

ISP トポロジにおけるオーバレイルーティングの効果

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

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

あらまし 近年、インターネットにおいて、既存の IP ネットワーク上にアプリケーション独自の論理的なネットワークを構築するオーバレイネットワークが注目されている。このようなオーバレイネットワークでは、オーバレイネットワーク上のノード（エンドホスト）が、自身の QoS を満足できるようにオーバレイルーティングを用いて経路を制御する。しかし、エンドホストによる経路制御は、各エンドホストが自分の QoS、もしくは享受する性能を最大限向上させるように経路を選択する利己的なものであり、ネットワーク管理者は制御できない。従って、オーバレイルーティングの利己的な振る舞いがネットワーク与える影響や、非オーバレイのトラフィックに与える影響を明らかにする必要がある。そこで本稿では、オーバレイルーティングが ISP トポロジに与える影響を、最大リンク利用率や平均レイテンシの観点から評価する。本稿では、エンドホストによるレイテンシの最小化を目的とするオーバレイルーティングと、ネットワークによる負荷の分散を目的とするオーバレイルーティングの 2 つを想定し、それぞれのオーバレイルーティングがネットワークに与える影響と、その性能を計算機シミュレーションを用いて比較評価する。評価の結果、ネットワークによるオーバレイルーティングは、ユーザによるオーバレイルーティングとほぼ同等の平均レイテンシを達成しつつ、ユーザによるオーバレイルーティングと比較して最大リンク利用率を大きく低下させることが明らかになった。

キーワード オーバレイルーティング、経路制御、べき乗則、フロー偏差法

Classification and evaluation of overlay routing methods in ISP topologies

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

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

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

Abstract In recent years, overlay networks have been deployed in the Internet. On overlay networks, each application constructs its own logical topology. Users of overlay networks then select routes that maximize their QoS requirements on top of the logical topology, which we call overlay routing. However, such a routing controlled by end users is selfish by nature in that they can greedy select routes to optimize their own performance without considering the network-wide criteria. Such routings are uncontrollable by network operators. Therefore we have to show the influence that the selfish behavior makes network performances and non-overlay traffic being worse. In this paper, we evaluate the impact of selfish behavior of overlay routings from the perspective of maximum link utilization and average latency. We also show whether the structural property of ISP topologies strengthens the impact or not. We introduce an user-oriented overlay routing and a network-oriented overlay routing. The results of our simulations show that the network-oriented overlay routing achieves lower maximum link utilization than the user-oriented overlay routing while keeping the average latency approximately equivalent to that of the user-oriented overlay routing.

Key words Overlay routing, Selfish routing, Power-law network, Flow deviation method

1. はじめに

近年、インターネットにおいて、既存の IP ネットワーク上にアプリケーション独自の論理的なネットワークを構築するオーバーレイネットワークが注目されている。オーバーレイネットワークの例として、ピア同士の直接的な通信を実現する P2P ネットワーク、ネットワーク上での分散計算環境を提供するグリッドネットワーク、コンテンツ配信を目的とした Contents Delivery Network (CDN)、IP ネットワーク上に仮想網を構築する IP-VPN などがあり、IP ネットワーク上で様々なオーバーレイネットワークが展開されつつある。

一方で、既存のネットワークレベルでの経路制御、すなわち、IP ルーティングは、通常最短ホップ経路、もしくは、ネットワーク管理者が自身のネットワークのリンクの最大負荷（最大リンク利用率）を最小化するための経路制御を行う [1]。しかし、ネットワークの利用者の観点からは、例えばエンド・エンド間遅延は必ずしも最小化されているわけではなく、利用者が要求する QoS は満たされているとは限らない。そのため、オーバーレイネットワーク上のノード（エンドユーザ）が、自身のサービスに適した QoS を満足できるように経路を制御するオーバーレイルーティングが考えられている [2]。しかし、エンドホストによる経路制御は、各エンドホストが自分の QoS、もしくは享受する性能を最大限向上させるように経路を選択する利己的なものであり、このような利己的な経路制御はネットワーク管理者が制御することはできない。従ってオーバーレイルーティングの利己的な振る舞いが最大リンク利用率などのネットワーク性能に与える影響や非オーバーレイネットワークのトラヒックに与える影響を明らかにする必要がある。

オーバーレイネットワーク上で利己的な経路制御を行うオーバーレイルーティングに関する研究として、文献 [3] がある。ここでは、各エンドホストが各指標に応じて利己的に経路制御を行う Selfish routing は、ユーザ性能が極めて悪くなる可能性が指摘されている。しかし、文献 [4] では、POP レベルの ISP トポロジを用いて Selfish routing を行った場合に、ユーザ性能であるレイテンシ（重み付き遅延）は最適値に近い値となることが明らかにされており、インターネットに似た環境においてオーバーレイルーティングが有効に作用する可能性が示されている。また、レイテンシが最適値に近い値を示す一方で、オーバーレイルーティングを行った場合に一部のリンクの負荷が上昇し、ネットワークのリンク負荷の最大値（最大リンク利用率）が高くなることも明らかにされている。

文献 [4] では、インターネットに似た環境として POP レベルのトポロジを用いており、高々100 ノードの小規模なネットワークでのオーバーレイルーティングの適用可能性を示しているのみである。しかし、オーバーレイネットワークのアプリケーションはインターネットの広域にわたって展開されるサービスである。そのため、より大規模なルータレベルのトポロジにおいても実際にオーバーレイルーティングが有効に作用するかどうかが示す必要がある。特に、近年インターネットのトポロジはべき乗則に従うことが指摘されているが [5]、文献 [4] で評価に用いら

れている POP レベルのトポロジは、ノード数が少ないことから現実のインターネットトポロジで観測される特性が反映されていない。従って、大規模なトポロジにオーバーレイルーティングを適用した際の性能を明らかにすることが重要である。

そこで本稿では、べき乗則に従うトポロジとルータレベルのトポロジにおいてオーバーレイルーティングを導入した際に、各ノードの利己的な経路制御によってレイテンシと最大リンク利用率がどのように変化するかを明らかにする。また、文献 [4] では、利己的な経路選択を行った際の均衡状態を解析的に導いているが、実際のインターネットにおいては解析的に求められた均衡状態に収束するとは限らない。そこで本稿では、これら均衡状態でのオーバーレイルーティングの効果と、オーバーレイネットワーク上の各エンドホストが定期的に経路を変更する状況下でのオーバーレイルーティングの効果との比較評価も行う。評価の結果、大規模なトポロジにおいてもオーバーレイルーティングは、レイテンシを低下させる一方で、一部のリンクに負荷が集中することを明らかにする。また、各エンドホストが定期的に経路を変更する場合、均衡状態の結果と比較して、最大リンク利用率が増加し、レイテンシに関しても上昇するという結果が見られた。

さらに、オーバーレイルーティングに関しては、P2P ネットワークで行われるようなユーザが利己的に行うオーバーレイルーティングだけでなく、RON (Resilient Overlay Networks) [6] のように、ネットワークでの輻輳回避や信頼性の向上を目的としたものも存在する。よって、エンドユーザから見た指標を改善するためのオーバーレイルーティングだけでなく、逆に、ネットワーク管理者から見た指標を改善するようなオーバーレイルーティングを行った場合、ネットワークにどのような影響を与えるのかについても評価を行うことが必要である。そこで、本稿では、エンドユーザが行うオーバーレイルーティング以外にも、オーバーレイネットワーク上で分散して経路を制御することでネットワーク全体の最適化を図るオーバーレイルーティングも考慮し、それらのオーバーレイルーティングを比較評価する。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2. 章では、ISP トポロジの構造と、その関連研究について述べる。3. 章では、評価を行うオーバーレイルーティングの詳細について述べる。4. 章では、3. 章で説明したオーバーレイルーティングを ISP トポロジに適用した際の比較評価を行う。最後に、本稿のまとめと今後の課題を 5. 章にて述べる。

2. ISP トポロジ

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 [5]。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 [7]。

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 [8] 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 [9-11] 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 [7] 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フィックが集中することが示されている。

一方で、文献 [12] では、同じ出線数分布を持つものの、ネットワークのスループットや linklihood メトリクスのような他の特徴の異なるいくつかのトポロジを列挙している。文献 [12] では、ルータレベルトポロジはルータの技術的な制約により、ルータの出線数が決定することを述べており、このようなトポロジにおいては、出線数の大きいノードはネットワークのエッジ部分に、出線数の小さなノードはネットワークのコアの部分に存在し、BA モデルによって生成されるトポロジと実際のルータレベルトポロジの構造は異なることを指摘している。また、文献 [13] では、経路制御を適用した際のスループットや、リンク負荷の特性に BA モデルで作成したトポロジと実際の ISP のトポロジとは大きな違いがあることが述べられている。

3. オーバレイルーティング

文献 [4] では、エンドユーザによるオーバレイルーティングのみを評価しているが、実際には、RON (Resilient Overlay Networks) [6] のように、ネットワークでの輻輳回避や信頼性の向上を目的としたオーバレイルーティングも存在する。したがって、エンドユーザから見た指標を改善するためのオーバレイルーティングだけでなく、ネットワーク管理者から見た指標を改善するようなオーバレイルーティングを行った場合、ネットワークにどのような影響を与えるのかについても評価を行うことが必要である。そこで本稿では、ネットワーク管理者から見た指標を改善するためのオーバレイルーティングも想定し、その比較評価を行う。以下では、本稿で想定するオーバレイネットワークと、それぞれのオーバレイルーティングについて記述する。

3.1 オーバレイネットワーク

オーバレイネットワークはオーバレイノードとオーバレイノード間を結ぶ論理リンクで構成される。論理リンクは、1 本もしくは複数本の物理リンクで構成される。論理リンクを構成する物理リンクは、ネットワークレベルの経路制御に依存しており、最小ホップ経路制御によって決定する。また、本稿では全オーバレイノード同士が 1 本の論理リンクで接続されていることを想定する。実際のオーバレイネットワークにおいては、全オーバレイノード同士が相互に接続されることは考えにく

い。しかし、全オーバレイノード同士が相互に接続されることを想定して得られた結果は、最適にオーバレイネットワークを構築したことを想定して得られた結果と同等になると考えられる。よって、ここでは最適にオーバレイネットワークを構築できると仮定した上で、全オーバレイノード同士が相互に接続される状況にて評価を行う。また、各オーバレイノードは、そこで発生したトラフィックを、自身の指標を最適化するように目的のオーバレイノードへ向かって送出する。このとき、各オーバレイノードは、目的地までに経路するオーバレイノードを指定して送出する (source routing)。

3.2 Pure distributed overlay routing

エンドユーザがオーバレイノードであることを想定したオーバレイルーティングを、本稿では、Pure distributed overlay routing と呼ぶ。Pure distributed overlay routing において、各オーバレイノードは、自身から発生するトラフィックのレイテンシが最小となるように、目的地までの経路を指定してトラフィックを送出する。各オーバレイノードは自身から発生するトラフィックが最適な経路を經由することのみを考えて利己的かつ動的に経路を変更する。また、あるオーバレイノードが経路を変更することで、他のオーバレイノードがより良い経路を発見し経路変更を行うことがある。そのため、各オーバレイノードは経路変更を行うことによる性能向上がなくなる均衡状態になるまで経路の変更を続ける。

3.3 Partially distributed overlay routing

ルータがオーバレイノードとなり、ネットワーク内の負荷を分散させることを目的としたオーバレイルーティングを、本稿では Partially distributed overlay routing と呼ぶ。各オーバレイノードは、自身で発生するトラフィックが經由するリンクでのキューイング遅延を最小とするように、目的地までの経路を指定してトラフィックを送出する。各オーバレイノードはリンクのキューイング遅延に基づいて経路制御を行うので、利用率の極端に高いリンク迂回し、ネットワークでの輻輳を回避できる。Partially distributed overlay routing では、各オーバレイノードは、自身から発生するトラフィックのこのみを考えて経路を動的に変更し、分散的に経路制御を行う。また、Pure distributed overlay routing と同様に均衡状態に落ち着くまで各ノードは経路の変更を続ける。

3.4 Network optimal overlay routing

ネットワーク内の輻輳を避けるために集中制御を行い、最適に経路制御を行うオーバレイルーティングを、本稿では、Network optimal overlay routing と定義する。Partially distributed overlay routing は自身で発生するトラフィックのみを考えて各ルータが分散的に経路制御を行うことを想定しているが、Network optimal overlay routing はネットワーク全体で発生するトラフィックを考えて、集中的に経路を制御し、ネットワークでの輻輳を回避することを想定している。

4. 性能評価

本章では、3 章で述べたオーバレイルーティングを、ISP トポロジに適用した際の性能の評価を行う。オーバレイルーティ

表 1 ISP トポロジの構成

	ノード数	リンク数
Sprint	467	1280
AT&T	523	1304

ングは動的に経路を変更するため、本稿では、オーバレイルーティングの均衡状態を、文献 [4] と同様に、フロー偏差法 [14] を用いて算出し、均衡状態での最大リンク利用率と、平均レイテンシの評価を行う。また、オーバレイネットワーク上の各エンドホストが定期的に経路を変更する状況下でのオーバレイルーティングの効果も評価することで、均衡状態での性能との比較を行う。

4.1 シミュレーションモデル

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、実測によって得られたルータレベルのトポロジ（以下、Sprint トポロジ、AT&T トポロジと記す）を使用する。本稿で使用するルータレベルトポロジは、Rocketfuel [15] ツールを用いて計測されたものである。また、これらの ISP トポロジとの比較を行うため、BA モデルと、ER モデルによって作成したトポロジ（以下、それぞれ BA トポロジ、ER トポロジと記す）も使用した [13]。ER モデルは、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ためのモデルである。Sprint トポロジ、AT&T トポロジは、表 1 に示すノード数、リンク数で構成されている。BA モデルおよび ER モデルで作成したトポロジは、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。

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フィックを発生させる。各リンクは全て 10 Gbps、伝播遅延時間は全て 1 msec であると仮定している。さらに、本稿ではリンク負荷に着目するため、ノードで生じるパケットの処理遅延は 0 とし、エンド・エンド間遅延は、リンクの伝播遅延と伝送遅延によってのみ生じるものとする。また本稿では、論理リンクの経路は、最小ホップ経路選択によって決まるものとする。オーバレイネットワーク上での経路制御は、3 章で述べた 3 つの手法を使用する。文献 [4] と同様にフロー偏差法 [14] を用いてオーバレイルーティングの均衡状態を求め、それぞれのオーバレイルーティング手法の均衡状態でのユーザ性能（レイテンシ）とネットワーク性能（最大リンク利用率）を比較する。

4.2 フロー偏差法に基づく均衡状態の計算

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 [14]。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 e に対してリンク e を流れるフロー量 F_e に関する偏微分をそのリンクのコスト w_e とする。そして w_e 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当てを計算する。このようにして計算したフロー割当てを徐々に古いフロー割当てと変更してゆくこと

で、最適なフロー割当てを決定する。本稿では、この手法に与える目的関数を、それぞれ以下のように設定することで、それぞれのオーバレイルーティングの均衡状態または最適解を求めている。

$$T_p = \sum_e \int l_e(x_e) dx \quad (\text{Pure distributed})$$

$$T_d = \sum_e \int (1/(C_e - x_e)) dx \quad (\text{Partially distributed})$$

$$T_o = \sum_e 1/(C_e - x_e) \quad (\text{Network optimal})$$

C_e はリンク e の回線容量、 x_e はリンク e を流れるフローの量、 l_e はリンク e で発生する平均遅延（伝播遅延 + 伝送遅延）。

4.3 オーバレイルーティングの評価

図 1 はオーバレイネットワークを流れるトラフィック（以下、オーバレイトラフィックとする）の量の変化に対する最大リンク利用率の変化を示している。シミュレーションでは、物理ネットワーク上に、最大リンク利用率が 0.5 となる量のトラフィック（以下、非オーバレイトラフィックとする）を発生させており、このトラフィックの量は固定している。グラフの横軸である Overlay traffic factor の値は、オーバレイトラフィックの量を表しており、その値が 1.0 のとき、非オーバレイトラフィックの量と等しい量のオーバレイトラフィックが発生していることを示す。縦軸は、ネットワークの最大リンク利用率を示している。図 1(a)、1(c)、1(b) から、出線数分布がべき乗則に従うトポロジにおいては、Partially distributed overlay routing を行うことで、Pure distributed overlay routing を行う場合に比べ、最大リンク利用率が大きく低下していることがわかる。これは、集中制御により最適に経路制御を行った場合 (Network optimal overlay routing) と比較してもほとんど差はなく、最大リンク利用率が最適に近い値になっていることがわかる。また、図 1(e) の、POP レベルの Sprint トポロジでも、同様の傾向が見て取れる。一方、図 1(d) の ER トポロジの場合、ネットワークによるオーバレイルーティング (Partially distributed overlay routing) と、ユーザによるオーバレイルーティング (Pure distributed overlay routing) の効果にほとんど差が見られていない。これは、ER トポロジとその他のトポロジ構造の違いが原因である。文献 [13] でも指摘されているように、ER トポロジでは最小ホップ経路制御を使用して経路制御を行ったとしても、リンク負荷はネットワーク全体に分散されるという特徴を持つ。一方で、べき乗則に従うようなトポロジでは一部のリンクにトラフィックが集中する。よって、ER トポロジでは、もともとリンク負荷に偏りがなく、どのリンクにもある程度の負荷がかかっているため、オーバレイルーティングが利用できる負荷の低い迂回経路が限られてしまう。結果として、どのオーバレイルーティングを使用しても選択される迂回経路がほとんど同じになってしまうと考えられる。また、以上の結果は、文献 [4] と同様、理想的な均衡状態をフロー偏差法を使用して算出している。しかし、このような均衡状態に実際に収束するとは限らず、このようなパフォーマンスを達成できるかはわからない。そこ

で、オーバーレイネットワーク上の各エンドホストが定期的に経路を変更する状況下での、“Pure distributed overlay routing”の効果を、図中の“Pure distributed - no equilibrium -”と表示した結果で示す。どのトポロジにおいても、均衡状態に収束した場合よりも、オーバーレイトラフィックが少ない状態で最大リンク利用率が 1.0 に到達していることがわかる。これより、実際にオーバーレイルーティングを使用した場合、均衡状態での結果よりも最大リンク利用率が大きくなることが予想される。

次に、図 2 に、平均レイテンシを示す。グラフの横軸は図 1 と同じく、オーバーレイトラフィックの量を示している。縦軸はネットワーク内の全てのノードペア間での遅延時間の平均値を表している。図 2 より、どのオーバーレイルーティングを使用しても平均レイテンシにほとんど違いがないのがわかる。これより、ネットワークでの分散制御により、ネットワークへの負荷を分散させる Partially distributed overlay routing は、ユーザによる平均レイテンシの短縮を目的とした Pure distributed overlay routing と比較して、ユーザにとっての平均レイテンシを Pure distributed overlay routing とほぼ同等に抑えつつ、ネットワーク内の最大リンク利用率を大きく低下させていることがわかる。

図 3 では、Pure distributed overlay routing を適用した際の、リンク利用率の平均値の変化に対する最大リンク利用率の変化を示している。横軸は、Pure distributed overlay routing を使用した際の、ネットワーク内の全リンクの利用率の平均値を示している。縦軸は、最大リンク利用率を示している。図より、Sprint トポロジ、AT&T トポロジ、POP レベルの Sprint トポロジなどの実際のトポロジは、BA トポロジや ER トポロジと比較して最大リンク利用率の変化が大きいことがわかる。すなわち、Sprint トポロジ、AT&T トポロジ、POP レベルの Sprint トポロジでは、オーバーレイトラフィックの量が増加すると、最大リンク利用率は急激に上昇することを示している。また、ルータレベルの Sprint トポロジと、POP レベルの Sprint トポロジを比較した場合、ルータレベルの Sprint トポロジの方が、ネットワーク内のトラフィックの増加に伴って最大リンク利用率が上昇しやすい傾向を有することがわかる。文献 [4] においては、POP レベルのトポロジにおいてオーバーレイルーティングの評価がなされてきたが、今回の結果から、POP レベルのトポロジよりもルータレベルのような大規模なトポロジの方が、オーバーレイルーティングによって最大リンク利用率が影響を受けやすいということがわかる。

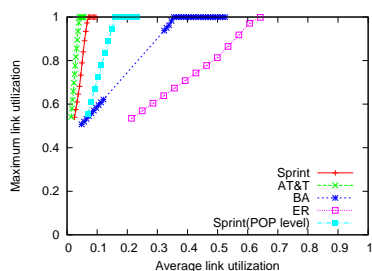


図 3 リンク利用率の平均値の変化に対する最大リンク利用率の変化

5. まとめと今後の課題

本稿では、近年注目されているオーバーレイルーティングに着目し、利己的なオーバーレイルーティングが、大規模なインターネットルータレベルトポロジに与える影響を評価した。本稿では、ユーザによるオーバーレイルーティングと (Pure distributed overlay routing) と、ネットワークによるオーバーレイルーティング (Partially distributed overlay routing) の、2 つを想定し、それぞれのオーバーレイルーティングが均衡状態でネットワークに与える影響と、その性能を計算機シミュレーションを用いて比較評価を行った。

計算機シミュレーションの結果、Partially distributed overlay routing は、Pure distributed overlay routing とほぼ同等の平均レイテンシを達成し、また、最大リンク利用率を Pure distributed overlay routing と比べて大きく下げることができた。さらに、Pure distributed overlay routing を適用した際、ルータレベルのような大規模なトポロジでは、POP レベルのような小規模なトポロジと比較して、ネットワークに流れるトラフィックの量に最大リンク利用率が影響を受けやすいことがわかった。

また、文献 [16] では、オーバーレイルーティングとトラフィックエンジニアリングが互いの影響によって経路を変更し続けている状態をインタラクションと定義し、このインタラクションについて評価を行っている。しかし、これらの評価に関しても POP レベルの小規模なトポロジが使用されており、現実のインターネットトポロジで観測される特性が反映されていない。したがって、今後は、ISP のルータレベルトポロジにおける、オーバーレイルーティングとトラフィックエンジニアリングのインタラクションについて評価を行うことが課題として挙げられる。

文 献

- [1] B. Fortz and M. Thorup, “Internet Traffic Engineering by Optimizing OSPF Weights,” in *Proceedings of INFOCOM (2)*, pp. 519–528, 2000.
- [2] P. M. Zhi Li, “QRON: QoS-aware routing in overlay networks,” *IEEE Journal*, vol. 22, pp. 29–40, Jan. 2004.
- [3] T. Roughgarden and E. Tardos, “How bad is selfish routing?,” *Journal of the ACM*, vol. 49, pp. 236–259, Mar. 2002.
- [4] L. Qiu, Y. R. Yang, Y. Zhang, and S. Shenker, “On selfish routing in internet-like environments,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, All ACM Conferences, (Karlsruhe, Germany), pp. 151–162, Aug. 2003.
- [5] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, “On power-law relationships of the Internet topology,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 251–262, Aug. 1999.
- [6] D. Andersen, H. Balakrishnan, F. Kaashoek, and R. Morris, “Resilient overlay networks,” *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, vol. 35, pp. 131–145, Oct. 2001.
- [7] A. Barabasi and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [8] 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. Structural Properties of scale-free networks.
- [9] 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.

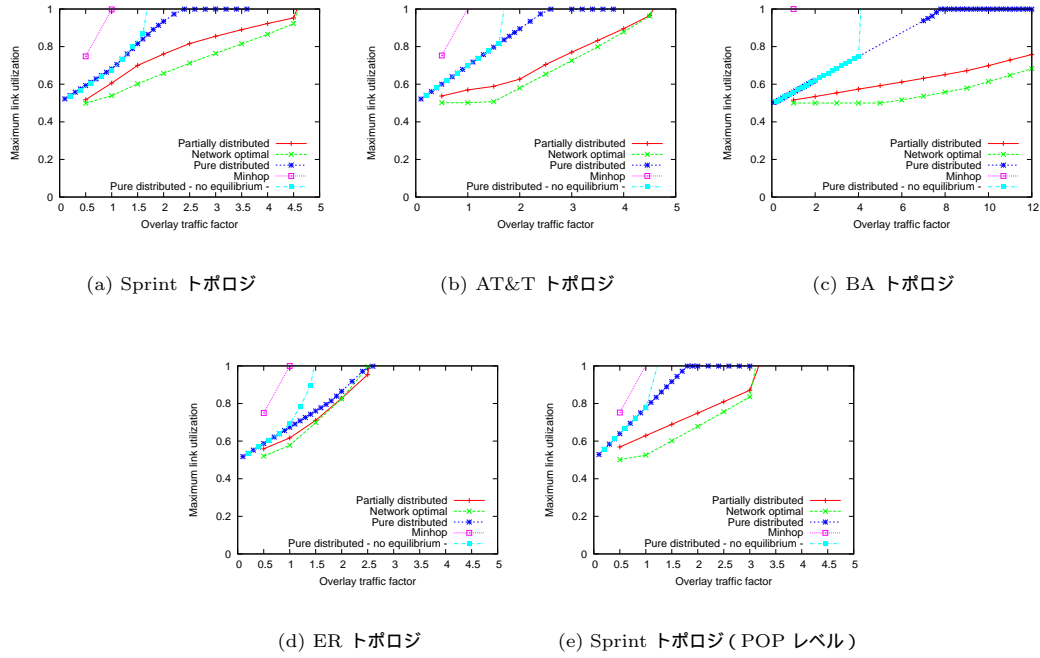


図 1 オーバレイトラフィックの変化に対する最大リンク利用率の変化

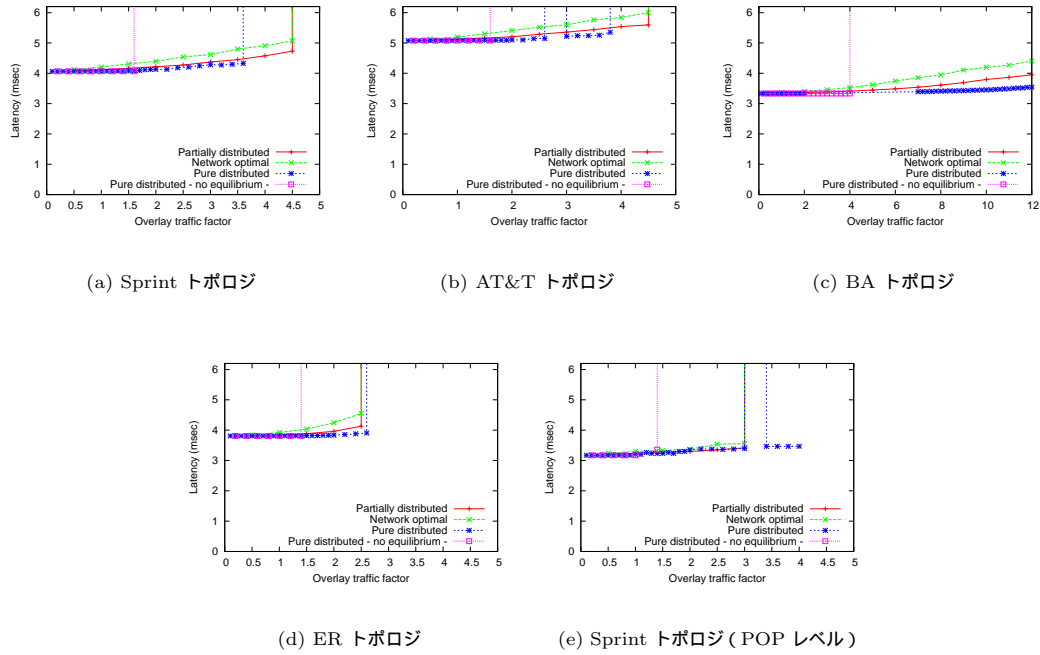


図 2 オーバレイトラフィックの増加に対する平均レイテンシの変化

- [10] 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.
- [11] C. Gkantsidis, M. Mihail, and A. Saberi, "Conductance and congestion in power law graphs," in *Proceedings of ACM SIGMETRICS*, pp. 148–159, June 2003.
- [12] 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.
- [13] 福元良太, 荒川伸一, 村田正幸, "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," 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2005-68), vol. 105, pp. 43–48, Sept. 2005.
- [14] 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.
- [15] "Rocketfuel: An ISP Topology Mapping Engine," <http://www.cs.washington.edu/research/networking/rocketfuel/>.
- [16] Y. Liu, H. Zhang, W. Gong, and D. Towsley, "On the interaction between overlay routing and traffic engineering," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, Mar. 2005.