

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月11日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009～2011

課題番号：21240004

研究課題名（和文） 生物システムのダイナミクスに学ぶ持続発展可能な
情報ネットワークの構築手法研究課題名（英文） Designing a sustainable information network based on the dynamics
of biological systems

研究代表者

村田 正幸（MURATA MASAYUKI）

大阪大学・大学院情報科学研究科・教授

研究者番号：80200301

研究成果の概要（和文）：

ISPの空間的特性として、高いモジュール性を有すること、および、回線容量分布がZipf則に従うことを示した。この空間的特性により、遅延のばらつきを抑制し、輻輳の波及を抑制する時間的特性を得られることを明らかにした。また、空間的・時間的非平衡性を前提とした回線容量増強手法を提案し、回線容量分布のZipf則を導きつつ収容可能なフロー量を増大することを示した。

研究成果の概要（英文）：

We showed that ISP topologies have a modular structure and Zipf law in the link capacity distribution. We then reveal that such the spatial characteristic leads to the temporal characteristic that suppresses a variation of packet delay and a spread of traffic congestion. We finally present a method to enhance the link bandwidth based on the spatial characteristic and the corresponding temporal characteristic, and show its effectiveness via computer simulations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	10,900,000円	3,270,000円	14,170,000円
2010年度	10,300,000円	3,090,000円	13,390,000円
2011年度	8,500,000円	2,550,000円	11,050,000円
年度			
年度			
総計	29,700,000円	8,910,000円	38,610,000円

研究分野：情報ネットワーク

科研費の分科・細目：情報学、計算機システム・ネットワーク

キーワード：ネットワーク設計、生物システム、持続成長、環境変動、べき則

1. 研究開始当初の背景

インターネットは産業社会や市民生活に急速に浸透し、社会基盤として重要な役割を担うようになってきた。しかし、同時に管理の複雑さや脆弱さなどその限界が指摘されるようになってきている。そのため、コンピュータによる情報処理とネットワークによる情報流通からなる情報基盤を根幹から見直し、現状の限界を克服する新しいネットワークアーキテクチャの確立の必要性が国の内外を問わず認識されつつある。

我々は、これまでに発展してきた既存の情報ネットワーク学分野に閉じることなく、先端科学技術の融合、すなわち、先端的な科学の知見に基づいて情報ネットワークの新しい設計手法の構築に関する取り組みを行ってきた。特に生物の自己組織化に学ぶことによって、スケラビリティや頑強性など従来の既存の情報ネットワーク分野における設計手法では達成できなかった特性を具備することに成功しつつある。

これらの研究活動を通じて、我々は生物学者、物理学者、応用数学者らに知己を得て、単に生物に学び、その数理的構造を応用するだけでなく、その根幹となるシステムダイナミクス的重要性を認識するに至った。すなわち、生物システムは、そのネットワーク形状に関する空間的適応性とさまざまな変動に対する時間的適応性を同時に持つことによって、常に非平衡状態にあるにも関わらず環境適応性を有している。本課題では、このような特性を情報ネットワーク上を流れる情報ダイナミクスのモデル化に適用し、新しい情報ネットワークを構築するための設計論の根幹として採用する。それによって、膨大で多様な情報の処理・伝達を可能とし、利用の多様化・偏在化に適応して成長していく、持続発展可能な情報ネットワークアーキテクチャの設計論を展開することを目的とする。

2. 研究の目的

情報ダイナミクスの変化やそれに適応しつつ規模拡大に対応できる、持続発展可能な情報ネットワークの設計、評価、および構築手法に関する理論的枠組みを明らかにする。

3. 研究の方法

空間的・時間的に常に非平衡にあることを前提とした情報ネットワークシステムの設計論に関する研究を推進する。すなわち、情報ネットワークの形状に関する構造的特徴だけでなく、情報流にも同時に着目し、その上でそれらの時間的変動も考慮したネットワ

ーク設計手法に関わる問題に取り組む。具体的には、以下の3つの研究課題を設定する。

研究課題1：情報ネットワークシステムにおける空間的特性の解明

我々は、今までの研究によって、現在の情報ネットワークはべき則に従うが（ネットワークの各ノードにおけるリンクの接続数が k 本となる頻度が $k^{-\gamma}$ (γ は定数) に比例する、すなわち結合分布がべき則 (Power Law) に従う)、にも関わらず、広く用いられている BA (Barabasi-Albert) モデルとはまったく異なる特性を有することを、ISP を対象として測定によって明らかにした。これはネットワークの歴史的経緯や人の手による設計が要因と推測しているが、それを解明するために、べき則に関する他分野の研究成果を参考としつつ、特に情報ネットワークの構造的特徴として、BA モデルにはない回線容量、さらにはトラヒック量との関係を明らかにする。

研究課題2：情報ネットワークシステムにおける時間的特性の解明

研究課題1の成果によって得られた空間的モデルに基づいて、トラヒックがネットワークにおいてどのような振る舞いをするか、どのように制御すればよいかを明らかにする。

研究課題3：空間的・時間的非平衡性を前提とした持続的成長可能な情報ネットワーク設計手法

研究課題1、2の成果によって現状の情報ネットワークの空間的・時間的特性の関係に基づいて、望ましい情報ネットワークの構造的設計手法（トポロジー設計、回線容量設計など）、およびトラヒック制御手法（経路制御、輻輳制御など）を明らかにする。

4. 研究成果

情報ネットワークシステムにおける空間的特性の解明に関して、まず情報ネットワークの構造的な特徴として通信ネットワーク固有の特徴であるリンクの回線容量に着目し、その特性を明らかにした。

国内の商用 ISP におけるバックボーンネットワークの回線容量分布を求めた。その結果を図1に示す。図1において、縦軸は回線容量、横軸はその順位 (ランク) を示している。この図を見ると、物回線容量分布の傾きはランクが上位 40 程度までは -1 の Zipf 則に従うことがわかる。

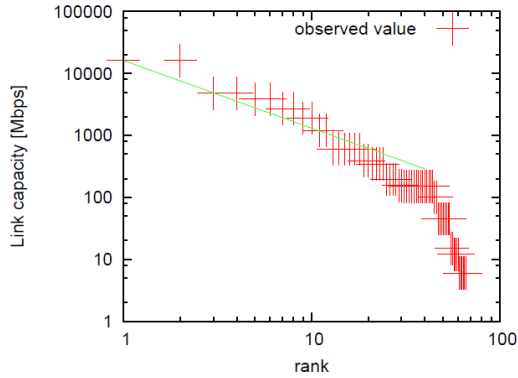


図 1: 国内 ISP の回線容量分布

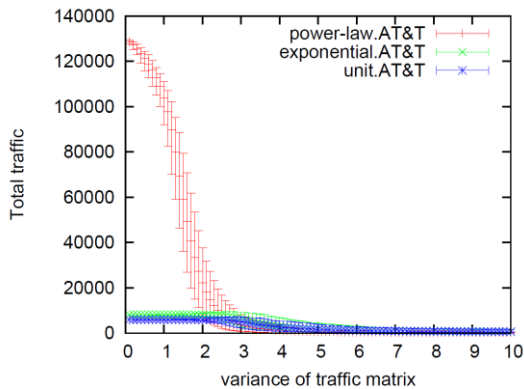


図 2: 収容可能なトラフィック量: AT&T トポロジー

そこで、回線容量分布が Zipf 則であることの理由を明らかにすることを目的として、回線容量分布が指数分布である場合、回線容量がすべて等しい場合、回線容量分布が Zipf 則である場合のそれぞれに対して、ネットワークが収容可能なトラフィック量を求めた。その結果を図 2 に示す。収容可能なトラフィック量を求めるにあたって、トラフィックマトリクスを対数正規分布で与えた。図 2 の横軸は、対数正規分布の分散値であり、0 から 10.0 まで 0.1 刻みで変化させている。また、それぞれの分散値に対して対数正規分布を用いてトラフィック需要を定め、回線容量の制約下でトラフィック需要をスケールアップする。そのときのトラフィックマトリクスの総和を収容可能なトラフィック量として定義し、縦軸としている。信頼区間 95%をあわせて示している。なお、従来研究において、インターネットの ISP のトラフィック需要のモデル化がなされており、そこではトラフィック需要が対数正規分布でモデル化されることが指摘されている。以上のことから、現実的なトラフィック需要下では、回線容量分布が Zipf 則に従うことによって、収容可能なトラフィック量が増加することが明らかとなった。また、分散値がおおよ

そ 2 までは、Zipf 則に従う回線容量分布によって収容可能なトラフィック量が増大することから、トラフィック需要の変動に対しても頑強性を持っていることが明らかとなった。

次に、情報ネットワークの時間的特性として、次数分布がべき則に従う ISP ルーターレベルトポロジーにおけるエンドホスト間フロー制御機構がもたらすトラフィックダイナミクスを評価した。

従来研究では、エンドホスト間のフロー制御がインターネットトラフィックにおける統計的性質を生み出す要因になっていることが示されている。しかしながら、これらの研究では小規模で単純なトポロジーを対象としている。そこで、BA モデルにより生成したトポロジー、および ISP ルーターレベルトポロジーがパケット転送遅延に与える影響を評価し、さらにトポロジーが持つ構造の違いに着目することで、トポロジーが持つ構造とフロー制御の相互作用がパケット転送遅延分布、各リンクの待ち行列長の変動の規模に与える影響を評価した。計算機シミュレーションの結果、エンドホスト間のフロー制御として TCP を用いた場合には、ストップアンドウェイトと比較してエンドホスト間の遅延が増大することを示した。図 3 にその結果を示す。図 3 の横軸はエンドホスト間の転送遅延を表し、縦軸は横軸の値を超える転送遅延の出現確率を表している。

また、時間変動の大きさを表す指標であるハースト値により評価を行い、TCP を用いることで待ち行列長の変動が大きいリンクの出現確率が増すことが明らかになった。図 4 にその結果を示す。縦軸は変動の大きさを表し、横軸は降順に整列したときの順位を表している。加えて、また、TCP にもとづくフロー制御では、ネットワーク負荷が小さい場合は待ち行列長が大きく変動するリンクが全体の 39%である一方、ネットワーク負荷が大きい場合には、ボトルネックリンクでは待ち行列長の変動は小さくなるにもかかわらず、全体の約 50%のリンクで待ち行列長が大きく変動することが明らかになった。

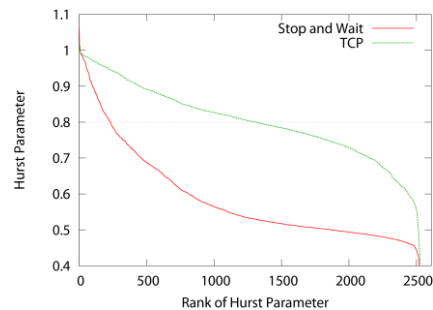


図 3: AT&T トポロジーにおける転送遅延の分布

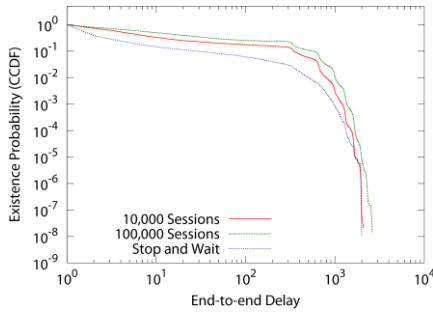


図 4: AT&T トポロジーの待ち行列長の変動の大きさの分布

次に、BA モデルにより生成したトポロジーおよび ISP ルーターレベルトポロジーがキュー長の時間変動に与える影響を明らかにする。トポロジーが持つ構造の違いに着目することで、トポロジーが持つ構造とフロー制御の相互作用が各リンクの待ち行列長の変動の規模に与える影響を評価した。その結果、各種 ISP トポロジーは BA モデルにより生成したトポロジーに比べて高い局所連結性を持ち (図 5、図 6 参照)、待ち行列長の変動が大きいリンクの出現を抑制する働きを持つことを明らかにした (表 1)。ここで高い局所連結性を持つとは、地域ごとのモジュール内のルーター間が密に連結された構造を有することを指す。ISP トポロジーが持つ局所連結性の高い構造により、ISP トポロジーにおいてはボトルネックリンクから支流のリンクへと待ち行列長の変動が伝播するトポロジー構造を有することを示し、ISP トポロジーのモジュール構造が待ち行列長の変動を抑制することを示した。

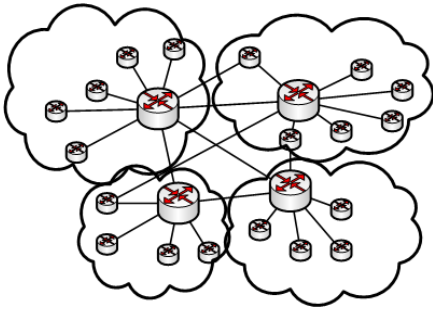


図 5: BA トポロジーの空間的構造

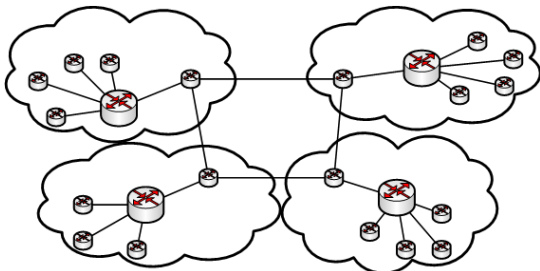


図 6: ISP トポロジーの空間的構造

表 1: ISP トポロジーの局所連結性と待ち行列長の変動の大きいリンクの出現確率

トポロジー	局所連結性	変動の大きいリンクの割合
AT&T	0.68	0.5
BA AT&T	0.32	0.88
Sprint	0.66	0.53
BA Sprint	0.3	0.81
Verio	0.7	0.46
BA Verio	0.25	0.77
Telstra	0.74	0.46
BA Telstra	0.29	0.78

次に、情報ネットワークの空間的特性を解明するために、モジュール構造の発生要因とフロー量の関係を明らかにした。まず、モジュール性の異なる複数のトポロジーを対象に評価した結果、モジュール性の高い構造がリンクのフロー量変動を抑えること、および、ネットワークスループットとフロー量変動の抑制の両立を目指した結果、フロー数分布の一部にべき則の性質が観察されることを示した。次に、トポロジー構造の違いがリンクを経由するフロー量の分布に与える影響をシミュレーションにより評価した。評価の結果、ISP トポロジーが有する構造的特徴である高いモジュール性は、回線の総物理距離の最小化の過程で生じることが明らかにし、回線の総物理距離が減少するとともにフロー量分布が Zipf 則となることを示した。ただし、回線の物理距離が最小となるトポロジーを構築すると、回線容量制約によって収容可能なトラヒック量が減少することも明らかとなった。以上のことから、ISP のルーターレベルトポロジーの空間的特性は、回線容量制約下において収容可能なトラヒック量を最大化しつつ、回線の総物理距離を最小化することにより得られることがわかった。

上記の研究により得られた知見をもとに、空間的・時間的非平衡性を前提とした持続的成長可能な情報ネットワーク設計手法を提案する。提案に先立ち、まずフロー制御が作用する環境下での回線容量増強時の空間的・時間的非平衡性に関して、計算機シミュレーションによる評価をおこなった。回線容量が均一な状態を初期状態とし、フロー制御が作用する環境下でネットワークのボトルネックとなるリンクを増強することによって、回線容量の分布が Zipf 則を示し、インターネットで観察される回線容量分布の特徴と一致することを確認した (図 7)。また、BA モデルで生成したトポロジーよりも ISP トポロジーがより多くのトラヒック量を転送することを示した。そこで、時間的特性を考慮した

回線容量増強手法として、空間的特性を決定付けるネットワークのモジュール構造の特性を用いた回線容量増強手法を提案した。提案手法では、各リンクに重みを与え、重みの高い順に回線容量を増強する。回線容量を増強した場合、そのリンクの重みを減少させ、モジュール内でそのリンクと隣接し下層に位置するリンクに重みを分配する。提案手法を用いて回線容量を増強した結果、回線容量分布が Zipf 則に近づくこと、および、フロー制御が作用する環境下でのボトルネックリンクの増強により得られた回線容量分布と特徴が一致することを示した。

以上の結果から、モジュール性の高いトポロジーにおいて本手法に基づいた回線容量増強手法を用いることで、空間的・時間的非平衡性を有する情報ネットワーク構築が可能となることを示した。

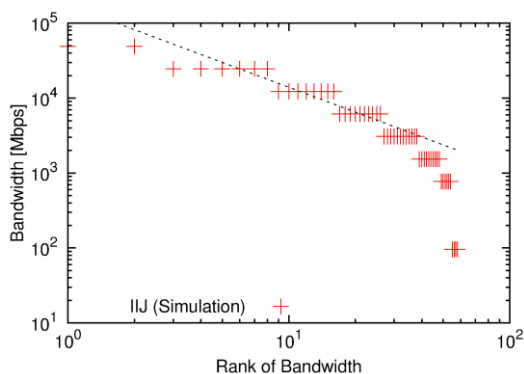


図 7: ボトルネックの増強により得られた回線容量分布: IIJ トポロジー

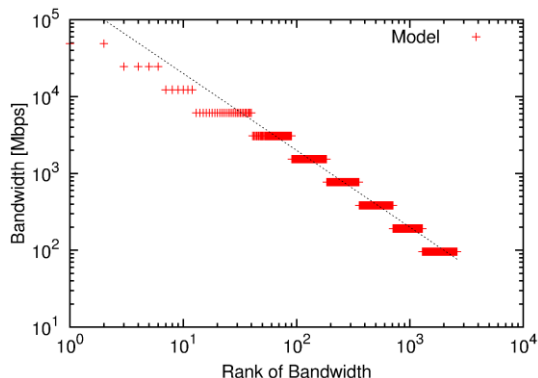


図8: 提案手法により得られた回線容量分布: AT&T トポロジー

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Takahiro Hirayama, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "Dynamics of feedback-induced packet delay in ISP

router-level topologies," IEICE Transactions on Communications. (in press)

- ② Shin'ichi Arakawa, Tetsuya Takine, and Masayuki Murata, "Analyzing and Modeling Router-level Internet Topology and Application to Routing Control," ELSEVIER Computer Communications, Vol. 35, No. 8, pp. 980-992, May 2012.
- ③ Takahiro Hirayama, Shin'ichi Arakawa, Shigehiro Hosoki, and Masayuki Murata, "Models of link capacity distribution in ISP's router-level topologies," International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC), vol. 3, pp. 205-216, September 2011.
- ④ Shin'ichi Arakawa, Naoto Hidaka, and Masayuki Murata, "A modeling method for ISP topologies based on network-cost optimization," International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC), vol. 3, pp. 61-75, September 2011.

[学会発表] (計 14 件)

- ① 秋山紀彦, 滝根哲哉, "ISP ネットワークの構造分析," 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2012-12), vol. 112, pp. 65-70, April 2012.
- ② 荒川伸一, 滝根哲哉, 村田正幸, "通信ネットワークのトポロジー構成のモデル化と性能評価への応用," 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2011-110), vol. 111, pp. 37-42, November 2011. (チュートリアル招待講演)
- ③ 荒川伸一, "情報ネットワークのトポロジー構造がもたらすトラフィックダイナミクス," 電子情報通信学会情報ネットワーク科学時限研究専門委員会, October 2011. (招待講演)
- ④ 平山孝弘, 荒川伸一, 新井賢一, 村田正幸, "トポロジーのモジュール性がもたらす TCP トラフィックのダイナミクス," 新世代ネットワーク時限研究専門委員会 (NwGN2010-39), pp. 15-20, January 2011.
- ⑤ Suyong Eum, Shin'ichi Arakawa and Masayuki Murata, "Self transforming to power law topology for overlay networks," in Proceedings of 3rd International Workshop on the Network of the Future FutureNet III, (Miami, USA), December 2010.
- ⑥ 荒川伸一, "情報通信ネットワークのトポロジー構造がもたらすトラフィックダイ

ナミクス,” 複雑システムのネットワーク科学研究会, 2010年10月18日(招待講演)

- ⑦ Takahiro Hirayama, Shin'ichi Arakawa, Ken-ichi Arai, and Masayuki Murata, “Dynamics of Feedback-induced Packet Delay in Power-law Networks,” in Proceedings of the Fifth International Conference on Systems and Networks Communications (ICSNC2010), pp. 375-380, August 2010.
- ⑧ Shin'ichi Arakawa, Tetuya Takine, and Masayuki Murata, “A failure-tolerant structure in router-level Internet topologies,” 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2010-39), vol. 110, pp. 7-12, July 2010.
- ⑨ 平山孝弘, 荒川伸一, 新井賢一, 村田正幸, “べき則の性質を有するトポロジにおけるフィードバック型フロー制御に起因するパケット転送遅延の評価,” 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2010-38), vol. 110, pp. 1-6, July 2010.
- ⑩ Shigehiro Hosoki, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, “A Model of Link Capacities in ISP's Router-level Topology,” in Proceedings of The Sixth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems ICAS 2010), March 2010.
- ⑪ Takahiro Hirayama, Shin'ichi Arakawa, Ken-ichi Arai, and Masayuki Murata, “Queue dynamics in power-law networks,” in 2nd International Workshop on Sensor Networks and Ambient Intelligence (SeNAI 2009), December 2009.
- ⑫ 細木茂洋, 荒川伸一, 村田正幸, “回線容量分布がルータレベルトポロジの収容トラヒック量に与える影響の評価,” 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2009-84), vol. 109, pp. 43-48, October 2009.
- ⑬ 平山孝弘, 荒川伸一, 新井賢一, 村田正幸, “べき則の性質を有するトポロジにおけるパケット転送遅延の評価,” 電子情報通信学会技術研究報告 (NS2009-82), vol. 109, pp. 31-36, October 2009.
- ⑭ Takahiro Hirayama, Shin'ichi Arakawa, Ken-ichi Arai, and Masayuki Murata, “On the Packet Delay Distribution in Power-law Networks,” in Proceedings of The First International Conference

on Evolving Internet (INTERNET 2009), August 2009.

[図書] (計1件)

- ① Suyong Eum, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, “Topological Robustness of Biological Systems for Information Networks - Modularity,” Book chapter in Bio-inspired Computing and Communication Networks, Y. Xiao and F. Hu (Eds.), Taylor & Francis Group, CRC Press, March 2011.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村田 正幸 (MURATA MASAYUKI)
大阪大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：80200301

(2) 研究分担者

滝根 哲哉 (TAKINE TETSUYA)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00216821

荒川 伸一 (ARAKAWA SHINICHI)
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：20324741