

ネットワーク共生環境を築く情報技術の創出

西尾章治郎 大阪大学大学院情報科学研究科 nishio@ist.osaka-u.ac.jp

生物界は、新しい知恵やアイデアの宝庫であり、それらに学び、ヒントを得ることは、今後さまざまな分野の技術革新にとって最も有効な鍵となると考えられる。大阪大学大学院情報科学研究科がサイバーメディアセンターと共同で推進している21世紀COEプログラム「ネットワーク共生環境を築く情報技術の創出」は、生物界に学ぶことによって情報技術分野にブレークスルーをもたらすことを目指している。本稿では、そのプログラムで推進している研究内容の概要について、同時に実施している人材育成プログラムも含めて紹介する。

生物界に学ぶ大切さ

21世紀は、「共生の時代」だといわれている。ところが、昨今の世界情勢は、それとは逆の方向に進んでいるような気がしてならない。そのような状況において、多くの人間または人間集団が、豊かで持続的に共生可能なネットワーク社会を実現する情報環境、つまり、「ネットワーク共生環境」の構築がますます重要になってきている。

インターネットは、顔も知らない者同士がサイバースペース上で向き合え、世界中の親交のないコミュニティ間の理解を深めるための20世紀最大の創造物の一つであろう。しかし、現在、インターネットで採用されているクライアント・サーバ・アーキテクチャーをとっても、急激なユーザの増加のもとで技術的な種々の問題に直面している。そこで、たとえば、危機的な社会情勢に陥り、超大量の情報がインターネット上に流れたとしても耐え得るアーキテクチャが求められている。その実現には、従来技術の単なる発展ではなく、まったく斬新なアプローチが必要であり、本COEプログラムでは、生物界に学んだ情報技術の創出に挑戦することにした。

生物界から学ぶ現象の一例として、細胞性粘菌と大腸菌の共生環境の構築過程がある。両者を一緒の場所に

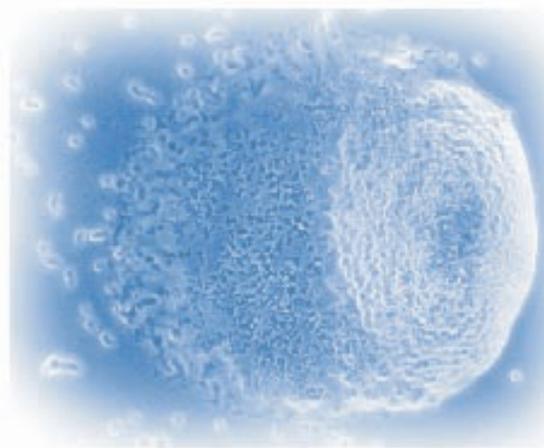


図-1 細胞性粘菌と大腸菌の共生コロニー

置くと、細胞性粘菌は大腸菌をどんどん食べる。しかし、食べ尽くせば食べ物がなくなり、一方では、食べなければ飢え死にする。そのような究極の場面にやがて遭遇するはずなのに、そうはならない。細胞性粘菌と大腸菌は相互に作用しながら、図-1に示す「くずあん」のようなドーム(コロニー)をつくり、共生環境状態に入る。融通をきかして適当に変化し、お互いに緩々と生き延びている。生物界のそのようなインタラクションの本質を解明し、新たな情報技術の創出に繋げることができないか。そのような発想が本COEプログラムのテーマ設定のもとになった。特に、「情報科学技術と生物学分野の融合」をその設立の趣旨の一つとして平成14年度、つまり、本COEプログラムの開始年度に創設された本情報科学研究科にとっても、その設立の趣旨を活かす重要なテーマであった。

本COEプログラムと同様に、欧米においても次のような生物界に学んだ情報技術の革新を目指すプロジェクトが推進されており、その重要性は新たな潮流として世界的に広く認識されつつある。



図-2 本COEプログラムのサブテーマと目標

- eLisa プロジェクト (IBM)
- 分散システムの自律調整に関するプロジェクト (University College London)
- Anthill(蟻塚)プロジェクト (Bologna University)

ネットワーク共生環境の7要件

ここで、本COEプログラムで用いている「共生環境」という言葉の意味を明確にしておく必要がある。ここでは、「外界からの大きな環境変化にもかかわらず、個々のオブジェクトが安定した状態を保ちながら、本来の機能を果たしていく環境」と考える。

生物界における細胞性粘菌と大腸菌、マメ科の植物と根粒菌などにおける共生環境に関する前段階的な解析から、生物界では共生環境を構築する上で、少なくとも次の七つの要件が重要であることが明らかになった。つまり、「自律性 (autonomy)」、「強靱性 (resiliency)」、「適応性 (adaptation)」、「移動性 (mobility)」、「多様性 (diversity)」、「個別化 (personalization)」、「拡張性

(scalability)」である。

そこで、本COEプログラムが目指すネットワーク共生環境を構築する上で、これら七つの要件を満たす情報環境を構築することを目標とした。また、研究を強力に推進するために、図-2に示す五つのサブテーマを設定した。

まずは、「生物界における共生過程の解明」をする第1のテーマ。その結果を情報システム技術として移転していく三つのテーマ。つまり、情報システムの下位層から上位層に向けて、基盤となる「ネットワークアーキテクチャの構築」(テーマ [2])、そのネットワーク上での「コンテンツ流通機構の構築」(テーマ [3])、さらには、人間との接点に関する「ヒューマンインタフェース技術の創出」(テーマ [4])である。最後に、第5のテーマとして、本COEプログラムが目標とする共生環境を「高度な信頼性および安全性」を持って構築する技術の創出を設定した。

本COEプログラム推進担当者は、図-2に示す国の内外で活躍している研究者20名によって構成されている。また、本COEプログラムでは、図-2に示すように世界

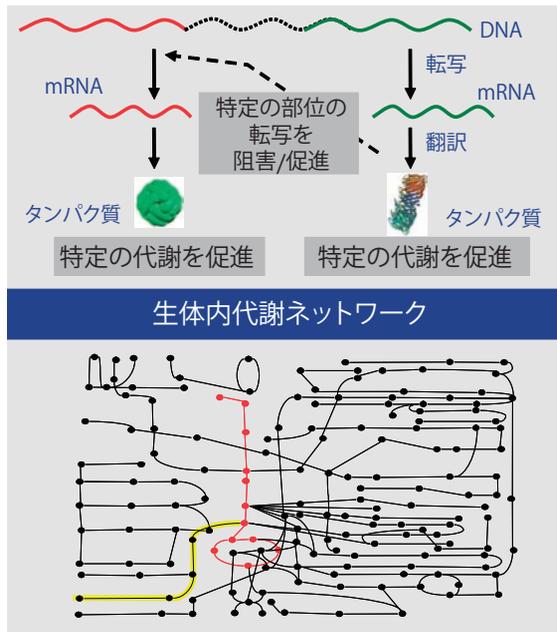


図-3 代謝ネットワーク

をリードする卓越した研究拠点形成を第一義にしながら、人材育成プログラム、若手研究者養成も重視している。

べき乗則の普遍性

以下では、本プロジェクトで得られている世界的な水準を超えている成果を三つ挙げることにする。その最初として、生物ネットワーク、情報ネットワークに共通する特性の発見がある。

インターネットのWWW (World Wide Web) サイトのWebページには、関連する情報にさまざまなリンクが張られる。最近明らかにされた結果として、各Webページに張られるリンク数の分布が、「べき乗則 (Power Law)」に従う、つまり、リンク数を k とするとその出現頻度 $P(k)$ が $P(k) \propto k^{-r}$ となり、その関係を両対数グラフに記すと直線状になることが知られている。つまり、一部のサイトは膨大なリンク数を持つ一方で、ほとんどのサイトはごくわずかなサイトとしか繋がっていない。この点で、こうしたネットワークはスケール (縮尺) が存在しない (フリー) ように見えることから、スケールフリーネットワーク (Scale-Free Network) と呼ばれる¹⁾。

一方、生体内の代謝過程について、代謝物をノード (node)、各代謝物からの触媒 (タンパク質) による化学反応の過程をエッジ (edge) で表現するとネットワーク構造が得られ、それは「代謝ネットワーク」とよばれ、**図-3**のように示される。生物は、大規模な代謝ネットワークをその内部に含んでおり、このネットワークの活性化の状態を変化させることによってさまざまな環境に

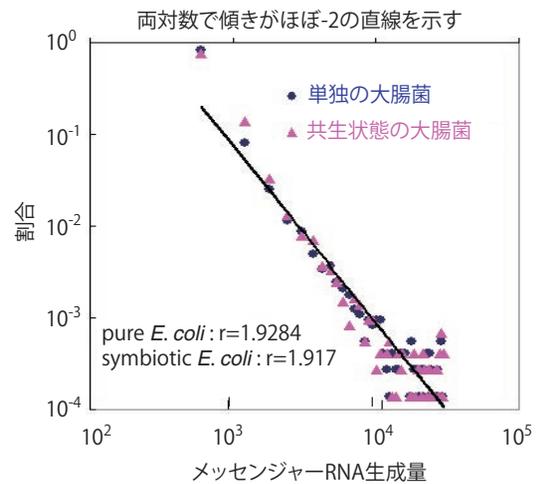


図-4 タンパク質合成におけるメッセンジャーRNAの分布

適応している。化学反応を促進する触媒であるタンパク質は、遺伝子からメッセンジャー RNA (mRNA) を作る (転写することによって合成 (翻訳) されている。

本COEプログラムでは、細胞性粘菌と大腸菌の共生形成過程において、大腸菌がこの代謝ネットワークをどのように変化させているかを解明した。単独状態と共生状態にある大腸菌の細胞内部のすべての遺伝子について、メッセンジャー RNA の生成量をジーンチップと呼ばれる網羅的遺伝子解析装置で調べた。単独で培養した状態の大腸菌の遺伝子と、共生コロニーを形成した大腸菌の遺伝子について、横軸に遺伝子のメッセンジャー RNA 生成量を、縦軸に各々の遺伝子発現量を示した遺伝子の割合をとって、それらの分布を**図-4**に示す。大腸菌が単独で存在する場合 (pure *E. coli*) も共生コロニーに移行した場合 (symbiotic *E. coli*) においても両分布は、ほぼ同じ傾きの直線に乗っており、べき乗則を示していることを明らかにした²⁾。

これは、大腸菌が単独状態から共生コロニーに移行した場合、個々の遺伝子の発現量は大きく変化しているが、全体の分布の形としては傾きほぼ-2の同様な分布に落ち着くという非常に興味深い結果を示している。

以上の結果は、四方哲也らの生物系の研究者たちが、WWWのリンク数の分布に関する情報科学系の研究者たちとの議論に触発され、代謝ネットワークにおいて同様の「べき乗則」の特性が見られることを解明したものである。特に、WWWに関するべき乗則についても傾きがほぼ-2になることが知られている。これら生物分野と情報技術分野に共通のシステム特性があることは、

一方で得られている知見を他方に移転できる可能性を強く示唆しており、両分野の融合を目指す本COEプログラムの研究方向の妥当性を強く支持している。

共生プロセスを解明する数学モデル

本COEプログラムにおいて世界的に注目されている成果として次に紹介するのが、生物が共生環境を築いていくプロセスを解明する数学モデルの構築である。

たとえば、2種類の生物種がある環境下に置かれた場合、両者の競合状態に起因して必須物質の供給一つにしてもさまざまな環境変化が起きる。その場合に、四方らは、アトラクター（安定状態）を選択しながら柔軟に環境適応する過程、つまり、共生環境を構築していく過程の数学モデルを提案し、実験によってその正しさを示した。

ここでは、生物1と生物2がある環境で突然出会った後、それらの生物の異なる代謝ネットワークが柔軟に対応し、再編され、共生環境が形成されていく過程について考える。この過程を一方の生物1から見ると、生物2の出現は環境変化、つまり、化学物質濃度変化によってもたらされる。生物1は、既知の環境変化を認識し、それを遺伝子制御系に伝える分子機構を備えているが、その機構は過去の経験を通して得られた産物であり、新しい環境変化には適用が難しいと考えられる。そこで、本COEプログラムでは、分子認識によらないネットワーク再編機構の解明を試み、新たに「アトラクター選択による適応応答」の機構として提案した。

まず、生物1は、必須物質1、必須物質2の両方を必要とし、その生物内の遺伝子1、遺伝子2は、各々必須物質1、必須物質2を生成する。ここで、生物1は必須物質を外界から吸収するか、遺伝子からメッセンジャーRNAを生成し、必須物質を自ら合成する必要がある。そのとき、生物1が共生環境を築く過程における代謝ネットワークの一部の変化は、式(1)のような二重フィードバックループを持ったモデルで表され、その挙動をシミュレーション実験を通じて解析した。ここで、 t は時間、 m_1 と m_2 はそれぞれ遺伝子1と遺伝子2から転写されるメッセンジャーRNAの濃度、右辺の第2項 η_1 と η_2 はノイズを表す。また、*activity*は、細胞の化学反応の活性度を表し、必須物質1、必須物質2が外部から供給された場合、あるいは生物内で生成された場合に増大する特性を持つ関数として表現される。この数式モデルの詳細は、文献3)を参照されたい。

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} m_1 &= f_1(m_1, m_2) \times activity + \eta_1 \\ \frac{d}{dt} m_2 &= f_2(m_1, m_2) \times activity + \eta_2 \end{aligned} \quad (1)$$

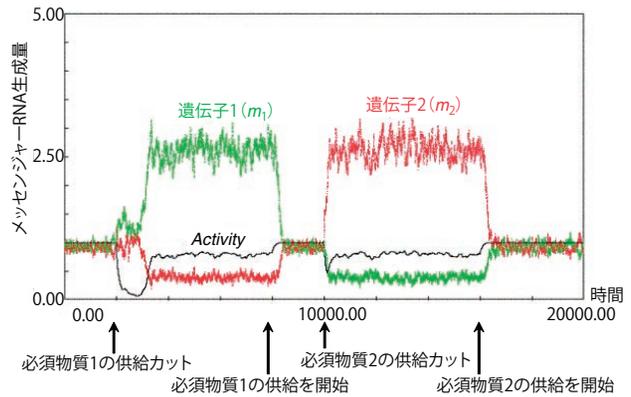


図-5 アトラクター選択による環境適応応答のシミュレーション結果

以上の特性を持つ数式モデルに関して、シミュレーション実験を行い、外部環境変数として必須物質の供給量の値を変化させ、提案した二重フィードバックループの応答を調べた。図-5に示すように、外部からの必須物質1および必須物質2がともに存在する環境では、互いの遺伝子の生成を抑えた状態が安定なアトラクターになっており、メッセンジャーRNAの生成量の合計は最小になっている。次に、一つの栄養の外部供給を断つと、その欠乏を補う状態がアトラクターとして選択される。ただし、この環境変化に対しては、二つのアトラクター（どちらか一方のメッセンジャーRNAが選択的に作られる状態）が存在するが、環境に適応的なアトラクターだけが選ばれる。環境状態が悪くなって、活性度が小さくなるとメッセンジャーRNA変化速度に与える決定論的項が小さくなり、ノイズによる揺らぎ成分 η_1 、 η_2 が相対的に大きくなる。その揺らぎによって、いったん、適応的なアトラクターに近づくとも活性度が増大して、その接近速度がより高まり、最終的にそのアトラクターに吸収される。これが、アトラクター選択による環境適応の原理である。なお、以上の提案モデルの正当性は、実際の大腸菌を用いた実験で実証している。

以上で、環境変動に対して自律的にネットワークの活性度が変動し、活性が低下するような環境変動が起きた場合には、ノイズによって新たな安定状態を自律的に探索し、それに伴ってネットワークの活性度が回復に向かうという生物の共生環境の構築過程のモデル化が可能になった。

現在、インターネットの脆弱性、不安定性を解決するための方策としてアプリケーションプロトコル層における「オーバーレイルーティング」が注目されている。本COEプログラムでは、村田正幸らのグループがオーバー

レイルーティングにおける経路選択原理に適用する研究を進めている。複数のオーバーレイネットワークが存在する環境において、それぞれは独自の最適化戦略をとっており、しかもネットワーク全体は動的なシステムである。そのようなシステム全体の最適化戦略は定式化が不可能であり、各々のオーバーレイネットワークの状態に応じた確率的経路制御が有効である。そこで、アトラクター選択モデルに基づいて自律的に経路を選択することで、アドホックなパラメータ設定を必要とすることなく、耐故障性を有し、しかも従来のIP層における経路選択に比べて安定性の高い経路制御が実現している。

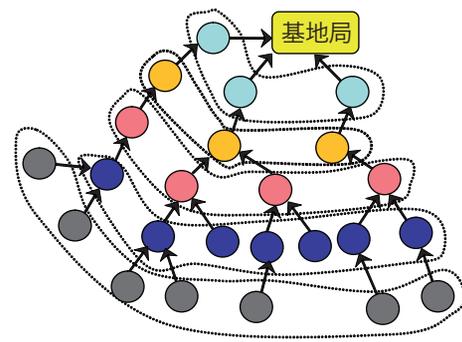


図-6 センサネットワークにおける情報収集同期機構

生物界に学んだ情報システム

先に述べた7要件である自律性、拡張性、移動性などの優れた生物界の挙動を単に定性的な観点から情報システムに適用するのではなく、それらを記述する数理モデルを解明した上で適用することは、新たな情報技術の創成に繋がる。本COEプログラムの卓越した成果の3番目として、蜚、蟻、蜂などの挙動の観察をもとに、それらの挙動を数理モデル化し、以下のようにセンサネットワーク、Peer-to-Peer型ネットワークなどの諸技術に適用することに成功している。

たとえば、アジアのある地区に生息する *Pteroptyx malaccas*、あるいは *Pteroptyx cribellata* という蜚は、単独の時は独自の間隔で発光するが、群をなしてくると隣同士の蜚が発光間隔をお互いに同期させ、最終的には群全体が同じ間隔で一斉に発光ようになる。その同期機構は、まったく分散かつ自己組織的になされる。本COEプログラムでは、これらの挙動を表現する数理モデルを明確にし、センサネットワークに適用することに成功している。

センサネットワークは、最近のセンサデバイス技術の飛躍的な発展に伴い、新たな応用分野が開発され、ますます重要になっている。ある環境に配置された多数のセンサ端末から基地局と呼ばれる受信端へと定期的にセンサ情報を収集するシステムを考える。このようなシステムでは、図-6に示すように、情報収集の周期にあわせて、センサネットワークの周縁部のセンサ端末から順にセンサ情報を発信し、基地局に近いセンサ端末が中継する手法が効率的である。さらに、基地局から同程度離れたセンサ端末が同期してセンサ情報を発信すれば、より基地局に近いセンサ端末は信号受信のタイミングだけ無線受信機の電源を入れればよく、また、受信したセンサ情報と自身のセンサ情報を集約してデータ量を減少できれば、より電力効率の良いセンサ情報の収集が可能となる。

通常センサ端末は無作為に配置されることがしばしば

であり、数百から数千のセンサ端末に対して、集中型制御によりセンサ情報発信、収集のタイミングを制御するのは現実的ではない。また、そのような集中制御が可能であったとしても、センサ端末の移動、停止、追加、さらに無線通信環境の変動によって通信状態が変化するたびにタイミング制御するのは困難である。

そこで本COEプログラムでは、若宮直紀らが上記の蜚に見られる自己組織的同期機構をセンサ端末の同期機構に導入することを提案した⁴⁾。蜚が相互に干渉しながら同期する機構をモデル化したパルス結合振動子モデルを応用することにより、個々のセンサ端末が自律的にセンサ情報を発信するタイミングを調整し、互いに直接信号の送受信が不可能なセンサ端末のセンサ情報発信のタイミングの同期を可能にした。

新たな研究領域の確立への寄与

著名な学術論文誌および国際会議における研究成果の公表、さらには招待講演の要請など世界的な研究拠点としての地位を確立しつつあるが、本COEプログラムの大きな貢献として、新たな研究領域の確立への寄与がある。「生物界に学ぶ先端的な情報技術」に関する世界最初のワークショップであるBio-ADIT2004を平成16年1月にスイスのローザンヌで、19カ国からの参加者を得て開催した。世界25カ国から多数の論文が投稿され、採択率は第1回目の会議としては28%と質の高い国際会議となった。特に、採択された論文の25%を本COEプログラム関係の論文が占めた。このように、新たな研究領域の確立に大きく貢献するとともに、この分野で本COEプログラムがリーダーシップを執っていることを示すことができた。

なお、このワークショップは世界的にも注目され、再編集された会議録が審査を経た上で、Springer社から“State-of-the-Art Survey”シリーズの1巻として、出版

された⁵⁾。このシリーズの刊行物として採用されることは、Bio-ADIT2004、さらには本COEプログラムの取り組みが高く評価されたといえよう。Bio-ADIT2004の成功を受けて第2回目を平成18年1月に大阪で開催する予定である。

人材育成プログラム

本COEプログラムでは、研究活動と同時に高度人材育成を重視し、次のような特徴的な三つのプログラムを推進している。

1. **セキュアネットワーク構築のための人材育成プログラム**：セキュリティエキスパートを養成することを目的として、単に本学の大学院生のみならず、他大学の教員、民間企業、官庁関係の方々にも開放している。本学のキャンパスネットワークODINSを用いたオン・ザ・ジョブ・トレーニング(OJT)を中心としたカリキュラムを作成・実施し、外部からも高い評価と関心が寄せられている。
2. **ネットワークプロセッサ設計ラボ計画**：さまざまな先進的な装置を用いてネットワーク設計手法を学ぶことを目的としており、米国Intel社が国内では唯一本COEプログラムにカリキュラム内容をサポートしていることで知られている。
3. **ソフトウェア工学工房**：最近特に問題視されている「ソフトウェア工学分野の人材不足」に対処する本格的な人材育成プログラムとして、特に、その「実践的ソフトウェア工学」に基づく教育スキームが、非常に注目を集めている。

産学官のあらゆる分野からの受講生を受け入れている第1、第3のプログラムでは、その受講希望に応じきれないほどの反響を得ている。これらの人材育成プログラムは、国立大学法人化後の産学官連携の一つの有り様として非常に良い事例となると考えており、今後も強力に推進する予定である。

本COEプログラムでは、21世紀の情報技術分野でリーダーシップを発揮できる国際性のある若手研究者の養成は非常に重要と考え、博士後期課程の大学院生への制度的・経済的な支援を積極的に行ってきた。たとえば、リサーチアシスタント(RA)として年度ごとの延べ60名の博士後期課程の大学院生、特任助手を延べ12名、特任研究員1名を雇用してきた。その結果、平成15年度の研究科全体の博士後期課程の充足率は135%に達し、特に、本COEプログラムのメンバの所属する研究室だけに限定すると200%に近くになり、本COEプログラムが

若手研究者養成に有効に機能していることを示している。

今後の展望

これまでに、本COEプログラムの最初の2年半の間で特に重要視したテーマ[1]、つまり、「生物共生ネットワークの形成過程の解明」については、すでに世界的な成果が得られ、また、情報システム関連のテーマ[2]～[5]については、生物界に学んだ情報システムアーキテクチャについて、いくつかの顕著な成果が得られているとともに、テーマ[1]の成果を統合する受け皿が完成しつつある。今後の課題は、両者の成果を統合して、当初の計画を達成すべく着実に邁進することである。実際、平成16年度に行われた中間評価において、「当初計画は順調に実施に移され、現行の努力を継続することによって目的達成が可能と評価される」という高い評価を得ることができた。

我が国のCOEとしていかに特色を出していくかを考える時、野依良治博士の『欧米のパラダイムの追従は賢明でない。後進には日本人独特の思想と感性で自律的に道を拓いて欲しい。それが我が国が尊敬されて生きる道である』という教えと、熊谷信昭大阪大学元総長の『21世紀の革新的な科学技術のブレークスルーを拓く鍵は二つ、「自然と生物に学ぶ」ことと、人文・社会科学系を含む「異分野間の融合」をはかることである』という教えは非常に重要である。本COEプログラムは、西洋の二元論とは異なる「共生」という東洋的な発想に基づく情報技術の創出を、「生物に学び」ながら推進するという意味で、両先達の教えをまさに具現化していくものであると確信している。

謝辞 本COEプログラムを遂行するにあたり貴重なコメントおよびご示唆をいただいているアドバイザー委員会の皆様に深謝の意を表す。

参考文献

- 1) Barabási, A.-L. and Bonabeau, A. : Scale-Free Networks, Scientific American, Vol.288, No.5, pp.60-69 (May 2003).
- 2) Ueda, H. R., Hayashi, S., Matsuyama, S., Yomo, T., Hashimoto, S., Kay, S. A., Hogenesch, J. B. and Iino, M. : Univsersality and Flexibility in Gene Expression from Bacteria to Human, Proceedings of the National Academy of Sciences, USA, 101 (11), pp.3765-3769 (2004).
- 3) 「ネットワーク共生環境を築く情報技術の創出」, 平成15年度成果報告書, 文部科学省21世紀COEプログラム(研究拠点形成費補助金)(Mar. 2004).
- 4) Wakamiya, N. and Murata, M.: Scalable and Robust Scheme for Data Gathering in Sensor Networks, Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology, LNCS 3141, Springer, pp.412-427 (2004).
- 5) Ijspeert, A. J., Murata, M. and Wakamiya, N. (Eds.) : Biologically Inspired Approaches to Advanced Information Technology, LNCS 3141, State-of-the-Art Survey, Springer (2004).

(平成17年2月25日受付)