

パワー則の性質を有するネットワークにおける 出線数情報を利用した経路制御手法の提案と評価

福元 良太[†] 荒川 伸一^{††} 村田 正幸[†]

[†] 大阪大学大学院情報科学研究科 〒 565-0871 吹田市山田丘 1-5

^{††} 大阪大学大学院経済学研究科 〒 560-0043 豊中市待兼山町 1-7

E-mail: [†]{r-fukumoto,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}arakawa@econ.osaka-u.ac.jp

あらまし インターネットのトポロジ形状を観測した結果、ノードの出線分布がべき乗則に従うことが近年明らかにされている。一方で、基幹ネットワークのトラフィック量が急激に増加してきており、基幹ネットワークにおいてトラフィックを効率よく収容することが重要となっている。本稿では、ネットワーク内の最大リンク利用率を削減することを目的とし、べき乗則に従うトポロジ形状の性質を利用した経路制御手法を提案する。提案手法では、経路制御の指標としてルータの出線数とリンクの回線容量を利用することで、ネットワーク内の最大リンク利用率を削減している。シミュレーションによりネットワーク内の最大リンク利用率を評価した結果、提案手法は最小ホップ経路制御方式に比べて最大リンク利用率を約 37 %削減することがわかった。

キーワード 経路制御、べき乗則、ルータレベルトポロジ、フロー偏差法、最適経路制御

Proposal and evaluation of routing methods in power-law networks

Ryota FUKUMOTO[†], Shin'ichi ARAKAWA^{††}, and Masayuki MURATA[†]

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

^{††} Graduate School of Economics, Osaka University

E-mail: [†]{r-fukumoto,murata}@ist.osaka-u.ac.jp, ^{††}arakawa@econ.osaka-u.ac.jp

Abstract Recent studies of measurement studies on the Internet topology show that connectivity of nodes exhibit power-law attribute. Many researches have investigated the modeling method and structure of topologies that exhibit power-law attribute. However, the flow-level behavior in the topologies has been less studied. In this paper, we apply the optimal routing control method to power-law networks which includes the ISP topologies and a topology generated by Barabási-Albert model. The simulation results show that the optimal routing method gives much smaller maximum link utilization compared with the minimum hop routing which is often used in the operating networks. Accordingly, we propose a heuristic routing method suitable to the ISP topologies with consideration of technology constraints of IP routers and power-law network. The evaluation results show that our routing method achieves lower maximum link utilization in the power-law networks.

Key words Routing, Power-Law, Router-Level Topology, Flow Deviation Method, Optimal Routing

1. はじめに

インターネットへのアクセス回線のブロードバンド化の急速な発展に伴い、インターネットの基幹ネットワークを流れるトラフィックは依然として増加傾向にある。近年では、ギガビットのアクセス回線を用いた高速通信も提供されつつあり、基幹ネットワークにおいてアクセス回線網で生じるインターネットトラフィックを効率よく収容することは急務の課題となっている。

その一方で、現状のインターネットにおいて AS (Autonomous

System) 間・ルータ間の接続状況を観測した結果、ノードの出線数の分布がべき乗則 (Power-Law、パワー則) に従うトポロジであることが示されている [1]。べき乗則に従うトポロジとは、隣接ノード数が k であるノードの出現確率 $P(k)$ が $k^{-\gamma}$ (γ は定数) に比例するネットワークである。この場合、一部のノードに多くのリンクが接続される一方で、多くのノードは少数のリンクと接続される [2]。

ノード出線数の分布がべき乗則に従うネットワークにおいて、平均ホップ長などのトポロジ特性およびノード・リンク負荷の

評価が盛んに行われている。例えば、文献 [3] では、べき乗則に従うネットワークにおいて接続されているリンク数が大きいノードとリンク数が小さいノード間のホップ数が小さくなり、その結果、ネットワークのノード間が極めて小さいホップ数で接続される “Small-World” の性質を持つことが示されている。また、文献 [4] ~ [6] では、インターネットの AS レベルのトポロジ（以降、AS トポロジ）を対象としてべき乗則に従うネットワークのリンク負荷の特性が評価されている。これらの研究では、トポロジを生成する手法である BA (Barabási-Albert) モデル [2] を用いて AS トポロジのノード数が増加した際のリンク負荷の特性が評価されており、その結果、AS トポロジでは出線数の大きなノードに多くのトラヒックが集中することが示されている。

一方、インターネットにおけるルータレベルのトポロジのモデル化に関する研究として、文献 [7] がある。そこでは、ルータの処理能力とルータインターフェースの回線容量による技術的な制約のもとでネットワークのスループットの最大化を目指すことで、べき乗則に従うトポロジが生成されることが示されている。生成されたトポロジは、出線数が大きいノードは容量の小さいアクセス回線を収容し、出線数が小さいノードは容量が大きい回線を収容する特徴をもち、AS トポロジの構造とは大きく異なるトポロジ特性を有する。

インターネットトラヒックを基幹ネットワークに効率よく収容するためには、上述のトポロジ特性に適した経路制御が必要である。しかし、べき乗則に従うネットワークのリンク負荷に着目した研究では、最小ホップ経路制御を使用しており、べき乗則に従うネットワークにおける経路制御の有効性については明らかになっていないのが現状である。また、文献 [8], [9] などの経路制御手法に関する研究では、その手法の評価トポロジは高々100 ノードであり、べき乗則の性質があらわれる大規模なトポロジにおける経路制御の評価が不可欠である。さらに、べき乗則に従うネットワークであっても、上述の AS トポロジとルータレベルトポロジのようにトポロジ特性が大きく異なることがある。したがって、べき乗則に従うネットワークにおける経路制御手法の検討にあたっては、特性の異なる複数のトポロジで評価をすることが重要である。

そこで、本稿では、べき乗則に従うネットワークとして、BA モデルで生成したトポロジと、ルータレベルのインターネットトポロジを対象とした経路制御手法を評価し、べき乗則に適した経路制御手法を提案する。まず、既存の経路制御手法を適用した際に、ノード間トラヒックの増加がリンク負荷に与える影響を計算機シミュレーションにより示し、既存の経路制御を使用することの問題点を明らかにする。次に、フロー偏差法に基づく最適経路制御手法を各トポロジに適用し、収容可能なトラヒック量を比較評価する。計算機シミュレーションの結果、最適経路制御手法を適用することにより、最小ホップ経路制御に比べて、約 2 倍以上のトラヒックを収容できることを明らかにする。しかし、フロー偏差法に基づく最適経路制御は計算時間が増大し、現実の大規模なネットワークに適用することは難しい。そこで、本稿ではルータの技術的制約に関する情報を利用

し、ルータレベルのインターネットトポロジに適した経路制御手法を提案し、その有効性を示す。

本稿の内容は以下の通りである。まず 2 章では、従来検討されてきた経路制御手法をインターネットトポロジに適用し、ルータレベルトポロジに収容可能なトラヒック量を評価する。3 章では、2 章において明らかとなる問題点を解決するために、ルータの出線数とそのリンクの回線容量の関係に基づいた経路制御手法を提案し、計算機シミュレーションを用いた比較評価により提案手法の有効性を示す。最後に本稿のまとめと今後の課題を 4 章で述べる。

2. ルータレベルトポロジに収容可能なトラヒック量の評価

2.1 シミュレーションモデル

本章では、計算機シミュレーションによって、ルータレベルトポロジに収容可能なトラヒック量の評価を行う。ネットワークモデルとして、米国の通信大手である Sprint 社、AT&T 社のルータレベルネットワークのトポロジを使用する。本稿で使用するルータレベルトポロジは、Rocketfuel [10] ツールを用いて計測されたものである。このトポロジの出力リンク数の分布は図 1 となり、出力リンク数の分布がべき乗則に従うことがわかる。また、これらの実際のトポロジとの比較を行うため、BA モデルと、出線数分布がポアソン分布に従うランダムグラフを生成する ER モデルによって作成したトポロジ（以降では、それぞれ BA トポロジ、ER トポロジと呼ぶ）も使用した。作成したこれらのトポロジは、いずれも Sprint トポロジと総ノード数および総リンク数が等しくなるように作成している。また、シミュレーションでは各トポロジに対し、全ノードペア間に同量のトラヒックを発生させる。

2.2 経路制御手法

本稿では、ルータレベルインターネットに収容可能なトラヒック量の評価を行うための経路制御手法として、OSPF (Open Shortest Path First) に基づいた経路制御手法とフロー偏差法を使用した経路制御手法 (Optimal Routing) を用いる。OSPF では、リンクコストとして、全て同じ値を与えた最小ホップ経路制御 (Minimum Hop Routing) と、Cisco 社 [11] 推奨のリンクコスト値 (リンクの回線容量の逆数) を使用した経路制御 (以下、Invcap Routing) を用いる。また、最適経路制御手法は以下の通りである。

フロー偏差法に基づく最適経路制御手法

フロー偏差法は、すべての送受信ノードペア間のフローに対して、ネットワーク全体にとって最適な経路を決定するための手法の一つである。フロー偏差法は、最適な経路割当てを目指して実現可能かつ減少方向に段階的に経路を少しずつ変更し、最適な経路集合を求める [12]。フロー偏差法ではまず、目的関数 T が与えられたときに、それぞれのリンク l に対してリンク l を流れるフロー量 F_l に関する偏微分をそのリンクのコスト w_l とする。そして w_l を基に最短経路アルゴリズムを使用して新たなフロー割り当てを計算する。このようにして計算したフロー割り当てを徐々に古いフロー割り当てと変更してゆくこと

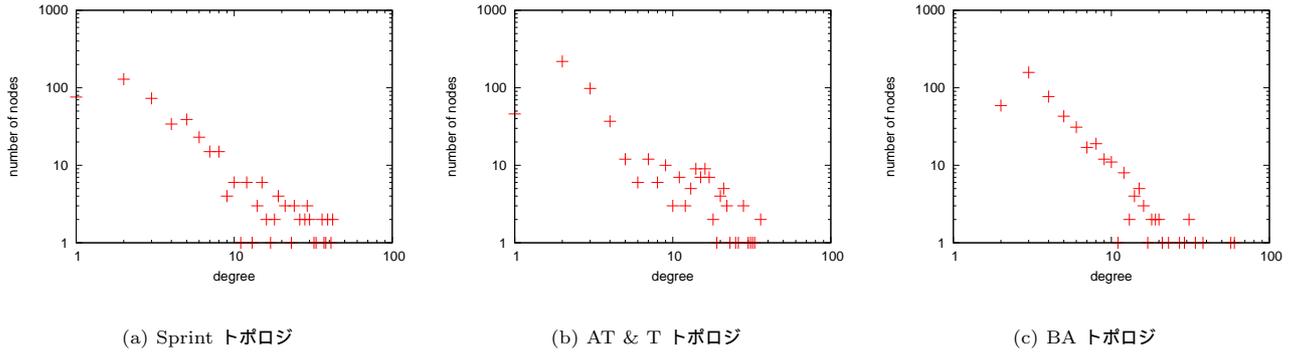


図1 ノードの出線数分布

で、最適なフロー割り当てを決定する。本稿では目的関数 T を

$$T = \sum_l 1/(C_l - F_l) \quad (1)$$

と定める (C_l はリンク l の回線容量)。

2.3 回線容量設定手法

本稿でシミュレーションを行うトポロジは、ルータレベルのものであり、リンクの回線容量の情報は公開されていない。しかし、ルータレベルトポロジに収容可能なトラヒック量の評価を行うためには、各トポロジ内のリンクの回線容量を決定する必要がある。そこで、本稿で評価を行うトポロジのリンクの回線容量は、文献 [7] のルータの技術的な制約に基づいて決定する。ルータの技術的な制約とは、簡潔に述べると、出線数の大きなルータには回線容量の大きなリンクを接続することができないという制約である。本稿ではルータのモデルとして Cisco 12416 ルータ [11] を使用する。Cisco 12416 ルータは 16 個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 以下の場合には全リンクの回線容量を 10Gbps とすることが可能である。しかし、接続されるリンクの数が 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出線数にほぼ反比例する制約がある [7]。本稿では、このルータの技術的な制約を以下のように簡単化する。

制約 1: ルータに接続できるリンクの回線容量は、100Mbps、1Gbps、2.4Gbps、4.8Gbps、10Gbps のいずれかである

制約 2: ルータに接続されるリンクの回線容量の総和は、320Gbps 以下である

以上の制約を考慮して回線容量を決定する。基本的には、最小ホップ経路制御を適用した際にリンクに流れるフロー量を収容しつつ、制約 2 のもとでリンク回線容量を最大化することにより、各リンクの回線容量を決定する。なお、各リンクのフロー量を求めるためには、ノードから発生するトラヒック量を与える必要があるが、ここでは十分大きなトラヒック量を初期値として与え、回線容量の割り当てを試みる。しかし、ルータの技術的な制約により、フローを収容可能な回線容量を割り当てることができない場合には、トラヒック量を小さくし、再度回線

容量を割り当てる。上記の手順を繰り返すことで、回線容量の割り当てを行う。具体的な手順は以下の通りである。

- Step 1: 各ノードから発生するトラヒック量を d とし、最小ホップ経路制御を適用したときにリンク i に流れるフロー量 F_i をそれぞれ計算する
- Step 2: 各リンク i の回線容量 C_i をすべて 10Gbps とする
- Step 3: すべてのノード i に対して以下の操作を行う
 - Step 3.1: ノード i に接続する全てのリンクの回線容量の合計 C_i^{all} を計算する
 - Step 3.2: $C_i^{all} > 320\text{Gbps}$ ならば、 $C_i^{all} \leq 320\text{Gbps}$ となるまで以下のステップを繰り返す
 - Step 3.2.1: ノード i に接続する全てのリンクの回線容量を 1 段階小さくする (例: 10Gbps \rightarrow 4.8Gbps)。ただし、流れるトラヒック量を収容することができなくなるリンクの回線容量は下げない
 - Step 3.2.2: リンクの回線容量が 100Mbps のため、これ以上回線容量を小さくすることができない場合には、 d を小さくして Step 1 へ戻る

以上の手順が終了し、どのリンクも前述した制約を満たすように回線容量を割り当てることができた場合には、そのときに割り当てた回線容量が、対象とするトポロジに対して行う回線容量の割り当てとなる。

2.4 計算機シミュレーションによる従来手法の評価

計算機シミュレーションの結果、それぞれのトポロジにおいて最大リンク利用率が 1.0 となったときに各ノードで発生しているトラヒック量を表 1 に示す。なお、本稿では、リンク i に到着するフローレートを F_i 、リンク i の回線容量を C_i とした時の F_i/C_i をリンク i の利用率と定義する。また、このリンク利用率の最大値を最大リンク利用率と定義する。表からわかるように、Sprint トポロジおよび AT&T トポロジに最小ホップ経路制御を適用した場合、各ノードから発生するトラヒック

表 1 各ノードあたりの最大トラフィック量 (Mbps)

	Sprint	AT&T	BA トポロジ	ER トポロジ
Minimum Hop	550	225	780	5170
Invcap	245	265	2479	6582
Optimal	1344	645	5795	10000

量がそれぞれ 550Mbps、225Mbps で最大リンク利用率が 1.0 となることからわかる。また一方で、BA トポロジにおいては 780Mbps で最大リンク利用率が 1.0 となるが、ER トポロジにおいては 5170Mbps で最大リンク利用率が 1.0 となることからわかる。これは、ランダムネットワークである ER モデルのトポロジでは、全てのノードの出線数が 16 以下であり、全てのリンクの回線容量を 10Gbps とすることができるためである。

次に、BA トポロジでは、Invcap Routing を適用することで、より多くのトラフィックを収容できるようになっていることがわかる。一方で、その他のトポロジではほとんど収容できるトラフィックが増えていないことがわかる。特に Sprint トポロジの場合は、トラフィック量が最小ホップ経路制御の結果よりも減少しており、Invcap Routing は必ずしも多くのトラフィックを収容できるわけではないことがわかる。

最適経路制御手法を適用した場合の結果を見ると、どのトポロジにおいても約 2 倍以上のトラフィックを収容できていることがわかる。特に BA トポロジの場合、収容できるトラフィック量が最小ホップ経路制御を行った場合の 7.43 倍になっている。これは、最小ホップ経路制御を適用した場合、出線数が大きいノードに接続する回線容量の小さいリンクがボトルネックとなるのに対し、最適に経路制御を適用すると、出線数の小さなノードに接続する回線容量の大きいリンクを利用することによって収容可能なトラフィック量が高まるためである。

3. 出線数情報を利用した経路制御手法の提案

3.1 提案手法

2.3 節で述べたように、ルータに接続できるリンクはルータの出線数が小さい場合には回線容量を大きくすることが可能であり、ルータの出線数がある一定の値 (Cisco 12416 ルータの場合、16) から大きくなるにつれて接続できるリンクの回線容量は減少していく技術的な制約を持つ。このような技術的制約を考慮すると、出線数の大きなルータに接続するリンクは基本的に回線容量が小さく、リンクの利用率が高くなりやすい。また、出線数が小さいルータに接続するリンクに関しても、そのリンクの接続先ルータにおいても技術的な制約が影響するため、回線容量が大きいとは限らない。

そこで本節で提案する経路制御手法では上記の特性に基づき、1) 出線数の大きいルータを避けるように経路を選択、2) 回線容量の大きいリンクを優先的に選択する。これにより、特定のリンクに負荷が集中することを避け、ネットワーク内の最大リンク利用率を減少させることが可能となる。最小ホップ経路制御手法は、宛先のみで次の出力リンクを決定する経路制御手法であるが、本節で提案する経路制御手法は最適経路制御と同じく送信ノードと宛先ノードを用いて経路を決定している。提案

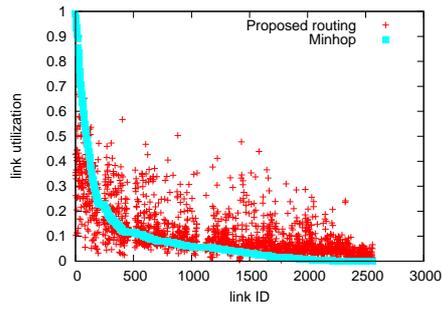
手法では、経路制御の対象となるトポロジとすべてのノードの出線数および、すべてのリンクの回線容量を利用して、先に述べた 1)、2) の方針を反映するようにリンクコストを与える。そして、与えられたリンクコストに基づいて Dijkstra の最短経路アルゴリズムを使用し、経路を求める。アルゴリズムの詳細は以下の通りであり、これによりノード i からその他のノードまでの経路を決定する。

- Step 1: ネットワーク内のすべてのリンクの初期コストを設定する。コストは、そのリンクの宛先ノードの出線数に等しい値とする
- Step 2: ノード i 以外の全てのノード j に対して以下の操作を行う
 - Step 2.1: 設定されたリンクコストを用いて Dijkstra のアルゴリズムを適用し、ノード j への経路を決定する
 - Step 2.2: Step 2.1 により求めたルータ j への経路に含まれるリンクのリンクコストを、そのリンクの回線容量に反比例した値 ($\alpha \frac{C_{max}}{C_l}$: α は定数、 C_l はリンクの回線容量、 C_{max} はネットワーク内のリンクの回線容量の最大値) だけ増加させる
- Step 3: ノード i から他のすべてのノードへの経路が決定したら終了する

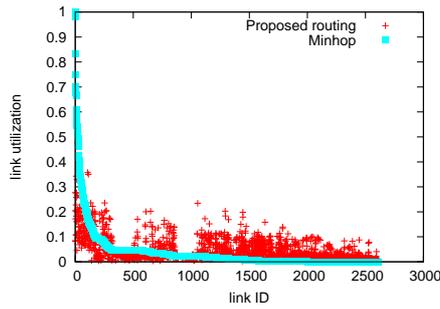
3.2 計算機シミュレーションによる提案手法の評価

提案手法を用いたときに各トポロジにおいて収容可能なトラフィックの量を示すため、2.4 節と同じ条件で提案手法を使用した場合の最大リンク利用率を評価した。表 2 は、ネットワークの最大リンク利用率が 1.0 となったときに各ノードで発生しているトラフィックの量を示している。なお、提案手法のパラメータ α は、最大リンク利用率が最小となる最適な値を各トポロジに応じて設定している。なお、パラメータ α に対する最大リンク利用率の変化に関しては本節の最後に述べる。表 2 を見ると、提案経路制御手法を用いた場合、最大リンク利用率が 1.0 となる時に各ノードで発生しているトラフィック量は、Sprint トポロジ、AT&T トポロジで最小ホップ経路制御手法を適用したときのそれぞれ約 1.6 倍、約 2.1 倍となり、ネットワーク内の最大リンク利用率がそれぞれ約 37 % および約 53 % 減少していることがわかる。また、BA トポロジにおいては Sprint トポロジ以上に大幅に収容可能トラフィック量を増やすことができている。ER トポロジにおいては、べき乗則に従うトポロジほどの効果は見られなかった。これは、ER トポロジにおいて、ルータの技術的な制約を考慮してリンクの回線容量を割り当てた場合でも、出線数の大きいルータが ER トポロジには存在しないことにより、すべてのリンクの回線容量が 10Gbps となるためである。

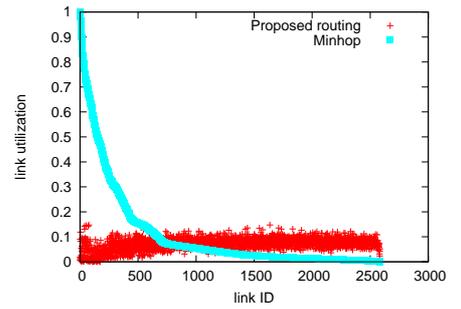
次に、図 2(a)、3(a)、4(a) にて計算機シミュレーションによって得られた、最小ホップ経路制御手法を適用したときのリ



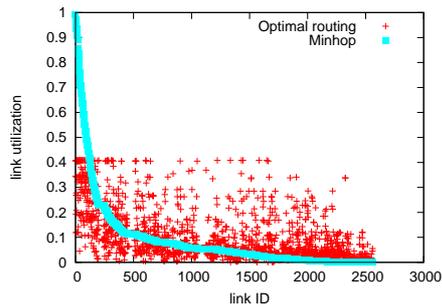
(a) 提案手法による経路制御



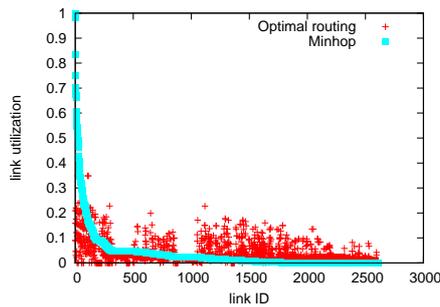
(a) 提案手法による経路制御



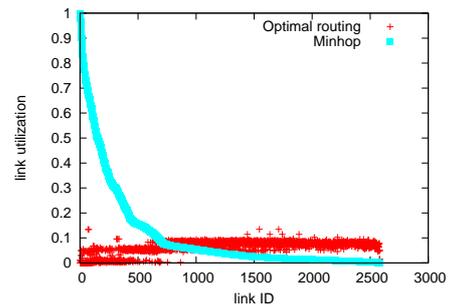
(a) 提案手法による経路制御



(b) 最適経路制御



(b) 最適経路制御



(b) 最適経路制御

図 2 リンク利用率の分布: Sprint トポロジ

図 3 リンク利用率の分布: AT&T トポロジ

図 4 リンク利用率の分布: BA トポロジ

表 2 各ノードあたりの最大トラフィック量 (Mbps)

	Sprint	AT&T	BA トポロジ	ER トポロジ
Minimum Hop	550	225	780	5170
Proposed	869	476	5235	6374
Optimal	1344	645	5795	10000

表 3 出線数が最大のノードから他のノードへの平均ホップ数

Sprint	AT&T	Verio	Level3	BA
2.89	3.99	3.50	2.22	2.15

リンクの利用率の分布と、提案経路制御手法を適用したときのリンク利用率の分布を比較する。これらの図では、それぞれのトポロジにおいて最小ホップ経路制御を使用したときに最大リンク利用率が 1.0 となるトラフィック量を与えた時の結果を示している。図は横軸がリンクの ID となっており、ID は最小ホップ経路制御を適用したときの利用率に関する降順で各リンクに付与している。また、縦軸はリンク利用率である。さらに、最適経路制御手法を適用したときのリンク利用率の分布と最小ホップ経路制御手法を適用したときのリンク利用率の分布の比較も図 2(b)、3(b)、4(b) に示す。

図 2(a) から、Sprint トポロジにおいて提案経路制御手法を適用したときのリンクの利用率分布は、最小ホップ経路制御手法を適用した場合の分布と大きく異なることがわかる。分布を見ると、リンク ID の小さいリンク、すなわち最小ホップ経路制御において利用率の高いリンクにおいて、リンク利用率が大きく減少していることがわかる。また、図 2(b) と比較すると、一部負荷の高いリンクが残るものの、他のリンクに関しては最適経路制御を適用した場合と同様の分布を示していることがわかる。

図 3(a) が示す AT&T トポロジの場合も Sprint トポロジの場合と同様に、提案手法を使用することで、一部に集中していた負荷をうまくその他のリンクに分散できていることがわかる。特に図 3(b) と比較すると、リンクの負荷の分布が最適な経路制御を行った場合とほとんど変わらず、理想的に経路制御をできていることがわかる。

BA トポロジにおいても、提案経路制御手法を適用したときのリンク利用率の分布は Sprint トポロジでの結果と同様の傾向を示している (図 4(a))。しかし、BA トポロジにおいては、最小ホップ経路制御手法を適用したときにおいて利用率の高いリンクの負荷を大きく下げることができおり、リンク利用率がより抑えられていることがわかる。これは、BA トポロジでは、Sprint トポロジに比べて出線数の大きいノード同士が接続されやすいという傾向があり、出線数の大きいノードに負荷がより集中する傾向がある。その結果、提案経路制御手法による負荷分散の効果が高くなるためであると考えられる。また、最適経路制御を適用した場合の結果と比較した場合についても、Sprint トポロジで評価したときと同様の傾向が見られる (図 4(b))。

最後に、各トポロジにおいて提案手法で用いるパラメータ α の値が最大リンク利用率に与える影響を図 5 に示す。また、こ

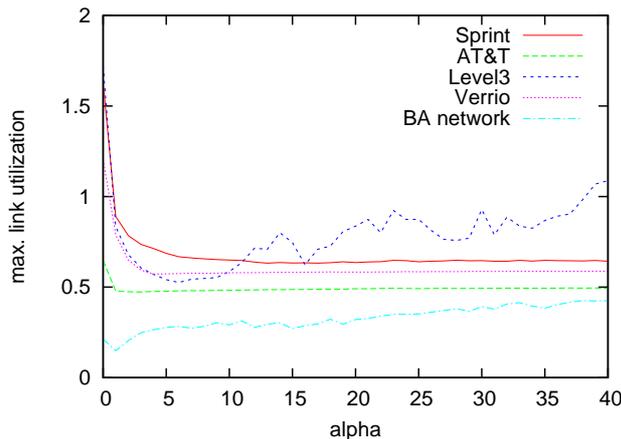


図5 パラメータ α に対する最大リンク利用率

ここでは Verio 社、Level3 社のルータレベルトポロジでの結果も示している。図 5 より、 α の値として、1 から 10 を設定すると最大リンク利用率を大きく削減できることがわかる。しかし、BA トポロジ、Level3 のトポロジに関しては、 α の値を大きくすると、最大リンク利用率が高くなる傾向がある。これは、BA トポロジや Level3 のトポロジでは出線数の大きなノードがトポロジの“中心”に位置し、トラフィックがそれらのノードに集中しやすい構造になっているためである。ここでいう中心とは、他のノードに少ないホップ数で到達可能であることを意味する。パラメータ α の値を大きくすると、回線容量の大きいリンクのリンクコスト値が大きくなり、回線容量が大きい経路よりもホップ数が小さくなる経路が選ばれやすくなる。そのため中心に位置する出線数の大きいノードを経由しやすくなるが、その接続リンクの回線容量は小さいため、リンク利用率が上昇する。出線数の大きいノードがネットワークの中心に位置することを明確にするために、表 3 に出線数が最大のノードから各ノードへのホップ数の平均を示す。この値が小さいほど、出線数の大きなノードがトポロジの中心に位置することを表す。これより、BA トポロジと Level3 のトポロジは、その他のトポロジに比べて、出線数の大きなノードからその他のノードへの距離が小さく、出線数の大きなノードにトラフィックが集中しやすい構造であることがわかる。一方、Sprint、AT&T、Verio のトポロジでは、出線数の大きなノードはネットワークの中心になく、トラフィックの集中を回避できる構造となっている。

4. まとめと今後の課題

本稿では、インターネットのノードの出線数がべき乗則に従うということに着目し、その環境に適した経路制御手法を提案した。そのために、まず、従来の経路制御手法をべき乗則に従うネットワークに適用した際の評価をおこなった。最適な経路制御を行った場合、従来使用されてきた最小ホップ経路制御手法に比べて最大リンク利用率を約 5 分の 2 に抑えられることがわかった。本稿では、この結果を踏まえ、リンク負荷を抑える経路制御手法の確立を目指し、新たな経路制御手法の提案を行った。提案手法では、ルータの技術的な制約を考慮して、1)

出線数の大きいルータを避けて経路を選択し、2) 回線容量が大きいリンクを優先的に選択する、という 2 つの方針をもとにルータ間の経路を選択する。計算機シミュレーションによる評価の結果、Sprint 社のネットワークにおいて最大リンク利用率を約 37 %抑えられることが明らかになった。

本稿でシミュレーションを行ったルータレベルネットワークは、実測によって得られたトポロジを使用している。したがって、ノード数増加に対するスケーラビリティなどの議論を進めていくにあたってはルータレベルのインターネットトポロジのモデル化手法が不可欠であり、そのようなモデル化手法を考案することが課題である。また本稿では、計算機シミュレーションにおいて、トラフィックデマンドは各ノードペアで均一のトラフィックが発生することを仮定しているが、より現実に近いトラフィックデマンドを与えてリンクの負荷特性を評価することが今後の課題として挙げられる。

文 献

- [1] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, “On power-law relationships of the Internet topology,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 251–262, 1999.
- [2] A. Barabasi and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [3] R. Cohen, S. Havlin, and D. Avraham, *Handbook of Graphs and Networks – From the Genome to the Internet*, ch. 4. WILEY-VCH GmbH & Co., 2003.
- [4] A. Akella, S. Chawla, A. Kannan, and S. Seshan, “Scaling properties of the Internet graph,” in *Proceedings of the twenty-second annual symposium on Principles of distributed computing*, pp. 337–346, 2003.
- [5] W. Willinger, R. Govindan, S. Jamin, V. Paxson, and S. Shenker, “Scaling phenomena in the Internet: Critically examining criticality,” in *Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America*, pp. 2573–2580, Feb. 2002.
- [6] C. Gkantsidis, M. Mihail, and A. Saberi, “Conductance and congestion in power law graphs,” in *Proceedings of ACM SIGMETRIC*, pp. 148–159, June 2003.
- [7] 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*, pp. 3–14, Aug. 2004.
- [8] B. Fortz and M. Thorup, “Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights,” in *Proceedings of INFOCOM (2)*, pp. 519–528, 2000.
- [9] L. Qiu, Y. R. Yang, Y. Zhang, and S. Shenker, “On selfish routing in Internet-like environments,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 151–162, Aug. 2003.
- [10] “Rocketfuel: An ISP topology mapping engine,” <http://www.cs.washington.edu/research/networking/rocketfuel/>.
- [11] “Cisco systems,” <http://www.cisco.com/>.
- [12] L. Fratta, M. Gerla, and L. Kleinrock, “The flow deviation method: An approach to store-and-forward communication network design,” *Networks*, vol. 3, pp. 97–133, 1973.