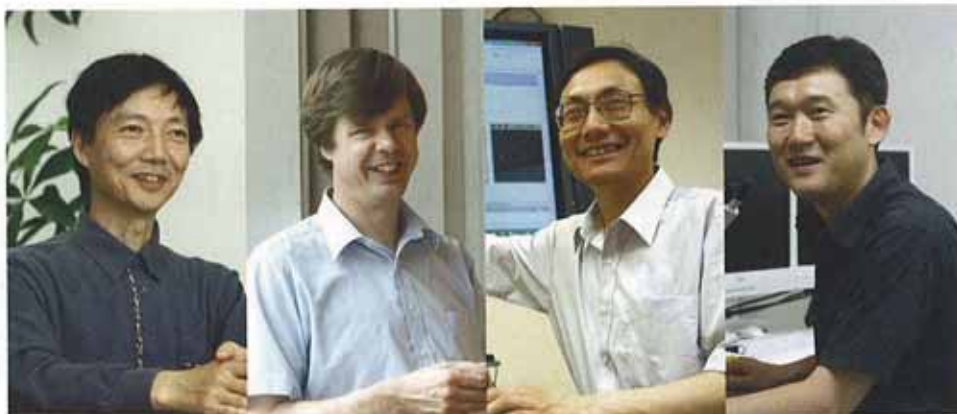


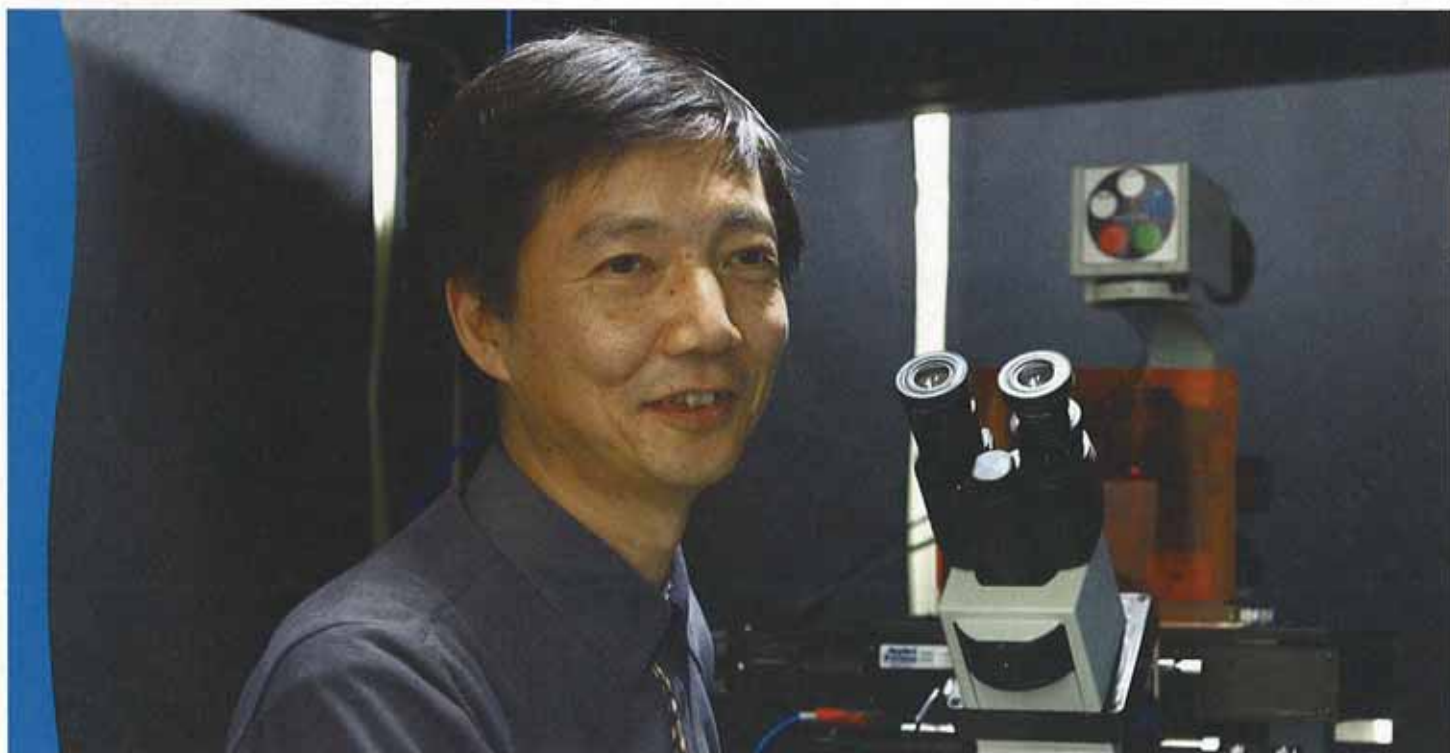
独立行政法人  
情報通信研究機構



## CONTENTS

- 特集 I \_\_\_\_\_ 3
- 生物の情報伝達機能を解析し、  
情報通信分野に活かす**
- 近重 裕次 博士 (理学)
- 特集 II \_\_\_\_\_ 6
- 生体内での分子のブラウン運動を情報  
通信分野に応用**
- ペバー・フェルディナンド 工学博士 (Ph.D)
- KARCフロント・トピックス \_\_\_\_\_ 8
- クローズアップ研究者① \_\_\_\_\_ 12
- ネットワーク情報学とバイオインフォマティクスの交叉**
- 劉 健勤 工学博士・博士 (情報学)
- クローズアップ研究者② \_\_\_\_\_ 14
- 繊毛虫の特殊性を利用した細胞内の情報と物流を制御するシステムの研究**
- 岩本 政明 博士 (理学)
- 未来 ICT 研究センター STAFF 総覧 \_\_\_\_\_ 16





## 特集 I

# 生物の情報伝達機能を解析し、情報通信分野に活かす

～染色体末端「テロメア」が「ブーケ・アレンジメント」を形成する分子機序を解明～

バイオ ICT グループの近重主任研究員は、遺伝伝達を担う染色体末端構造「テロメア」に関わる 4 種類のタンパク質を発見しました。これらのタンパク質が染色体の構造変化にもたらすメカニズムと、生物が持つ情報伝達機能と NICT の研究テーマである情報通信システムとの連関についてお聞きしました。

細胞核内での染色体の特殊な構造「ブーケ・アレンジメント」

**Q:**「染色体の構造変化に関わる新たなタンパク質を発見」と 2009 年 11 月 3 日に報道発表されました。生殖細胞での減数分裂における染色体の構造変化とはどのようなものでしょうか。

**近重:** 細胞の核内に存在する染色体は遺伝情報を担う生体物質で、子孫を残す減数分裂において一对の染色体を半数に分配し、精細胞、または卵細胞を作ります。減数分裂の際に、遺伝情報を壊さず、確実に組み換えて娘細胞（分裂した後の細胞）に伝えなければなりません。そのため染色体は特殊な構造をとります。それは染色体の末端（テロメアと呼びます）が一時的に核膜上の一点に

集合するというもので、その様子が、花束（ブーケ）のようにみえることから、染色体の「ブーケ・アレンジメント」と呼ばれているものです。

**Q:**ブーケ・アレンジメントの発見はどのような経緯でしょうか。

**近重:** 19 世紀の末に、Eisen というひとが、サンショウウオの減数分裂において、特徴的な染色体の配置を見出して、それをブーケ・アレンジメントと名づけました。私たちは、1990 年代の初め頃、分裂酵母を使って蛍光顕微鏡による染色体の可視化を試みていました。その過程で、分裂酵母の減数分裂においてもブーケアレンジメントと呼ぶべき現象を見出しました。この発見を報告した私たちの論文は、1994 年に Science 誌に掲載さ



れました。私たちの論文の出版後、ヒトや高等植物でのブーケアレンジメントの観察例が相次いで報告されて、100年近く前から知られていた現象でしたが、私たちの論文がきっかけのようになって、1990年代後半は、さながらブーケアレンジメントの再発見ブームのようになりました。このように、ブーケアレンジメントは、真核生物界全般でひろく観察される現象です。現象自体が、減数分裂における相同染色体のペアリング（父方由来の染色体と母方由来の染色体とが、ペアとなって整列すること）時期に先立って生じることから、相同染色体のペアリングに何らかの重要な役割があるのではないかと考えられていました。けれども、そのブーケアレンジメントがどのようなメカニズムで形成されるかということは、まったくわかっていませんでした。今回、私たちが発見した一連のタンパク質は、このブーケアレンジメントの形成に深く関わるものです。

#### 蛍光技術で生物の情報通信の可視化が可能に

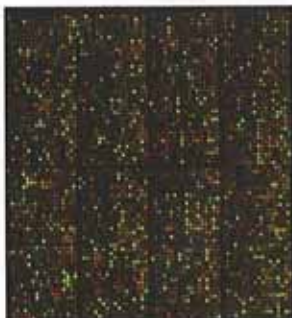
**Q: ブーケ・アレンジメントの形成に関わるタンパク質が発見されましたが、どのような方法で見つけられたのでしょうか。**

**近重:** 光学顕微鏡技術もずいぶん向上し、高度な蛍光顕微鏡である高分解能蛍光顕微鏡装置を用いて細胞の経時の変化を追っていくことができるようになりました。細胞を生かしながら観察を続けることで、細胞のなかで起こる変化を見ることができます。

細胞は、分裂酵母を使っています。遺伝的な情報と細胞内の分子の挙動とを対応させるのに必要な遺伝学的、細胞学的なツールが整っているからです。遺伝情報、すなわち、ゲノム DNA の解読もされていて、私たちがすすめてきた、生きた細胞中の特定のタンパク質や DNA のイメージング技術と組み合わせることで、さまざまな刺激に対する細胞内の遺伝子機能を可視化できるようになってきました。

#### 図1 DNA マイクロアレイ

DNA マイクロアレイによる遺伝子発現計測  
右図は、各遺伝子の RNA 量（発現量）を測定したもの。  
赤スポットは、実験区での発現が対照区よりも多い遺伝子。  
緑スポットは、実験区での発現が対照区よりも低い遺伝子。  
黄スポットは、実験区での発現が対照区と同レベルの遺伝子。  
黒スポットは、いずれの場合も、十分な発現のない遺伝子。



私たちは、ブーケ形成機構を明らかにするために、DNA マイクロアレイを使って、ブーケ形成を誘導する刺激に応じて活性化する遺伝子を同定し、各々の欠損変異体を作成して、ブーケ形成可能かどうかを調べました。このような解析から、欠損させるとブーケ形成できなくなる遺伝子を4個見出しました。それが欠損するとブーケ形成できなくなるわけですから、その遺伝子は、ブーケ形成に必要なものということになります。この4個の遺伝子をブーケ1からブーケ4と名付けました。

**Q: ブーケ1とブーケ2は2006年に、ブーケ3とブーケ4は2009年に発見されました。それぞれどのような役割を持っているのでしょうか。**

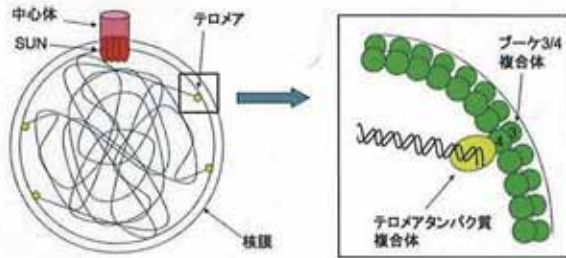
**近重:** 細胞核というものは、核膜で覆われたボールのようなもので、その表面に中心体と呼ばれる小さなこぶのようなものが1個くっついていると想像してみてください。染色体は、ボールの中に入っています。染色体という途方もなく細長い糸状の分子の末端がテロメアですが、テロメアも、従ってボールの中に入っています。ブーケアレンジメントというのは、ボールの中にばらばらに入っているテロメアが件のこぶ（中心体）のすぐ下に集められる現象です。私たちは、蛍光顕微鏡を使ったライブイメージングによって、ブーケ形成過程を詳細に観察した結果、ブーケアレンジメントは、普段は、中心体の下に存在しているある分子（SUN タンパク質と呼ばれているものの一種）がテロメアを探しにでかけて、テロメアを見つけ、中心体まで連れて戻ってくることによって形成されているという結論に到達しました。しかし、SUN は、核膜に沿ってしか移動できないのです。核というボールの中の方までは、入って行けません。従って、テロメアが SUN によって見つけられるには、テロメアが核膜に付着していなければならないこととなります。テロメアを核膜につなぎとめるのに働いているのが、私たちの見つけたブーケ3とブーケ4でした。そして、ブーケ1とブーケ2は、SUN とテロメアが出会ったときに両者を結合させる糊のような役割をしているタンパク質でした。ブーケ1からブーケ4の発見により、SUN がテロメアを集めてブーケが形成されるという一連の機序を明らかにすることができました。

**Q: 減数分裂における細胞核構造の変化を分子レベルで解明されました。このような構造になっている理由をどのよ**

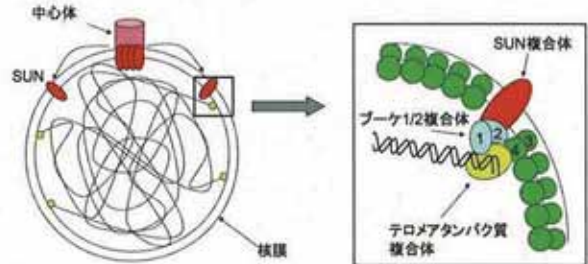


図2 テロメアとブーケ1~4

A: テロメアは、核膜タンパク質複合体ブーケ3/4を介して核膜に付着している。



B: 減数分裂へ進行すると、SUNが核膜に沿って移動しテロメアを中心体に集める。この時、ブーケ1/2複合体が出現し、SUNとテロメアを結合させる。



うに考えますか。

**近重:** 分裂酵母は、ヒトと同じ真核生物で、染色体は、大腸菌などの原核生物とは、異なり、直鎖状DNAからなります。ブーケアレンジメントは、減数分裂を行う多くの真核生物で見られます。遺伝情報を子孫へ伝える際に行われるのが減数分裂ですが、これは、父方由来と母方由来の一对の染色体(遺伝情報)を半数に減する分裂様式ですが、この際、父方と母方の染色体の間で組換えを行います。そのためには、両方の染色体DNAが整然と並んで、きちんとペアをつくる必要があるのですが、このこととブーケアレンジメントの形成が深く関わっていると考えられています。2本の糸を整然と並べようとしたら、最初に、末端を探して、そこから並べようとするよね。ブーケアレンジメントもそれと同じことやっているのではないのでしょうか。

#### 生物の情報伝達機能から学ぶ

**Q:** 近重さんは生物情報の可視化に取り組んでおられますが、研究テーマについて具体的に教えてください。

**近重:** バイオICTグループで、生物情報プロジェクトで研究しています。バイオICTの役割は生物が行っている情報通信と世の中で行われている電話やインターネットなどの情報通信との橋渡しです。これを進めるために継続して研究しているテーマが生物情報の可視化で、細胞核の中で染色体の挙動を可視化して遺伝情報の処理や伝達を調べています。

**Q:** 生物の情報伝達機能などを解析、分析してとらえるために、KARCの強みはどこにあるのでしょうか。

**近重:** 生物に学ぶ情報通信を進めていくには、生物の中で行われている情報通信というものを計測し、可視化し、数値化しなければなりません。その方法の一つはブーケ遺伝子を発見するときに使ったDNAマイクロアレイで、この計測方法を使って遺伝子情報を解析します。そして、新たな計測技術の開発も行わなければなりません。

生物情報通信の特徴は、生物の可塑性、柔軟性、省エネルギー性等があげられます。KARCでの研究は、例えば、生物の可塑性が具体的にどのような分子メカニズムで達成されているのかを解き、生物が持つ優れた特徴を取り入れた情報通信システムへの応用につなげていくことです。

私自身は、染色体の核内の配置と遺伝子の発現状態をできるだけ正確に解析していこうとしています。KARCの顕微鏡技術は優れており、単純に遺伝子発現のオン・オフという機械的な数値化だけではなく、細胞核の中の染色体の挙動という視点を忘れないで持っていることが大きな強みです。



神戸研究所 未来 ICT 研究センター  
バイオ ICT グループ 主任研究員  
**近重 裕次 博士 (理学)**

**学歴**  
1992年 京都大学大学院理学研究科博士課程修了 博士 (理学)

**職歴**  
1992年 通機総合研究所 (現 NICT) 入所  
1997年 1月より主任研究員  
2000年 1月より退職

「趣味というほどのものではありませんが、昔から、書法や占いの本を読むのが好き」と語る近重研究員。伝統的な占いは、どれもとても精密な体系から成り立っており、そうした体系の精密さにひかれるようです。



## 特集Ⅱ

# 生体内での分子のブラウン運動を情報通信分野に応用

ナノICTグループのペパー主任研究員はコンピューターの並列分散処理やパターン認識といった研究を経て、1990年ころから現在のナノ、バイオを利用した研究を進めています。ナノテクノロジーによる分子デバイスを実装し、分子の性質をアルゴリズムに取り入れる分子コンピュータのための新しいアーキテクチャー研究の現況をお聞きしました。

**Q:** 半導体デバイスは微細化することで集積度を上げてきましたが、微細化が進むたびにノイズの問題を解決しなければなりません。ところが生物はノイズを利用しているとのことですが、どのようなことでしょうか。

**ペパー:** 現状のシリコン半導体を代表するLSIのSi-MOSFETは年々進む電源電圧の低下とプロセスルールの微細化に伴ってノイズが増え、信号品質は年々劣化します。ノイズの制御もLSIのトランジスタの規模がナノスケールになると限界が生じ、近い将来、コンピュータはエラー発生率が大きくなり、精度を保証できなくなります。

ところで生物は自己の環境でノイズを効果的に利用しています。例えば、バクテリアの鞭毛は回転しながら餌の方向に進んでいく分子モーターです。バクテリアのサイズになると水や気体分子はあらゆる方向に激しい勢いで絶えず飛び回りバクテリアに衝突しています。このような粒子の動きは、マクロの世界ではノイズとされ、できる限り排除しようとするのですが、鞭毛の分子モーターは

むしろこのノイズを分子モーターの回転にうまく利用しています。雑音を排除するのではなく、効率よく利用しているのが生物です。

このように生物の持つ分子的メカニズムはナノテクノロジーにおける分子の相互作用と似ています。ナノテクノロジーによる回路を作製中、生物のシステムも分子の相互作用であることに気づき、これが利用できないかと考えました。

**Q:** 分子モーターはどのような動きをするのでしょうか。

**ペパー:** 分子モーターの動きをブラウン運動といいます。ブラウン運動とは非常に微小な粒子が乱数的に動くことをいいます。イギリスの植物学者ロバート・ブラウンが、植物の受粉の研究から発見した粒子の運動のことです。

**Q:** コンピュータのアルゴリズムなどを表す数理モデルの一つであるセル・オートマトンにブラウン運動を実装され、どのような効率の良さが表れたのでしょうか。



ペパー:乱数的な動きで、予測のできないランダムな動き、偏差を「ゆらぎ」といいます。ブラウン運動を分子デバイスモデルや回路モデルに展開し、ノイズおよびゆらぎというランダム性が情報・通信システムに有効であることが分かりました。

セル・オートマトンにブラウン運動回路を実装することを学会で提唱しました。セル・オートマトンとは有限次元の格子と単純な規則からなる計算モデルで、対象となる空間を等間隔に区切り、各格子内でとりうる状態を離散量として定義すると、時間を更新したときに対象全体がどのように変化するかを見ることができます。生物学的な動きの導入に大きな反響があり、このときに発表した学会「Automata 2008:EPSRC Workshop on Cellular Automaton Theory」でこのときに発表した論文が2008年のベストペーパーに選ばれました。

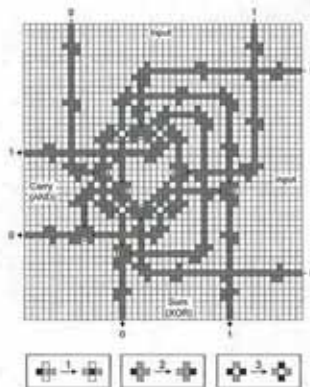


図1 半加算器のブラウンセルオートマトンにおける局所形状  
(1) (2) (3) の選移ルールによって2つのビットが加算される。加算の動作が計算の基本になる。

Q:計測自動制御学会学会誌「計測と制御」2010年4月号に「ナノコンピュータ用のブラウン回路」を寄稿されました。ブラウン回路とはブラウン運動を利用する回路でしょうか。

ペパー:分子デバイスを使った分子コンピュータは、分子の性質をアルゴリズムに取り入れることで、一つのプロセッサで複数の計算処理を可能にし、さらにコンピュータ自体も非常に小さく安価にできる可能性を秘めています。ナノスケールの分子や原子などの粒子はブラウン運動による乱数的な動きは粒子が多様な動作をします。ノイズやゆらぎというランダム性はコンピュータと通信システムのアーキテクチャーを構築するでしょう。この論文では状態空間におけるランダム探索が活用しうる原



神戸研究所 未来 ICT 研究センター  
ナノ ICT グループ 主任研究員

ペパー・フェルディナンド  
工学博士 (Ph.D)

学歴  
1989年 デルフト工科大学大学院 理学コン  
ピュータサイエンス博士課程修了

職歴  
1990年 STA フェロー  
1993年 通信総合研究所 (現 NICT) 入所  
研究員、主任研究員 (現職)  
1997年 カリフォルニア大学サンフラン  
シスコ校 Keck Center for Integrative  
Neuroscience 客員ポスドク (1年間)  
1999年 兵庫県立大学 (元姫路工業大学) 大  
学院工学研究科 教員教授 (現職)  
2005年 広島大学大学院工学研究科 非常勤  
講師 (2年間)

休日には、子ども達と一緒に過ごせる時間を見つけて、水泳の練習や2人用のピアノを弾いたりして過ごすとペパーさん。ロボットを作成することも楽しみの一つだそうです。

理とトークンベース回路を使ってデッドロック解決のためにランダムな探索行動を利用する原理について議論しました。

Q:生物から非常に効率のいい活動を学びましたが、次はどのような分野を研究されるのでしょうか。

ペパー:脳はコンピュータと比較すると計算は遅いですが複雑な画像でもパターン認識は速い。脳は140億個の神経細胞が50兆個の結合を持っています。しかし脳の消費エネルギーはわずか1ワットで、これではノイズを遮断することはできません。遮断ではなく、ノイズやゆらぎを利用してうまく制御しているのではないかと考えられています。

脳における情報符号化、特に神経細胞の発火が同期化するかしらないか、それによるどの情報があるのかについての研究を行っています。脳は雑音があっても、非常に高効率な動作ができ、この動作の原則を理解して、その原則に基づいて、さらに高効率情報処理と通信のアルゴリズムを開発したいと思います。



図2 乱数的な動きを持つブラウン回路  
ロジック空間である回路において、ブラウン運動による乱数的な探索によって、入力から出力までの計算の道が見つけれれる。



# KARC フロント・トピックス

## ▶ 施設一般公開 2010 開催報告 ～情報通信の未来を体感しよう～

神戸研究所 未来 ICT 研究センターでは平成 22 年度施設一般公開を 7 月 24 日(土)に開催しました。当日は晴天に恵まれ、695 名の方にご来場いただきました。訪れた来場者は、当日催したクイズラリーへの参加や、各プロジェクトが工夫した体験型の展示に参加されるなど、当センターの施設・研究を十分に楽しまれた様子でした。また、当センターの研究員による一般向けの講演会も催し、午前・午後共に多数のご参加をいただきました。会場では幅広い年齢層の参加者が熱心に聞き入り、積極的に質問する場面も見られました。

当日行ったアンケートの結果では、施設一般公開に初めて来場された方が半数を占めるなど、科学技術への関心が高まっていることがうかがえました。

本年の施設一般公開も、猛暑の中、事故やトラブルなく無事に終了することができました。

### ● KARC クイズラリー 2010

各ブースからクイズを出題。難問でした!!



### ● 各プロジェクトブース

各プロジェクトが工夫した体験型の展示がいっぱい!!



超伝導を知る実験コーナー



「MY 顕微鏡」のコーナー



バラボラに熱を置く実験コーナー



「脳波の測定」体験コーナー



ブロッコリーの DNA 取り出し実験コーナー



分子を使った「ナノテクノロジー」の展示コーナー

### ● KARC 研究講演会

当センター 3 つの分野の研究員が最新の情報科学について分かりやすくレクチャーする講演会を開催。



「つながることの不思議」



「ナノメートルの世界への招待」



「人の心はどこまで見えるのか」



近畿情報通信局からも出展していただきました。



## KARC フロント・トピックス

## ▶ 世界最高性能マルチチャンネル超伝導 単一光子検出システムを開発

～トータル性能として半導体 APD を 100 倍凌駕～

ナノ ICT グループ 王鎮グループリーダーの研究成果が、7月27日報道発表されました。

量子情報通信技術を支えるコア技術として、高検出効率のマルチチャンネル超伝導単一光子検出器 (SSPD) システム (図 1) の開発に成功し、1550 nm 通信波長帯において、市販されている半導体アバランシェ・フォトダイオード (APD) の性能を遙かに凌駕する世界最高性能 (検出効率 20%、動作速度 100 MHz、暗計数率 100 Hz) を達成しました。

また、開発したシステムは、最大 6 チャンネルを搭載すると共に、100 V の家庭用電源で駆動可能な小型冷凍機により構成され、小型化と低消費電力性の実現によって、実用化に向けて大きく前進しました。



図1 マルチチャンネル超伝導単一光子検出システム (SSPD)、光ファイバを実装した検出器パッケージ、超伝導ナノワイヤ検出素子

### ● 今回の成果

今回開発したマルチチャンネル超伝導単一光子検出システムは、2年前の NICT 開発のシステムに比べて検出効率が 7 倍、動作速度が 2 倍に向上しました。また、トータル性能として半導体 APD を 100 倍凌駕しました (表 1)。

1. 検出効率の向上: 積層薄膜により構成された光キャビティを用いた新しい検出素子 (図 2) を開発し、単層薄膜素子より 7 倍以上の検出効率の向上を実現しました。
2. 動作速度の向上: レンズ付き光ファイバを用いることによって、より小さい受光面積をもつ検出素子への集光が可能となり、動作速度を 2 倍向上しました。
3. システムの小型化: システム設計の最適化によって、従来の NICT 開発の検出システムに比べ 2/3 まで小型化しました。



ナノ ICT グループグループリーダー  
王鎮 工学博士  
ZHEN WANG Ph.D

#### 学歴

1978年 中国南京大学物理系卒業  
同年同大学物理系助手  
1991年 長岡技術科学大学大学院工学研究科  
博士課程修了、工学博士

#### 職歴

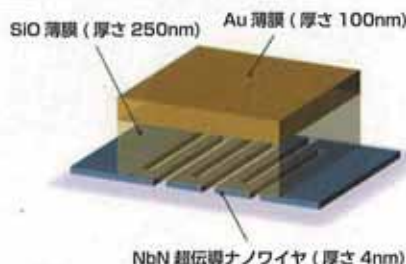
1991年 郵政省通信総合研究所  
(現情報通信研究機構) 入所  
関西先端研究センター  
超伝導エレクトロニクスグループ  
グループリーダー  
2000年 郵政大臣賞受賞  
2007年～ 現職

表1 超伝導単一光子検出器と APD の性能比較 (検出効率 20%、動作速度 100 MHz 動作時)

検出器	暗計数率 (Hz)	アフターパルス確率	ゲート動作	性能指数 $\times 10^4$
SSPD (NICT)	0.1	~0	不必要	200
InGaAs/InP APD	10	$\geq 10^{-4}$	必須	2

検出効率: 検出した光子数と入力した光子数の比、最大 100%。  
動作速度: 検出可能な光子の繰り返し速度。  
暗計数率: 入力光子がゼロのときに検出した光子数。理想は 0 です。  
アフターパルス: 正味のアバランシェに続いて行ったアバランシェ増幅が起こる現象。  
性能指数: 性能におけるメリットとデメリットの比 (検出効率  $\times$  動作速度 / 暗計数率)、トータル性能を表す指数。

図2 キャビティ構造の概念図





## KARC フロント・トピックス

### ▶ 第3回 神戸研究所 研究交流会を開催

7月8日(木) 神戸研究所未来 ICT 研究センターにおいて、神戸研究所に所属する研究者を中心に「研究交流会」を開催しました。この交流会は今年で3回目となりました。異分野研究者が既存のプロジェクトの枠を越え研究成果・技術に関する情報・意見交換を行うことにより、新たな融合研究・領域横断的研究の掘り起こしと促進を図ることを目的としています。

今回の交流会では、研究推進部門、ユニバーサルメディア研究センター、新世代ワイヤレス研究センター、新世代ネットワーク研究センターからもポスター発表があり、ポスター総数は65点にのぼりました。

また、宮原秀夫理事長をはじめ多くの幹部が訪れるなど、参加者はのべ126名と昨年を上回る盛況な交流会となりました。

最後に熊谷理事から、活発な研究議論が行われたことなどについての総評があって、交流会は閉会となりました。

神戸研究所では、既存プロジェクトを支える個の研究や他センターの研究交流の場から、多くのユニークな研究が生まれることを期待し、今後もこの交流会を研究推進の一手として継続する方針です。



神戸研究所 未来 ICT 研究センター大会議室



総評される熊谷博理事



説明を受ける宮原秀夫理事長



研究奨励賞受賞者



## KARC フロント・トピックス



交流会の様子

## ▶ 研究奨励賞を受賞した発表ポスターの紹介

- ・「有機 EO 材料・デバイスの研究開発～電気と光の超高速シグナル変換技術～」  
 ナノ ICT グループ 分子フォトニックプロジェクト 研究マネージャー 大友 明
- ・「非線形フォトニック結晶による超小型・高効率光非線形機能デバイスの研究開発」  
 ナノ ICT グループ 分子フォトニックプロジェクト 主任研究員 井上 振一郎
- ・「光をアンテナで受信～ナノアンテナの試作と評価～」  
 ナノ ICT グループ 超伝導プロジェクト 主任研究員 川上 彰
- ・「通信波長帯用超伝導単一光子検出器開発の最新成果」  
 ナノ ICT グループ 超伝導プロジェクト 研究員 山下 太郎
- ・「べん毛はなぜ動く?～微細な構造変化がもたらす、生物のダイナミックな動き～」  
 ナノ ICT グループ 生体物性プロジェクト 専攻研究員 西浦 昌哉
- ・「DNA を鋳型としたモータータンパク質複合体の構築」  
 ナノ ICT グループ 生体物性プロジェクト 専攻研究員 古田 健也



**紹介** クローズアップ研究者①

# ネットワーク情報学と バイオインフォマティクスの交叉

神戸研究所 未来 ICT 研究センター 専攻研究員

劉 健勤 工学博士・博士 (情報学)

## 研究の背景

生命科学の分野において、システム生物学は生命システムのロバスト性 (いわゆる頑強性) を解明してきました。生命システムから抽出した情報学的な構造の解析、さらには新世代ネットワーク・アーキテクチャにおける斬新な方法論を開拓することが、今後求められています。

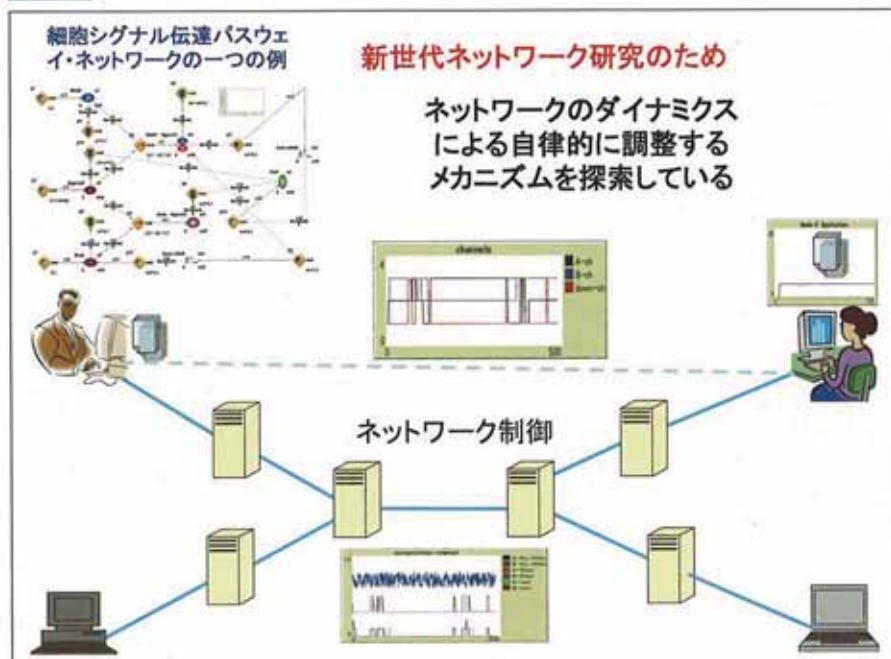
本質的に生化学的な反応であるため、生命システムはいろいろな形で表現され、アナログな信号である濃度で反映されますが、抽象的なトポロジー構造も持っています。研究の対象は具体的に、細胞のシグナル伝達における「バスウェイ・ネットワーク」です。そうした情報学的構造解析の視点から見出した生命システムですが、情報ネットワークとしての構造には幾つかの利点があります。先に挙げたロバスト性もその一つと言えます。

## 研究の全体像

研究の全体構想は、以下の二つの柱から構成されます。

- (a) 生物を対象とするシステム生物学で、生命システムのロバスト性、およびこれを支える細胞のシグナル伝達におけるバスウェイ・ネットワークのメカニズムを解析します。ここでは、生命情報学の定義における情報ネットワークを構造化します。計算論により、細胞シグナル伝達バスウェイの分析は生命科学と情報科学の橋渡しの役をしています。ここで、細胞の中にキナーゼ (リン酸化酵素) / ホスファターゼ (脱リン酸化酵素) と GEF/GAP などに関するバスウェイが情報理論でどのような信号伝達の機能を持つか、それに対する細胞内の空間にどのような通信路になるか、これらの情報をどのように符号化・復号化のメカニズムで説明するかなどの研究課題に取り組みます。
- (b) 上記のネットワーク構造を参照してダイナミック・ネットワークのモデルを設計し、これに関するネットワークング・アルゴリズムを研究します。また、ネットワークにおけるロバスト・メカニズムのモデルを、新世代ネットワークの基礎として抽象構造の分析を進めます。

図 1





## 生命システムのダイナミクスから情報ネットワークのダイナミック制御へ

ダイナミック・ネットワークにおけるロバスト性に対しては、ネットワーク制御のメカニズムにおける根本的なフィードバックに着手して、情報ネットワークのダイナミクスを定量的に解析しなければなりません。複雑系としての生命システムにいるシグナル伝達ネットワークをバイオインフォマティクス的手法で考査し、並びにランダム性を含むネットワークと情報学で定義した動力学構造についてシミュレーションをしています。

ロバスト性のメカニズムを用いて、ダイナミック・ネットワークのモデルを設計することが必要です。最適性理論の手法による平衡点分析から効率的な輻輳制御方法を見つけ出すために、パケットレベルでの新しいネットワーク制御器の設計につなげていきたいものです。ロバスト性を実現するために動的制御によるダイナミックなネットワークング・プロセスが重要な役目になります。また、ネットワーク制御については、ダイナミック・ネットワークのメカニズムは不可欠です。応用層、中間層、物理層の構造を考えて、ネットワークにおける情報流の制御プロセスの最適化に通じて未来通信ネットワークに対する斬新な構造モデルを考査していきます。

### 未来インターネットへの一歩

現在の私の研究は、自律的に諸要素の非線形型相互作用から効率的な機能を自律的に創発できる新たなネットワークの構造手法を通じて、新世代ネットワーク・アーキテクチャの基礎に着手しているところです。

ダイナミック・ネットワークに基づいて生命科学と情報通信工学から得た適応複雑系の知見を活用し、本課題の核心である頑強性の研究結果から適応性、自律性など一般的な特徴へと展開できないものかと考えています。今後創発される多様な通信技術に対応するため、ネットワーク本体は適応複雑系としてシステムの的に設計する方へ、つまり、“諸システムを一つのシステムとして統合する (system of systems)” という理念によるネットワーク全体の調和を図れるよう研究を進めていきたいと思ひます。

本研究は、主に大阪大学情報科学研究科 先進ネットワーク・アーキテクチャ講座との協力しながら行なっています。



KARCのバイオ ICT グループ、NICT 新世代ネットワーク研究センター成瀬誠主任研究員、東京大学医科学研究所ヒトゲノム解析センター DNA 情報解析分野・宮野研および九州工業大学倉田博之教授の協力をいただいています。

図 2

### 生命に学ぶ情報ネットワーク



ロバスト性を持つネットワーク構造を創る



## 紹介 クローズアップ研究者②

# 繊毛虫の特殊性を利用した細胞内の情報と物流を制御するシステムの研究

神戸研究所 未来 ICT 研究センター  
バイオ ICT グループ 専攻研究員

岩本 政明 博士 (理学)

### 研究の背景

情報化社会といわれる今日ですが、情報を利用しているのは人間だけではありません。あらゆる生物が情報を収集、解析処理、発信するという作業を行っています。生物が扱う情報（外界や体内の状況変化のシグナル）は、生死に直接かかわる重要なものばかりです。従って、そのような情報を迅速に処理し、適切に応答できる生物種だけが、今日までの進化の道のりを勝ち進んでくることができたと考えられています。もしそうなら、現存する生物が備えている情報処理の仕組みは、いずれも洗練された優秀な生体システムのはずです。そして、そこには、我々の情報通信技術に応用可能な、未知の情報通信アルゴリズムが数多く存在していると期待されます。

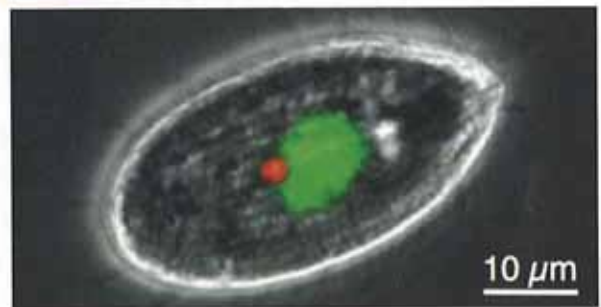
私の実験対象は、単細胞の繊毛虫です。単細胞生物は、時々刻々変化する過酷な環境に直接曝されているわけですが、繊毛虫は2億数千万年前の琥珀化石の中から今と寸分違わぬ形で見つかり、彼らがこの間の壮絶な環境変化を乗り切ってきたことが分かります。したがって、繊毛虫は、とりわけロバスタな生体システムをもつと考えられます。私は、この優れた生存戦略をもつ繊毛虫に着目し、彼らのもつ未知の生体システムを抽出しようと研究を行っています。

### 繊毛虫の生存戦略

繊毛虫は、大核と小核という2種類の細胞核（「核」と略）をもつ風変わりな細胞です（図1）。ほとんどの生物の細胞では、核は1個です。核は、細胞の中心に位置する構造体で、生物の全遺伝情報であるゲノムDNAが内包されています。細胞は、適宜核内から必要な遺伝情報を取り出し、その情報をもとにタンパク質を合成して生きています。繊毛虫は、もとは1つだったゲノムを2種

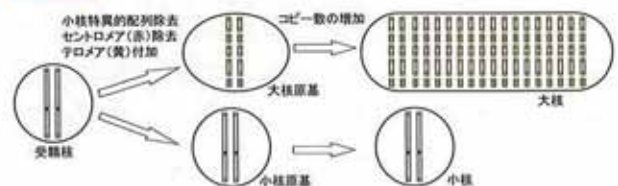
類に分け、大核と小核に分けて維持しています（図2）。大核は、ゲノム情報の大量読み出しを実現する大容量のハードディスクです。細胞が生きるための活動は、すべて大核の働きによって支えられています。一方、小核は、遺伝情報のバックアップとして働きます。細胞が普通に活動している時には使用されることはありませんが、世代交代をするときに初めて働き、子孫となる細胞に受け渡す遺伝情報を提供します。大核の遺伝情報は、普通の生活で使用され続けるため、だんだんエラーが蓄積していきます。そのエラーによってシステムが破綻するのを防ぐために、繊毛虫は頻りに世代交代を行って、その都度古い大核を破棄し、小核から新たな小核と大核を作り直すという驚くべき戦略を取っています。

図1 核を染色したテトラヒメナ



緑が大核、赤が小核

図2 繊毛虫の核分化



小核に由来する受精核から新たな大核と小核がつけられる。大核の分化過程では、小核特異的 DNA 配列が除かれた後、各染色体断片が大量にコピーされる



## 研究内容

繊毛虫は、どのように大核と小核に情報を伝えているのでしょうか。どちらかの核へ運ばれるべきものが、間違っ  
て他方の核へ運ばれるようなことがあっては生存できません。生存のためには、情報をどちらかの核だけに正しく伝える必要がありますが、それをどのように実現しているのでしょうか。核と細胞質間の情報と物質の輸送は、核膜孔とよばれる核膜上の“あな”を通して行われます。核膜孔は数十種類にもおよぶ特殊なタンパク質によって構成されています。これらの核膜孔タンパク質と親和性を持つ物質だけが核膜孔を通過できることが分かっています。我々は、繊毛虫の核膜孔には、大核と小核で部分的に違う構成タンパク質が存在していることを見出しました(図3)。Nup98 というこのタンパク質は、核膜孔が輸送物質との親和性を発揮する上でとりわけ重要な成分であり、繊毛虫はこの Nup98 の違いを利用して2核に運び分けを行っているらしいことが分かってきました。面白いことに、大核と小核のそれぞれにだけ選択的に輸送される物質が、別の核に間違っ  
て入るのを阻止するバリアーとして働いていたのです。すなわち、大核の“あな”にある Nup98 は、大核に運び込まれる物質を通過させますが、小核物質の通過は阻止し、同様に、小核の“あな”にある Nup98 は、小核物質は通過させますが、大核物質の通過は阻止していたのです。

## 今後の研究展開

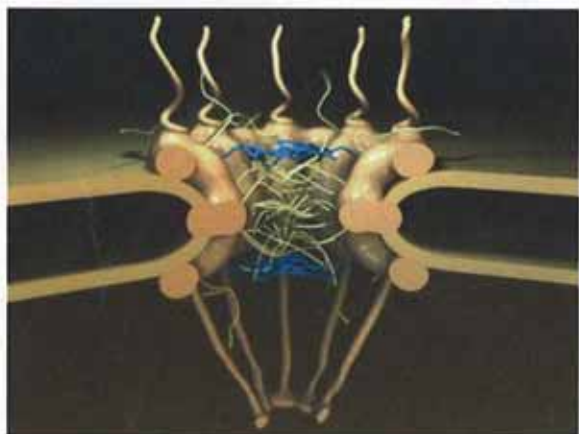
運び分けの仕組みを完全に理解するためには、我々が見出した核膜孔側(鍵穴)の違いに対応する、運ばれる物質側(鍵)の違いを見出す必要があります。これら双方が明らかになれば、1核の細胞に、新たな機能を持った2個目の核を導入し、既存の核とは独立に機能を制御できる人工的な2核性細胞の創出も可能になるでしょう。さらに、2個目の核に遺伝子を組み込んでおき、その発現をコントロールできれば、細胞の形質を自在に変化させることができるようになり、例えば、iPS細胞の作製などにも応用できると考えられます。

一方、輸送物質に対する厳密な選択性をもつ Nup98 タンパク質は、ナノデバイスに利用できる生体素材としての可能性を持っています。Nup98 は決まった構造を取らないしなやかなタンパク質で、類似のタンパク質と



ともに核膜孔内部を満たし、分子フィルターを形成して  
います(図3)。Nup98 と高い親和性をもつ物質は、フィ  
ルターの通過限界の分子サイズを大きく上回っても核膜  
孔を通過できます。このような Nup98 の性質を利用し  
て、特定物質のみを選択的に通過させる人工的な細孔フィ  
ルターを構築してみたいと考えています。

図3 核膜孔と Nup98



大核と小核の核膜孔は Nup98 (黄色) のアミノ酸配列が大きく異なっている。



## 未来 ICT 研究センター STAFF 総覧

研究センター長	大岩 和弘	理学博士
上席研究員	平岡 泰	理学博士
上席研究員	原口 徳子	医学博士

### センター付

専攻研究員	鈴木 秀明	医学博士 (理学)
専攻研究員	劉 健勳	工学博士 (理学)
専攻研究員	寒 重之	博士 (工学)
専攻研究員	片桐 祥雅	工学博士
専攻研究員	小池 耕彦	博士 (情報学)
有期技術員	鳥居 信夫	博士 (医学)

### 推進室

推進室長	久保田 徹	博士 (工学)
研究マネージャー	宮内 哲	医学博士
主任研究員	川上 彰	博士 (工学)
特別研究員	高濱 祥子	博士 (心理学)
管理チームリーダー	金釘 敏	
一般職員	山本 俊太郎	
有期技術員	大山 良多	
有期技術員	高橋 恵子	
有期補助員	相田 有実	

### ナノ ICT グループ

グループリーダー	王 鎮	工学博士
研究マネージャー	大友 明	Ph.D
主任研究員	兵頭 政春	博士 (工学)
主任研究員	川上 彰	博士 (工学)
主任研究員	寺井 弘高	博士 (工学)
主任研究員	三木 茂人	博士 (工学)
主任研究員	Peper Ferdinand	Ph.D
主任研究員	照井 通文	博士 (理学)
主任研究員	山田 俊樹	博士 (工学)
主任研究員	笠井 克幸	博士 (工学)
主任研究員	井上 振一郎	博士 (工学)
研究員	山下 太郎	博士 (理学)
専攻研究員	中尾 正史	工学博士
専攻研究員	丘 偉	Ph.D
専攻研究員	牧瀬 圭正	博士 (理学)
専攻研究員	梶 貴博	博士 (工学)
特別研究員	内藤 幸人	博士 (理学)
特別研究員	長谷川 裕之	博士 (理学)
有期技術員	三木 秀樹	医学博士
有期技術員	青木 勲	
有期技術員	上田 里永子	

### バイオ ICT グループ/計算神経グループ (在けいはん)

グループリーダー	今水 寛	博士 (心理学)
研究マネージャー	内藤 栄一	博士 (工学・理学)
招聘専門員	野崎 大地	博士 (教育学)
招聘専門員	荒牧 勇	博士 (理学)
招聘専門員	玄 相奨	博士 (工学)
専門研究員	杉本 徳和	博士 (工学)
専門研究員	富臨 陽一	博士 (工学)
専門研究員	吉岡 利福	
専門研究員	清水 優	Ph.D (数学)
専門研究員	Genesh Gourishanker	Ph.D
専門研究員	CHO Baek-Kyu	Ph.D
臨時専門研究員	山岸 典子	Ph.D
臨時専門研究員	OZTOP Erhan	Ph.D (Computer Science)
臨時専門研究員	大須 理英子	博士 (文学)
専門調査員	古川 友香	
専門調査員	Ugur Emre	
専門調査員	中野 直	
専門調査員	池上 剛	
有期補助員	南部 功夫	博士 (工学)
有期補助員	廣瀬 智士	博士 (工学・理学)
有期補助員	Matthew Joseph de Breech	博士 (情報学)

### バイオ ICT グループ

グループリーダー	今水 寛	博士 (心理学)
グループリーダー	村田 勉	博士 (工学)
研究マネージャー	澤井 秀文	工学博士
研究マネージャー	小嶋 寛明	博士 (工学)
主任研究員	榎原 斉	理学博士
主任研究員	田中 裕人	理学博士
主任研究員	丁 大橋	博士 (理学)
主任研究員	近重 裕次	博士 (理学)
主任研究員	藤巻 則夫	工学博士
主任研究員	加藤 誠	博士 (医学)
主任研究員	山田 章	理学博士
主任研究員	梅原 広明	博士 (理学)
主任研究員	井原 綾	博士 (保健学)
主任研究員	劉 国相	博士 (工学)
主任研究員	Leibnitz Kenji	理学博士
研究員	小林 昇平	博士 (工学)
専攻研究員	西浦 昌哉	博士 (工学)
専攻研究員	成瀬 康	博士 (理学)
専攻研究員	矢倉 晴子	博士 (保健学)
専攻研究員	岩本 政明	博士 (理学)
専攻研究員	松林 淳子	博士 (工学)
専攻研究員	平林 美樹	博士 (工学)
専攻研究員	前川 裕美	博士 (理学)
専攻研究員	小川 英知	博士 (工学)
専攻研究員	魏 強	博士 (工学)
専攻研究員	武内 史英	博士 (理学)
専攻研究員	松田 厚志	博士 (理学)
専攻研究員	清水 洋輔	博士 (工学)
専攻研究員	古田 健也	博士 (工学)
専攻研究員	森戸 勇介	博士 (理学)
専攻研究員	曾藤 崇弘	博士 (工学)
専攻研究員	下川 哲也	博士 (工学)
招聘専門員	阪井 清美	工学博士
招聘専門員	鈴木 良次	工学博士
招聘専門員	早川 友恵	博士 (心理学)
招聘専門員	眞溪 歩	博士 (工学)
招聘専門員	江田 英雄	博士 (工学)
専門研究員	山田 順一	工学博士
有期技術員	吉雄 麻喜	
有期技術員	堤 千尋	
有期技術員	荒神 尚子	
有期技術員	糸井 誠司	
有期技術員	野界 武史	博士 (工学)
有期技術員	山根 美穂	
有期技術員	大槻 千鶴	
有期技術員	岡正 華澄	
有期技術員	森 知栄	
有期技術員	小坂田 裕子	
有期技術員	梶谷 知子	
有期補助員	樋口 美香	
有期補助員	高村 佳美	
短時間補助員	小田 正起	

### 脳科学センター 脳 ICT グループ/野グループ

主任研究員	齋藤 伸吾	博士 (理学)
主任研究員	早坂 和	博士 (理学)



### 編集後記

KARC FRONT vol.18 (2010年夏号)では、生物の持つ情報通信システムに関する最先端の研究を取り上げました。神戸研究所未来 ICT 研究センター (KARC) では、生物、バイオ、細胞、タンパクなど、およそ情報通信とは無縁と思われる研究も、未来の複雑化した情報通信システムを構築する大きな技術の 1 つと捉え、最先端の未来情報通信研究と位置付けた研究を進めています。そのため、生物学の面から進める研究、情報通信分野からアプローチを広げる研究、そして物理学や技術の分野からそれぞれを繋げる研究など、異分野の基礎研究者が集う KARC だからこそ進んでいる研究と言えます。その中から、巻頭では、特集 I “生物の情報伝達機能を解析し情報通信分野に活かす”と題して、バイオ ICT グループ 生物情報 PJ から、近重氏の研究を紹介しています。研究は、純粋な生物学からのアプローチの 1 つであり、生物の持つ遺伝情報、究極の情報媒体である DNA を、生物がどのように情報を伝達し活かしているかが解ります。特集 II としては、“生体内での分子のブラウン運動を情報通信分野に応用”と題して、ナノ ICT グループ 分子フォトニック PJ から、ペパーフェルディナント氏の研究を紹介しています。ここでは、一転して、情報学からの観点で生物を見つめ、物理や論理回路技術の研究サイトからの研究アプローチとなります。情報学、アーキテクチャの研究から見ても、生物の持つ情報処理システムが非常に興味ある研究対象であることが解ります。

研究トピックスでは、7月に行われた一般公開の模様と、NICT 内ではありますが今年 3 回目となる研究交流会の模様を紹介いたしました。特に研究交流会では、NICT 内に限られた研究交流ではありませんでしたが、神戸研究所以外にも本所、けいはん研究所などから異分野の研究発表がなされ、非常に有益な研究交流が行われました。今後、ここから新たな研究の種がはくまれ、神戸研究所の基礎研究を支える研究になることが期待されます。

研究者紹介では、特集企画に合わせ、バイオ ICT グループ 生物アルゴリズム PJ から劉健勳氏、生物情報 PJ から岩本政明氏の 2 人をピックアップし、情報ネットワークとバイオインフォマティクスの研究と、細胞内の情報システムに関する研究という、それぞれの PJ で進む最先端研究を担うお二人の研究を紹介しております。最後に、本号の編集において、インタビュー、研究紹介などへの対応や編集・校正にご協力いただいた関係各位に感謝いたします。

推進室長 久保田 徹



### 独立行政法人 情報通信研究機構 神戸研究所 未来 ICT 研究センター

〒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  
http://www.karc.nict.go.jp/ Email: karc@po.nict.go.jp

