

# 生命に学ぶ新世代ネットワーク ・アーキテクチャの研究 I : ネットワーク制御器における安定性の分析

劉 健勤<sup>†</sup>

生命に学ぶ新世代ネットワーク・アーキテクチャを探索するため、生命システムのロバスト性に学ぶ新世代ネットワーク・アーキテクチャの方法論を提案し、これに関するフィジビリティ・スタディを紹介する。また、これに応じるネットワーク制御器における安定性の分析を議論する。

## Research on New Generation Network Architecture Learned from the Life I: Stability Analysis for Network Controller

Jian-Qin Liu<sup>†</sup>

In order to explore the architecture of new generation networks learned from the life, the methodology and the feasibility study of new generation network architecture learned from the robustness in life systems are presented, the stability analysis of the corresponding network controller is discussed as well.

### 1. はじめに

本報告には、生命に学ぶ新世代ネットワーク(New Generation Network, NWGN)[1, 2]・アーキテクチャについて、いま取り込んでいる研究を論じる。ここで、生命に学ぶというのは、具体的に言えば、生命システムのロバスト性に学ぶことを中心として、生命システムから定式化された情報ネットワークを研究することである。この情報ネットワークの構造に基づいて、新世代ネットワーク・アーキテクチャの創出を目指している。

### 2. 生命システムのロバスト性に学ぶ新世代ネットワーク・アーキテクチャ

本研究は新世代ネットワーク・アーキテクチャ研究の一つ試みとして、超大規模システムの不確実性に対応できるダイナミックなネットワークを実現するため、システムとしてのネットワークのロバスト性および自律性を獲得することが目的となる。新世代ネットワークにはロバストなネットワークの制御および自律システムの構築が重要な要因である。例えば、災害に対応するNWGNの実現に対して意義がある、災害対策の一つとしての強いネットワークの構築はネットワーク・システムのロバスト性を獲得しなければならない。

#### 2.1 生命システムのロバスト・メカニズムに学ぶ情報ネットワークの研究内容

具体的に、次の内容を展開している。

##### (1) ロバストな情報システムによるネットワークの制御

インターネットでパケット(packet)の遅延から輻輳が発生する場合にはロバスト性を実現するために動的な制御によるダイナミックなネットワーク・プロセスは重要な役割になる。ネットワーク制御については、ネットワーク・ダイナミックスのメカニズムは不可欠である。

##### (2) 自律性を持つ分散システム構造の創出

自律システム設計の場合には、上記のロバストなネットワークが基礎になると、自律性を持つ分散システムの構造を設計する。ここで、生命システムから抽取した情報ネットワーク・モデルの仕組みは役立つことができるだろう。

#### 2.2 生命システムのロバスト・メカニズムに学ぶ情報ネットワークの構築の方法論

自然から工学への方法論についての考え方の出発点は、生命システムの情報ネットワークに対して、概要的に次の三つ点でまとめる：

(1) どのような優れた特徴・性能を持っているのか (例えば、安定性、ロバスト性)

<sup>†</sup> 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  
National Institute of Information and Communications Technology, Kobe Research Laboratories, Kobe  
Advanced ICT Research Center

ど).

(2) 情報学の立場からこの性能を支持するメカニズムは一体何なのだろうか.

(3) 上記の内容に基づいて, どのような形でこれに学んで斬新な情報ネットワークの構造を創るのか[3, 4, 5].

これらの問題を解決することは本研究の基礎である.

本研究の方法論(図1で示された)の核心は, 生命システムの情報ネットワークと通信システムのダイナミクスを比較し, 現象論での考査から数学的な解析によって, 生命システムの情報ネットワークを設計する.

具体的に言えば, いままで本研究の研究結果から得たネットワークはフィードフォワード・フィードバックから構成されたロバストな非線形型ダイナミック・ネットワークであり, またこのネットワークによってネットワーク・ロバスト性に二つ決定的なファクター(ロバスト性の開始時間と振幅精度を決定する非線形型ダイナミックの状態)を発現した. この非線形型ダイナミック・ネットワークに基づいて, ロバストなダイナミック・ネットワークにおける新しい制御理論の枠組みを探索している.

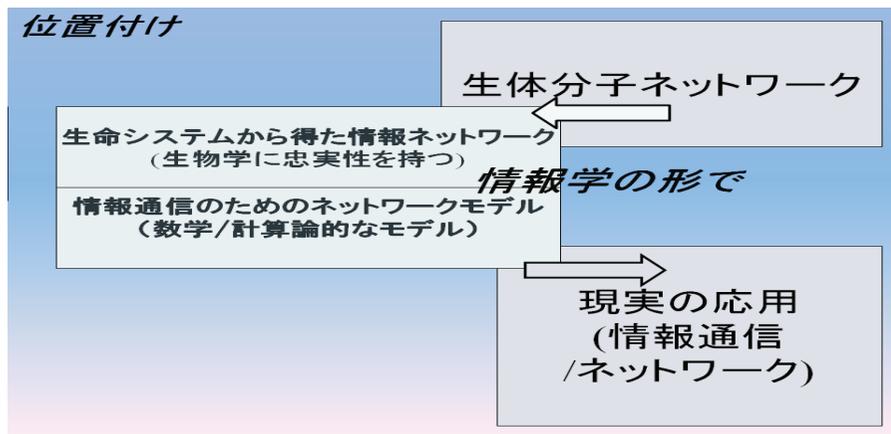


図1 方法論の要点

科学事実から確認されたシグナル伝達ネットワークは, 生命システムの情報ネットワークであり, 自然に存在している. このような生命科学から裏付けた情報ネットワーク構造の基礎になる. 例えば, 酵母周期における CDK(cyclin-dependent kinase)・cyclin パスウェイのサイクリン(cyclin いわゆる cln)信号と TCP(Transmission Control Protocol)の輻輳ウィンド・サイズ(Congestion Window Size, cwnd)信号を比較して, Cln2

の周期信号の周期信号からヒントをもらった. 一つ応用の例としての TCP ダイナミックに対して生命システムのシグナリング・パスウェイ・メカニズムに学んで, 斬新な TCP ダイナミックにおけるネットワーク・モデルを設計し, この着想に基づくロバストなネットワーク TCP 制御の新技术を提案し, シミュレートした. 本研究で, 二つ新しい TCP 制御方法を提案した:

- 酵母に学ぶ TCP 輻輳制御方法 (輻輳ウィンド・サイズや待ち行列遅延および RTT(Round Trip Time)時間の変数で) [5, 6, 7],
- 大腸菌熱ショック反応に学ぶ TCP 輻輳制御方法(輻輳ウィンド・サイズと RTT 時間の変数で).

輻輳制御の性能について, 一定的な優れた便利性を理論的に示すことができた.

待ち行列遅延の同定不要な TCP 輻輳制御器を設計し, ミクロ・ダイナミクス面での長所の保持とともに, マクロ・ダイナミクス面と融合し, 数学モデルだけより現実的な(real world oriented)手段になる可能性を導き出した. これはネットワーク・アーキテクチャの再構造技術に対して, TCP へ応用の形で生命システムのロバスト性をネットワーク・アーキテクチャに反映される. さらに, ネットワーク上で通信量など性能を保障できるロバストなネットワーク TCP 制御技術の基盤を創ることに努力している.

### 3. 生命システムのロバスト・メカニズムに学ぶ情報ネットワークの研究のフイージビリティ・スターディ

フイージビリティ・スターディは三つ主な方面で展開している:

- ロバストな生命システムの情報ネットワーク,
- ダイナミクス・ネットワークにおけるロバスト性,
- 新しい生物に学ぶ TCP (bio-inspired TCP) の提案.

#### 3.1 ロバストな生命システムの情報ネットワーク

大腸菌(E.coli)熱ショック反応(Heat Shock Response, HSR)における細胞シグナリング・ネットワークは生命システムのロバストなネットワークの一つの例である[8]. 現象で熱ショック発生したら, HSR パスウェイが対応する. そして, 熱ショックに対して, タンパク質折り畳みができるメカニズムは生化学反応のプロセスである. 新しい通信の情報ネットワークを設計するため, HSR シグナリング・ネットワークに関するバイオインフォマティクスのモデルとそれに応じるシミュレーションを行った. 情報学の立場から見ると, システムが一定的な機能を守るという概念で情報モデルの設計は必要になる. これに関する本研究の用務は, 計算論的なモデルを設計し, ロバスト性における定量的なプロセスをコンピューター上で精密的に再現され(biology in silico), この構造で安定性とロバスト性の状態を調べて, さらに数学の要因はその方

程式で表現され、分子生物学の証拠をもつての追試によって解析することが重要なことである。

### 3.2 ダイナミクス・ネットワークにおけるロバスト性

ネットワーク制御のメカニズムについては、根本的にフィードバックを着手して、情報ネットワークのダイナミクスを定量的に解析し、複雑システムとしてのシグナル伝達ネットワークをサイエンスの手法で観察する。

ロバスト性(Robustness)の定義:

ロバスト性は、環境変動に対してシステムの機能を維持・回復するメカニズム・属性・特徴・性質と言われる。

ダイナミクスからロバスト性を確保されるのか、次の諸要因:

- 正のフィードバック
- 負のフィードバック
- フィードフォワード(Feedforward)

からどのように構成されるネットワーク制御のシステム構造から解釈する。例えば大腸菌の熱ショック反応に  $\sigma 32$  のゆらぎに対して、ランダム性を含むネットワークのシミュレーションをした。これに関する安定性について、Cell Illustrator® Professional Version 3 によるシミュレーションの結果は、次の図(図2)に示される。

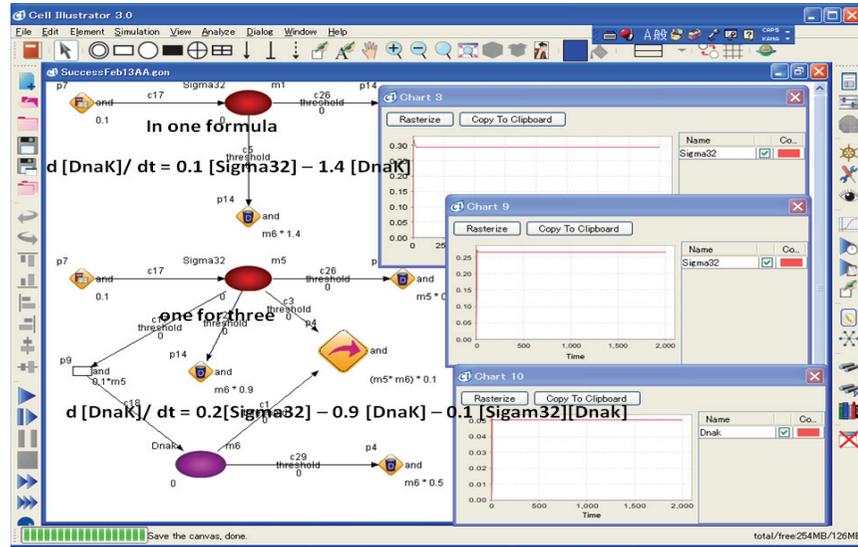


図2(a) HSR に学ぶ情報ネットワーク・モデル(ノイズなし)

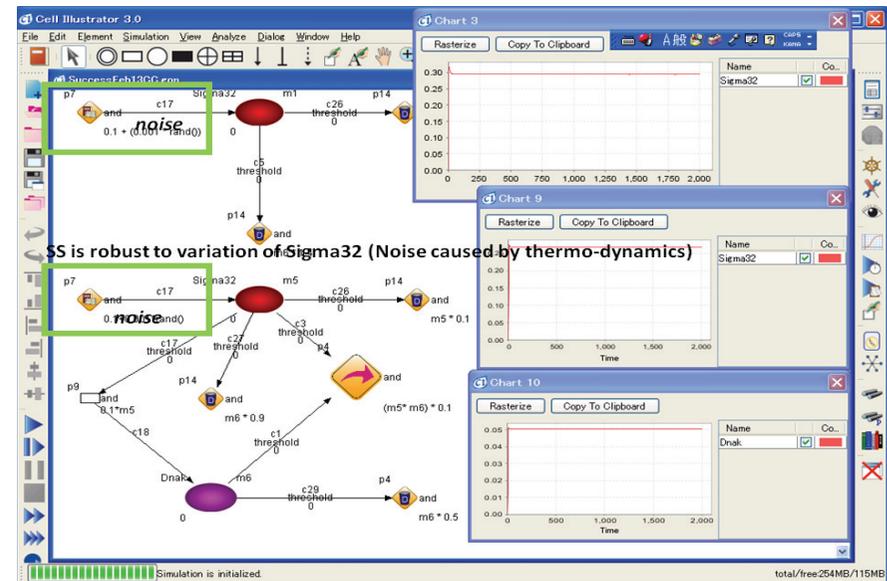


図2(b) HSR に学ぶ情報ネットワーク・モデル(ノイズある)

細胞シグナル伝達ネットワークの安定性、ロバスト性などの特徴を系統的に解明するため、基礎としてのシグナル伝達ネットワークの定式化およびこれに応じるネットワーク構造の解析は欠かせない。モデル生物である分裂酵母 (Schizosaccharomyces pombe) と出芽酵母 (Saccharomyces cerevisiae) から、酵母細胞周期シグナル伝達ネットワークの定式化によって、サイクリンを中心としての細胞生殖プロセスにおける生命システムの安定性とロバスト性を分析できる。情報ネットワーク学によって、細胞シグナル伝達サイクリンの一つ種類である Cln2 は、細胞分裂に伴って変化する曲線が TCP の時間ダイナミクスと傾向が一致する現象を発見しました[5]。サイエンスの立場での観察から、Kurata et al によるモデル化された大腸菌熱ショック反応のシグナリング・ネットワークにおける分子信号調整メカニズムは、センサ・フィードフォワード/フィードバックを含む[8]。これは細胞の自己制御に関する優れた能力を示された。

### 3.3 新しいTCPの提案

TCP ダイナミクスの汎用型マスター方程式[5]のアイデアは

$$\text{TCP dynamics(Bio-inspired-TCP)} = \text{既存の TPC} + \text{生命(生物)に学ぶ}$$

というものになった。そして、前記のロバスト性メカニズムに学ぶ斬新なネットワーク・ダイナミックのモデルを設計し、情報学で定義した動力学構造のシミュレーションによって、輻輳ウィンドウ・サイズ  $w(t)$  のモデルを提案した[5, 6, 7]。TCP を応用の対象としてのロバスト性を考察するため、TCP 定式化およびマスター方程式を導出し、最適性理論の手法による平衡点分析を行った。これからも TCP 定式化とマスター方程式に基づいて、より効率的な輻輳制御方法を探るために、パケットレベルでの新しいネットワーク制御器の設計への道を開きたい。

メゾスコピック(中間視的, mesoscopic)観点でマクロとマイクロ・ダイナミクスを比較し、メゾスコピックな観点で TCP ダイナミクスから獲得したネットワーク・制御器の設計図の完成は重要な一歩である。情報通信ネットワーク全体の”重層性”をみると、新世代ネットワークビジョンでの“複雑性を隠蔽したシンプルネットワークの実現”<sup>a</sup>の課題に向けて、マクロとマイクロ・ダイナミクスを融合する新世代ネットワーク・アーキテクチャの設計では、ロバストなネットワーク制御は自律性を持つ分散システム構造の基礎になる。

#### 4. 生命に学ぶ情報ネットワークの安定性の分析

本節は、生命に学ぶ情報ネットワークの安定性について、ネットワークのパラメーターに対する安定性の状況と表わされている。ここで、ひとつ主な方面としての安定性を維持できるメカニズムのパラメーターの考査を述べよう。

##### 安定性の概念：

本文に、安定性は、一般的にシステムの状態は一定的な値に達したら、変化なく続いている状態のことを指す。そして、ネットワークを対象として取り扱う場合はネットワークの状態における安定性を示すのである。

##### シグナル伝達ネットワークにおける安定性：

入力・出力を含むノードの濃度の数値と生化学反応の定数値はパラメーターとすると、生化学反応の定数値と入力の濃度の変化に対するネットワークのあるノードのパラメーターが変わらないという現象あるいは属性・特性は、シグナル伝達ネットワークにおける安定性だと言えるだろう。

細胞のシグナル伝達ネットワークについて、Ferrell et al は Mos-p・MAPK パスウェイの安定性の研究成果[9]が注目すべきだ。このパスウェイ・ネットワークの状態では、一定的な範囲内に遷移するプロセスは「安定な定常状態」という特徴を持つ[9]。

情報通信の領域について、一つの例として、TCPダイナミクスからのニーズが

ある。これについて、K. Jakobsson et al は、TCP Vegas に対して  $\alpha$  という定数の同定は未可決問題と指摘された[10]。また、A. Tang et al は一様分布(uniform distribution)とランダム変数で  $\alpha$  定数を処理された[11]。

細胞シグナルパスウェイからヒントをもらって、情報ネットワークの安定性を調べ、このネットワークに対して、線形系  $W$  を定義する。

$$W(X, S, U, Y, Q)$$

ここに、

$X$  : 系への入力ベクトル、

$Y$  : 系からの出力ベクトル、

$S$  : 系の状態ベクトル、

$U$  : フィードバック・ベクトル、

$Q$  : パラメーター・ベクトル。

系の記述は以下のように与えられる。

$$d/dt(S) = A S + B X$$

$$Y = C S$$

ここに、 $A, B, C$  は行列である。

上記の変数  $X, Y, S, U, Q$  はすべてベクトルである。

安定性の定義については、系の状態を取り扱う。ここで、以下の条件を満たす関数  $G(\cdot)$  によって安定性を定式化する。

$$S = G(S, E)$$

ここに、 $E$  は系が受ける外乱である。

$S$  は  $S(t)$  ネットワークが安定性の状態にいる時に

$$d S(t) / dt = 0,$$

そして、この条件を満たすよう、ネットワーク制御器を設計する。

生体自律神経系を参照し、ロバストなネットワーク制御に基づく自律性を持つ分散システム構造を調べて、自律神経システムと自律型ネットワークの比較を行う：

a <http://nwg.nict.go.jp/report/NWGN-Vision-NICT-Pamphlet-V2-2009.pdf>  
<http://nwg.nict.go.jp/report/NWGN-Vision-NICT-Report-V1-2008.pdf>

心拍 (心電図) 対(vs.) 送信性能(QoS)  
 血流 (血管) 対(vs.) 情報量(通信路)  
 細胞シグナル伝達の  
 ダイナミクス(受容体を含む) 対(vs.) 分散システム構造

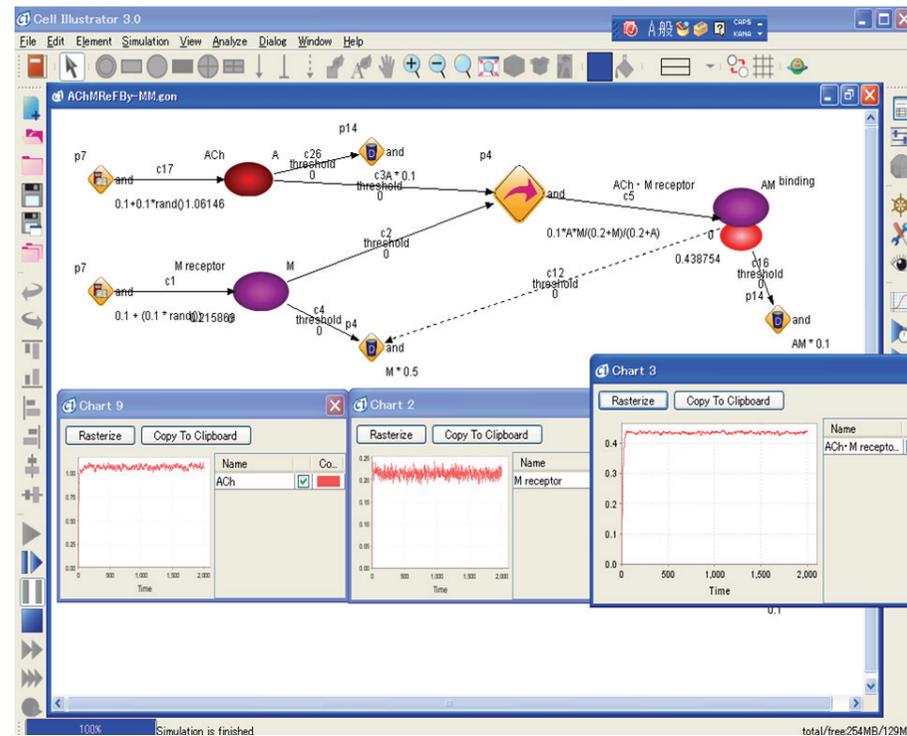


図3 (副)交感神経に学ぶ情報ネットワークのシミュレーション

このように対応しながら、分子生物学で解析された(副)交感神経におけるシグナル伝達メカニズムはどの部分がなぜ自律分散システムの設計へ役に立つだろうか？これは技術上での課題だろう。複雑性システムの立場から神経細胞のレベルで、ネットワー

ク再構造の自己組織化原理を探究し、分子生物学の科学事実に基づいて、ひとつ例としての P2P ネットワークを対象にするネットワーク・グローバルなダイナミクスのメカニズムを解明する。生体自律神経系における情報ネットワークのモデル化をする、この情報ネットワークの動力学的特性を解析することが可能になる。生体自律神経系を参照し、自律性を持つ分散システム構造からヒントをもらった。そして、(副)交感神経に学ぶ情報ネットワーク・モデルに対する Cell Illustrator® Professional Version 3 によるシミュレーションを行った結果は図 3 に示される。これから、生体自律神経系における情報ネットワーク、生命システムの安定性を反映したネットワーク・アーキテクチャの中に自律性のメカニズム、それに応じる分散システム構造および P2P ネットワーク/ネットワーク仮想化への応用を期待している。

## 5. おわりに

生命に学ぶ新世代ネットワーク・アーキテクチャの探索の一つ試みとして、生命システムのロバスト性に学ぶ新世代ネットワーク・アーキテクチャの方法論を提案し、これに関するフィージビリティ・スタディを紹介した。これに応じるネットワーク制御器における安定性の分析について、生命システムのシグナリング・パスウェイ・メカニズムに学ぶダイナミックのネットワーク・モデルを設計し、この着想に基づく安定性を持つネットワーク制御の新技术を提案し、シミュレートした。アーキテクチャ・再構造技術に対して、副交感神経に学んでシグナル伝達ネットワークの定式化による提案した複雑システムのメカニズムの安定性を解析した。ネットワークは非線形の状態方程式で表現されれば、非線形システムとしてのネットワーク・ダイナミクスを解析するため、微分幾何学の数学手段を導入することが必要になる。

次のステップは、“諸システムをひとつのシステム”(system of systems)として統合する方法論で、安定性、ロバスト性を持つ情報ネットワーク構造によって、新世代ネットワーク・アーキテクチャに関する新理論体系の構築の基礎を着手することである。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ように、新たなネットワーク制御手法を創り出し、神経細胞のシグナル情報伝達に学ぶネットワーク仮想化モデルとオーバーレイ・ネットワーク[12]の自己再構造モデル[13]の融合を目指している。

**謝辞** 本研究の実行に、新世代ネットワークと情報通信ネットワークについてご助言とご協力頂いた村田正幸教授、ライプニッツ賢治准教授、若宮直紀准教授および成

b Liu, J.-Q. and Leibnitz, K.: Modeling the Dynamics of Cellular Signaling for Communication Networks, in Xiao, Y. and Hu, F. eds., Bio-inspired Computing and Communication Networks, Auerbach Publications, CRC Press (2009).

瀬誠主任研究員、分子生物学についてご助言とご協力頂いた大岩和弘所長、平岡泰教授、小嶋寛明主任研究員、宮野悟教授、松野浩嗣教授、長崎正朗助教、李晨研究員、倉田博之教授、近重裕次主任研究員、丁大橋主任研究員および阿久津達也教授に、謹んで感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) Aoyama, T.: A New Generation Network: Beyond the Internet and NGN, IEEE Communications Magazine, Vol.47, No.5, pp. 82-87 (2009).
- 2) 平原正樹: 新世代ネットワークの実現に向けて-AKARI プロジェクト, 情報処理学会会誌, Vol.49, No.10, pp.48-53 (2008).
- 3) 西尾 章治郎, 村田 正幸: 生体に学ぶ情報システム構築技術, 電子情報通信学会誌「学会 90 周年記念特集号」, Vol. 90, No. 5, pp. 363-369 (2007).
- 4) 若宮直紀, ライブニツ賢治, 村田正幸: 生物の適応性・頑健性に学ぶ自己組織型ネットワーク設計手法・制御技術, 電子情報通信学会誌, vol.91, No.10, pp. 870- 874, (2008).
- 5) 劉健勤, ライブニツ賢治, 村田正幸: 情報ネットワーク学に見る細胞シグナル伝達と TCP 輻輳制御の情報処理メカニズムの比較, 情報処理学会研究報告, Vol.2008-MBL-46), No.94, pp.75-82 (2008)
- 6) Jian-Qin Liu, Kenji Leibnitz, and Masayuki Murata, Extended formulation of TCP Vegas inspired by a controller structure of cell cycle pathway networks, 情報処理学会研究報告, vol. 2008-MPS-72, pp. 103-106, (2008).
- 7) Jian-Qin Liu, Kenji Leibnitz, and Masayuki Murata: Nature-based information networking: On exploring robustness in TCP inspired by cellular signaling, in Proceedings of 2nd Workshop on Computing and Communications from Biological Systems: Theory and Applications (CCBS), (Awaji, Hyogo, Japan), November 2008.
- 8) Kurata, H., El-Samad, H., Iwasaki, R., et al., Module-based analysis of robustness tradeoffs in the heat shock response system, PLoS Computational Biology, Vol.2, No.7, pp.e59:0663-0675 (2006).
- 9) Ferrell Jr., J. E. and Machleder E. M.: The biochemical basis of an all-or-none cell fate switch in *Xenopus* Oocytes, Science, Vol.280, pp.895-898 (1998).
- 10) Jacobsson, K., Andrew, L.L.H., Tang, A., et al: An Improved Link Model for Window Flow Control and Its Application to FAST TCP, IEEE Transactions on Automatic Control, 2009
- 11) Tang, A., Wei, D., Low, S.H., and Chiang, M., Heterogeneous Congestion Control: Efficiency, Fairness and Design, Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP), Santa Barbara, CA, 12-15 Nov. 2006, pp.127-136.
- 12) Leibnitz, K., Wakamiya, N., Murata, M.: Biologically-Inspired Self-Adaptive Multi-Path Routing in Overlay Networks, Communications of the ACM, Vol.49, No.3, pp.62-67 (2006)
- 13) Liu, J.-Q.: Innovating the Robust Networks Inspired by the Nature, Proc. of the 11<sup>th</sup> International Conference on Humans and Computers (HC'2008), pp.31-36 (2008)