社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

[チュートリアル招待講演]　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

荒川　伸一† 　滝根　哲哉†† 　村田　正幸†

† 大阪大学 大学院情報科学研究科　〒 565–0871 大阪府吹田市山田丘 1–5
†† 大阪大学 大学院工学研究科
E-mail: †{arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††takine@comm.eng.osaka-u.ac.jp

あらまし　経路制御や輻輳制御など、ネットワーク制御手法の評価には通信ネットワークの適切なモデル化が必要である。インターネットトポロジーを観測した結果、ノードの次数分布がべき則に従うことが明らかになっているが、次数分布がべき則のみが通信ネットワークの特性を決定するわけではない。本講演では、通信ネットワーク、特に ISP 内のルーターレベルトポロジーに着目し、その構造分析とモデル化に関する研究を紹介する。ルーターレベルトポロジーと生物学や社会学の研究でしばしば用いられるスケールフリーネットワークを対比することで、通信ネットワークの構造的特徴を明らかにする。さらに、国内 ISP ネットワークを対象とした物理回線容量の計測結果をもとに、ルーターレベルトポロジーにおける回線容量分布の特性を説明し、その発生要因とモデル化手法を示す。
キーワード　べき則、ルーターレベルトポロジー、BA モデル、回線容量、Zipf 則、フロー制御

[Tutorial Invited Lecture] Analyzing and Modeling Router-level Networks and Its Application to Performance Evaluation

Shin'ichi ARAKAWA†, Tetuya TAKINE††, and Masayuki MURATA†

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1–5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565–0871, Japan
†† Graduate School of Engineering, Osaka University, Osaka, Japan
E-mail: †{arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††takine@comm.eng.osaka-u.ac.jp

Abstract　Modeling communication networks is vital for network researches. Recent measurement studies on the Internet topology show that the degree distribution obeys the power-law distribution. However, only the degree distribution does not determine the performance of network control methods. As previous studies have shown, one of important factors to characterize the performance of network control methods is a structure of topologies. However, other characteristics, which are even more important, are link capacity because these characteristics are particular to communication networks. In this tutorial, we introduce several research works that investigate and reveal the topological structure of router-level topologies, and then show the structural dissimilarity between router-level topologies and well-known scale-free network. We further introduce the link capacity characteristics of router-level topologies by using our own measurement data of ISP networks in Japan.
Key words　Power-Law Networks, Router-level topology, BA model, Link Capacity, Zipf Law, Flow control

はじめに

- **情報ネットワークのモデル化は何故必要か？**
  - 科学的な興味
  - 制御手法の性能評価
    - 例：（何らかの）経路制御手法を提案 → 評価で用いるトポロジーは？
      - 既存の文献で扱われているトポロジーを使う（これは論文を書く上で必須）
      - しかし、今のインターネットで効果を発揮するかはわからない
    - 実網のデータを取得できる立場にある場合でも、ネットワーク規模拡大（ノード追加、リンク追加）や回線容量増強時の検証が必要

情報ネットワークの特徴抽出、ネットワーク成長を含む
トポロジー構成のモデル化が重要

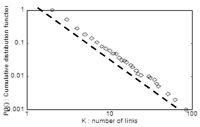
- もちろん、研究対象によって必要とするモデル化の粒度は異なる
  - 経路制御→トポロジー (AS-level or router-level)
  - 輻輳制御→トポロジー＋回線容量

ASレベルのトポロジーの特徴

- **1999年のASマップ: 3037ノード**
  - AT&T, Sprint等の様々なISP間の接続関係
- **次数分布にべき則の性質が観察されている： 次数kである確率が$k^{-c\cdot\gamma}$**
  - [Faloutsos99] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "On power-law relationships of the Internet topology," in Proceedings of SIGCOMM '99, vol. 29, pp. 251–262, Oct. 1999.

■http://research.lumeta.com/ches/map/gallery/index.html

- **AS-levelトポロジーのモデル化**
  - スケールフリーネットワーク:
    - BA モデル
      - 1. ノードを段階的に追加
      - 2. 追加時に既存トポロジーの次数が大きいノードに優先的に接続
  - Non-linear attachment: $(k_i-\beta)^{\alpha} / \sum_j (k_j-\beta)^{\alpha}$
    - T. Bu and D. Towsley, "On distinguishing between Internet power law topology generators," in Proceedings of INFOCOM, pp. 1587–1596, June 2002.

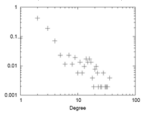


BAモデルで生成したトポロジー: 1000ノード, 平均次数2。縦軸は累積分布

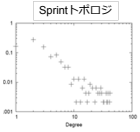
ルーターレベルトポロジーの次数分布

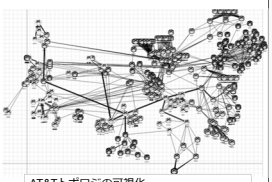
- **ASの1ノードが1 ISPに相当**
- **ISP内トポロジーの計測：[Sprint2004]**
  - AT&T 社: 523ノード, 1304リンク
  - Sprint 社: 467ノード, 1292リンク

AT&Tトポロジ



Sprintトポロジ



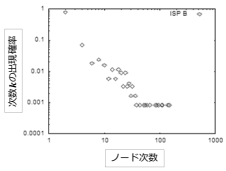


[Sprint2004] N. Sprint, R. Mahajan, D. Wetherall, and T. Anderson, "Measuring ISP topologies with rocketfuel," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, pp. 2–16, Feb. 2004.

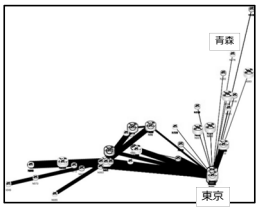
AT&Tトポロジの可視化
注) 州の粒度でのノード位置情報にもとづき、手でばらしている

国内ISPトポロジーの次数分布

- **Tracerouteによる国内ISPトポロジーの計測**
  - 2006年6月~2006年12月
  - 大阪大学を含む国内2拠点で調査
  - ISP A, ISP B, ISP Cの3つのISPのルーターレベルトポロジーを分析
- **国内ISPにおいても次数分布にべき則が観察される**

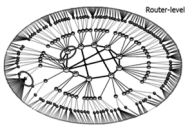


国内ISP B



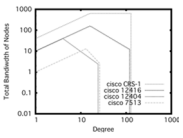
ルーターレベルトポロジーのモデル化

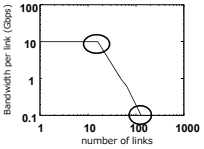
- **構造的特徴およびモデル化**
  - [Li04] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, "A first-principles approach to understanding the Internet's router-level topology," in Proceedings of SIGCOMM, Aug. 2004.
  - 次数分布がべき則となる複数のトポロジーを列挙
  - リンク両端の2ノードの次数相関がスループット性能を決定付ける
    - ルーターレベルトポロジーはスループット性能が高い
    - 次数の大きいノードはアクセス回線収容に用いられる
    - 次数の小さいノードはコアノードの大容量回線収容に用いられる
  - 工学的な最適化がなされている：確率的なトポロジー生成手法の問題点を指摘
    - D. Alderson and W. Willinger: "A contrasting look at self-organization in the Internet and next-generation communication networks," IEEE Communication Magazine, July 2005.



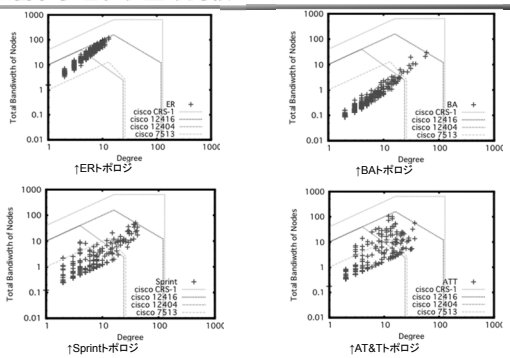
ISPトポロジーの構造的特徴：ルータ処理能力の制約 [Li04]

- **ルータのバックプレーンの処理制約**
  - Cisco 12416 ルータの場合
    - バックプレーン処理能力：160Gbps
    - 次数<= 16
      - 1本のリンクの回線容量：10Gbps
    - 次数 = 128
      - 1本のリンクの回線容量：100 Mbps
  - 次数が大→接続できるリンクの回線容量に制限
  - 次数が小→大容量回線を接続
- **ルーターレベルトポロジーの特徴**
  - $L(g) = \sum_{(i,j)\in edge} d_i d_j$
  - $s(g) = (L(g) - L_{min}) \ / \ (L_{max} - L_{min})$
    - 次数の大きいノードと次数の大きいノードがどの程度連結されているか
    - Assortative mixing: M. Newman, "Assortative mixing in networks" Physical Review Letters, 2002.





収容トラヒック量の比較



↑ERトポロジ ↑BAトポロジ

↑Sprintトポロジ ↑AT&Tトポロジ

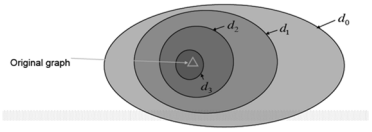
ルーターレベルトポロジーの分析、生成手法 (1/3)

- **隣接する2ノードの次数相関がルーターレベルトポロジーの特徴 [Li04]**
  - スループット性能が高くなるよう設計されている

- **3ノード間の次数相関がルーターレベルトポロジーの性質を決定する [Machadevan2006]**
  - [Machadevan2006] P. Machadevan, D. Krioukov, K. Fall, and A. Vahdat, "Systematic topology analysis and generation using degree correlation," in Proceedings of SIGCOMM 2006, Aug. 2006.
  - 平均クラスタ係数や最大固有値、平均ホップ長の類似性を議論

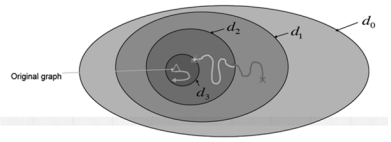
ルーターレベルトポロジーの分析、生成手法 (2/3)

- **元のトポロジとの類似度を表す指標**
  - クラスd0: 平均次数が等しい
  - クラスd1: 次数分布が等しい
  - クラスd2: 次数kのノードと次数k'のノードの2ノードが連結される確率が等しい
  - クラスd3: 次数k, k', k''のノード間の接続確率が元のグラフと等しい



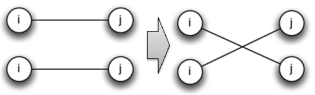
ルーターレベルトポロジーの分析、生成手法 (3/3)

- **d3-graph生成法**
  - Step.1: d1-pseudo graphを生成 (下図の×を求める)
  - Step.2: d2 targeted d1-preserved rewiring（赤い曲線）
  - Step.3: d3 targeted d2-preserved rewiring(水色の曲線) △を生成
  - → Original Graph（△)の情報が必要。
- **d3-randomizing**
  - オリジナルグラフを与え、d3の領域内（d3の性質を満たす状況）でのみrewiringする（黄緑）

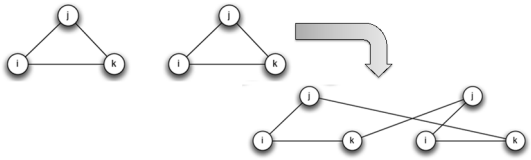


d*k*-reserved rewiring

- **d2 reserved rewiring**

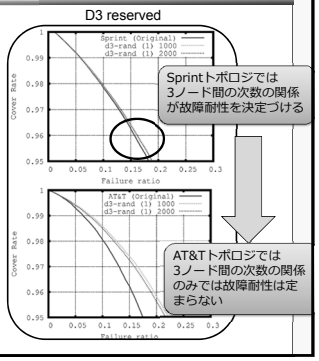


- **d3 reserved rewiring**



[Machadevan2006]の課題

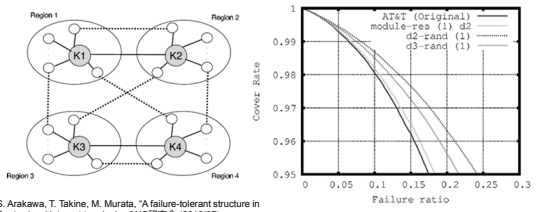
- **dK-randomizingの適用範囲は広い**
- **理論上は、クラスdNまで考えることが可能**
  - ただし、現実的には クラスD3まで。クラスD4以上 だと計算量がおいつかない
- **D3で測れないルーターレベルトポロジーの特性もある**
  - 例えば、故障耐性
  - 故障耐性の特性決定付ける指標として局所連結性（モジュール性）が挙げられる[Arakawa2010]



[Arakawa2010] S. Arakawa, T. Takine, M. Murata, "A failure-tolerant structure in Router-level Internet topologies," NS研究会 (2010/07)

Modularity-reserved rewiring

- **Modularity-reserved rewiring**
  - 地域をモジュールと見立て、地域間のconnectivityが確保されている時に、リンクをrewiring
  - Modularity-reserved + d2-randomizationにより、故障耐性が保持される



S. Arakawa, T. Takine, M. Murata, "A failure-tolerant structure in Router-level Internet topologies," NS研究会 (2010/07)

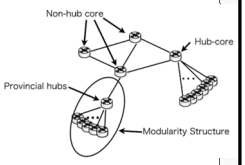
ルーターレベルトポロジーの階層構造

- **階層構造のイメージ図**
- **ノードiのFunctionalityとしてH_i, Z_iを導入**

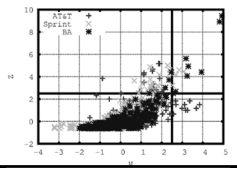
$$Z_i = \frac{k_i - < k >}{\sigma_k}$$

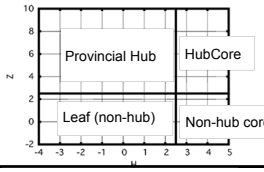
$$H_i = \frac{d_i - < d >}{-\sigma_d}$$

k_i：ノードiの次数
d_i：ノードiから他ノードへのホップ距離の和



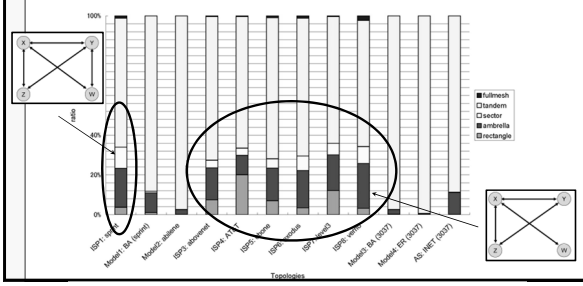
・ISP: Provincial Hubの存在
・AT&T: Non-hub coreが存在





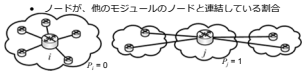
トポロジーの局所連結性

- **ISP1～ISP8: tracerouteによって観測されたISPトポロジ**
- **Model1~4: 既存のモデル化手法により生成したトポロジ (Sprint社と同一ノード数、リンク数)**
- **INET: 1997年11月のASトポロジ, トポロジ生成ツールINETで使用**

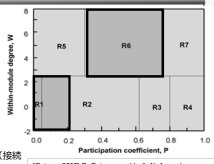


トポロジーの局所連結性（モジュール性）

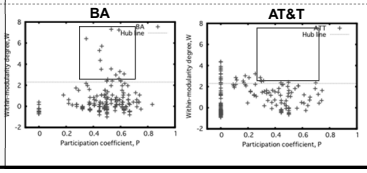
- **ノードの役割を分類 [Guimera2005]**
  - ネットワークをいくつかのモジュールに分割
  - Participation coefficient, P [$0 \le P \le 1$]
    - ノードが、他のモジュールのノードと連結している割合

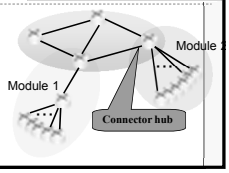


  - Within-module degree, W
    - 自身が属するモジュールのノード次数分布における、ノードの次数（接続リンク数）の偏差
      - 2.58 (0.5%) を超えるとハブノード、それ以外は非ハブノード

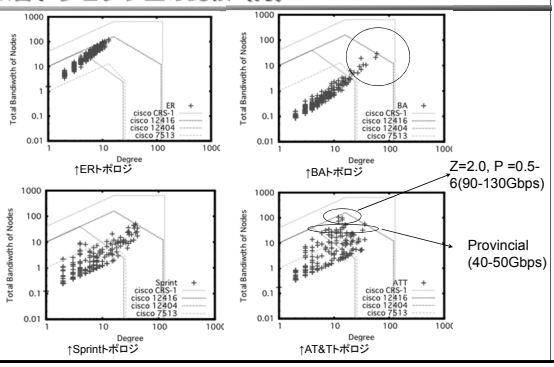


[Guimera2005] R. Guimera and L. A. N. Amaral, "Functional cartography of complex metabolic networks," Nature, vol. 433, p. 895, 2005.





収容トラヒック量の比較（再）

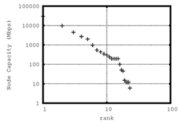


↑ERトポロジ ↑BAトポロジ ↑Sprintトポロジ ↑AT&Tトポロジ

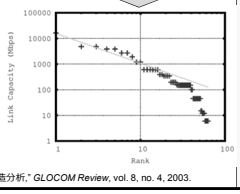
回線容量のモデル化

情報ネットワーク特有の性質：回線容量

- **IIJ社の基幹ルータのノード処理能力分布[9] (21ノード,34×2リンク)**
  - 2003年の公開データから計算
  - 傾き-2.6



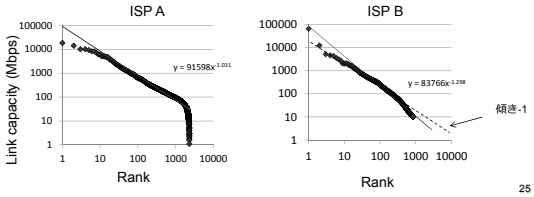
- **回線容量分布を算出**
  - 上位40位程度まで、傾き-1.1のべき則



[9] 丸田一, "べき指数を用いたインターネットバックボーンのネットワーク構造分析," *GLOCOM Review*, vol. 8, no. 4, 2003.

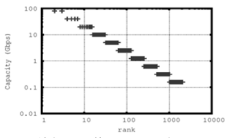
回線容量の計測結果（国内ISPネットワーク）

- **国内ISPネットワーク (ISP A, ISP B)の回線容量を測定**
  - 観測期間: 2006年6月~2006年12月
  - 3.8GHz PentiumIVのCPUタイマを使用
  - 使用した計測ツール
    - Traceroute （トポロジ観測）
    - Pchar （回線容量測定）
  - 大阪大学、国内ISP Dから計測

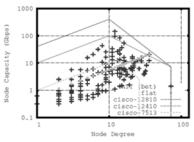


回線容量分布がZipf則に従う理由

- **単純に考えると、以下のルールでも回線容量分布はZipfとなる**
  - 10Gbpsのuplink, 2.4G×4のdownlink
  - ¼を4本、1/16を16本・・・とすればよい
- **このようなシンプルなルールでもそれなりに辻褄は合う（右下図）**
- **ただし、分布に基づいて回線容量を割り振る問題は残される**
- **回線容量増強を考慮することができない**



回線容量最大値 40Gbps×4本
"容量半分→本数を倍"のルールにより生成した分布

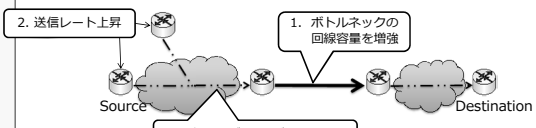


ノード次数vs. ノード容量：回線容量分布を与え、edge betweeness centralityのランクと1対1に対応

トポロジの構造と回線容量割当

- **フロー制御がもたらすダイナミクスを無視する場合、リンクを経由するフロー数に応じた回線容量割当が最適**
  - 例えば、Betweenness Centrality （あるノード、またはリンクを経由する最短経路数）に基づくノード性能・回線容量割当が有効 [Zhang09]

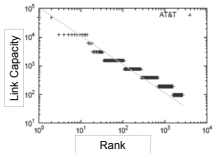
フロー制御が働く環境下での回線容量増強



[Zhang09] G. Q. Zhang, S. Zhou, D. Wang, G. Yan, and G. Q. Zhang, "Enhancing network transmission capacity by efficiently allocating node capability," arXiv:0910.2285, Oct. 2009.

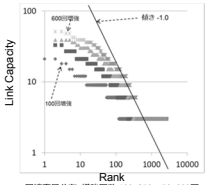
増強による回線容量分布の変化

- **回線増強を繰り返していくと、回線容量分布の傾きが増大する傾向**
  - 回線容量均一な状態を初期状態とする
  - シミュレーションによりボトルネックリンクを探し回線容量を増強
    - ボトルネックリンク：シミュレーション時にパケット棄却率が最大のリンク
    - 使用するフロー制御は TCP
  - さらにシミュレーションを行いボトルネックを増強（以降繰り返し）



AT&Tトポロジ（1331回増強、倍増）傾き-1

AT&Tトポロジ



回線容量分布: 増強回数 100, 250, 450, 600回一定量の増強

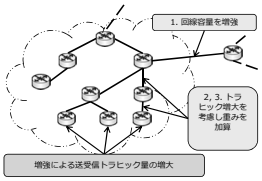
回線増強を繰り返していくと、回線容量分布の傾きが-1.0に近づく

ただし、長期間のシミュレーションが必要

回線容量割当手法

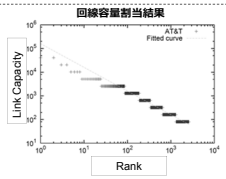
回線容量割当手法 (1/2)

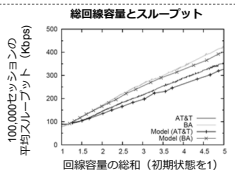
- **方針：**
  - **各リンクに重みw_lを定め、重みの高いリンクから順に増強**
    - 初期値を経由フロー数とする
  - **増強したリンクの重みを減少させ、周辺のリンクに重みを分配**
    - トポロジを階層化し下層と上層をつなぐリンクに優先的に重みを加算
      - モジュール間リンクを持つノードとの距離に基づき階層を定義
    - 他モジュールとの通信を担う上層のリンクが増強されるとモジュール内下層のノードと他モジュール間のトラヒック量が増大すると想定



回線容量割当手法 (2/2)

- **増強手順：**
  1. 重み最大のリンクを増強し重みをαw_l減少させる
  2. 増強したリンクの両端と同じもしくは1階層下のノードと接続するリンクに重みを分配
     - 重みは$\alpha(1-\alpha)w_l/n$ずつ均等に分配（nは対象となるリンク数）
  3. 重みが加算されたリンクからさらに1階層下のリンクに重みを分配
     - 重みは$\alpha^2 w_l/mn$ずつ均等に分配（mは対象となるリンク数）





まとめ

- **通信ネットワークの接続関係のモデル化**
  - スケールフリーネットワーク、BAモデル
  - ルーター処理能力制約を考慮したモデル
- **ルーターレベルトポロジーの構造的特徴**
  - 次数相関
  - 局所連結性（モジュール性）、階層性、冗長性
- **回線容量のモデル化**
  - 情報ネットワーク特有の性質である回線容量
  - 回線容量におけるZipf則：公開データ、計測データ、計算機シミュレーションデータのそれぞれで観察
  - 回線容量割当手法ならびに性能評価への適用例

関連文献

- **Motif (Graph Mining)**
  - SubGraphの出現頻度 (P.20)
  - R. Milo et al., “Network motif: Simple Building Blocks of Complex Networks,” Science Vol. 298, pp.824-827, 2002.
  - J.-P. Onnela, et al., ”Intensity and coherence of motifs in weighted complex networks”, Physical Review E, 71, 065103(R) (2005).
- **Assortative mixing, or degree-degree correlation.**
  - 次数の大きいノードと次数の大きいノードがどの程度連結されているか？
  - M. Newman, "Assortative mixing in networks" Physical Review Letters, 2002.
- **Modularity**
  - モジュール分割の手法（P.21）
  - M. Newman, “Modularity and community structure in networks,” PNAS, vol. 103, pp. 8577–8582, Apr. 2006.
- ***-centrality**
  - 様々な指標が検討されている (列挙しきれない。例えばP.27のbetweenness centrality)
    - Luciano da F. Costa, Francisco A. Rodrigues, Gonzalo Travieso, P. R. Villas Boas. Characterization of complex networks: A survey of measurements. Advances in Physics, Volume 56, pages 167 – 242, Issue 1 (2007)

関連文献

- **スケールフリーネットワーク上でのトラヒックダイナミクス**
  - M. Woolf, D. Arrowsmith, R. Mondragon, J. Pitts, and S. Zhou, “Dynamical modelling of TCP packet traffic on scale-free networks,” Institut Mittag-Leffler, vol.6, p.7, Oct. 2004.
  - W.-X. Wang, B.–H. Wang, C.–Y. Yin, Y.–B. Xie, and T. Zhou, “Traffic dynamics based on local routing protocol on a scale-free network,” Physical Review E, vol. 73, p.026111, Feb. 2006.
  - C. Liu, Q. Zhang, Z. Zhang, “Emergence and disappearance of traffic congestion in weight-evolving networks,” Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 17, pp. 1566–1574, Nov. 2009.
  - T. Hirayama, S. Arakawa, K. Arai, and M. Murata, “Effect of modularity structure on traffic dynamics,” in Technical Committee on New Generation Network (NwGN2010-39), pp. 15–20, Jan. 2011.
- **“ネットワーク設計”を扱った文献（主に物理学の研究分野）**
  - Y. Xia and D. Hill, “Optimal capacity distribution on complex networks,”Europhysics Letters, vol. 89, p. 58004, Mar. 2010.
  - X. Ling, M.-B. Hu, W.-B. Du, R. Jiang, Y.-H. Wu, and Q.-S. Wu, “Bandwidth allocation strategy for traffic systems of scale-free network,” Physics Letters A, pp. 4825–4830, Nov. 2010.
  - G.-Q. Zhang, S. Zhou, D. Wang, G. Yan, and G.-Q. Zhang, “Enhancing network transmission capacity by efficiently allocating node capability,” Physica A, vol. 390, pp. 387–391, Jan. 2011.