

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

平山 孝弘[†] 荒川 伸一[†] 新井 賢一^{††} 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

^{††}NTT コミュニケーション科学基礎研究所 〒619-0237 京都府相楽郡精華町光台 2-4

E-mail: †{t-hirayama,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††ken@cslab.kecl.ntt.co.jp

あらまし インターネットトポロジを計測した結果、出線数分布がべき則に従うことが明らかにされている。出線数分布がべき則に従うトポロジでは、出力リンク数が k であるノードの出現確率が $k^{-\gamma}$ (γ は定数) に近似できる。出線数分布がべき則に従うトポロジを生成する手法は多数提案されているが、出線数分布が同じであっても、生成手法に基づき確率的に生成されたトポロジでは、ISP のルータレベルトポロジの構造は再現できず、トポロジが持つ構造的特徴の違いにより、ネットワークの性能も大きく異なることが指摘されている。我々はこれまでに、ISP のルータレベルトポロジでは、トポロジが持つモジュール構造により、パケットの転送時間分布がロングテールになることを明らかにし、トポロジが持つ構造の違いによりトラヒックの振る舞いが異なることを示した。本稿では、各リンクの待ち行列長に見られる長期依存性に着目し評価を行う。計算機シミュレーションにより、ISP ルータレベルトポロジが、トラヒックの増大に対し、待ち行列長の変動を抑制し、長期依存性の発現を抑える性質を有していることを示す。

キーワード べき則、長期依存性、フロー制御、BA モデル、ルータレベルトポロジ

Characteristics of Packet Transfer Delay in Power-law Networks

Takahiro HIRAYAMA[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], Ken-ichi ARAI^{††}, and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

^{††} NTT Communication Science Laboratories

2-4 Hikaridai Seika-cho Soraku-gun, Kyoto, 619-0237, Japan

E-mail: †{t-hirayama,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ††ken@cslab.kecl.ntt.co.jp

Abstract Measurement studies of the Internet topology have revealed that the degree distribution follows a power-law. That is, the probability $P(k)$ that a node has k outgoing links follows $P(k) \sim k^{-\gamma}$. Many methods to generate power-law topologies are proposed, however, structure of the actual ISP topology and structure of the model-based topology differ from each other even if they have the same degree distribution. Besides, it is known that the power-law degree distribution does not determine traffic-level behaviors in the Internet topologies. In our previous work, we investigate packet-level delay behavior of topologies having power-law degree distribution. As a result, we revealed that end-to-end packet delay distribution of ISP topology has a long-tail characteristic caused by modularity structure of ISP topology. In this paper, we investigate the long range dependence (LRD) in time series of queue length on real ISP topology and model-based topology. Our results show that ISP topology prevents queue length from fluctuation against increased traffic.

Key words Power-law, Long Range Dependence, flow control, BA model, Router-level topology

1. はじめに

インターネットトポロジを計測した結果、ノードの出線数分布がべき則に従うことが明らかにされている。出線数分布がべき則に従うとは、ノードの出力リンク数が k 本であるノードの

出現確率 $P(k)$ が $k^{-\gamma}$ (γ は定数) で近似されることを言う。出線数分布がべき則に従うインターネットトポロジでは、多数の出力リンクを有するノード (以降、ハブノード) が少数となる一方で、多数のノードの出力リンクの数は少ない。

文献 [1] では、同一の出線数分布を持つトポロジを複数列挙し、トポロジが有する構造によってネットワークに収容可能なトラフィック量が大きく異なることが示されている。ISP ルータレベルトポロジでは、回線の物理距離やルータに接続可能なポート数などの技術的・物理的な制約に起因してトポロジの構造が定まり、それは、BA モデル [2] などの確率的なトポロジ生成では再現できないことが議論されている。すなわち、出線数分布がべき則に従うという性質にのみ着目して収容可能なトラフィック量などのネットワークの性質を議論することは不十分であり、現実のインターネットトポロジにおけるネットワークの性質を明らかにした上で、それがトポロジのどのような構造によってもたらされているのかを明らかにすることが重要である。

出線数分布がべき則となるトポロジにおいて、トラフィックの振る舞いに着目した研究がなされている [3-5]。これらの文献では、BA モデルにより出線数分布がべき則となるトポロジを生成し、そのトポロジ上でのネットワークの性質を示している。文献 [3] では、最短経路制御を適用した際に、ノードを経由する経路数の分布もまたべき則に従うことが示されている。文献 [4] では、ルータ間でフロー制御が行われている場合に輻輳がどのように拡散していくのかを示している。この文献では、BA モデルで生成したトポロジでは、ハブノードにパケットが集中するために輻輳が起りやすく、また、ハブノードの間にリンクが存在する確率が高いため、あるハブノードで輻輳が起きると別のハブノードへと輻輳が伝播し、ネットワークの広い範囲に輻輳が拡散すると指摘している。文献 [5] では、トラフィックが長期依存性を持つ場合とポアソン過程に従う場合のそれぞれについて、エンドホスト間のパケット転送遅延時間の平均値を比較している。その結果、長期依存性を持つトラフィックでは、キュー長の時間変動が大きいことと、BA モデルで生成したトポロジはハブノードで輻輳が発生しやすいことから、パケット転送遅延時間の平均値が最も大きくなると述べている。

これらの研究では BA モデルで生成したトポロジを対象とした評価が行われている。しかし、先にも述べたように、現実の ISP のルータレベルトポロジにおいて生じるネットワークの性質を明らかにすることが重要である。我々はこれまでに、出線数分布がべき則に従う ISP のルータレベルトポロジを対象とし、ノード間のフロー制御によりトラフィックの振る舞いがどのように変化するのかを明らかにしてきた。文献 [6] では、ISP のルータレベルトポロジでは、エンドホスト間のパケット転送遅延時間の分布の裾野が広がることを示し、それが ISP トポロジのモジュール構造によるものであることを示している。

本稿では、出線数分布がべき則となる ISP のルータレベルトポロジにおいて、リンクを経由するトラフィックの時間変動の性質に着目する。文献 [7] や文献 [8] では、TCP によるフロー制御や、転送されるファイルサイズの分布がべき則に従うことを起因として、トラフィックに長期依存性の性質が生じると述べている。文献 [9] では、長期依存性を生み出す要因は、トランスポート層におけるエンドホスト間のフィードバック型フロー制御によるものであり、アプリケーション層が転送するファイル

サイズの分布によらないと述べてられている。さらにこの文献では、TCP よりも単純である、ストップアンドウェイト方式でパケット交換を行った場合にも、トラフィックに長期依存性が現れることが示されている。しかし、これらの研究では、小規模で単純な構造のトポロジを対象としての評価が主で、インターネットトポロジのように大規模で複雑な構造を有するトポロジにおけるトラフィックの特性については明らかになっていない。

そこで、本稿では、出線数分布がべき則となる ISP のルータレベルトポロジを対象とし、パケット転送遅延時間の分布に加え、各リンクのキュー長の時間変動に着目し、どのようなリンクにおいて、経由するトラフィックに長期依存性が現れるかを計算機シミュレーションにより評価する。あるリンクのキュー長が強い長期依存性を持ち、キュー長が時間により大きく変動する場合、そのリンクを経由するパケットの転送遅延時間にも大きな影響を与えると考えられる。ISP のルータレベルトポロジと BA モデルにより生成したトポロジを対象に行ったシミュレーションの結果、ISP ルータレベルトポロジではトラフィックが増大した場合に、経由するトラフィックに長期依存性が現れるリンクの数が BA トポロジに比べて少なく、ISP ルータレベルトポロジはトラフィックの増大に対して、トラフィックの長期依存性の発現を抑制する性質を有していることが明らかになった。

本稿の構成は以下の通りである。2章で、本稿で行ったシミュレーションのモデル、3章でこれまでの研究で得られた結果について述べる。4章で ISP ルータレベルトポロジがトラフィックの長期依存性に与える影響について述べ、5章でまとめと今後の課題を述べる。

2. ネットワークモデル

2.1 ネットワークトポロジ

ネットワークトポロジとして、現実の ISP トポロジとして米国の通信会社である AT&T 社のルータレベルトポロジを用いる。[10] により計測して得られた 523 ノード、1304 リンクのトポロジ (以降、AT&T トポロジと呼ぶ) であり、ノードの出線数分布はべき則に従う。また、比較のために、BA モデルに基づいて AT&T 社のトポロジとノード数およびリンク数が等しいトポロジを BA モデルにより生成した。以降では、このトポロジを BA トポロジと呼ぶ。

2.2 ノード処理モデル

ネットワーク内の各ノードは出力リンク毎に、無限にパケットを格納できるバッファを持つものとする。パケットを受け取ったノードは、自身が宛先ノードである場合、そのパケットをネットワークから取り除く。自身が宛先ノードでない場合、経路制御アルゴリズムによって定まる次ホップのノード向けの出力リンクのバッファに格納される。本稿では最短経路制御を用い、複数の最短経路が存在する場合は、次ホップのノードは均等の確率で選ぶ。出力リンクは FIFO (First-In First-Out) に基づいてバッファ中のパケットを次ホップのノードへ転送する。各リンクの伝搬遅延時間は 1 単位時間とする。

2.3 トラフィックモデル

ランダムに選んだ 2 ノード間にセッションを生成し、それぞ

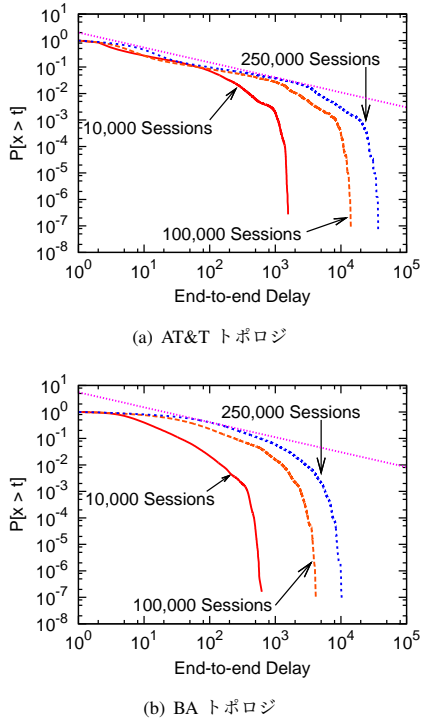


図1 パケットの転送遅延時間分布 (CCDF)

れのセッションはストップアンドウェイト方式でパケットを交換する。ここでいうストップアンドウェイトとは、送信ノードは1つデータパケットを送信すると、受信ノードからのACKを受け取るまで次のパケットを送信しないことを指す。単純化のために、タイムアウトによる再送は行わない。それぞれのセッションのパケット送信開始時刻はランダムで、全てのセッションはシミュレーション時間内に消滅せず、データパケット、もしくはACKパケットの送信を繰り返す。

3. ISPトポロジにおけるパケット転送遅延

3.1 パケット転送遅延分布

本章では、あるノードから送出されたパケットが、宛先のノードに到着するまでの時間であるパケット転送遅延時間に着目する。図1は、AT&Tトポロジ、BAトポロジにおけるパケット転送時間の相補累積分布である。100,000単位時間のシミュレーションのうち、終了直前の10,000単位時間を集計区間とし、区間に宛先に到着したパケットの転送遅延時間を集計した。図1(a)、図1(b)ともに、図中の直線は傾き-0.59である。両トポロジともに、セッション数の増加に伴い遅延が増大している。しかし、AT&Tトポロジにおける転送遅延時間の分布(図1(a))では、遅延時間の増加量に対して出現確率が下がりにくくロングテールな性質が観察される。一方、BAトポロジにおける転送時間分布(図1(b))ではそのような特徴は見られなかった。2つのトポロジはノード数、リンク数が同じであることから、2つのトポロジの持つ構造の違いがパケット転送遅延時間分布が異なる要因であると考えられる。

3.2 ルータレバルトポロジの構造分析

転送遅延時間分布の違いの要因となる構造的特徴を明らか

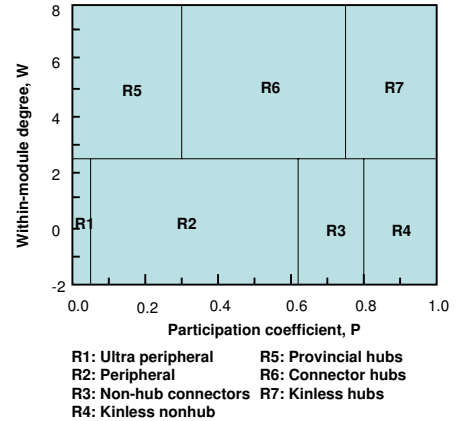


図2 Participation coefficient と Within-module degree を用いたノードの役割の分類

にするため、PZ指標[11]により、2つのトポロジの構造を比較する。PZ指標では、トポロジを複数のモジュールに分け、ノード*i*がモジュール間を結ぶリンクをどの程度持つかを表す指標であるParticipation coefficient, P_i と、ノード*i*の出線数のモジュール内の平均出線数に対する偏差を表す指標であるWithin-module degree, Z_i を用いて、トポロジ内の各ノードの役割を分類する。2つの指標は次のように定義される。

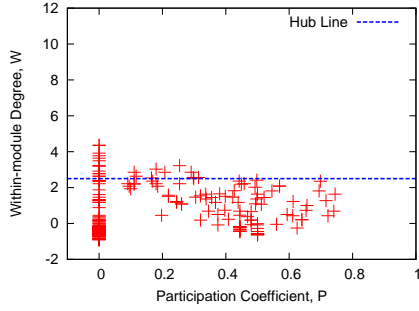
$$P_i = 1 - \sum_{s=1}^{N_m} \left(\frac{k_{is}}{k_i} \right)^2 \quad (1)$$

$$Z_i = \frac{k_i - \langle k_{s_i} \rangle}{\sigma_{s_i}} \quad (2)$$

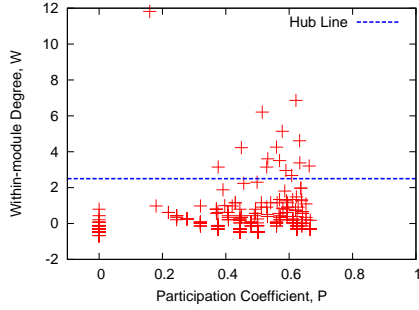
式(1)において、 k_{is} はノード*i*が接続するリンクのうち、宛先ノードが同じモジュール*s*に含まれる割合である。つまり、この指標はノード*i*に接続するリンクの宛先ノードが全てモジュール*s*内にあれば0、すべて*s*と異なるモジュールの場合は1となる。式(2)において、 k_i はノード*i*の出線数、 $\langle k_{s_i} \rangle$ 、 σ_{s_i} はノード*i*が属するモジュール*s*における出線数の平均および標準偏差である。モジュール内の平均出線数に対してノード*i*の出線数が大きい場合に Z_i は大きくなる。

これら2つの指標によりノードの役割を図2のように分類し、AT&Tトポロジ、BAトポロジに対して適用した結果を図3に示す。図3(b)を見ると、BAトポロジにおけるハブノードの多くが“Connector Hubs”に分類され、モジュール間をつなぎ大量のパケットを転送する働きをしている。一方、図3(a)を見ると、AT&Tトポロジにおけるハブノードの多くは“Provincial Hubs”に分類され、モジュール内下位層のトラフィックを集約して上位層へと中継する役割を果たしている。

PZ指標による比較の結果、AT&Tトポロジにおけるハブノードはモジュール内のトラフィックを集積する働きをし、BAトポロジではハブノードが持つ多数のリンクがモジュール間を結ぶ働きをしていることが明らかになった。2つのトポロジはハブノードが持つ役割、およびモジュール間を結ぶリンクの数が異なり、こうした構造の違いがパケットの転送遅延時間分布の違いに影響していると考えられる。このことを確認するために、AT&Tトポロジにおいて、米国の1つの州が1つのモジュール



(a) AT&T トポロジ



(b) BA トポロジ

図3 ノード役割の分類

ルであるとみなし、同じモジュールに属する2ノード間を移動するパケットと、2つの異なるモジュールに属する2ノード間を移動するパケットを区別し、パケット転送遅延時間分布を求めた。その結果を図4に示す。この図より、モジュール間を移動するパケットにより転送遅延時間が長くなるのがわかる。モジュール間を結ぶ少数のリンクにパケットが集中し、混雑することで、モジュール間を移動するパケットの転送遅延時間が増大していると考えられる。これらの結果より、AT&Tトポロジにおいてパケットの転送時間分布がロングテールになる要因が、モジュール間を繋ぐリンクが少ない、モジュール度の高い構造にあると言える。

4. べき則の性質を有するトポロジにおけるキュー長の長期依存性

4.1 R/S plot による長期依存性の測定

前章ではAT&Tトポロジの構造的特徴により、転送遅延時間分布がロングテールになることを示した。そこで本章では、リンクのキュー長、すなわちリンクを経由するトラヒックの長期依存性に着目し、ネットワーク性能を評価する。強い長期依存性を持つトラヒックは集計時間のスケールによらず大きく変動し、バースト性が失われにくい。バースト性が失われなければ、キュー長は時間により大きく変動し、パケット転送遅延時間に強い影響を与えると考えられる。

長期依存性の評価指標にはハースト値 (H) を用いる。ハースト値は0.5から1の範囲で表され、1に近いほど長期依存性が強いと見なす。ハースト値の測定方法にはR/S plot [12] を用いる。R/S plot ではまず、集計区間 n に対応する R_n/S_n 値を以下の式 (3) で求める。

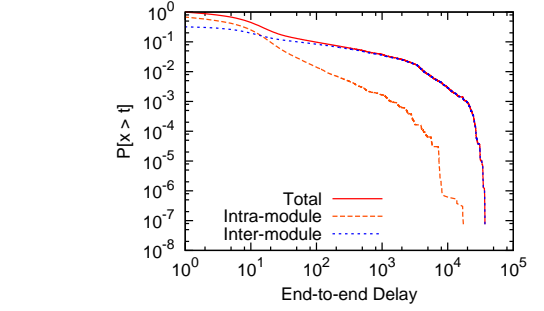


図4 モジュール間を移動するパケット、モジュール内を移動するパケットを区別した転送遅延時間分布 (AT&T トポロジ)

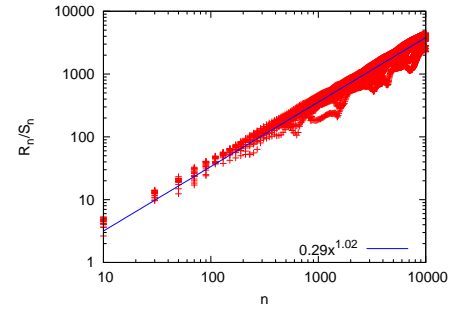


図5 ボトルネックリンクのキュー長に対するR/S plot (AT&T トポロジ)

$$R_n/S_n = 1/S_n [\max(0, W_1, W_2, \dots, W_n) - \min(0, W_1, W_2, \dots, W_n)]$$

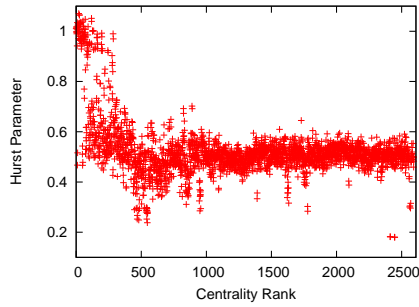
$$(W_k = (X_1 + X_2 + \dots + X_k) - kX(n), k = 1, 2, \dots, n)$$

ここで $X(n)$ は、 n 個の要素の標本平均、 S_n は標本標準偏差である。集計区間の幅 n を徐々に広げていき、 n を横軸、 n に対応する R_n/S_n を縦軸にとった両対数グラフの近似曲線の傾きからハースト値 H を求める。

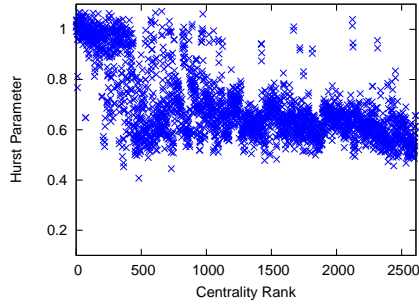
4.2 ボトルネックリンクを経由するトラヒックの長期依存性

まず、トポロジ内で最も Betweenness Centrality が高いリンクをボトルネックリンクと見なし、そのリンクのバッファ内パケット数であるキュー長の時間経過による変動をもとに長期依存性を評価する。ここで Betweenness Centrality とは、最短経路を選択した場合に、あるリンクを経由するノードペアの数によって定まる値である。エンドホスト間フロー制御によりボトルネックリンクを経由するトラヒックに長期依存性が現れることは文献 [9] で示されているが、そのことを確認するため、エンドホスト間フロー制御が働く場合と、働かない場合を比較する。

AT&Tトポロジにおいて2章で述べたモデルを用いた場合のシミュレーションでは、図5のように近似曲線の傾き、すなわちハースト値は1に近く、長期依存性が強いことがわかった。図5は、AT&Tトポロジにおいてセッション数を10,000とした場合の結果であるが、セッション数を250,000とし負荷を大きくした場合や、BAトポロジを対象とした場合でも同様にボトルネックリンクのキュー長の時間変動に強い長期依存性が見られるという結果が得られた。一方、本稿では図は省略するが、エンドホスト間フロー制御が働かず、各ノードがポアソン過程



(a) 10,000 セッション



(b) 250,000 セッション

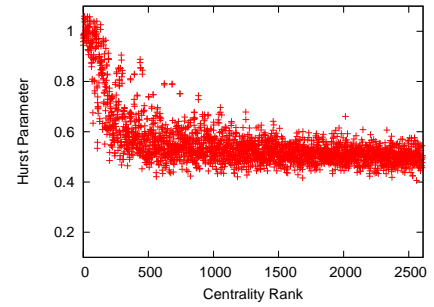
図6 AT&T トポロジにおける Betweenness Centrality のランクとハースト値の相関

に従う間隔で他のノードへパケットを送出するモデルを用いた場合、ボトルネックリンクにおけるハースト値は 0.64 となり、長期依存性が弱いことを確認している。エンドホスト間フロー制御が働く場合にハースト値が高くなっていることから、ボトルネックリンクにて観察される長期依存性はエンドホスト間フロー制御により生み出されていると考えることができ、[7,9]とも合致している。

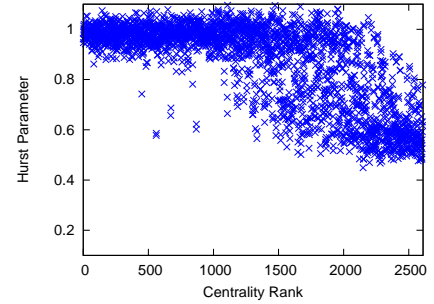
4.3 トポロジ内全リンクのキュー長における長期依存性

ボトルネックリンクにおけるキュー長の長期依存性を評価した結果、AT&T トポロジ、BA トポロジともにセッション数の多寡にかかわらず長期依存性が現れており、トポロジが持つ構造の違いによる差は見られなかった。そこで本節では各トポロジのボトルネックリンクを含む全てのリンクのキュー長におけるハースト値を求め、トポロジがもつ構造的特徴と長期依存性の関係性を評価する。

図6、図7は、セッション数を 10,000、および 250,000 とした場合の、AT&T トポロジ、BA トポロジにおける Betweenness Centrality のランクとキュー長の時間変動より得たハースト値の相関を示している。それぞれ横軸は Betweenness Centrality の順位を表し、縦軸はそのリンクにおけるキュー長の時間変動より得たハースト値を示している。図6(a)、および図7(a)を見ると、セッション数が 10,000 の場合、AT&T トポロジ、BA トポロジともに、ハースト値が 1 に近いリンクは Betweenness Centrality の高いリンクに集中していることがわかる。ネットワーク負荷が小さい状況でも、Betweenness Centrality の高いリンクには、多数のパケットが集中すること、およびエンドホスト間フロー制御によりパケットの送出間隔が制御されているこ



(a) 10,000 セッション



(b) 250,000 セッション

図7 BA トポロジにおける Betweenness Centrality のランクとハースト値の相関

とが、Betweenness Centrality の高いリンクでキュー長の長期依存性が強くなる要因であると考えられる。

次にセッション数を 250,000 とした場合、Betweenness Centrality とハースト値の相関は、AT&T トポロジと BA トポロジとで大きく異なる。AT&T トポロジを対象にして得られた図6(a)と図6(b)を比較すると、ハースト値が 1 に近いリンクの数はあまり増加していないが、BA トポロジを対象にして得られた図7(a)と図7(b)を比較すると、多くのリンクでハースト値が増加し 1 に近くなることからわかる。つまり、AT&T トポロジは、BA トポロジに比べると、セッション数が増加し、負荷が増大しても、長期依存性が現れにくいリンクが多いと言える。

本稿では省略するが、米国の通信事業者である Sprint 社のルータレベルトポロジを計測して得たトポロジ (467 ノード、1280 リンク) においても同様の評価を行い、AT&T トポロジと同様に、セッション数が増加してもハースト値が高い値を示すリンクが増えにくいことを確認している。これらより、AT&T トポロジ、Sprint トポロジの 2 つの ISP トポロジはトラヒックが増大しても、長期依存性が現れにくく、キュー長の時間変動を抑制する構造を持っているといえる。

4.4 ルータレベルトポロジの構造がトラヒックの時間変動に与える影響

リンクを経由するトラヒックに長期依存性が現れにくくなる要因が、AT&T トポロジが持つ構造にあることを確認するため、3.2 節と同様に、AT&T トポロジがもつモジュール構造に着目する。3.2 節でも述べたように、AT&T トポロジではハブノードはモジュール内のトラヒックを集積する働きをしており、モジュール間は少数のリンクで結ばれている。そこでモジュ

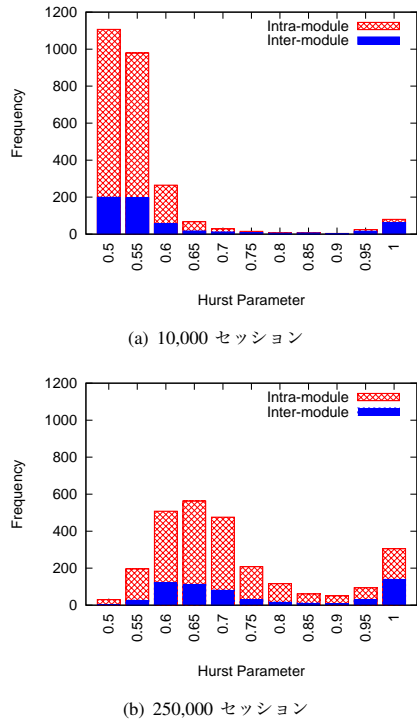


図8 モジュール間リンク、モジュール内リンクを区別したハースト値の度数分布 (AT&T トポロジ)

ル内を結ぶリンク、モジュール間を結ぶリンクを区別し、セッション数が多い場合、少ない場合のそれぞれの場合のハースト値の分布を評価する。

図8は、セッション数が10,000、および250,000のそれぞれにおける、各リンクのキュー長のハースト値の度数分布である。横軸はハースト値、縦軸はその値を示したリンクの存在確率を表している。図6では0.5未満や、1を超えるハースト値が観察されるが、図8では、0.5未満の値は0.5、1を超える値は1とみなして分布を作成した。図8(a)を見ると、セッション数が10,000と負荷が小さい場合では、高いハースト値が計測されたリンクの多くは、モジュール間を結ぶリンクであることがわかる。セッションが少ない場合でもモジュール間を結ぶリンクにはトラヒックが集中しやすいため、キュー長が時間により大きく変動すると考えられる。モジュール内を結ぶリンクでは、0.5から0.6前後の値が大半を占め、ハースト値が1に近い値を示すリンクはほとんど見られない。

一方、図8(b)を見ると、セッション数が250,000となり負荷が大きい場合には、ハースト値が1に近い値を示すリンクの存在確率が上昇している。その内訳を見るとモジュール間を結ぶリンクだけでなく、モジュール内を結ぶリンクでも、高いハースト値が計測されたリンクが存在していることがわかる。モジュール内を結ぶリンクの中にも、高いハースト値を示すリンクの出現確率が高くなっているものの、モジュール内を結ぶリンクの多くは、ハースト値は0.65前後であり、それらのリンクではセッション数の増加による影響が小さいといえる。この点より、モジュール間を結ぶリンクに多くのトラヒックが集中することで、他のリンクではトラヒックの時間変動が抑制されて

いると考えられる。

5. おわりに

本稿では、キュー長の長期依存性に着目し、ISPトポロジと、BAモデルにより生成したトポロジを対象に、それぞれのトポロジにおいてキュー長の時間変動の様子がどのように変化するかを評価した。その結果、ISPトポロジは、トラヒックが増大してもキュー長の変動が大きくなるリンクの数が少なく、キュー長の時間変動を抑える特徴を有していることが明らかになった。ISPトポロジのモジュール構造に着目した結果、少数のモジュール間を結ぶリンクは多量のトラヒックが流れるため、キュー長の変動が大きくなるが、他のリンクではトラヒック量が抑えられるため、キュー長の変動が小さくなることがわかった。

今後は、リンクの回線容量が異なるトポロジを用いた場合の評価や、通信プロトコルとしてTCPを用いた場合の、よりインターネットに近いシミュレーション環境での評価を行うことが考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究 (A)21240004 によっている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, "A first-principles approach to understanding the Internet's router-level topology," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 34, pp. 3–14, Oct. 2004.
- [2] A.-L. Barabási and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [3] K.-I. Goh, B. Kahng, and D. Kim, "Universal behavior of load distribution in scale-free networks," *Physical Review Letters*, vol. 87, Dec. 2001.
- [4] B. Tadić, S. Thurner, and G. Rodgers, "Traffic on complex networks: Towards understanding global statistical properties from microscopic density fluctuations," *Physical Review E*, vol. 69, Mar. 2004.
- [5] M. Woolf, D. Arrowsmith, R. Mondragon, J. Pitts, and S. Zhou, "Dynamical modelling of TCP packet traffic on scale-free networks," *Physical Review E*, Oct. 2004.
- [6] T. Hirayama, S. Arakawa, K. Arai, and M. Murata, "On the packet delay distribution in power-law networks," in *Proceedings of the First International Conference on Evolving Internet (INTERNET 2009)*, Aug. 2009.
- [7] K. Park, G. Kim, and M. Crovella, "On the relationship between file sizes, transport protocols, and self-similar network traffic," in *Proceedings of ICNP*.
- [8] A. Feldmann, A. C. Gilbert, W. Willinger, and T. G. Kurtz, "The changing nature of network traffic: scaling phenomena," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 28, no. 2, pp. 5–29, 1998.
- [9] K. Fukuda, M. Takayasu, and H. Takayasu, "A cause of self-similarity in TCP traffic," *International Journal of Communication Systems*, vol. 18, pp. 603–617, Aug. 2005.
- [10] 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.
- [11] R. Guimera and L. A. N. Amaral, "Functional cartography of complex metabolic networks," *Nature*, vol. 433, p. 895, Feb. 2005.
- [12] W. E. Leland, M. S. taquet, W. Willinger, and D. V. Wilson, "On the self-similar nature of ethernet traffic (extended version)," *IEEE/ACM Transactions on networking*, vol. 2, pp. 1–15, Feb. 1994.