

特別研究報告

題目

次数分布がべき則に従うネットワークにおける
物理回線容量割当手法の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

細木 茂洋

平成 21 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

内容梗概

インターネットトポロジを計測した結果、次数分布がべき則となることが明らかになっている。しかし、ネットワーク性能は次数分布のみに依存するのではなく、トポロジが有する構造ならびに物理回線容量の割り当てにも大きく依存する。特に、インターネットにおけるリンクの物理回線容量はルータの処理能力やリンクを経由する対地間フロー量など、様々な要因に基づいて設計されるものである。ところが、これまでの次数分布がべき則に従うネットワークを対象とした研究では、対地間トラフィック需要は一様である、もしくは、重力モデルによって決定されると仮定されてきた。

本報告では、次数分布がべき則となるトポロジを対象とし、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。その結果、既存のモデル化手法で生成したトポロジではノードを経由するフロー量の分布がべき則に従うものの、米国 ISP の AT&T 社のトポロジにおいてはべき則の性質が現れないことがわかった。一方で、AT&T 社のトポロジでは、リンクを経由するフロー量の分布にべき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、いずれのトポロジにおいてもリンクを経由するフロー量分布がべき則に従うことも明らかとなった。次に、米国の AT&T 社のトポロジを対象として、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が明らかとなった。

主な用語

べき則，ルータレベルトポロジ，対地間フロー量，トラフィックマトリクス，フロー量分布

目次

1	はじめに	5
2	べき則の性質を有するトポロジの生成モデル	7
2.1	BA (Barabási-Albert) モデル	7
2.2	FKP (Fabrikant Koutsoupias Papadimitriou) モデル	7
2.3	HOT (Heuristically optimal topology) モデル	8
2.4	各モデルの性質	8
3	べき則ネットワークにおけるフロー量特性の評価	10
3.1	トラヒックマトリクスモデル	10
3.1.1	単位フロー (Unit)	10
3.1.2	一様分布 (Uniform)	10
3.1.3	対数正規分布 (LogNormal)	11
3.2	ネットワークモデル	11
3.2.1	トポロジ生成モデル	11
3.2.2	トラヒックマトリクス生成モデル	12
3.3	ノードを経由するフロー量の評価	12
3.4	リンクを経由するフロー量の評価	17
4	物理回線容量割当手法の提案と評価	23
4.1	物理回線容量割当手法の提案	23
4.2	物理回線容量割当手法の評価	26
5	まとめと今後の課題	29
	謝辞	30
	参考文献	31

目 次

1	HOT モデルによって生成されるトポロジ [1]	8
2	トラフィックマトリクスモデルの比較	13
3	ノードを経由するフロー量分布: BA トポロジ	13
4	ノードを経由するフロー量分布: FKP トポロジ	14
5	ノードを経由するフロー量分布: HOT トポロジ	14
6	ノードを経由するフロー量分布: AT&T トポロジ	15
7	ノードを経由するフロー量分布: Sprint トポロジ	15
8	ノードを経由するフロー量分布: T_{normal}^a	16
9	ノードを経由するフロー量分布: T_{normal}^b	17
10	リンクを経由するフロー量分布: BA トポロジ	18
11	リンクを経由するフロー量分布: FKP トポロジ	18
12	リンクを経由するフロー量分布: HOT トポロジ	19
13	リンクを経由するフロー量分布: AT&T トポロジ	19
14	リンクを経由するフロー量分布: Sprint トポロジ	20
15	リンクを経由するフロー量分布: T_{normal}^a	21
16	リンクを経由するフロー量分布: T_{normal}^b	21
17	リンク回線容量分布: AT&T トポロジ	24
18	ノードに連結している回線容量の総和: AT&T トポロジ, べき則分布	24
19	ノードに連結している回線容量の総和: AT&T トポロジ, 指数分布	25
20	ノードに連結している回線容量の総和: AT&T トポロジ, 回線容量が全て等しい場合	25
21	ノードに連結している回線容量の総和: BA トポロジ	26
22	収容可能トラフィック量: AT&T トポロジ, 対数正規分布	27
23	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 トポロジ	28

表 目 次

1	トラヒックマトリクスモデル生成に用いたパラメータ	12
2	生成したトラヒックマトリクスの平均と分散	12

1 はじめに

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 [2], [3]．次数分布のべき則とは，ノードの次数が k となる確率 $P(k)$ が $k^{-\gamma}$ に比例することである (γ は定数)．次数分布がべき則に従うトポロジ生成手法はこれまでも広く検討されており，その1つにBAモデルがある [4]．BAモデルは(1)ノードを段階的に追加していく Incremental Growth (2)追加の際に既存のトポロジのノードの次数分布に応じて確率的に接続する Preferential Attachment の規則に基づいてノードおよびリンクを追加するトポロジ生成手法である．BAモデルで生成したトポロジでは，多数のノードの次数は小さい一方で，次数の大きいノード(以降ではハブノードと呼ぶ)が少数存在する．ノード追加時の確率を適切に設定することによって，インターネットのAS間接続関係(ASレベルトポロジ)の次数分布，ならびに平均パス長・クラスタ係数に関してよく似たトポロジが生成できることが示されている [5]．

ただし，ASレベルトポロジが論理的な接続関係であるピアリングによって構成されるのに対して，ルータレベルトポロジはルータ間の物理的なリンク接続により構成される．そのため，例えばBAモデルのように，物理的距離を無視して次数の情報のみを用いて確率的にリンクを追加するトポロジ生成法では，ルータレベルトポロジを生成することはできない．

ルータレベルトポロジは原則として通信事業者(ISP)が構築するトポロジであり，例えばコスト最小化，信頼性の向上，収容トラフィック最大化 [6] など，ISP独自の最適化ポリシーによって設計されるものである．また，トポロジを設計する際には，ノード間のトラフィック需要を計測により取得し，ルータの処理能力やリンク回線容量の制約のもとで指標の最適化が行われる．そこで，文献 [7] では，リンクの接続先を確率的に求めるのではなく，接続先との物理的距離に基づいて接続先を決定することによってトポロジを生成する手法であるFKPモデルが提案されている．FKPモデルでは，物理距離と論理距離の重み付き和が最小化されるようにリンクを追加することでトポロジを生成する．しかし，得られるトポロジは次数が1のノードが極めて多く [8]，またISPのルータレベルトポロジの次数分布と大きく異なることが指摘されている [9]．さらに，最大次数を持つノードが複数生成され，文献 [2] で観測された次数分布とは大きく異なることが指摘されている [8]．一方，ルータにおける処理能力の制約に着目したルータレベルトポロジのモデル化に関する研究として，文献 [1] がある．文献 [1] では同じ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フィ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フィック量(ネットワークスループット)を評価している．その結果，BAモデルで生成したトポロジはノードの処理能力の制約によって収容可能なトラフィック量はきわめて少なくなる．その一方で，実在の学術ネットワーク Abilene に基づいて作成したトポロジ(以降，Abilene-inspired トポロジ)のネットワークスループットが大きくなることが示されている．Abilene-inspired トポロジでは，ノードの処理能力に上限があるため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る．その結果，回線容量の小さいリンクを収容しているノードはネットワークのコアに現れるのではなく，ネットワークのエッジに出現し，さらに次

数が比較的小さく回線容量の大きいリンクを収容可能なノードは、ネットワークのコアに出現する。一方、BA モデルで生成されるトポロジは、その生成規則から高次数のノードと高次数のノードが連結されやすい性質を有しており、Abilene-inspired トポロジのように高次数ノード同士が接続されていないトポロジを生成する可能性は極めて小さい。ところが、上に述べた工学的な制約の下でのスループット最適化に基づいたモデル化手法で生成されるトポロジは、実際の ISP 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、その結果、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となっている [9]。

結局のところ、次数分布がべき則というトポロジ特性ののみに着目するだけではルータレベルトポロジの性質を有するトポロジ生成には不十分であり、そのために文献 [1] や [10] が提案されているが、現実の ISP のルータレベルトポロジがどのような性質を有するかを明確にし、その上でトポロジ生成手法の確立に取り組む必要がある。

本報告では、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、ネットワーク性能の向上のために各リンクに割り当てるべき回線容量を明らかにする。現実のルータレベルトポロジにおけるリンク回線容量は、文献 [1] で議論されているノード処理能力の制約のみならず、ノード間のトラフィック需要にも大きく依存するものと考えられる。しかし、これまでのトポロジ生成の研究においてはノード間のトラフィック需要は一様である、もしくは重力モデルによって決定される [11] と仮定されているが、観測結果と大きく異なるとの指摘もなされている [12]。

そこで、本報告では文献 [12] で用いられている様々なトラフィックマトリクスを次数分布がべき則となるトポロジに適用し、従来の一様なトラフィックマトリクスと比較して、ノードおよびリンクを経由するフロー量にどのような違いがあるのかを明らかにする。評価の結果、トラフィックマトリクスの分布の分散値が小さいとき、ノードおよびリンクを経由するフロー量の分布は ISP トポロジでべき則に従うが、トラフィックマトリクスの分散値が大きいとき、ノードおよびリンクを経由するフロー量の分布にべき則の性質が現れず、ポアソン分布となることを示す。次に、リンクを経由するフロー量を基づいてリンクに回線容量を割り当てた際に、物理回線容量の分布の違いにより収容可能なトラフィック量にどのような違いがあるのかを明らかにする。評価の結果、物理回線容量をべき則に従う分布により割り当てた場合に収容可能なフロー量が大きくなることがわかった。一方、トラフィックマトリクスの分散が大きい場合は、物理回線容量をポアソン分布により割り当てた場合に収容可能なフロー量が大きくなることも明らかになった。

本報告の構成は以下の通りである。まず 2 章でべき則の性質を有するトポロジを生成するモデルを列挙し、それらの性質について述べる。次に 3 章でトラフィックマトリクス生成モデルを列挙し、それらを適用した際のノード、リンクにおけるフロー量分布を明らかにする。この結果をもとに 4 章で物理回線容量割り当て手法を考案し、評価を行う。最後に 5 章で本報告のまとめと今後の課題を述べる。

2 べき則の性質を有するトポロジの生成モデル

本章では、本報告で用いるトポロジ生成モデルとその性質について述べる。

2.1 BA (Barabási-Albert) モデル

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) モデルである [4]。

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 (Incremental Growth) と優先接続 (Preferential Attachment) 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が生成される。

2.2 FKP (Fabrikant Koutsoupias Papadimitriou) モデル

1 ノードのトポロジを初期状態として、1 つノードを加える (Incremental Growth) ごとに、以下の式を満たす既存ノード j と新規ノード i の間にリンクを張る (Preferential Attachment) モデルである [7]。

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

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。

文献 [7] では論理距離として 3. を選択した場合のパラメータ α の値について議論されており、 α が小さければスター型トポロジが、 α が大きければ次数分布が指数則に従うトポロジが、 α が中程度の値ならば次数分布がべき則に従うトポロジが、それぞれ生成される。

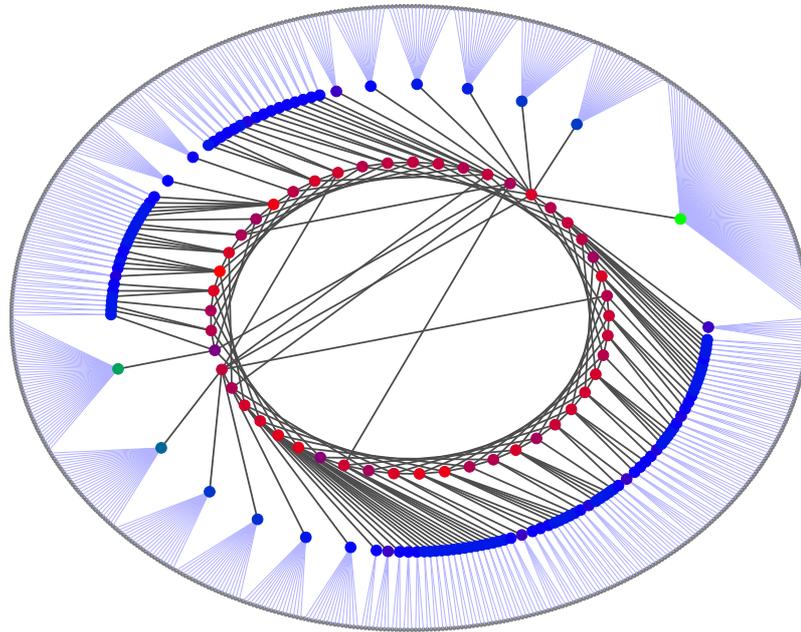


図 1: HOT モデルによって生成されるトポロジ [1]

2.3 HOT (Heuristically optimal topology) モデル

BA モデルで生成したトポロジに対し，ルータの物理的制約を考慮し，次数をもとに core , gateway , edge の 3 種にノードの役割を分担してリンクの張替えを行うモデルである [1] . ここで，ルータの物理的制約とは，処理能力の限界により高性能なルータであっても，容量の大きな回線を多数収容することが困難であることである . そのため，処理能力の高いルータは，大容量の回線を少数収容する core ノードと小容量の回線を多数収容する gateway ノードとに二極化する傾向になる . この物理的制約にもとづいて次数の低いノードを core ノード，core ノードとリンクを持つ次数の高いノードを gateway ノード，その他のノードを edge ノードとしてネットワークスループットを高めるモデルが HOT モデルである . HOT モデルによって生成されるトポロジを図 1 に示す .

2.4 各モデルの性質

以上のモデルはいずれも次数分布がべき則に従うトポロジを生成する . しかし，同じ次数分布を有していても，トポロジを生成する際に考慮するパラメータは異なっている .

BA モデルと FKP モデルはともに段階的成長と優先接続に沿ってトポロジを生成するが，前者はノードの次数を，後者はノード間の物理的な配置と論理距離を，それぞれ考慮する優先接続アルゴリズムを採用している . BA モデルでの優先接続は次数に依存しており，あくまで確率に従ってリンク

を張るアルゴリズムであるが、FKP モデルの優先接続は物理距離と論理距離の重み付き和が最小になるようにリンクを張る。また、生成されるトポロジについて比較すると、FKP モデルによるトポロジでは次数 1 のノード数が BA モデルによるトポロジよりも多いという違いが見られる。

一方、HOT モデルは 3 層構造のトポロジを生成するので、他の 2 モデルによって生成されるトポロジとはハブノードの役割が異なる。BA モデル及び FKP モデルにおけるハブノードは基本的にネットワークの中心に存在し、任意の 2 ノード間ホップ数を小さくする役割を持っている。しかし、HOT モデルにおいて、これは次数の低い core ノードの役割である。HOT モデルでは gateway ノードがハブノードとなっているが、edge ノードのトラフィックを収容することが主な役割となっている。ノード次数や物理距離、ホップ数を考慮する BA モデル/FKP モデルと、ノードの役割を 3 種類に分けて 3 層構造を作る HOT モデルとの差が、このようなハブノードの役割の違いを生む。

3 べき則ネットワークにおけるフロー量特性の評価

本章ではまず文献 [12] を引用し、いくつかのトラヒックマトリクスモデルを取り上げる。次にこれを様々なトポロジに対して適用し、ノードとリンクを経由するフロー量分布を明らかにする。

3.1 トラヒックマトリクスモデル

トラヒック送信元ノードからトラヒック宛先ノードへと送信されるデータの生成ビットレートを対地間フロー量と呼び、これを行列として管理するものをトラヒックマトリクスと呼ぶ。

本報告では、以下で述べるモデルに従って対地間フロー量を生成し、トラヒックマトリクスを生成する。

3.1.1 単位フロー (Unit)

対地間フロー量を全て 1 とする。このとき、平均は 1、分散は 0 となる。

このモデルについて、以下 T_{unit} と呼ぶ。

3.1.2 一様分布 (Uniform)

値にあらかじめ下限 α と上限 β が決定されており、定義域内の値が全て等しい確率で生成される分布を一様分布と呼ぶ。文献 [12] では、他のトラヒックマトリクスとの比較のために引用されている。

生成確率 $f_{\text{Uniform}}(x)$ は次の式で定義される。

$$f_{\text{Uniform}}(x; \alpha, \beta) = \begin{cases} \frac{1}{\beta - \alpha} & (\alpha \leq x \leq \beta) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (3)$$

このとき、平均値 $E(x)$ 及び分散値 $V(x)$ は次の式で表される。

$$E(x) = \frac{\beta - \alpha}{2} \quad (4)$$

$$V(x) = \frac{(\beta - \alpha)^2}{12} \quad (5)$$

文献中では、式中のパラメータについて、それぞれ $\alpha = 1.06 \times 10^6$ 、 $\beta = 4.43 \times 10^7$ と設定されている。

このモデルについて、以下 T_{uniform} と呼ぶ。

3.1.3 対数正規分布 (LogNormal)

横軸の値を対数で表すと正規分布になる分布を対数正規分布と呼ぶ。文献 [12] では、実測フロー量をもとにした対地間フロー量の再現モデルとして引用されている。

生成確率 $f_{LogNormal}(x)$ は次の式で表される。

$$f_{LogNormal}(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (6)$$

このとき、平均値 $E(x)$ 及び分散値 $V(x)$ は次の式で表される。

$$E(x) = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (7)$$

$$V(x) = \exp(2\mu + \sigma^2) \{\exp(\sigma^2) - 1\} \quad (8)$$

文献中では、式中のパラメータについて、それぞれ $\mu = 15.45$ 、 $\sigma = 0.885$ と設定されている。

このモデルについて、以下 T_{normal} と呼ぶ。

3.2 ネットワークモデル

ここでは、シミュレーションに用いるトポロジ生成モデル及びトラヒックマトリクス生成モデルの各パラメータについて述べる。

3.2.1 トポロジ生成モデル

2.1 で述べた 3 つのトポロジ生成モデルを用いて、ノード数 869/リンク数 1754 のトポロジを構築した。これは文献 [1] から得た値である。

各モデルにおけるパラメータは次のようになっている。

BA model: 869 ノードのトポロジを生成し、足りないリンクの本数だけ次数に従ってノードペアを選択し、リンクを接続する。

FKP model: 物理距離への重みについて、パラメータ $\alpha = 15$ とした。これは、次数分布がべき則に従い、かつ次数分布における次数が 5~10 となるノードの存在確率が BA モデルに近くなるよう調整した値である。

HOT model: 各種ノード数は、それぞれ core ノードが 43, gateway ノードが 107, edge ノードが 719 となっている。これは、次数分布が他の 2 モデルに近くなるよう設定した値である。

また、各モデルによって生成したトポロジに加え、ノード数 523/リンク数 1304 の AT&T トポロジ、ノード数 467/リンク数 1280 の Sprint トポロジも利用する。これは米国の通信会社 AT&T 社、Sprint 社のネットワークを計測することによって得られたルータレベルトポロジである。

表 1: トラヒックマトリクスモデル生成に用いたパラメータ

TM Model	Parameter1	Parameter2
T_{unit}	(なし)	(なし)
T_{uniform}	$\alpha = 1.06 \times 10^6$	$\beta = 4.43 \times 10^7$
$T_{\text{normal}}^{\text{a}}$	$\mu = 15.45$	$\sigma = 0.885$
$T_{\text{normal}}^{\text{b}}$	$\mu = -16.16$	$\sigma = 8.00$

表 2: 生成したトラヒックマトリクスの平均と分散

TM Model	平均値 $E(x)$	分散値 $V(x)$
T_{unit}	1.00	0
T_{uniform}	2.16×10^7	1.56×10^{13}
$T_{\text{normal}}^{\text{a}}$	7.58×10^6	6.84×10^{13}
$T_{\text{normal}}^{\text{b}}$	7.58×10^6	3.58×10^{41}

3.2.2 トラヒックマトリクス生成モデル

適用するトラヒックマトリクスモデルは 3.1 で述べた T_{unit} , T_{uniform} , T_{normal} の 3 モデルで, T_{uniform} は文献 [12] と同じパラメータを用いた. T_{normal} は文献 [12] と同じパラメータを用いたものを $T_{\text{normal}}^{\text{a}}$ と, 調整したパラメータを用いたものを $T_{\text{normal}}^{\text{b}}$ とする. 表 1 に各モデルのパラメータを, 表 2 に各モデルの平均と分散をそれぞれ示す. また, 各モデルの比較を図 2 に示す. 横軸が生成される対地間フロー量, 縦軸が下側累積確率である.

これらの 4 モデルを用いて, 全ノードペアに対して対地間フローを生成し, トラヒックマトリクスを生成する. 全ての対地間フローを最短ホップルーティングで伝送し, 発信元ノードから宛先ノードまで, 通信に関わったノードとリンクにフロー量を加算していく. ホップ数最短経路が複数存在する場合, トラヒックを均等に分割して伝送を行う. 全てのトラヒック伝送が終了した時点で, 全ノードおよび全リンクが処理したフロー総量を計測する.

3.3 ノードを経由するフロー量の評価

ノードを経由するフロー量について, トポロジ別/トラヒックマトリクスモデル別にそれぞれ評価を行なう.

まず, 図 3-7 に各トポロジごとにノードを経由するフロー量分布について, 3.4 節で述べた方法で生成したトラヒックマトリクスを適用した結果を示す. 図における縦軸は各ノードを経由するフロー量

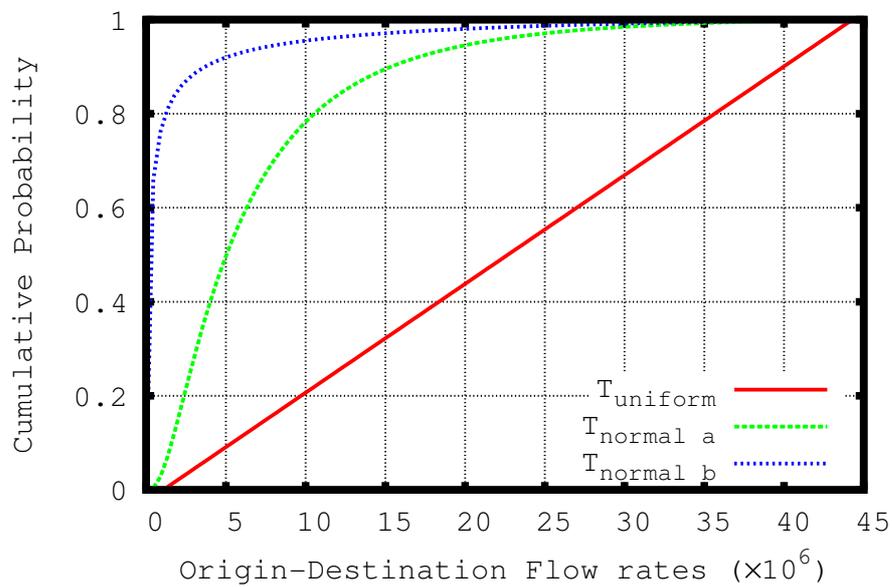


図 2: トラフィックマトリクスモデルの比較

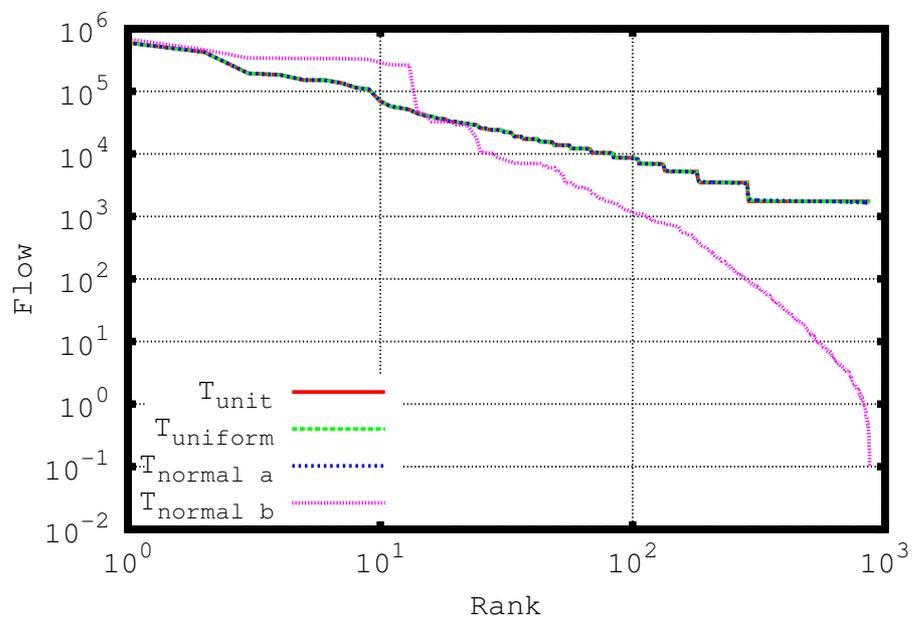


図 3: ノードを經由するフロー量分布: BA トポロジ

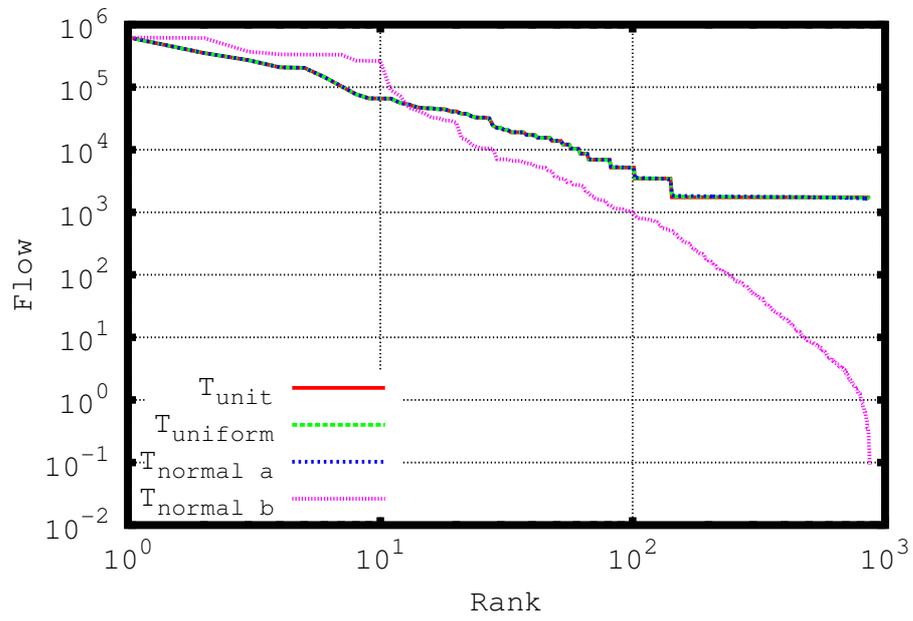


図 4: ノードを經由するフロー量分布: FKP トポロジ

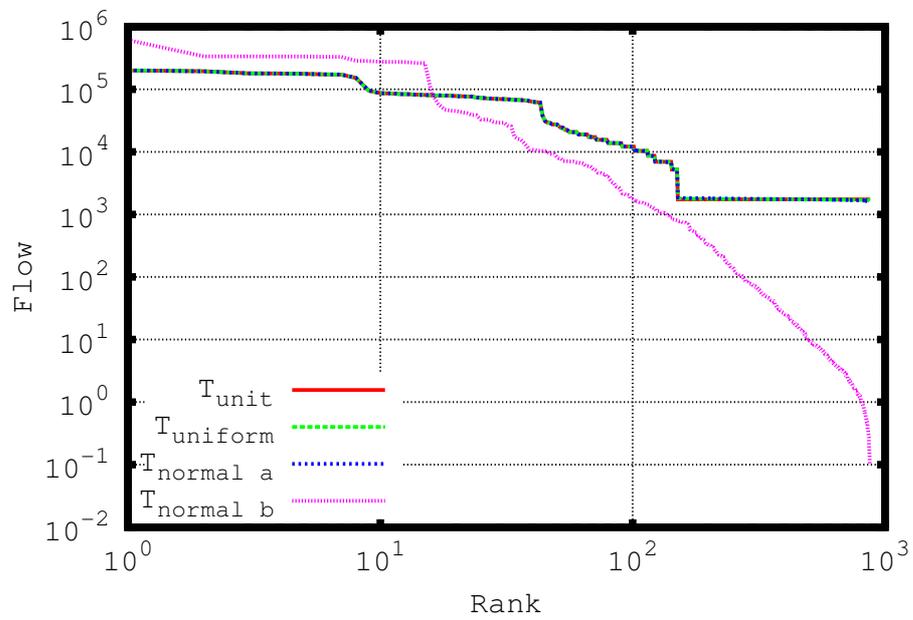


図 5: ノードを經由するフロー量分布: HOP トポロジ

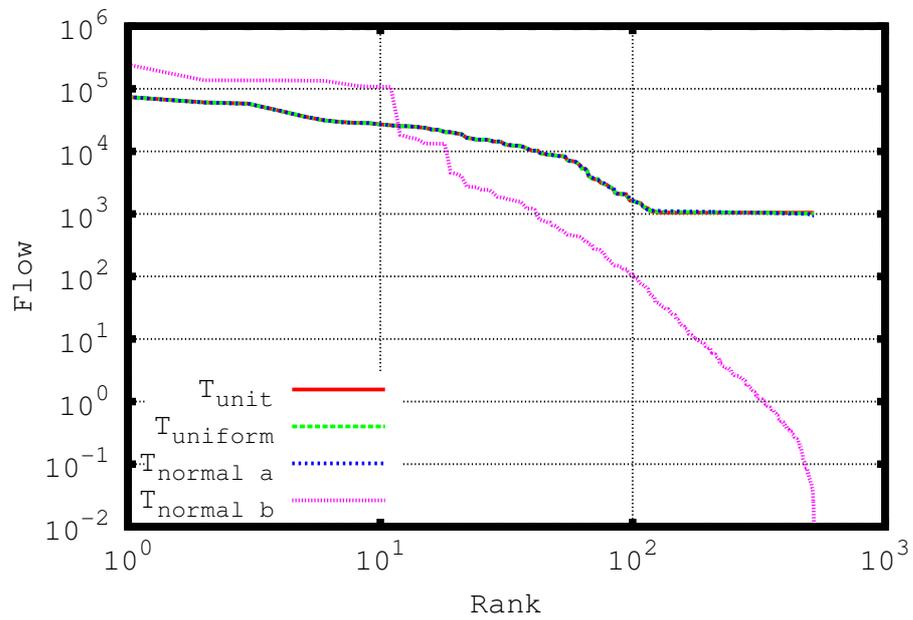


図 6: ノードを經由するフロー量分布: AT&T トポロジ

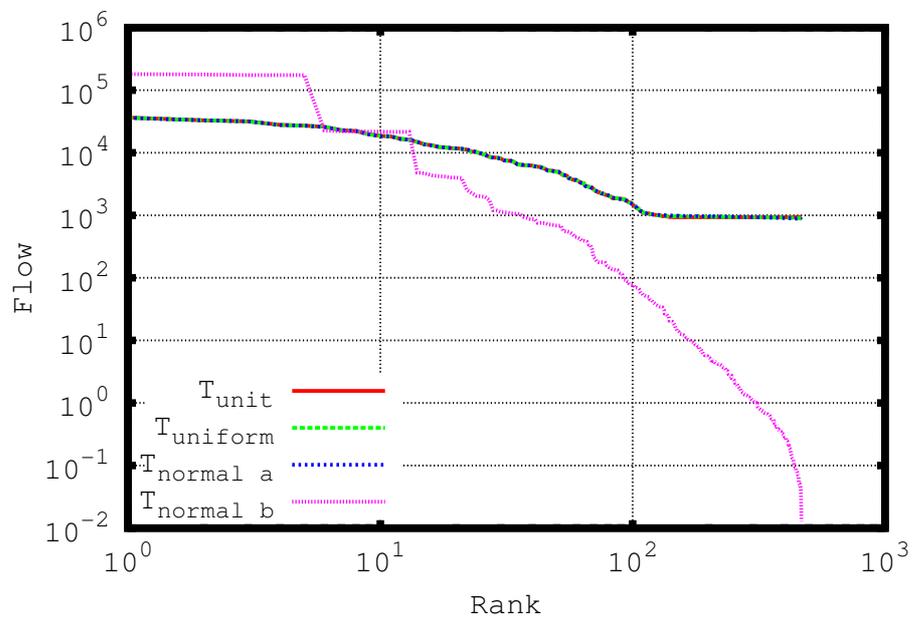


図 7: ノードを經由するフロー量分布: Sprint トポロジ

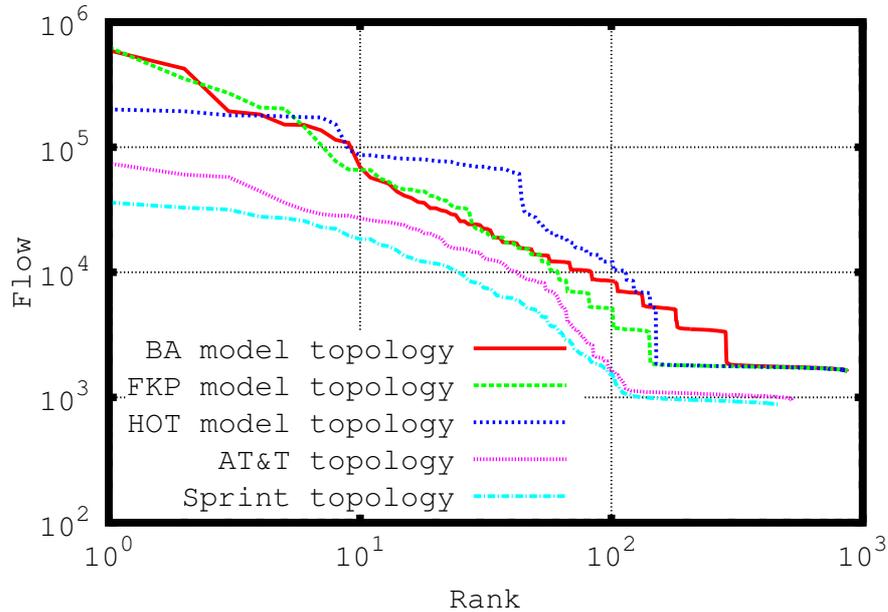


図 8: ノードを經由するフロー量分布: T_{normal}^a

であり、横軸はその順位である。なお、ここでは対地間フロー量の総和を T_{unit} モデルの総和で正規化している。いずれのトポロジについても、 $T_{\text{unit}}/T_{\text{uniform}}/T_{\text{normal}}^a$ モデルのフロー量分布がほぼ同じとなっている。フロー量の上位 100 位までのノードに着目すると、BA トポロジ (図 3)、FKP トポロジ (図 4) では、ノードを經由するフロー量の分布はべき則に従うことがわかる。一方、HOT トポロジ (図 5)、AT&T トポロジ (図 6)、および Sprint トポロジ (図 7) における $T_{\text{unit}}/T_{\text{uniform}}/T_{\text{normal}}^a$ モデルの結果を見ると、ノードを經由するフロー量の分布はべき則にならないこともわかる。一方、 T_{normal}^b モデルで生成したトラフィックマトリクスを適用した際のフロー量分布を見ると、どのトポロジの場合でも經由するフロー量が上位 10 位前後までのフロー量はほぼ同じである。これは、 T_{normal}^b モデルでは、対数正規分布の分散値が大きくなるため一部の対地間フロー量が極めて大きくなるが、その対地間のフローが經由するノードのフロー量がほぼ等しくなっているためである。これらのノード以外のノードのフロー量分布を見ると、傾きが -3 のべきの性質があらわれることも見てとれる。

次に、トラフィックマトリクスの分散によるフロー量分布の違いを明確化するため、対数正規分布に従うトラフィックマトリクスモデル $T_{\text{normal}}^a/T_{\text{normal}}^b$ のそれぞれを、各トポロジに対して適用した結果を図 8 および図 9 に示す。いずれの図においても、縦軸は各ノードを經由するフロー量であり、横軸はフロー量降順で並べた順位である。

図 8 において、BA トポロジと FKP トポロジを比べると、どちらのトポロジでもフロー量の多いノードでべき則の性質が現れているのがわかる。FKP トポロジは BA トポロジと比べて次数 1 のノードが多く、それらのノードはトラフィックを中継することがないため、フロー量が最小となるノードが、

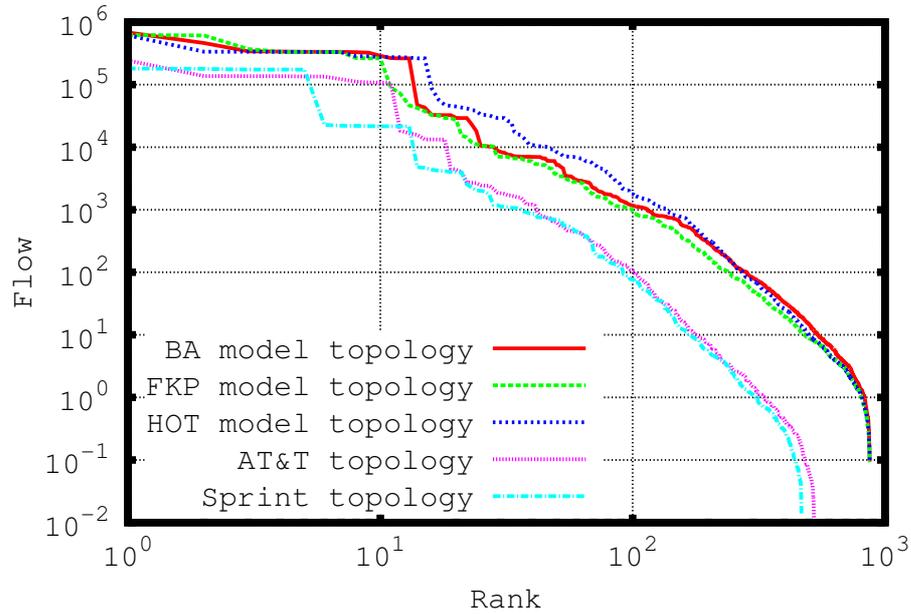


図 9: ノードを經由するフロー量分布: T_{normal}^b

BA モデルと比較して多くなっている。また、BA トポロジと HOT トポロジを比べると、HOT トポロジのフロー量分布は階段状になっていることがわかる。これは、HOT モデルは 3 層に階層化されたトポロジを生成するため、それぞれの階層のノードにより階段状の分布になるものと考えられる。また、BA トポロジと ISP トポロジの比較を行った。AT&T および Sprint トポロジではノードを經由するフロー量にばらつきはあるものの、フロー量分布にべき則の性質は現れないことがわかった。

次に、 T_{normal}^b モデルで生成したトラフィックマトリクスを適用した結果である図 9 を見ると、 T_{normal}^a モデルで生成したトラフィックマトリクスの結果と異なり、經由するフロー量が上位のノードについて、そのフロー量はほぼ等しくなるが、それを除いたノードのフロー量分布についてはべき則の性質が現れることがわかる。

以上より、トラフィックマトリクスの分散が小さい T_{normal}^a モデルの場合、BA / FKP モデルで生成したトポロジにおいてはフロー量分布にべき則が見られるが、HOT モデルで生成したトポロジ、および、AT&T / Sprint トポロジでは、フロー量分布はべき則とならないことがわかった。また、トラフィックマトリクスの分散が大きい T_{normal}^a モデルの場合、どのトポロジにおいてもべき則の性質が現れることも明らかとなった。

3.4 リンクを經由するフロー量の評価

リンクを經由するフロー量について、トポロジ別 / トラフィックマトリクスモデル別にそれぞれの評価を行なう。

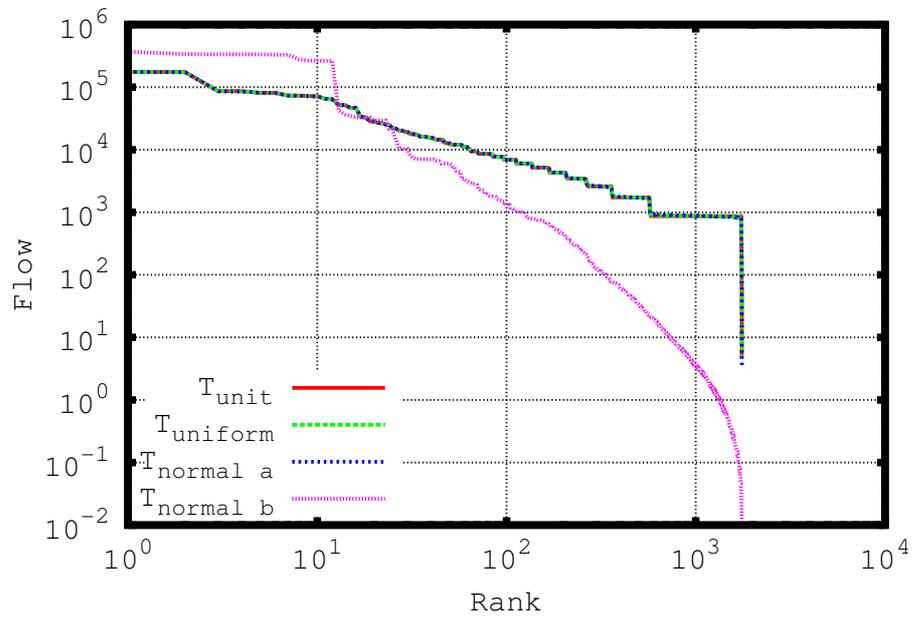


図 10: リンクを経由するフロー量分布: BA トポロジ

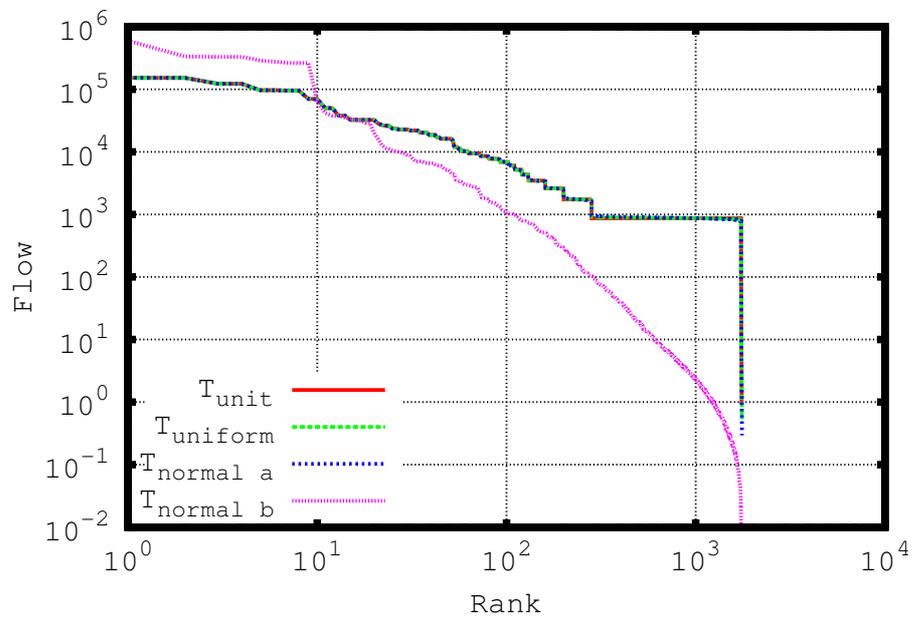


図 11: リンクを経由するフロー量分布: FKP トポロジ

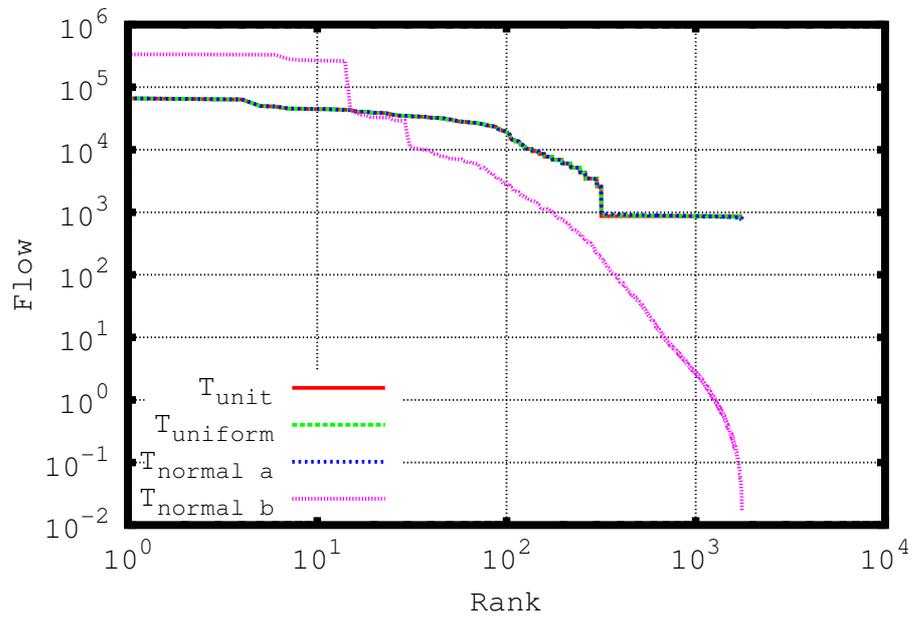


図 12: リンクを経由するフロー量分布: HOT トポロジ

*

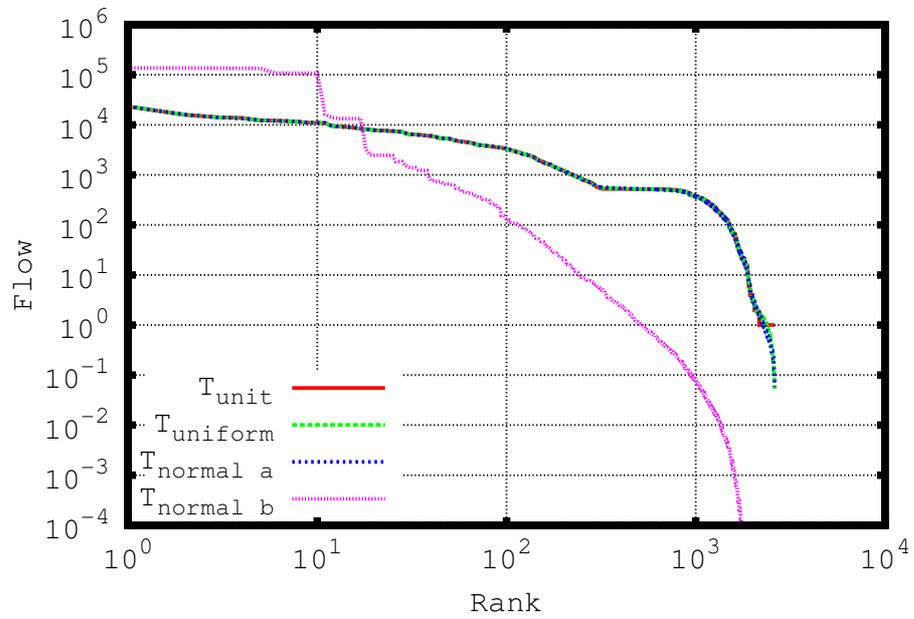


図 13: リンクを経由するフロー量分布: AT&T トポロジ

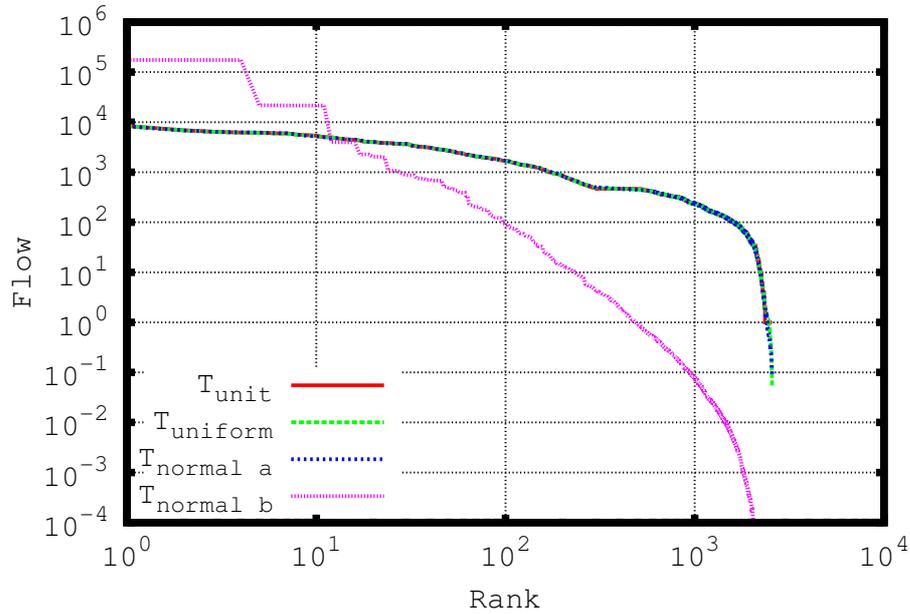


図 14: リンクを経由するフロー量分布: Sprint トポロジ

まず、図 10-14 に各トポロジごとにリンクを経由するフロー量分布について、で述べた方法で生成したトラフィックマトリクスを適用した結果を示す。図における縦軸は各リンクを経由するフロー量であり、横軸はその順位である。なお、ここでは対地間フロー量の総和を T_{unit} モデルの総和で正規化している。いずれのトポロジについても、 $T_{unit}/T_{uniform}/T_{normal}^a$ モデルのフロー量分布がほぼ同じとなっている。BA トポロジ (図 10)、FKP トポロジ (図 11)、AT トポロジ (図 13)、Sprint トポロジ (図 14) におけるリンクを経由するフロー量分布は、フロー量の高いリンクにおいてべき則に従うことがわかる。

一方、 T_{normal}^b モデルで生成したトラフィックマトリクスを適用した際のフロー量分布を見ると、どのトポロジの場合でも経由するフロー量が上位 10 位前後までのフロー量はほぼ同じである。これは、 T_{normal}^b モデルでは対数正規分布の分散値が大きくなるため一部の対地間フロー量が極めて大きくなるが、その対地間のフローが経由するリンクのフロー量がほぼ等しくなっているためである。これらのリンク以外のリンクのフロー量分布を見ると、傾きが -3 のべきの性質があらわれることも見てとれる。

次に、トラフィックマトリクスの分散によるフロー量分布の違いを明確化するため、対数正規分布に従うトラフィックマトリクスモデル $T_{normal}^a/T_{normal}^b$ のそれぞれを、各トポロジに対して適用した結果を図 15 および図 16 に示す。いずれの図においても、横軸は各リンクを経由するフロー量であり、横軸はフロー量降順で並べた順位である。

図 15 において、BA トポロジ、FKP トポロジ、AT&T トポロジ、Sprint トポロジを比べると、ど

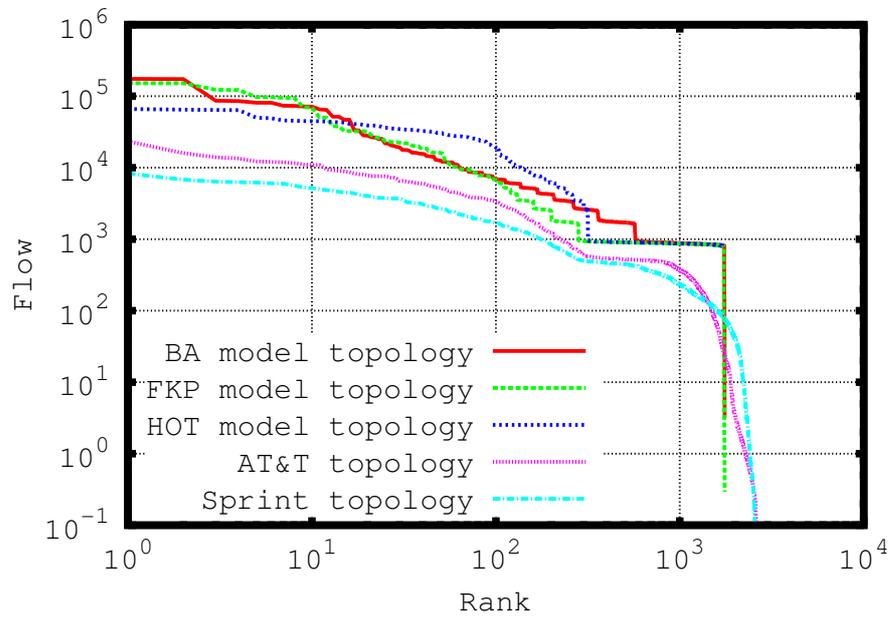


図 15: リンクを経由するフロー量分布: T_{normal}^a

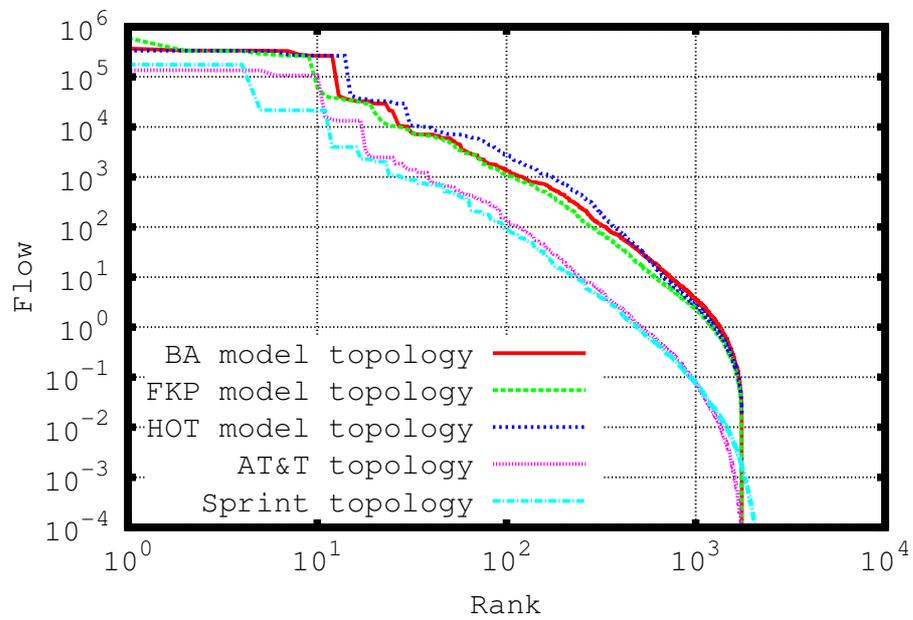


図 16: リンクを経由するフロー量分布: T_{normal}^b

のトポロジでもフロー量の多いノードでべき則の性質が現れているのがわかる。FKP トポロジは BA トポロジと比べて次数 1 のノードが多く、それらのノードはトラヒックを中継することがないため、フロー量が最小となるリンクが、BA モデルと比較して多くなっている。また、BA トポロジと HOT トポロジを比べると、HOT トポロジのフロー量分布は階段状になっていることがわかる。これは、HOT モデルは 3 層に階層化されたトポロジを生成するため、それぞれの階層の内外をつなぐリンクにより階段状の分布になるものと考えられる。

次に、 T_{normal}^b モデルで生成したトラヒックマトリクスを適用した結果である図 16 を見ると、 T_{normal}^a モデルで生成したトラヒックマトリクスの結果と異なり、経由するフロー量が上位のリンクについて、そのフロー量はほぼ等しくなるが、それを除いたリンクのフロー量分布についてはべき則の性質が現れることがわかる。

以上より、トラヒックマトリクスの分散が小さい T_{normal}^a モデルの場合、BA/FKP/AT&T/Spring トポロジにおいてはフロー量分布にべき則が見られるが、HOT モデルで生成したトポロジでは、フロー量分布はべき則とならないことがわかった。また、トラヒックマトリクスの分散が大きい T_{normal}^b モデルの場合、どのトポロジにおいてもべき則の性質が現れることも明らかとなった。

4 物理回線容量割当手法の提案と評価

ルータ処理能力や回線容量などの要因から、現実のネットワークではノードとリンクに流れるフロー量に限りがある。本章ではネットワーク性能がどのような影響を受けるのかを明らかにし、次数分布がべき則に従うトポロジにおいてどのように回線容量分布を定めればルータ処理能力と回線容量による制約下で性能向上が見込まれるのかを明らかにする。

4.1 物理回線容量割当手法の提案

回線容量をトポロジの各リンクへ割り当てるための回線容量分布について考える。本報告では(1)回線容量分布として容量がべき則に従う分布(2)指数に従う分布(3)全回線容量が等しい分布で比較を行う。

まず、べき則に従う回線容量分布を次のようにして求める。

Step.1 最大回線容量 B_{max} を 10 (Gbps) と定義し、回線本数の初期値 C_{init} を 5 本とする。Step.3 へ。

Step.2 回線容量 B および回線本数 C を新しく用意した回線の数値に更新する。回線本数の総和が事前に決めておいた数に達したならば Step.4 へ、達していないならば Step.3 へ。

Step.3 新しい回線を $C \times \alpha$ 本用意し、この回線容量を $B \times 1.0/\beta$ (Gbps) と決定する。Step.2 へ。

Step.4 回線容量分布の生成を終了する。

この手順により、 $\alpha = \beta = 1.2$ として回線容量分布を求めた結果を図 17 に示す。図の縦軸は回線容量で、横軸は回線容量の順位を表している。この図から、 $\alpha = \beta$ とすることで $\gamma = -1$ のべき則となることがわかる。

次に、指数分布に基づいた回線容量分布を与える。べき則に従う回線容量分布で与える回線容量の総和に正規化し、指数分布に基づく回線容量分布も図 17 に示す。

以上で求めた回線容量分布をもとにして、ネットワークの各リンクへ回線容量を割り当てる。その際、最短経路を適用した際にリンクを経由するノードペア数(媒介中心性)を利用する。同一ホップ数の最短経路が複数存在する場合にフロー分割はせず、どれか 1 つの経路をランダムに選択するものとする。媒介中心性の大きいリンクから降順に、回線容量分布に従って容量を割り当てていく

図 18 に回線容量分布がべき則のとき、図 19 に回線容量分布が指数のとき、図 20 に回線容量が全て等しいとしたときの、ノードに連結されている回線容量の総和を全てのノードに対して次数ごとに示した。これらには、Cisco 社のルータ 12810, 12410, 7513 の、次数に対するノード処理能力も示している [1]。Cisco 12810 ルータは、16 のラインカードスロットを持ち、接続されるリンクの総数が 16 以下の場合には最大 10 Gbps のリンクを接続することが可能である。しかし、接続するリンクの数が 16 を超えると接続できるリンクの 1 本あたりの回線容量が次数の増大とともに減少し、結果としてルータに連結される回線容量の総和は減少する。

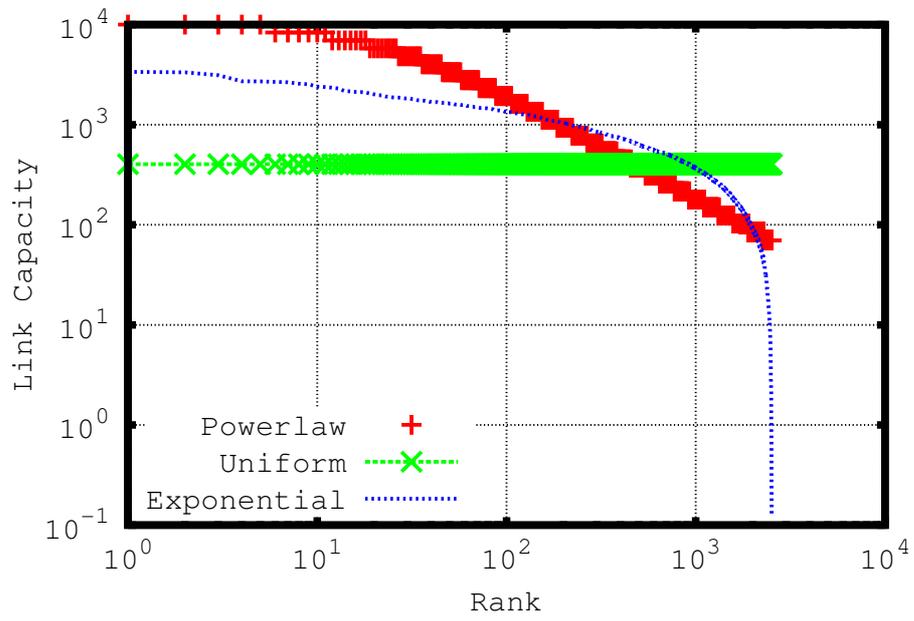


図 17: リンク回線容量分布: AT&T トポロジ

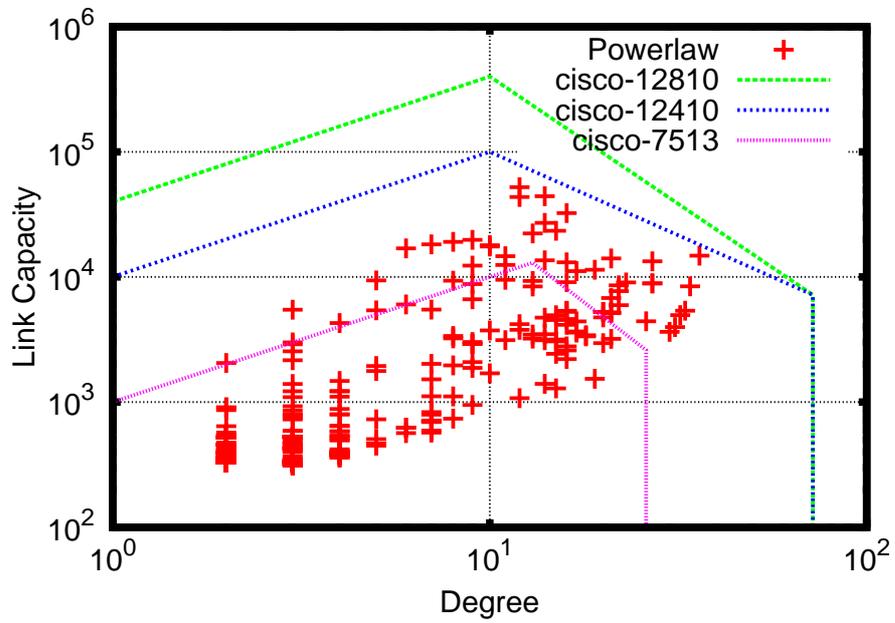


図 18: ノードに連結している回線容量の総和: AT&T トポロジ, べき則分布

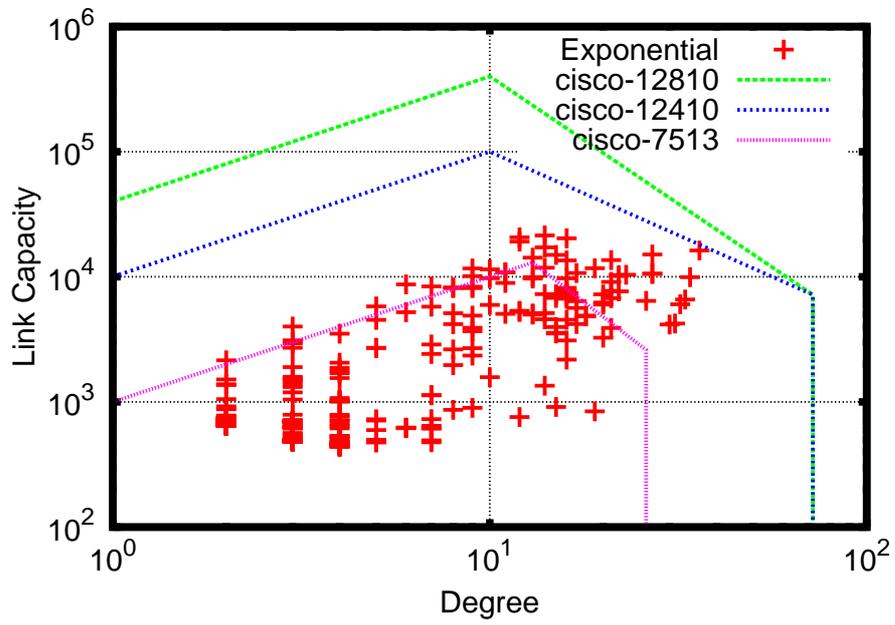


図 19: ノードに連結している回線容量の総和: AT&T トポロジ, 指数分布

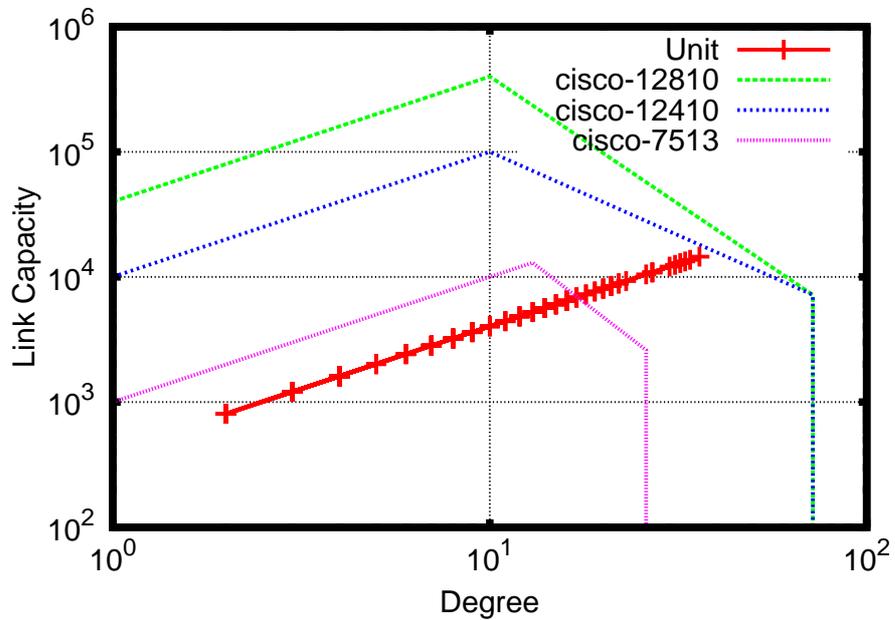


図 20: ノードに連結している回線容量の総和: AT&T トポロジ, 回線容量が全て等しい場合

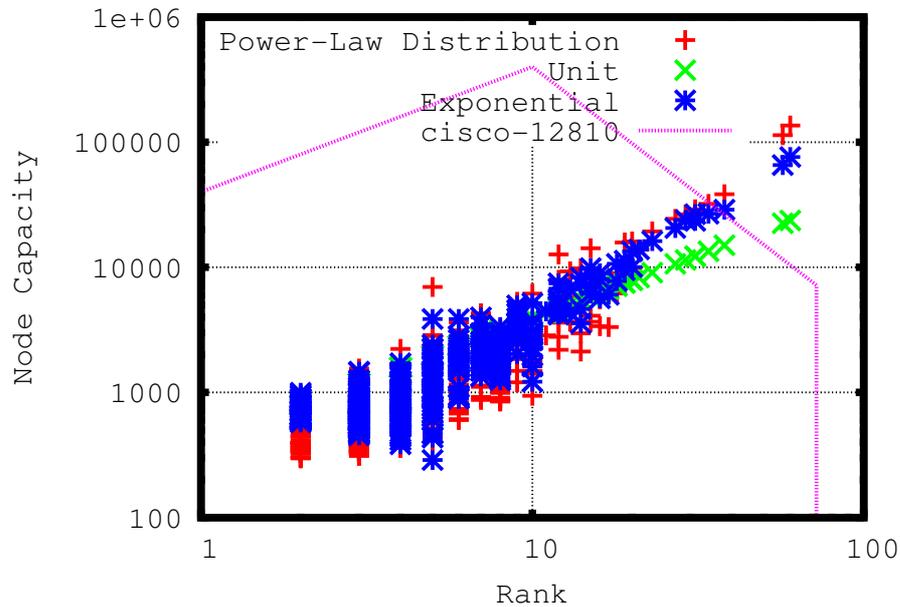


図 21: ノードに連結している回線容量の総和: BA トポロジ

この図から、回線容量の分布をべき則とすることで、次数が 10 程度のルータの処理能力を効率的に使えていることがわかる。なお、これらの図は回線容量の総和が等しいことから、全ノードに接続されている回線容量の総和も等しい。すなわち、回線容量をべき則とすることで、ルータの処理能力を有効に活用できていると言える。一方、回線容量を全て等しくする場合、次数の高いノードにもっとも処理能力の高いルータを配置する必要がある。また、回線容量を指数分布で与えたとしても、回線容量の大きいリンク数が少ないため、次数が高いノードと次数が 10~16 のノードとの処理能力に大きな差がなく、この分布のままトラヒック量が増加する場合、次数の高いノードがボトルネックとなる。

BA トポロジにおいても同様に回線容量分布を求め、回線容量の総和が等しくなるように正規化して、各ノードの容量を求めた結果が図 21 である。BA トポロジでは次数の高いノードに流れるフロー量が大きくなるため、次数の高いノードにつながるリンクに大きな回線容量が割り当てられやすい。結果として、次数が高いノードは“Uniform”よりも大きなノード容量が必要になる。

4.2 物理回線容量割当手法の評価

ここでは、対地間フロー量を事前に定めて設計したネットワークにおいて、トラヒック分布を変更した際に、回線容量分布がべき則であるとどれだけの耐性を得られるかについて評価する。

適用するトラヒックマトリクスは T_{normal}^a とする。図 22 において、横軸は試行回数、縦軸はパラメータ α である。ここで α とは、回線容量分布が一様であるときの結果と比べて、ノード処理能力、

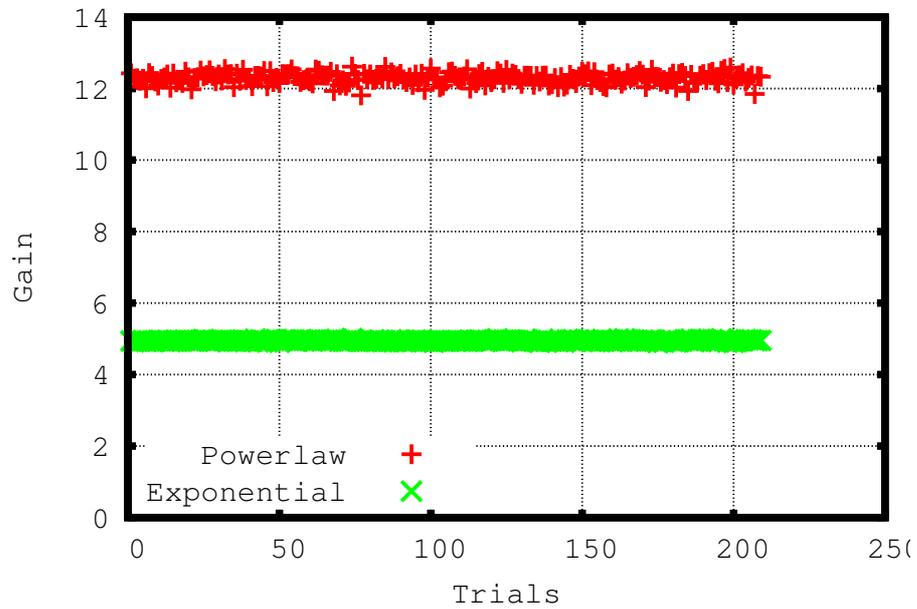


図 22: 収容可能トラヒック量: AT&T トポロジ, 対数正規分布

回線容量制約が等しい条件のもとで、リンクを経由するフロー量が回線容量を超えない最大のトラヒック倍率を示す。赤が回線容量分布がべき則のとき、緑が指数のときを示す。指数にするとときと比べ、べき則にすると α より大きくなることがわかる。

次に、 T_{normal} の分散値による α を求める。横軸に T_{normal} における分散値、縦軸に 10 回試行したときの平均値をとってシミュレーションを行った結果を図 23 に示す。この図から、 T_{normal} の分散が大きくなるとともに回線容量分布をべき則にする利点が小さくなっている。一方、べき則に対する指数分布の α は大きくなっている。

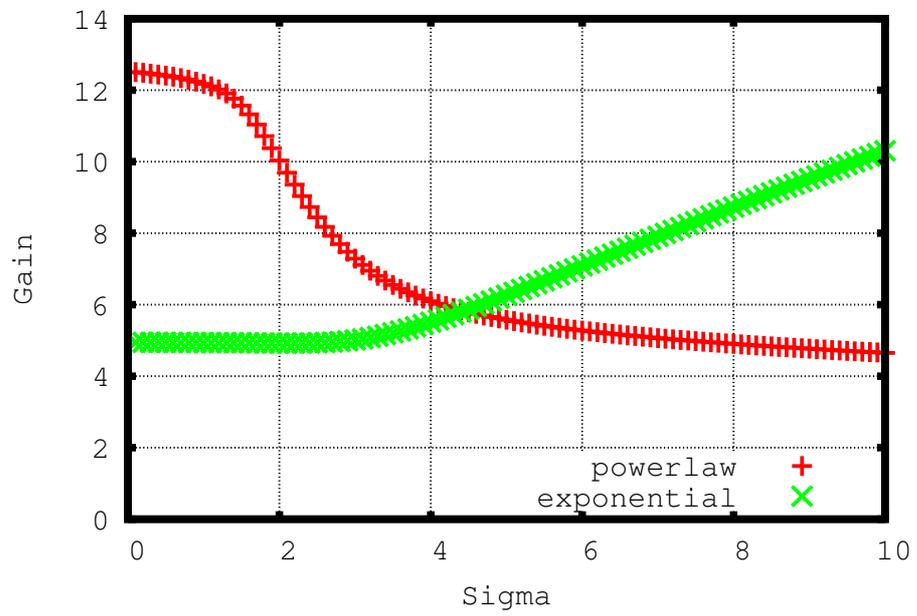


図 23: 対数正規分布の分散に対する収容可能トラフィック量 : AT&T トポロジ

5 まとめと今後の課題

本報告では、次数分布がべき則となるトポロジを対象とし、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。その結果、既存のモデル化手法で生成したトポロジではノードを経由するフロー量の分布がべき則に従うものの、米国 ISP の AT&T 社のトポロジにおいてはべき則の性質が現れないことがわかった。一方で、AT&T 社のトポロジでは、リンクを経由するフロー量の分布にべき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、いずれのトポロジにおいてもリンクを経由するフロー量分布がべき則に従うことも明らかとなった。次に、米国の AT&T 社のトポロジを対象として、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則とすることで、ルータの技術的制約下での処理能力を有効に利用することが可能となり、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 2 倍以上のフロー量を収容可能であることが明らかとなった。

本報告では、すべてのノードにおいて同一機種ルータが設置されていると仮定している。しかし、現実の ISP トポロジではルータ処理能力についても階層化されているものと考えられる。今後は、様々なルータ処理能力がある環境を考慮した物理回線容量割当を検討していく必要がある。

謝辞

本報告を終えるにあたり、ご指導、ご教授を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に心より感謝申し上げます。

ならびに、本報告の作成に終始ご指導を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一助教に深く感謝致します。

また、平素から適切な助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の若宮直紀准教授、大阪大学大学院経済学研究科の山下裕一助教に心より感謝致します。

最後に、日頃から様々な相談に応じて頂きました日高直人氏、平山孝弘氏をはじめとする村田研究室の皆様方に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, “A first-principles approach to understanding the Internet’s router-level topology,” in *Proceedings of the 2004 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications (SIGCOMM’04)*, vol. 34, pp. 3–14, Oct. 2004.
- [2] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, “On power-law relationships of the Internet topology,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 251–262, Oct. 1999.
- [3] B. Zhang, R. Liu, D. Massey, and L. Zhang, “Collecting the Internet AS-level topology,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 35, pp. 53–61, Jan. 2005.
- [4] A. L. Barabasi and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [5] T. Bu and D. Towsley, “On distinguishing between Internet power law topology generators,” in *Proceedings of INFOCOM*, pp. 1587–1596, June 2002.
- [6] N. F. Maxemchuk, L. Ouveysi, and M. Zukerman, “A quantitative measure for telecommunications networks topology design,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Aug. 2005.
- [7] A. Fabrikant, E. Koutsoupias, and C. H. Papadimitriou, “Heuristically optimized trade-offs: A new paradigm for power laws in the Internet,” in *Proceedings of the 29th International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP’02)*, pp. 110–122, July 2002.
- [8] N. Berger, B. Bollobás, C. Borgs, J. Chayes, and O. Riordan, “Degree distribution of the FKP network model,” in *Proceedings of International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP)*, pp. 725–738, July 2003.
- [9] R. Fukumoto, S. Arakawa, T. Takine, and M. Murata, “Analyzing and modeling router-level Internet topology,” in *Proceedings of ICOIN 2007*, Jan. 2007.
- [10] P. Machadevan, D. Krioukov, K. Fall, and A. Vahdat, “Systematic topology analysis and generation using degree correlation,” in *Proceedings of SIGCOM 2006*, Aug. 2006.
- [11] M. Roughan, A. Greenberg, C. Kalmanek, M. Rumsewicz, J. Yates, and Y. Zhang, “Experience in measuring backbone traffic variability: Models, metrics, measurements and meaning,” in *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement (IMW’02)*, pp. 91–92, Nov. 2002.

- [12] 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.