

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

細木 茂洋[†] 荒川 伸一[†] 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

E-mail: †{s-hosoki,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 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、ネットワーク制御手法の性能は、トポロジの構造的特徴のみならず、回線容量やノード処理能力にも大きく依存すると考えられる。本稿では、通信ネットワーク固有の特徴であるリンクの物理回線容量に着目し、そのモデル化を行う。まず、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がべき則に従うことを示す。次に、回線容量がべき則であることの利点を明確にするために、様々な物理回線容量分布を生成し、トポロジに割り当て、ネットワークに収容可能なトラヒック量を比較評価する。対数正規分布に従うトラヒックマトリクスを生成し、ISPトポロジおよびトポロジのモデル化手法により生成したトポロジに適用した結果、回線容量分布がべき則に従う場合に収容可能なトラヒック量が増加することがわかった。また、既存のルータレベルトポロジのモデル化の研究において議論されていたノード処理能力制約のみでは、収容可能なトラヒック量が極めて多くなり、適切にモデル化できないことも明らかとなった。

キーワード べき則, ルータレベルトポロジ, 回線容量, インターネットのモデル化, トラヒックマトリクス, 対数正規分布

On the Link Capacity Distribution in ISP's Router-level Topologies

Shigehiro HOSOKI[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], and Masayuki MURATA[†]

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

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

E-mail: †{s-hosoki,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Modeling the Internet is vital for network researches. Recent measurement studies on the Internet topology show that the degree distribution obeys 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 in the Internet is the topological structure. However, other factors, which are even more important, are link capacities and node processing capacities of the network because these are features particular to communication networks. In this paper, we investigate how to model the link capacity in the router-level topologies. We first reveal that the link capacity distribution of ISP's backbone network in Japan obeys the power-law distribution. We then evaluate the network throughput of power-law distribution of link capacities. Our numerical results show that the network taking power-law capacity distributions can accommodate much more traffic than the network taking exponential or uniform capacity distributions.

Key words power-law, router-level topology, link capacity, modeling the Internet, traffic demand matrix, lognormal distribution

1. はじめに

ネットワークの研究において、インターネットをどのようにモデル化するかは重要な課題である [1]。ネットワーク制御方式の性能は、インターネットのトポロジ、回線容量、ノード処理能力などに大きく依存することから、何らかの方式を提案して有効性を示す際には、対象とするネットワークを適切にモデル化して評価することが重要となる。そのためには、通信ネットワーク固有の特徴が何であるか、また、その特徴が何によってもたらされるかを明らかにする必要がある。

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なっている [2]。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が少数となる一方で、多数のノードの出力リンク数は少ない。

次数分布がべき則であることに着目したトポロジのモデル化手法はこれまでも広く検討されている [3–5]。その中でも、ルータレベルの物理的な制約を考慮したトポロジのモデル化手法が [4, 5] で議論されている。文献 [4] では、トポロジにノードを追加する際に、物理距離及びノード接続後のホップ数で定義される論理距離の和を最小化することで生成したトポロジにおいて、次数分布にべき則が現れることが示されている。しかし、次数が 1 となるノードが多くルータレベルトポロジを適切にモデル化できないとの指摘もある [6]。文献 [5] では、べき則に従う同一の次数分布を有するいくつかのトポロジを列挙し、ノードが処理可能なトラヒック量の制約下でそれぞれのトポロジに収容可能なトラヒック量を評価している。ノードの処理能力に上限がある環境下では、次数の大きいノードには回線容量の小さいリンクが連結され、次数が比較的小さいノードには回線容量の大きなリンクが連結されることから、次数の大きいノードをネットワークの末端に設置し、回線容量の大きなリンクと連結しているノードをネットワークの基幹に設置することで、収容可能なトラヒック量が大きくなることを指摘している。しかし、ISP のルータレベルトポロジである Sprint 社や AT&T 社のトポロジとは構造が大きく異なり、経路制御手法などのネットワーク制御手法を適用した際の性能も大きく異なることが明らかになっている [7]。

上記の研究では、次数分布がべき則というトポロジの特徴にもとづいてルータレベルトポロジのモデル化に関する研究が行われてきた。そこでは、リンクの物理回線容量を無視している、もしくは、一律であるという仮定が置かれてきた。しかし、実際のインターネットにおいては、リンクの物理回線容量の違いにより、ネットワークの性能が大きく異なると考えられる。

そこで、本稿ではルータレベルトポロジの性質としてリンクの回線容量に着目し、リンクの物理回線容量のモデル化に取り組む。まず、[8] に記載の国内 ISP におけるリンク回線容量のデータを用いて回線容量分布を算出した結果、傾き -1.11 のべき則となっていることを明らかにする。次に、回線容量分布

がべき則に従うこと理由を明らかにするために、様々な分布を用いて生成した回線容量をリンクに割り当て、物理回線容量の分布の違いにより収容可能なトラヒック量にどのような違いがあるのかを明らかにする。その結果、回線容量分布がべき則である場合に、ネットワークに収容可能なトラヒック量が大きくなることがわかった。また、ネットワークに収容可能なトラヒック量を評価する場合に、文献 [5] において議論されている次数にもとづいたノード処理能力制約のみでは不十分であり、回線容量分布がべき則である特徴を考慮することが重要であることを示す。

本稿の構成は次の通りである。まず 2 章で商用バックボーンネットワークにおける回線容量分布について述べる。3 章で評価対象のトポロジについて説明し、4 章で回線容量を割り当てたトポロジに収容可能なトラヒック量を求める。最後に 5 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. ISP ネットワークの回線容量分布

文献 [8] では、国内商用プロバイダである III 社のバックボーンネットワークを構成する NOC (ネットワークオペレーションセンター) をノードとみなし、ノード処理能力の年次変化を調査している。そこではノード処理能力の分布がべき則であり、また近年は東京への一極集中が加速していき指数が増加傾向にあると指摘している。2002 年の III 社のネットワークにおけるノード処理能力の分布を図 1 に示す。この図の縦軸はノードの処理能力 (ノードに連結している回線の容量の総和) である。図に示すように、ノード処理能力の分布はべき的であり、その傾きは -2.6 前後となっている。一方、物理回線容量については [8] では議論されていないものの、[8] に記載されている III 社の回線容量のデータをもとに回線容量の分布を求めた結果 (図 2)、そ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。

上記の議論は、2002 年の III 社の回線容量にもとづいており、他の ISP 社のルータレベルトポロジに適用できるとは限らない。しかし、ルータの構成がノンブロッキング構成である場合には回線容量分布の傾きは -1 となる。すなわち、回線容量 X を持つあるリンクに対して、その $1/\alpha$ の容量 X/α を持つリンクを α 本用意する場合、回線容量分布の傾きは -1 となる。従って、ルータレベルトポロジにおいて回線容量分布の傾きを -1 と考えることは妥当であると推察される。

4 章では、回線容量分布の傾きを -1 (α を 1.2) とし、これによりネットワークに収容可能なトラヒック量が増加することを示す。

3. 評価トポロジ

本稿で評価対象とするトポロジを以下に説明する。

3.1 ISP トポロジ

それぞれ米国の通信会社である AT&T 社、Sprint 社のルータレベルトポロジを観測して得られたトポロジである。AT&T トポロジは 523 ノード、1304 リンク、Sprint トポロジは 467 ノード、1280 リンクである。

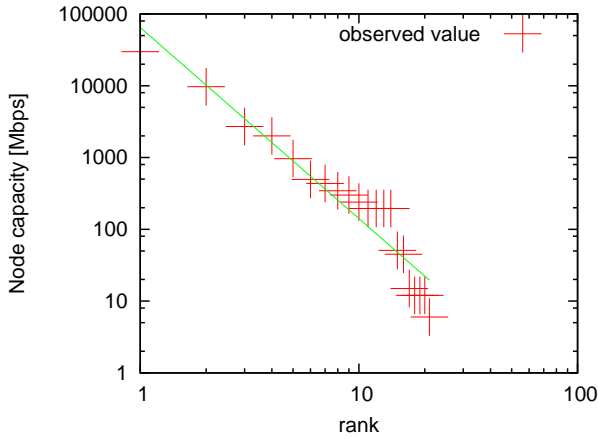


図1 III NOC の回線総容量とランクとの関係

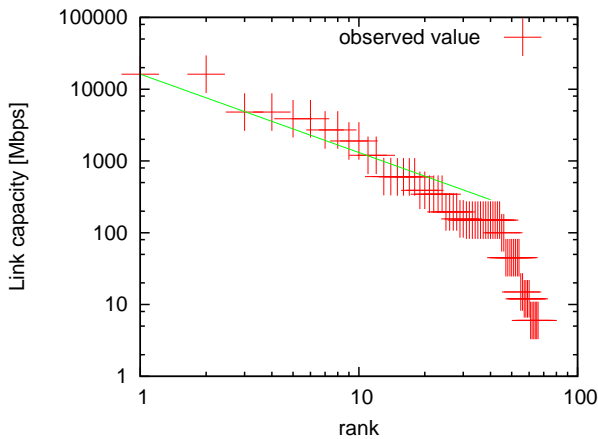


図2 III 回線容量分布

3.2 Abilene-inspired トポロジ

文献 [5] で評価されているトポロジで、学術研究ネットワーク Abilene をもとにしたルータレベルトポロジ (869 ノード, 877 リンク) を用いる。文献 [5] では、ルータの物理的制約を考慮し、トポロジ生成モデルが述べられている。ルータの物理的制約とは、高性能なルータであっても、処理能力の限界から容量の大きな回線を多数収容することができないことである。Abilene-inspired トポロジはネットワークの基幹に次数の小さいルータを配置することでネットワーク全体のスループット向上を図ったトポロジである。

3.3 BA トポロジ

m_0 ノードの完全グラフを初期状態として、1 つノードを加える (Incremental Growth) ごとに、次数に比例する確率で選択したノードとの間にリンクを張る (Preferential Attachment) BA モデルを用いて生成したトポロジである [3]。

以下に、初期ノード数 m_0 の完全グラフからノード数 N のトポロジを生成する手順を示す。

Step. 1: m_0 個のノードからなる完全グラフを用意する。Step. 2 へ。

Step. 2: ノード数が N 未満ならば Step. 3 へ。ノード数が N ならば Step. 5 へ。

Step. 3: ノードを 1 つ追加する (Incremental Growth)。Step.

4 へ。

Step. 4: 式 (1) の確率に従い、相異なる m ($\leq m_0$) 個のノードを選択し、ノードとの間に m 本のリンクを張る (Preferential Attachment)。Step. 2 へ。

$$\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (1)$$

Step. 5: トポロジ生成を終了する。

以上、段階的成長と優先接続という 2 つのルールから、次数分布がべき則に従うトポロジを生成する。本稿では、 $m_0 = 1$ としてまず 869 ノード, 868 リンクのトポロジを生成し、abilene-inspired トポロジとリンク数を合わせるために Step. 4 にもとづいて 9 本のリンクを追加する。

3.4 FKP トポロジ

1 ノードを初期トポロジ状態として、1 つノードを加えるごとに、以下の式を満たすリンクを既存ノード j と新規ノード i の間に張る FKP モデルを用いて生成したトポロジである [4]。

$$\min_j \alpha \times d_{ij} + h_j \quad (2)$$

ここで、 d_{ij} はノード i とノード j の間の物理距離、 α は物理距離への重み、 h_j は論理距離 (ホップ数) である。論理距離 h_j は次のいずれかを選択する。

- (1) ノード j とその他のノード間の平均ホップ数。
- (2) ノード j とその他のノード間の最大ホップ数。
- (3) ノード j と初期ノード間のホップ数。

論理距離 h_j として 3 つの内のいずれを選択しても、パラメータ α の設定によって指数分布がべき則に従うトポロジが生成可能である。本稿では (3) を用い、abilene-inspired トポロジとリンク数を合わせるため、リンクを 2 本張るノードを 9 つトポロジ生成前にランダムに選択しておく。この 9 つのノードは、物理距離と論理距離の重み付き和が最小となるノードに加え、その次に重み付き和が小さいノードにもリンクを張る。これにより、869 ノード, 877 リンクのトポロジを生成する。

4. ネットワークに収容可能なトラフィック量

2 章では、国内 ISP の回線容量分布がべき則に従うことを示した。回線容量分布がべき則であることの理由を明らかにするために、本稿では、回線容量分布が指数分布である場合、および、回線容量がすべて等しい場合のそれぞれに対して収容可能なトラフィック量を求め、回線容量分布がべき則である場合の結果と比較する。

4.1 回線容量の割り当て

まず、傾きが -1 のべき則となるように回線容量分布を求める。次に回線容量分布が指数分布である場合、すべて等しい場合のそれぞれについて、回線容量分布がべき則に従う場合の回線容量の総和で正規化する。その結果を図 3 に示す。

次に、図 3 に示した回線容量を、トポロジの各リンクに割り当てる。本稿では、edge betweenness centrality の高いリンクから降順に割り当てるものとする。edge betweenness centrality は各リンクに対して与えられる指標であり、リンクを経由する最

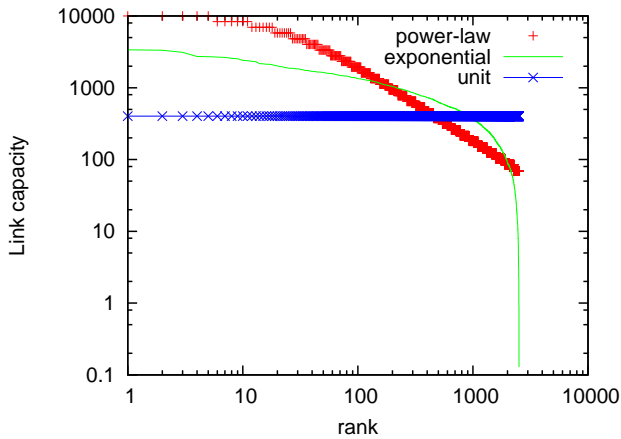


図3 正規化した回線容量分布の例

短経路の数として定義される．edge betweenness centrality の高いリンクから降順に割り当てることで，ノード対の最短経路が多いリンクに対して大きい回線容量を割り当てる．

4.2 評価指標

各トポロジに対して前節の3つの回線容量分布を割り当てた後，それぞれの回線容量分布において収容可能なトラフィック量を求める．収容可能なトラフィック量を求めるにあたっては，まずトラフィックマトリクスを生成し，そのトラフィックマトリクスをリンク回線容量の制約下で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する．

4.3 収容可能なトラフィック量の評価

各トポロジについて，回線容量制約を考慮した場合に収容可能なトラフィック量を検証する．適用するトラフィックマトリクスは対数正規分布に従うものとする [9]．また，トラフィックマトリクスの分散値は 0.1 ~ 10.0 まで 0.1 刻みで変化させ，それぞれの分散値に対して対数正規分布を用いて対地間トラフィック量を定める．なお，トラフィックマトリクスは，全ての対地間トラフィック量が 1 である場合の総トラフィック量で正規化している．ノード間の経路は最短経路により定め，同ホップ数の最短経路が複数存在する場合，いずれかをランダムに選択する．図 4 ~ 8 はトラフィックマトリクスの分散値に対するネットワークに収容可能なトラフィック量を示した結果である．ここでは信頼区間 95% でプロットしている．

図 4 と図 5 から，対数正規分布の分散値 2 以下の範囲に着目すると，べき則に従う回線容量分布で収容可能なトラフィック量が多い．文献 [9] ではトラフィックマトリクスのモデル化がなされており，そこでは対数正規分布の分散値が 1 前後であることが指摘されている．従って，現実的なトラフィックマトリクスでは，べき則に従う回線容量により収容可能なトラフィック量が大きくなると言える．また，分散値がおおよそ 2 まではべき則に従う回線容量分布で収容可能なトラフィック量が多いことから，トラフィックマトリクスの変動に対しても頑強性を持っていることがわかる．同様の結果が図 6，図 7，図 8 から観察される．

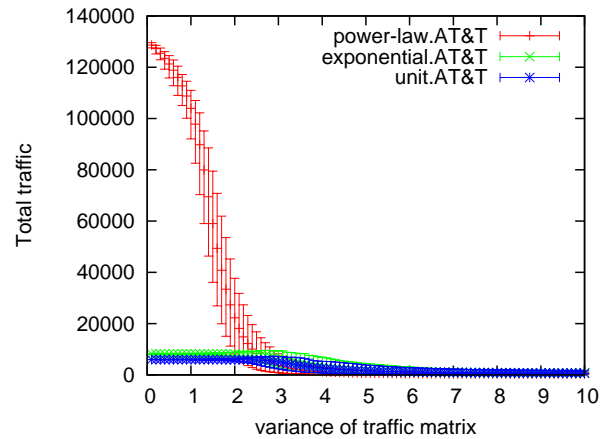


図4 収容可能なトラフィック量: AT&T トポロジ

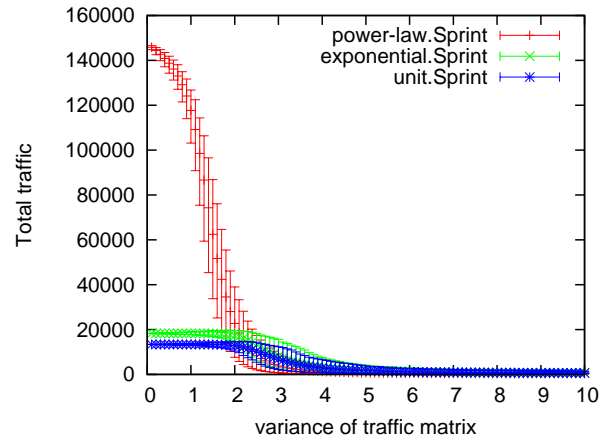


図5 収容可能なトラフィック量: Sprint トポロジ

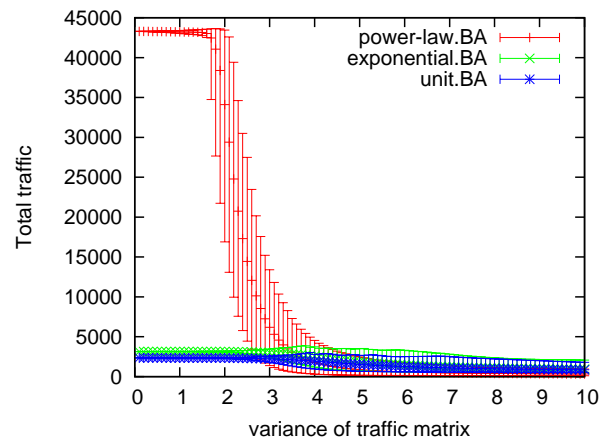


図6 収容可能なトラフィック量: BA トポロジ

以上より，回線容量分布がべき則であるときにはネットワークに収容可能なトラフィック量が大きくなり，またトラフィックマトリクスの変化に対して頑強性を持っているので，実在の ISP トポロジにおける回線容量分布がべき則になっているものと考えられる．

4.4 ノード処理制約のみを考慮した場合

文献 [5] では，ルータ容量はそのルータに接続している回線の本数に影響されるとしている．接続する回線の本数と回線一

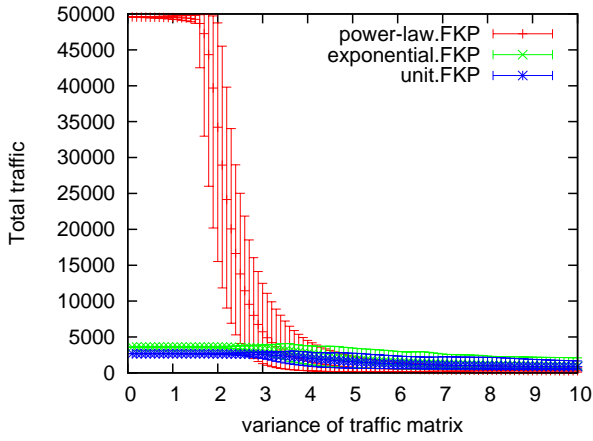
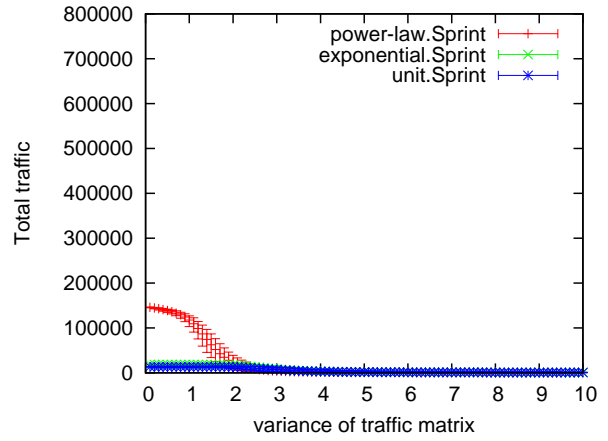


図7 収容可能なトラフィック量: FKP トポロジ



(a) 回線容量分布割り当てによるリンク制約

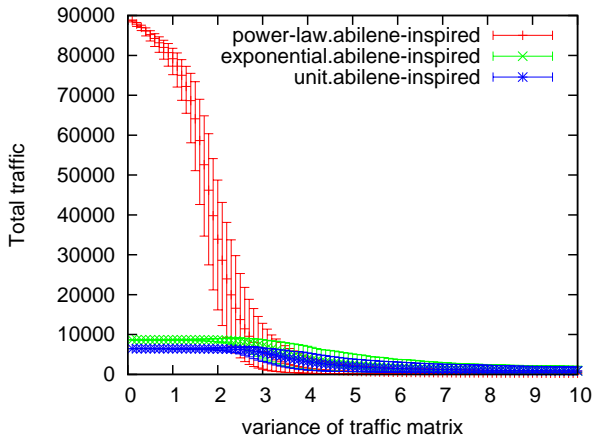
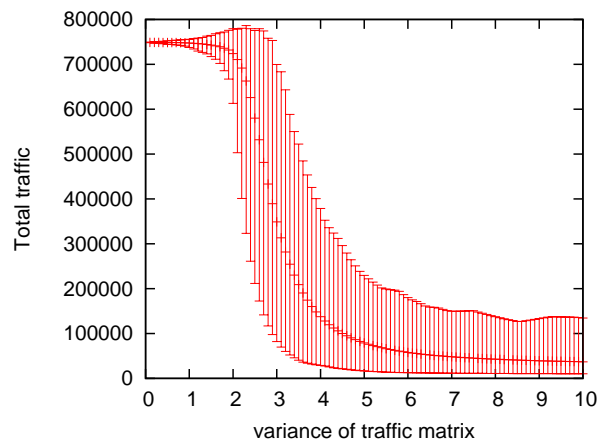


図8 収容可能なトラフィック量: abilene-inspired トポロジ



(b) 次数ベースのノード制約

図10 収容可能なトラフィック量: Sprint トポロジ

において (a) が前節の結果であり, (b) が次数からノード処理能力を決定する手法を適用した結果である。

図 10(a) と図 10(b), 図 11(a) と図 11(b) を比較することで, 導入した物理制約の違いによってトポロジに収容可能なトラフィック量がどのように変化するのがわかる。この図から, どちらのトポロジでも, トラフィックマトリクス分散値が大きくなるとともに収容可能なトラフィック量が低下する傾向が見られるものの, リンクの物理回線容量の制約により収容可能なトラフィック量が大きく低下していることがわかる。そのため, ネットワーク性能を評価するためには文献 [5] のような次数ベースのノード制約を考えるのみでは不十分であると言える。

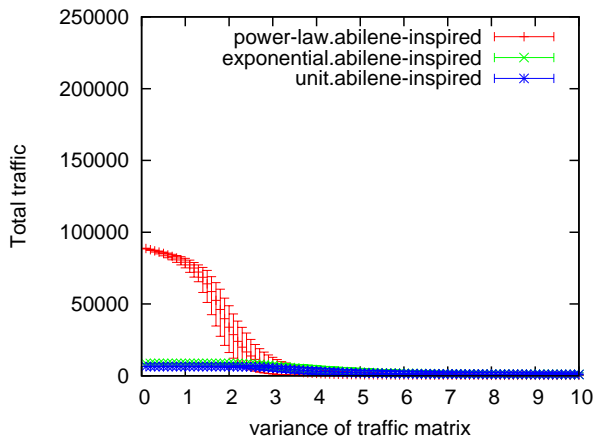
5. まとめと今後の課題

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。本稿では, ISP のルータレベルトポロジにおけるリンク回線容量に着目し, 商用 ISP において回線容量分布がべき則になることを示した。次に, 回線容量分布がべき則に従うこと理由を明らかにするために, 回線容量分布

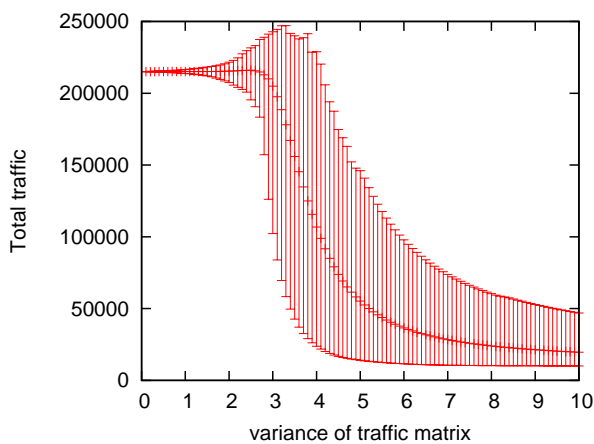
本あたりの容量との積がルータに要求される最大処理能力 (= 容量) であるため, 大容量の回線は少ない本数しか収容できず, また多数の回線を収容するならば 1 本あたりの回線容量は小さくなる。この次数と容量の関係を図 9 に示す。

これをもとに Sprint および Abilene-inspired トポロジの全ノードについて次数からノード処理能力を算出し, 4.2 節と同様のトラフィックマトリクス生成手法を用いて収容可能なトラフィック量を計測した結果が図 10 および図 11 である。それぞれの図に

図9 ルータの次数と容量の関係



(a) 回線容量分布割り当てによるリンク制約



(b) 次数ベースのノード制約

図 11 収容可能なトラフィック量: abilene-inspired トポロジ

がべき則に従う場合，指数分布に従う場合，一様である場合のそれぞれについて，収容可能なトラフィック量を比較した．その結果，回線容量分布がべき則である場合にネットワークに収容可能なトラフィック量が大きくなることが明らかとなった．また，ノード次数にもとづいたノード処理能力制約のみでは，収容可能なトラフィック量が過大に算出されることを示し，回線容量分布がべき則に従うという特性をネットワーク制御手法の評価に取り入れることが重要であることを示した．

本稿では，観測により得られている AT&T 社のトポロジと，Sprint 社のトポロジに対して回線容量を割り当て，分布がべき則であることの妥当性を示した．しかし，回線容量とトポロジ構造は密接に関連していると予測される．今後は，ISP のルータレベルトポロジの構造的特徴と回線容量の関連性を明らかにするとともに，ISP ネットワークのモデル化手法の確立に取り組む予定である．

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．また，回線容量分布の傾きについて議論いただいた大阪大学 大学院工学研究科 滝根哲哉教授に深く感謝いたします．

文 献

- [1] F. Sally and P. Vern, “Difficulties in simulating the Internet,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 9, no. 4, pp. 392–403, 2001.
- [2] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, “On power-law relationships of the Internet topology,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM’99*, pp. 251–262, Oct. 1999.
- [3] A. L. Barabasi and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [4] A. Fabrikant, E. Koutsoupias, and C. H. Papadimitriou, “Heuristically optimized trade-offs: A new paradigm for power laws in the Internet,” in *Proceedings of ICALP’02*, pp. 110–122, July 2002.
- [5] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, “A first-principles approach to understanding the Internet’s router-level topology,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM’04*, vol. 34, pp. 3–14, Oct. 2004.
- [6] N. Berger, B. Bollobás, C. Borgs, J. Chayes, and O. Riordan, “Degree distribution of the FKP network model,” in *Proceedings of ICALP’03*, pp. 725–738, July 2003.
- [7] R. Fukumoto, S. Arakawa, T. Takine, and M. Murata, “Analyzing and modeling router-level Internet topology,” in *Proceedings of ICOIN 2007*, Jan. 2007.
- [8] 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布,” *GLOCOM Review*, vol. 9, pp. 1–16, Sept. 2003.
- [9] A. Nucci, A. Sridharan, and N. Taft, “The problem of synthetically generating IP traffic matrices: Initial recommendations,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 35, pp. 19–32, July 2005.