

SF ネットワーク構造がパケット輸送に与える影響について

遠藤 友基[†] 林 幸雄[†]

近年の研究により、インターネットのルーターネットワークにはスケールフリー性という構造的特徴があることが明らかになっている。コンピュータネットワークをモデルとしたパケット輸送のシミュレーションは数多く行われているが、実際のインターネットの基本機能を実現し、かつスケールフリー性を考慮した大規模ネットワークでの試みは行われていない。本研究では現実のトポロジ情報を用い、スケールフリー性がパケット輸送にどのような影響を与えるかをシミュレーションにより検証した。その結果、スケールフリー性がネットワークの渋滞現象に大きな影響を与えていることが明らかになった。

Dynamic properties of packet transportation in Scale-Free network models

YUUKI ENDOU[†] and YUKIO HAYASHI[†]

Recent studies in physics and computer science have shown that many complex networks in nature and social relationships have a common structure called scale-free(SF) networks. The topology with a power law degree distribution appears in router network on the Internet. Although many simulations of packet transportation in many types of network model are studied, both of the routing function on the Internet and the SF structure are not considered in large networks. We investigate the dynamic property of packet transportation in SF network models whose topological structures are extracted from real data. Our results show that "betweenness centrality", which was used in social networks, is very important factor for packet transportation and network congestion.

1. はじめに

計算機性能の劇的な向上と情報ネットワークの整備が進むに従って、インターネットは必要不可欠な情報インフラとして、その地位を確固たるものとしている。しかし、流通されるデータ量やホスト数の増大によって、トポロジの変化や輻輳といったより広域的なネットワークの状況に応じた経路制御が求められている。中でもネットワークの渋滞を引き起こす輻輳現象の解明は重要な課題である。この問題はネットワークのトポロジとダイナミクスという大きく2つの枠組みに分けて考えることができる。これまで、トポロジは格子モデルやランダムグラフなどが、ダイナミクスではパケットの独立なポアソン到着による待ち行列解析が一般的だった。しかし近年の研究により、トポロジではスケールフリー性という普遍的性質が、ダイナミクスでは従来の待ち行列理論では説明できない相互作用の輻輳の相転移現象がみられることが指摘されており¹⁾、こうした新たな知見に基づく研究が盛んになっ

てきている。

本研究ではインターネットのルーター構造はべき乗則に従うという Faloutsos²⁾ たちの測定結果を踏まえ、インターネットシミュレーションモデルを構築する。そして大規模ネットワークでもシミュレーション可能なパケット通信を行うシミュレータを製作し、スケールフリーの特性をもつ実データのトポロジ情報をもとにしたモデルにおいて、ネットワーク中のパケット分布の状態を分析する。この結果から、ネットワークのトポロジがパケット輸送に大きな影響を与えていることを明らかにする。

2. パケット通信シミュレータ

パケットシミュレータは現在も様々なものが利用されている³⁾。しかし大規模な場合において、様々なトポロジ情報を扱うには適していない。そのために独自でパケット通信シミュレータを製作した。本研究では、ルーター間の距離などのリンク情報も加味できる OSPF のメカニズムをより一般化したものを用いた。製作したシミュレータの概要は図1のようになっている。ホスト PC とルーターを表すノードはそれぞれにルーティ

[†] 北陸先端科学技術大学院大学 知識科学研究科
School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology

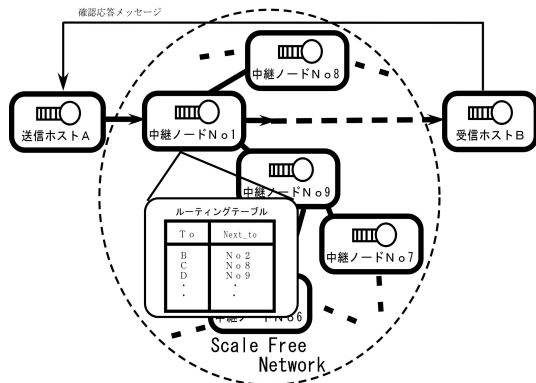


図1 離散事象の packets 通信シミュレータの概要

ングテーブルとクロックを持っており、マクロなシステム時計を参照しながらパケット送受信の動作を決めている。また送信されるパケットは送信先、送信元、発送時間、パケット生存時間の情報を保持し、送受信間でパケット消滅における TCP の再送機能も実現できるようにになっている。

3. スケールフリーネットワークについて

Faloutsos たちの実測により、インターネットにおけるノード間の接続関係はべき乗則に従うということが分かっている²⁾。このべき乗則はノードをルーターとみなしたトポロジだけでなく、AS(Autonomous System)をノードとみなしたとき(以下、図2参照)やWWW(World Wide Web)の接続関係に対しても同様の性質が成り立っている⁴⁾。こうしたべき乗則のネットワークは観察するスケールを変えても同じ構造が現れることから、スケールフリーネットワークと呼ばれており、理論解析やシミュレーションによる実験が盛んに行われている。

一方、パケット輸送に関して、SF ネットワーク構造に着目したモデルの研究は近年特に活発になっている。Tadićらはノード数 $N = 1000$ のサイズのネットワークを使い、パケットの伝送時間や拡散速度の分布にはべき乗則に従う性質があることを示した⁶⁾。また、これらの性質がネットワークサイズにも依存しないことも示している⁷⁾。だが、彼らの関心はトポロジの性質に特化しているところがあり、インターネットの基本的なパケット伝送機能は満たしていない。また、Kimらは各ノードを通過するパケットのフロー量に着目し、これがべき乗分布に従うことを示している⁸⁾。

4. シミュレーションモデル

本研究では現実のネットワークトポロジ特性、特にス

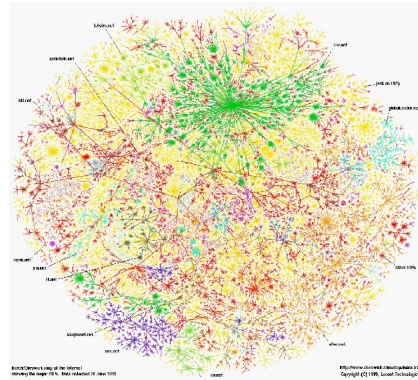


図2 ISP間の接続地図(出典: Internet Mapping Project⁵⁾)

ケールフリー性に注目している。そこで今回対象に選んだネットワークモデルは入手可能な実データの中で、スケールフリーの構造的特徴を持つ電力網⁹⁾とAS¹⁰⁾のネットワークデータである。表1にネットワークモデルの各種データを、表2にシミュレータの各種設定パラメータを示す。

表1. 計算ネットワークの各種データ

参照データ	電力網	AS
総辺数	6594	12572
全ノード数	4941	6474
合計次数	13188	25144
平均次数	2.66910	3.88384
平均経路長	18.98919	3.70500
assortativity	0.01128	-0.05714
次数分布べき指数	3.95353	2.49614
平均結合相関べき指数	0.04236	0.51906

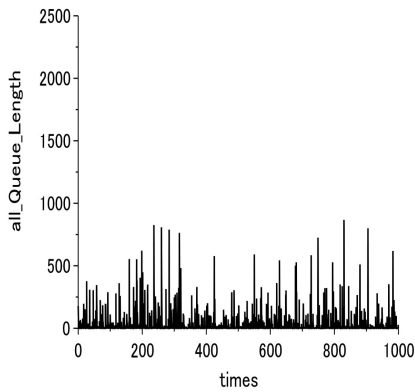
表2. シミュレータの各種パラメータ(単位はシステム時間)

ルーター処理時間	0.001
再送要求発生間隔	10
Queueの上限	50
ダメージノードからの回復する規定長	40
平均伝送率	0.005
リンクコスト	全て1
確認メッセージ伝送時間	0.005
リクエスト上限	100
パケット生存時間	10
終了時間	1000
平均要求パケット数	20 (ポアソン乱数)
平均リクエスト発生間隔	1.0, 0.5, 0.1, 0.05 (ポアソン過程)

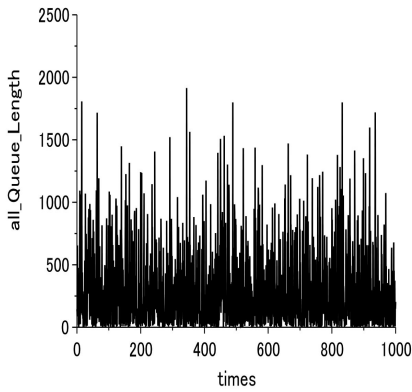
5. 輻輳現象とトポロジの影響

本節ではトポロジの性質によって、ネットワークの輻輳状態が大きく異なってくるについて述べる。

まずは図3に、平均リクエスト間隔の異なる状況での総 Queue 長の時間変化を示す。ここに示す総 Queue 長とは、ネットワーク中のすべてのノードに入っている Queue の総和のことである。平均リクエスト間隔を小さくしていくと、総 Queue 長が大きくなり、ネット



(a) 平均リクエスト間隔 0.5 (非輻輳時)



(b) 平均リクエスト間隔 0.05 (輻輳時)

図 3 総 Queue 長の時間変化

ワークが輻輳してくる現象が図 3 から分かる。

図 4 は平均リクエスト間隔と変化させたとき、ネットワーク中における総 Queue 長とリンクに流れていたパケット総量の時間平均はどのように変わっていくかを示したグラフである。電力網、AS のトポロジともノードに溜まる総 Queue 長はほぼ同様の変化を見せるのに比べ、リンクを流れるのパケット総量は電力網のトポロジのほうが AS のトポロジに比べて大きくなっていることが分かる。特に平均リクエスト間隔が 0.05 の輻輳時には、電力網で、全ノードの総 Queue 長 : リンクの総パケット数がほぼ 2:1 なのに対し、AS は 7:1 とノードの負担が大きくなっている。

これを稼動しているノード、リンクの数で示したのが図 5 である。これを見ると、相対的に電力網のトポロジが AS のトポロジに比べて大きく推移していること

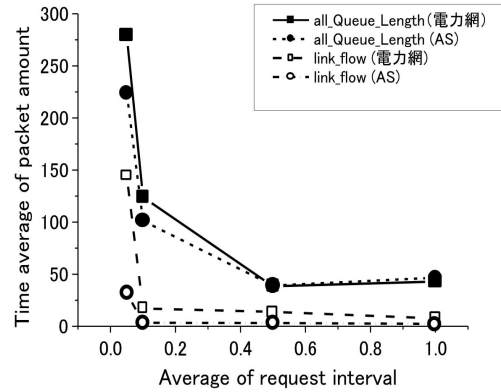


図 4 総 Queue 長とリンク総量の時間平均

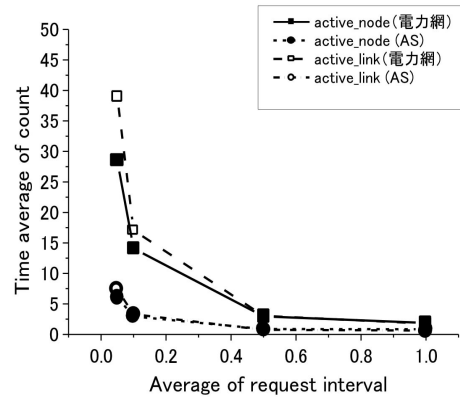


図 5 active なノードとリンクの時間平均

が分かる。これは電力網のトポロジがパケットの負荷を広く分散させていることを示しているのに対し、AS のトポロジは限られたノードやリンクが集中して使われていることを表している。これらの結果と表 1 のデータと照らし合わせると、電力網のトポロジに対して、AS のトポロジは平均経路長が短いため総 Queue 長やリンクのパケット総量が小さくなり、平均結合相関のべきの傾きが大きくなることからホスト間の結合がより強くなるため、負荷が集中するものと考えられる。

6. Betweenness との関係

社会的ネットワークで研究されてきた”betweenness centrality (以下, betweenness)”という指標がパケット輸送の問題でも重要となる⁸⁾。betweenness とは各ノード間の最短パスを考えたとき、あるノードを経由

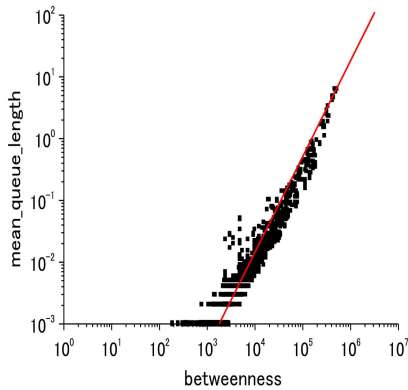


図 6 betweenness と平均 Queue 長との関係 (電力網)

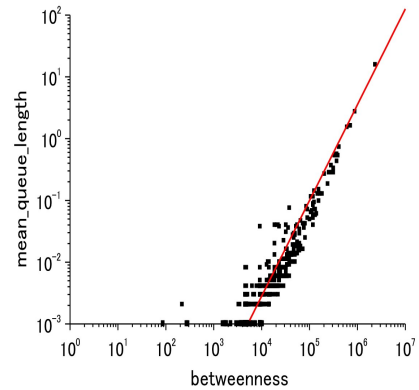


図 7 betweenness と平均 Queue 長との関係 (AS)

する割合を数値化したものである。我々のシミュレーションにおいても、そうした betweenness がパケット輸送に大きな影響を与えることが分かった。

図 6 と図 7 は各ノードの平均 Queue 長が betweenness とどのように関係してくるかを示したものである。本来の betweenness は各ノード間において定義されるものだが、ここではホスト間の通信に限定して算出している。この状況でも、betweenness の値が高いノードほど平均 Queue 長が長くなるのが分かり、それはべき乗の傾きをもっている。このとき、どちらの結果も betweenness の値を b とすると、 b^γ ($\gamma = 1.55$) に比例する直線にのる。この結果からもパケット輸送を考える上で、各ノードの betweenness が大きなノードほど、通信では重要なコネクタの役割を果たしていると考えられる。

7. 結 び に

本論文で得られた結果を以下にまとめる。

- ネットワークのつながり方を示す平均経路長や平均結合相関は、前者の値が大きいほど総 Queue 長やリンクのパケット総量が大きくなり、後者の値が大きいほどノードとリンクに負荷が集中する傾向にある (表 1, 図 4, 図 5)。
- 単一ノードで見たときに betweenness はパケット輸送に大きく関係してくる量であり、betweenness が高いノードほど平均 Queue 長が長くなり、それはべき乗の傾きをもつ (図 6, 図 7)。

betweenness はネットワークのトポロジによって大きく変わってくる。従って、この betweenness が高いノードの分布状態が、渋滞現象において重要なファクターになることが予想される。今後は種々のネット

ワークモデルを用い、より詳細な定量的性質を検討していく必要がある。

参 考 文 献

- 1) 高安美佐子, “インターネットの交通流にみられる自己組織化,” 数理科学, 1月号, 1999.
- 2) M.Faloutsos, P.Faloutsos, C.Faloutsos, “On Power-Law Relationships of the Internet Topology,” ACM SIGCOMM, 29(4), 251-262, 1999.
- 3) <http://www.cs.bu.edu/BRITE/>
- 4) A.L.Barabási, 青木薫 訳, 「新ネットワーク思考」, NHK 出版, 2002.
- 5) G.Caldarelli, R.Marchetti, L.Pietronero, “The fractal properties of Internet,” Europhysics Letters, 52, 386-391, 2000.
- 6) B.Tadić, S.Thurner, G.J.Rodgers, “Traffic on complex networks: Toward understanding global statistical properties from microscopic density fluctuations,” arxiv:cond-mat/0401094, 2004.
- 7) B.Tadić, S.Thurner, “Information Super-Diffusion on Structured Networks,” arxiv:cond-mat/0307670, 2003.
- 8) K.I.Goh, B.Kahng, D.Kim, “Universal Behavior of Load Distribution in Scale-Free Networks,” Phys. Rev. Lett. 87(27), 278701, 2001.
- 9) D.J.Watts, S.H.Strogatz, “Collective dynamics of small-world networks,” Nature, 393, 440, 1998.
- 10) Adilson E.Motter, Ying-Cheng Lai, “Cascade-based attacks on complex networks,” Phys. Rev. E 66, 065102, 2002.