

研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2006-2008
 課題番号：18200004
 研究課題名（和文） べき乗則に従うトポロジーを有する情報ネットワークのための新しい制御方式の確立
 研究課題名（英文） Network control methods for information networks having power-law degree distribution
 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：

本研究では、結合分布がべき乗則に従う情報ネットワークに適したネットワーク制御方式を考案し、有効性を示した。特に、ネットワークの形状に関する構造的特徴のうち、どのような特性がシステムの頑強性を生み出すのかについて研究を進め、トラヒック制御として特に経路制御への適用手法について成果を挙げた。更にオーバーレイネットワークにおけるキャッシング制御方式についてファイル可用性が向上することを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	10,100,000	3,030,000	13,130,000
2007年度	11,000,000	3,300,000	14,300,000
2008年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
年度			
年度			
総計	29,900,000	8,970,000	38,870,000

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：べき乗則、高信頼ネットワーク、オーバーレイネットワーク、ネットワーク設計

1. 研究開始当初の背景

近年、遺伝子代謝ネットワークや神経回路網、送電網、知人関係、論文引用関係、WWWのリンク関係、インターネットのルータ間接続関係などさまざまな分野におけるネットワークの普遍的な特性として、べき乗則が「発見」されている。これらのネットワークにおけるトポロジー特性の理解は、生物の進化の解明、安心・安全な社会インフラの構築、さらには良好な社会コミュニティの形成に至るまで、生物学、工学、さらには経済学、社会学など

における学問領域のさらなる発展の可能性を持つものである。そのために現在、経済学、社会学、物理学、数学などの各分野において、べき乗則を有するネットワークに関する研究が活発になされている。しかし、現状においてはそれらの研究成果の大半はトポロジー形成に着目するものである。

一方、インターネットにおけるネットワーク制御方式については、これまで、その有効性の評価・検証のために、タンデム型の簡単なモデルやノードにおけるリンク接続数が指数的な分布を持つランダムネットワーク

モデルが多く用いられてきた。インターネットトポロジー (AS レベル、ルータレベル) もべき乗則を持つことが指摘されるようになって、そのようなネットワークモデルを用いた評価も徐々に行われつつあるが、べき乗則に従うインターネットに適したトラフィック制御方式、ネットワーク設計論は何かという根源的な問いには答えられていないのが現状である。

2. 研究の目的

1. に述べた研究背景にもとづき、本研究では、べき乗則に従うネットワークに関する数多くの関連分野の研究成果の知見に基づきつつ、さらに、ノードやリンクの処理能力、それらとトポロジーとの相関関係など他の研究では対象とされていないインターネット固有の特性を考慮したネットワーク制御方式を考案していく。具体的には、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乗則 (Power Law) に従うトポロジーを有する情報ネットワークにおけるネットワーク制御方式および設計論を確立し、現実のインターネットに適した効率的かつ信頼性の高いネットワーク構築を可能とする。

3. 研究の方法

本研究では、結合分布がべき乗則に従うトポロジーを有する情報ネットワークにおけるネットワーク制御方式を確立するために、以下の4つの研究課題を設定する。

- 1) べき乗則に従うインターネットにおける障害に強い経路制御方式の確立
- 2) べき乗則に従うインターネットにおける効率的なエンド間輻輳/フロー制御方式の確立
- 3) べき乗則に従うオーバーレイネットワーク制御方式の確立
- 4) べき乗則に従う情報ネットワークを対象としたネットワーク設計論の確立

近年、インターネットも AS レベル、ルータレベルのそれぞれにおいて、そのトポロジーがべき乗則に従うことが示されており、課題1、2においてはべき乗則に従うトポロジー特性を前提として、それに適したネットワーク制御 (経路制御、輻輳制御及びエンド間フロー制御) 方式を確立する。一方、課題3においては、最近急速にサービスが展開されつつあるオーバーレイネットワークに着目する。そのひとつである P2P (Peer-to-Peer) ネットワークもピア (P2P ネットワークにお

るノード) 間の論理的なトポロジーはべき乗則に従うことが明らかになっている。すなわち、べき乗則に従う物理的なインターネット上で、べき乗則に従う論理的なオーバーレイネットワークが展開されていることになる。課題3では、べき乗則に従うインターネット上で、効率的かつ信頼性の高いオーバーレイネットワークの構成方法、制御方式を確立する。さらに課題4においては、以上の研究課題の成果をもとに、効率的かつ信頼性の高いインターネット構成手法を考案する。なお、本研究で考慮するインターネット特性は、以下のとおりである。

- (1) 現実のインターネットにおいては、ネットワーク設計者の介在により、ネットワークの中心部 (コアネットワーク) には大容量のノードやリンクが存在し、一方、エッジ部には、アクセスネットワークとして大量の低速回線を収容するようなノードが多く存在し、結合分布のみでネットワークのトポロジー特性が決まるわけではない。
- (2) 各リンクやノードの処理能力はさまざまであり、それがネットワーク性能にどのような影響を与えるかを考慮しなければならない。ノードやそれに接続されるリンクと、それらの処理能力 (回線容量) には相関関係が存在すると予測できる。
- (3) ネットワークの耐故障性を議論するときには、ネットワークフローへの影響も考慮し、例えば、経路制御のもとでトラフィックが異なる経路に移動することを考慮しなければならない。
- (4) 迂回したトラフィックがリンク容量を越えたとしても、エンド間のフロー制御によって抑制が可能のために、ただちにネットワークが機能しなくなるわけではない。

上記インターネット特性と、べき乗則に従うネットワークに関する数多くの関連分野の研究成果の知見に基づきつつ結合分布がべき乗則 (Power Law) に従うトポロジーを有する情報ネットワークにおけるネットワーク制御方式および設計論を確立する。

4. 研究成果

- (1) べき乗則に従うインターネットにおける障害に強い経路制御方式の確立
国内の ISP トポロジーを対象としたインターネットトポロジーの観測、および、観測したインターネットトポロジーにおける回線容量分布を計測した。計測したトポロジーを出線数分布、平均ホップ数、クラスタ係数、平均ノードペア数の指標から評価した結果、国内 ISP トポロジーもべき乗則 (べき乗則) に従うことが明らかとなった。また、国内 ISP トポロジーでは、出線数が大きいノードは東

京に集中しており、海外の ISP トポロジーとは異なり BA モデルで生成したトポロジーに近い構造特性を示すことを明らかにした。さらに、国内 ISP トポロジーの回線容量分布を計測した結果、その分布もべき乗則に従うことを明らかにした。

これらの観測結果にもとづき、ISP レベルのトポロジーに着目したトポジモデル化手法の確立に取り組んだ。まず既存のモデル化手法で生成されるトポロジーと ISP のトポロジーの構造上の違いを明らかにしている。その結果に基づいて物理的距離およびクラスタ係数に着目したトポロジー生成手法を提案し、その生成トポロジーは経路制御手法の評価に適用可能であることを示した。

次に、ISP におけるネットワーク設計に着目した新たなインターネットトポロジー生成モデルを提案し、有効性を示した。提案モデルでは、物理距離およびトラフィック収容に必要な回線容量を考慮した回線コストを導入し、回線コストを最小化することによってトポロジーを生成する。提案モデルにより生成されるトポロジーを ISP ネットワークのトポロジーおよび従来の生成モデルと比較評価した結果、提案モデルによるトポロジーは、従来のトポロジー生成モデルによるトポロジーに比べ、クラスタ係数、平均パス長、リンク負荷に関して、現実の ISP ネットワークのトポロジーに近い特性を示すことを明らかにした。

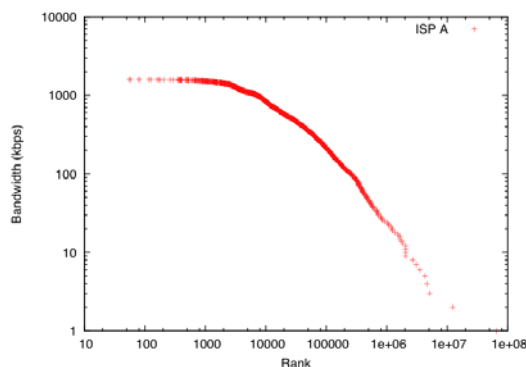


図 1 国内 ISP (ISP A) の回線容量分布: 縦軸は回線容量、横軸はその Rank である。回線容量分布にもべき乗則が出現することがわかる。

(2) べき乗則に従うインターネットにおける効率的なエンド間輻輳/フロー制御方式の確立

TCP の輻輳制御を考慮した大規模ネットワークの解析手法を提案した。本解析では、エンドホストで動作する TCP およびネットワークリンクを、それぞれ独立のシステムとしてモデル化し、これらを相互接続することで、大規模ネットワークをモデル化している。各リンクにおけるリンク利用率およびパケ

ット棄却率、そして TCP コネクションのスループットを導出し、ネットワークの輻輳箇所およびその輻輳の度を求める。解析結果をシミュレーション結果と比較することにより、解析の妥当性を示した。また、我々の解析手法が、べき乗則の性質が現れる大規模ネットワークにおける TCP コネクションの振舞いを適切に捉えていることを明らかにした。さらに、トポロジーがべき乗則に従う大規模 TCP/IP ネットワークにおける TCP の性能解析手法を確立した。解析手法は ns などのソフトウェアシミュレータでは対応できないような大規模ネットワークにおいても適用可能である。性能評価の結果、近年検討されている、ルータバッファの極小化は、リンク利用率を維持することはできるが、特に次数の高いような繁忙ルータを通過する TCP コネクションの性能を様々な面で劣化させることが明らかとなった。

これらの研究成果により得られた知見により、高速広帯域ネットワークにおける輻輳制御方式に関する研究として帯域やラウンドトリップ時間のインライン計測に基づく TCP 輻輳制御方式が、計測誤差や環境変化の影響を大きく受けるという問題を指摘し、それを解決するために、計測誤差に応じたパラメータを設定する手法、および意図的にノイズを加えることによって環境変動の影響を吸収する手法を確立した。

(3) べき乗則に従うオーバーレイネットワーク制御方式の確立

トポロジーがべき乗則に従う P2P ファイル共有システムにおいて、ノードの自律的、利己的な振る舞いによってシステム全体で適切なキャッシングが行われる機構の実現を目指し、進化ゲーム理論にもとづくキャッシングについて検討を行なった。シミュレーションにより、キャッシングに対するコストと需要のモデルによっては、ノードが利己的に振る舞ったとしてもファイルがシステムから消失することのない、ファイル共有が実現可能であることを示した。

さらに、オーバーレイネットワークにおけるキャッシング機構について、べき乗則に従う静的なトポロジーではフルメッシュのトポロジーに比べてファイル可用性が向上すること、及び同じくべき乗則に従う成長型のトポロジーでは静的なトポロジーの場合と非常に近い特性が見られることを明らかにした。

(4) べき乗則に従う情報ネットワークを対象としたネットワーク設計論の確立

次数分布がべき乗則となるトポロジーを対象とし、様々な対地間フロー量を適用することでトポロジーのノードおよびリンクを経

由するフロー量の評価を行った結果、ISP レベルのトポロジーでは、リンクを経由するフロー量の分布にべき乗則が出現することが明らかとなった。また、対地間トラフィック需要の分布が対数正規分布に従い、かつ、その分散が大きい場合に、ISP レベルのトポロジーおよびモデル化手法により生成されたトポロジーにおいて、リンクを経由するフロー量分布がべき乗則に従うことも明らかとなった。次に、ISP トポロジーを対象として、様々な物理回線容量の分布を生成し、各リンクに回線容量を割り当てて収容可能なフロー量を評価した。その結果、物理回線容量分布がべき乗則とすることで、全回線容量が等しい場合と比較し、10 倍以上のフロー量が収容可能であることがわかった。また、指数分布に基づいて回線容量を割り当てた場合と比較しても 2 倍以上のフロー量を収容可能であることを示した。

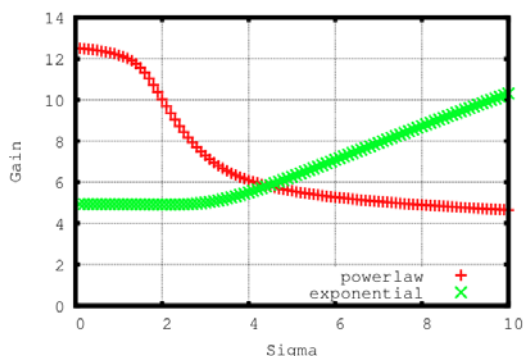


図 2 対数正規分布の分散に対する収容可能トラフィック量 (AT&T 社ネットワーク)：既存研究により、インターネットのトラフィック量が対数正規分布 (分散 0.885) となることが明らかとなっている。この図から、べき乗則に従った回線容量分布が与えられると、収容可能なトラフィック量が大きくなることわかる。

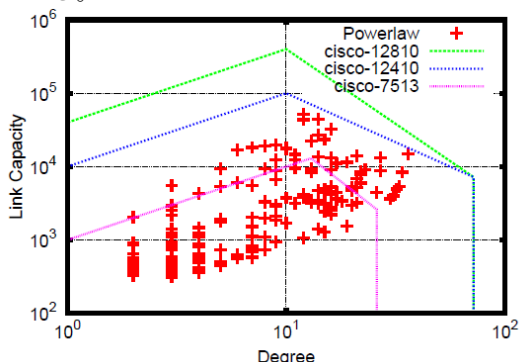


図 3 ノードに連結しているリンクの回線容量の総和 (AT&T 社ネットワーク、べき乗則に従った回線容量分布)：横軸はノードの次数である。Cisco 社のルータの性能を図示している。べき乗則に従った回線容量分布を与えることで、ルータの性能を効率よく活用できていることがわかる。

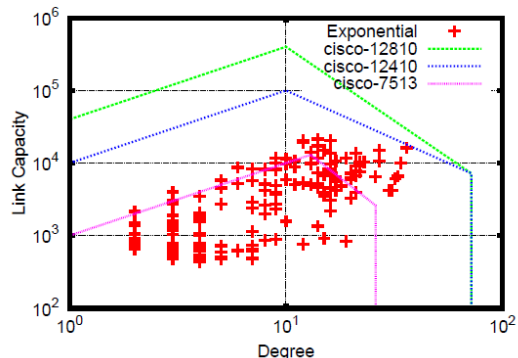


図 4 ノードに連結しているリンクの回線容量の総和 (AT&T 社ネットワーク、回線容量分布を指数分布で定めた場合)：横軸はノードの次数である。べき乗則の場合と比較すると、ルータの性能を活用できていないことがわかる。

(5) まとめ

本研究では、結合分布がべき乗則に従う情報ネットワークに適したネットワーク制御方式を考案し、有効性を示した。特に、ネットワークの形状に関する構造的特徴のうち、どのような特性がシステムの頑強性を生み出すのかを中心に研究を進め、トラフィック制御として特に経路制御への適用手法について成果を挙げた。

今後、ますます多種多様な情報機器がネットワークに接続され、人とモノ、モノとモノの間で膨大な情報流通がなされるようになり、また情報ネットワーク自体が大規模化・複雑化する一方で、ユーザ要求に応えるサービスやアプリケーションもますます多様化・高度化していくと考えられ、そのようなネットワークを取り巻く環境の変動に対し適切に適応していくことが今後の情報ネットワークに求められる。本研究では結合分布がべき乗則であるネットワークにおける制御方式の確立に取り組んだが、今後はこれらの成果を更に発展させ、ネットワークの構造が環境の変動に適応して時々刻々と変わるような時間的ダイナミクスや構造ダイナミクスの変動に対する適応性を持つ情報ネットワークを構築するための新しい設計論が必要になると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① Masahiro Sasabe, Naoki Wakamiya, and Masayuki Murata, "User Selfishness vs. File Availability in P2P File-Sharing Systems: Evolutionary Game Theoretic Approach," to appear in Peer-to-Peer Networking and

- Applications, Apr. 2009.
- ② Go Hasegawa, Takeshi Tomioka, Kentarou Tada, and Masayuki Murata, "Simulation studies on router buffer sizing for short-lived and pacing TCP flows", *Computer Communications*, Volume 31, Issue 16, pp. 3789-3798, Oct. 2008.
 - ③ Hiroyuki Hisamatsu, Go Hasegawa and Masayuki Murata, "Performance analysis of large-scale IP networks considering TCP traffic," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E90-B, no.10, pp. 2845-2853, October 2007

[学会発表] (計 14 件)

- ① 児玉瑞穂, 長谷川剛, 村田正幸, "計測誤差および環境変動を考慮した帯域計測に基づくTCP輻輳制御方式," *電子情報通信学会技術研究報告 (IN2008-141)*, vol. 108, no. 458, pp. 55-60, March 2009.
- ② 平山孝弘, 荒川伸一, 村田正幸, "べき則の性質を有するトポロジーにおける輻輳伝播に関する一考察," *電子情報通信学会技術研究報告 (NS2008-68)*, vol. 108, no. 258, pp. 1-6, October 2008.
- ③ Mizuho Kodama, Go Hasegawa, and Masayuki Murata, "Implementation experiments of TCP Symbiosis: bio-inspired mechanisms for Internet congestion control", in *Proceedings of CQR 2008*, April 2008.
- ④ Naoto Hidaka, Shin'ichi Arakawa and Masayuki Murata, "A modeling method for ISP topologies based on network-cost optimization," in *Proceedings of The Fourth International Conference on Autonomic and Autonomous Systems (ICAS 2008)*, pp. 169-174, March 2008.
- ⑤ 倉田園子, 荒川伸一, 村田正幸, "クラスタリング手法に基づくトポロジー生成手法の提案と耐故障性評価," *電子情報通信学会情報ネットワーク研究会 (IN2007-193)*, vol. 107, no. 525, pp. 205-210, March 2008
- ⑥ Masahiro Sasabe, Naoki Wakamiya and Masayuki Murata, "A caching algorithm using evolutionary game theory in a file-sharing system," in *Proceedings of IEEE Symposium on Computers and Communications (IEEE ISCC' 07)*, pp. 631-636, July 2007.
- ⑦ 日高直人, 荒川伸一, 村田正幸, "回線コストに基づくインターネットトポロ

- ジー生成モデルの提案と評価," *電子情報通信学会技術研究報告 (IN2007-21)*, vol. 107, no. 98, pp. 61-66, June 2007.
- ⑧ Hiroyuki Hisamatsu, Go Hasegawa and Masayuki Murata, "Sizing router buffers for large-scale TCP/IP networks," in *Proceedings of the 2007 International Symposium on Frontiers in Networking with Applications (FINA 2007)*, pp. 215-219, May 2007.
 - ⑨ Ryota Fukumoto, Shin'ichi Arakawa, Tetsuya Takine, and Masayuki Murata, "Analyzing and modeling router-level Internet topology," in *Proceedings of The International Conference on Information Networking (ICOIN)*, January 2007.
 - ⑩ Naoki Wakamiya and Masayuki Murata, "Overlay network symbiosis: Evolution and cooperation," in *Proceedings of First International Conference on Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems (Bio-netics 2006)*, pp. 1-5, December 2006.
 - ⑪ 福元良太, 荒川伸一, 村田正幸, "べき則の性質を有するネットワークにおけるオーバーレイによる経路制御手法の性能評価," *電子情報通信学会技術研究報告 (IN2006-92)*, vol. 106, no. 358, pp. 19-24, November 2006.
 - ⑫ Ryota Fukumoto, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "On routing controls in ISP topologies: A structural perspective," in *Proceedings of First International Conference on Communication and Networking in China (CHINACOM)*, pp. 1-5, October 2006.
 - ⑬ 福元良太, 荒川伸一, 村田正幸, "ISPトポロジーにおけるオーバーレイルーティングの効果," *電子情報通信学会技術研究報告 (IN2006-12)*, vol. 106, no. 42, pp. 67-72, May 2006.
 - ⑭ 久松潤之, 長谷川剛, 村田正幸, "TCPトラヒックを考慮した大規模ネットワーク解析手法の提案," *電子情報通信学会技術研究報告 (CQ2006-7)*, vol. 106, no. 9, pp. 31-36, April 2006.

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
若宮 直紀 (WAKAMIYA NAOKI)
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教

授

研究者番号: 50283742
長谷川 剛 (HASEGAWA GO)
大阪大学・サイバーメディアセンター・

准教授

研究者番号: 00294009
荒川 伸一 (ARAKAWA SHINICHI)
大阪大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号: 20324741
笹部 昌弘 (SASABE MASAHIRO)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 10379109

(3) 連携研究者