

べき則の性質を有するネットワークにおける オーバーレイによる経路制御手法の性能評価

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

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

あらまし オーバレイルーティングは、エンドホストが自身の 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 IP ネットワークの管理者が制御することはできない。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性能に与える影響や非オーバレイネットワークのトラヒックの品質に及ぼす影響を知り、ネットワークの設備設計を適切に行うことが重要である。一方、IP ネットワークにおいても、リンクの輻輳状況に応じて IP パケットの経路を動的に制御する IP ルーティングが考えられており、オーバレイルーティングの経路制御と IP ネットワークの経路制御が相互に干渉し、ネットワーク性能が劣化する可能性がある。そこで本稿では、これらの経路制御が、出線数分布がべき則に従う ISP トポロジに適用された際に、リンク利用率にどのような影響を与えるのかを評価する。評価の結果、ISP トポロジ上でのオーバレイルーティングによる性能向上は、確率的に作成されたトポロジ上でのオーバレイルーティングの性能向上と比較して低くなることを明らかにした。さらに、IP ネットワークにおいて動的な経路制御が行われている環境では、オーバレイルーティングの経路制御と競合し、ネットワーク性能が悪くなることを示した。ただし、アクセス回線からのトラヒックを集約し、バックボーンへ転送するようなノードにおいて動的な経路制御を行った場合には、オーバレイネットワークと IP ネットワークの経路制御が共存可能であることも明らかにした。

キーワード オーバレイルーティング、経路制御、べき乗則、トラヒックエンジニアリング

Performance of overlay routing and IP routing in Power-Law networks

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 Overlay routings by end hosts are selfish by nature in that such overlay routings select routes to optimize their own performance without considering the network-wide criteria. As well as the overlay routing, the IP routing, that dynamically controls the route of the IP packet to detour the congested links, have been considered by conventional researches. However, it is possible that the routing of the overlay routing and routing on the IP network interfere mutually, which deteriorate the performance of IP networks. In this paper, we reveal that the performance improvement by the overlay routing on the ISP topology made lowering compared with the performance improvement of the overlay routing on the topology that had been made probabilistically. In addition, it is shown that if dynamic routing is applied at IP networks, the overlay routing much degrades the maximum link utilization. However, we clarify that only when the dynamic routing is applied only to the “Provincial” nodes, the routing on the overlay network and the IP network can coexist.

Key words Overlay routing, Selfish routing, Power-law network, Traffic Engineering

1. はじめに

近年、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おり、オーバ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経路を制御するオーバレイルーティングが検討されている [1, 2]。

オーバレイルーティングは、エンドホストが自身の 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 IP ネットワークの管理者が制御することはできない。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性能に与える影響や非オーバレイネットワークのトラヒックの品質に及ぼす影響を知り、ネットワークの設備設計を適切に行うことが重要である。

我々は、文献 [3] において、出線数分布がべき則に従う ISP ルータレベルトポロジを対象として、オーバレイルーティングの効果を示した。評価の結果、オーバレイルーティングによりユーザ性能であるレイテンシ（重み付き遅延）を低下させる一方で、最大リンク利用率が極めて高くなることを明らかにした。しかし、上述のネットワーク設計・設備増強を適切に行うためには、オーバレイルーティングによって IP ネットワークの各リンクの負荷がどのように変化するかを詳細に評価する必要がある。

そこで、本稿では、まず文献 [3] にて評価を行ったオーバレイルーティングを対象として、これらの経路制御が、べき則に従うネットワークの負荷の分布にどのような影響を与えるのかを評価する。評価の結果、ISP トポロジは、確率モデルによって作成したトポロジと比較して、オーバレイルーティングによってリンク利用率が大きく変化することを明らかにする。

一方、IP ネットワークにおいて、リンクの輻輳状況に応じて IP パケットの経路を動的に制御する IP ルーティングが考えられている [4]。この場合、エンドユーザによるオーバレイルーティングを行うと、オーバレイルーティングの経路制御と IP ネットワークの経路制御が相互に干渉しネットワーク性能が劣化する可能性がある。文献 [5] では、オーバレイルーティングと IP ネットワークによる経路制御が混在した際の性能評価が行われており、そこでは、14 ノードのトポロジにおいて、オーバレイルーティングと IP ネットワークのトラヒックエンジニアリングを交互に実施した場合、オーバレイネットワークおよび IP ネットワークの経路が安定せず、性能低下を招く可能性を示している。しかし、そこでは小規模なトポロジが対象となっており、大規模なトポロジに適用した際の結果や、経路が不安定となる要因については議論されていない。本稿では、まずべき則に従うトポロジにおいてもオーバレイルーティングと IP ルーティングが相互に干渉し、最大リンク利用率が安定しないことを明らかにする。次に、オーバレイルーティングと IP ルーティングの相互干渉へ大きく寄与するノードの構造的な特徴を示し、最大リンク利用率が不安定となる要因を明らかにする。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2. 章では、評価を行うネットワークのモデルおよび、オーバレイルーティングについて説明する。3. 章では、オーバレイルーティングがリンク負

荷の分布に与える影響を評価する。最後に、本稿のまとめと今後の課題を 5. 章にて述べる。

2. オーバレイネットワーク

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のリンク利用率に与える影響を評価する。以下では、本稿で想定するオーバレイネットワークのモデルと、オーバレイルーティングの制御方式を説明する。

2.1 ネットワークモデル

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、オーバレイノード間に設定される仮想的なリンクであり、論理リンク上を流れるパケットは、IP ネットワークの経路制御に依存した 1 本もしくは複数本の物理リンクを経由する。本稿では、経由する物理リンクは最小ホップ経路制御によって決定するものとする。また、すべてのオーバレイノードは、互いに 1 本の論理リンクで接続されていると仮定する。ノード数に対するスケーラビリティの観点からは、すべてのオーバレイノードが相互に接続されることは考えにくい。しかし、オーバレイノードは自身の指標に関して最適な経路を選ぶことが可能となる。本稿では、オーバレイルーティングの基本的な振る舞いを明らかにすることが目的であり、オーバレイノードは最適な経路が選択可能であるものと仮定する。すなわち、各オーバレイノードは、自ノードで発生するトラヒックに対しては、自身の性能指標を最適化するように宛先オーバレイノードまでの経路を計算し、その経路（オーバレイノード集合）を指定してトラヒックを送出する（ソースルーティング）。

2.2 オーバレイルーティング

オーバレイルーティングの経路制御方式として、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である Pure distributed overlay routing、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である Partially distributed overlay routing および Network optimal overlay routing の三方式を用いる。以下では、それぞれの経路制御方式を簡単に説明する（詳細は文献 [3] を参照）。

2.2.1 Pure distributed overlay routing

エンドユーザがオーバレイノードとなることを想定したオーバレイルーティングである。各オーバレイノードは、自身から発生するトラヒックのレイテンシが最小となるように、宛先オーバレイノードまでの経路を指定してトラヒックを送出する。

2.2.2 Partially distributed overlay routing

ルータがオーバレイネットワークを構成し、IP ネットワーク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である。各オーバレイノードは、自ノードで発生するトラヒックが経由するリンクにおけるキューイング遅延が最小となるように、宛先オーバレイノードまでの経路を指定してトラヒックを送出する。各オーバレイノードはリンクのキューイング遅延の大きさに基づいて経路を制御するため、利用率が高いリンクが迂回され、ネットワークの輻輳回避が期待される。

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
BA	467	1280

2.2.3 Network optimal overlay routing

各オーバーレイノードのトラフィック情報を収集し、それに基づいて最適な経路計算を行うオーバーレイルーティングである。前述の二つの制御方式では、各オーバーレイノードが分散計算により自立的に経路制御を行うのに対し、ネットワーク全体で発生するトラフィック量に基づいて、集中計算により経路を制御し IP ネットワークの性能指標を最適化する。なお、ここでいう最適とは、ネットワークの全てのリンクで発生するキューイング遅延の値の和が最小となることとしている。

3. オーバレイルーティングがリンク利用率に与える影響

本節では、2.2 節で示したオーバーレイルーティングの各方式を評価し、リンクの利用率分布を示す。

3.1 評価モデル

評価を行うトポロジとして、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のトポロジは、Rocketfuel [6] ツールを用いて計測されたものであり、出線数分布はべき則に従う [7]。また、これらの ISP トポロジとの比較のため、BA モデル [8] によって生成したトポロジ（以下、BA トポロジと記す）も使用した。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 トポロジは、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生成した。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。

評価では、すべてのノード間に対してオーバーレイトラフィックと非オーバーレイトラフィックの二種類のトラフィックを発生させている。なお、オーバーレイトラフィックとは、オーバーレイネットワークを流れるトラフィックであり、非オーバーレイトラフィックはオーバーレイネットワークに属さないノードから生成されるトラフィックである。評価では、非オーバーレイトラフィック量は、IP ネットワーク上において最小ホップ経路制御が行われた際に最大リンク利用率が 0.5 となるトラフィック量を与えている。また、オーバーレイトラフィックは非オーバーレイトラフィックのトラフィック料と等しくしている。本稿では、各トポロジにおけるノードは、オーバーレイトラフィックと非オーバーレイトラフィックを送出するものとしており、すべてのオーバーレイノードは単一のオーバーレイネットワークに属するとしている。

オーバーレイネットワーク上での経路制御は、2.2 節で述べた 3 つの手法を使用する。それぞれのオーバーレイルーティング手法に対し、フロー偏差法 [9] を用いて均衡状態を求め [3]、リンク負荷分布およびノード負荷分布を評価する。

3.2 リンク利用率の評価

以下では、最小ホップ経路制御、および 2.2 節で示した各オーバーレイルーティングを ISP ルータレベルトポロジに適用した際

のリンク利用率に関して評価を行う。また、最小ホップ経路制御の評価で与える非オーバーレイトラフィックの量は、最大リンク利用率が 1.0 となるよう設定しており、オーバーレイルーティングを行った場合と同量のトラフィックをネットワーク内に発生させている。また、以下で示す全てのグラフにおいて、最小ホップ経路制御を行った際の結果を“Minhop”、Pure distributed overlay routing を行った際の結果を“Pure”、Partially distributed overlay routing を行った際の結果を“Partial”、Network optimal overlay routing を行った際の結果を“Optimal”と表記する。また、本稿では、リンク i の利用率を F_i/C_i と定義する（ F_i はリンク i を流れるトラフィックの量、 C_i はリンク i の容量）。

a) 最小ホップ経路制御

図 1 にリンク利用率の分布を示す。グラフの横軸は、リンクのランクを示す。縦軸は、リンク利用率を示す。グラフから、最小ホップ経路制御適用時、ISP トポロジである Sprint トポロジおよび AT&T トポロジでは、BA トポロジと比較して、利用率が最大のリンクとその他のリンクの差が大きいことがわかる。グラフでは、最も利用率の高いリンクは 1.0 の利用率を持っているが、2 番目に利用率の高いリンクは、Sprint トポロジでは、約 0.8、AT&T トポロジでは、約 0.7 であるのに対して、BA トポロジでは利用率が 0.8 以上のリンクが 5 つ以上確認できる。これより、モデルによって作成された BA トポロジに対し、ISP トポロジの方がより一部のリンクにトラフィックが集中しやすい構造となっていることがわかる。

b) オーバレイルーティングによる経路制御

図 1 の各オーバーレイルーティングを適用した結果を見ると、ユーザによって制御されるオーバーレイルーティングである Pure distributed overlay routing を使用した場合に最も最大リンク利用率が高くなることがわかる。また、ISP トポロジにおいては、オーバーレイルーティング適用時、利用率の大きく低下するリンクの数が少数であるのに対し、BA トポロジでは、多くのリンクの利用率が大きく下がっていることが、グラフの最小ホップ経路制御と、各オーバーレイルーティングのリンクの利用率の差からわかる。

次に、オーバーレイルーティングを適用した際に、最小ホップ経路制御を適用した場合と比較して、リンク利用率がどのように変化するかを図 2 に示す。図における x 軸は、最小ホップ経路制御時のリンク利用率であり、 y 軸はオーバーレイルーティングを適用したことによるリンク利用率の変化量である。すなわち、最小ホップ経路制御適用時のリンク利用率と各オーバーレイルーティング適用時のリンク利用率との差を y 軸に示している。 y 軸の値が大きいほど、オーバーレイルーティングを適用することによってリンク利用率が上昇することを意味する。この図より、すべてのトポロジにおいて、最小ホップ経路制御適用時のリンク利用率が高いほど、オーバーレイルーティングによりリンク利用率が大きく下がることがわかる。特に BA トポロジでは、最小ホップ経路制御適用時のリンク利用率に比例してオーバーレイルーティングによるリンク利用率が減少しており、右下がりの直線で近似できることがわかる。

また、最小ホップ経路制御時に利用率の低いリンクに着目すると、どのトポロジにおいても、オーバーレイルーティングによりリンク利用率が増加することがわかる。しかし、Sprint や

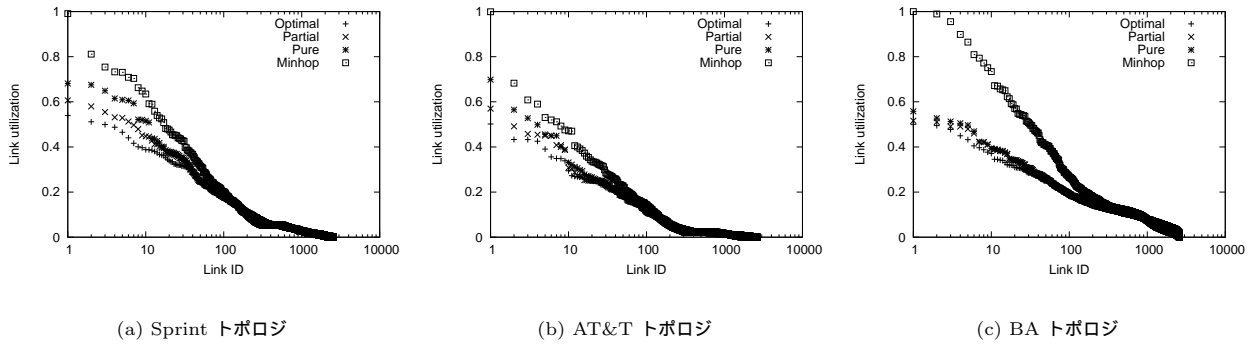


図1 リンク利用率の分布

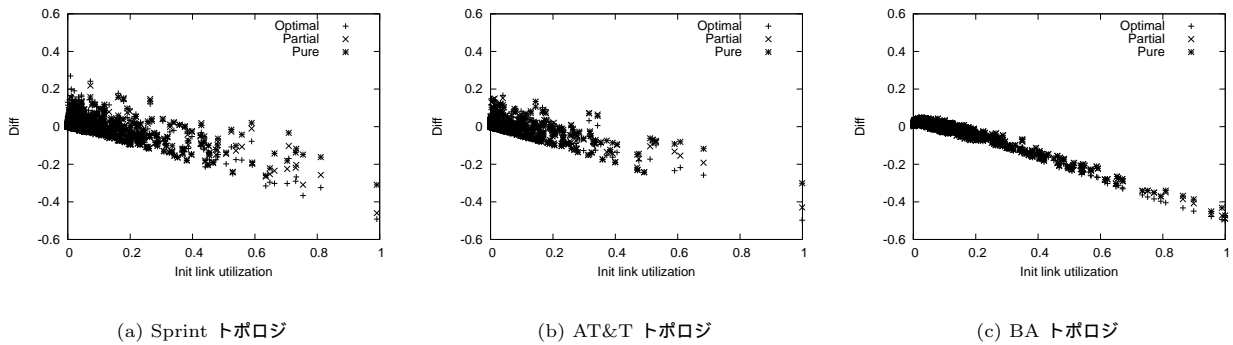


図2 最小ホップ経路制御時のリンク利用率とオーバーレイルーティング適用時のリンク利用率の相関

AT&TのようなISPトポロジにおいては、最小ホップ経路制御時に利用率の低いリンクの利用率が最大で0.2上昇する一方で、BAトポロジでは、最も利用率の上昇しているリンクでも、その利用率の上昇値は0.05を超えることはない。これより、BAトポロジでは、最小ホップ経路適用時に利用率の高いリンクに流れるトラフィックを、その他の多くのリンクに分散させてリンク利用率を抑えることができることがわかる。

ISPトポロジでは、利用率の高いリンクに流れるトラフィックを迂回する傾向はBAトポロジと同様であるが、特定のリンクにトラフィックを迂回されることから、リンク利用率の上昇が大きくなる。つまり、ISPトポロジにおいてオーバーレイルーティングが行われた場合、流れるトラフィック量が大きく変化するリンクが(BAトポロジと比較して)多く存在する。このようなトポロジを有するネットワークでは、ネットワーク管理者の観点から考えると、設計段階に想定していた以上のトラフィックが流れ込んでくる可能性が高いと考えられる。

4. オーバレイルーティングとIPルーティングの相互作用

2.章では、IPネットワーク上の経路は最小ホップ経路制御によって定まるとし、オーバーレイルーティングを導入した際のリンク利用率の評価を行った。本章では、IPネットワークにおいてもリンク利用率に基づいた動的な経路制御が行われている際に、オーバーレイルーティングによってリンク利用率がどのように変化するかを明らかにする。

4.1 IPネットワークにおける動的経路制御

IPネットワークにおける動的経路制御機構として、ソースルーティングに基づいた経路制御機構が導入されているものとする。ソースルーティングを行うノードは、ネットワークの負荷をもとに宛先ノードまでのトラフィックの経路を明示的に指定し、リンク利用率を抑える。経路は、各リンクのコスト W_l を与え、最小コスト経路を計算することによって求める。各リンクのコスト W_l は、以下のように定義する：

$$W_l = 1/(C_l - f_l)$$

ただし、 C_l はリンク l の回線容量であり、 f_l はリンク l を流れるトラフィックの量である。このようにリンクコストを設定することで、負荷の高いリンクを流れるトラフィックを迂回させることが可能となる。

4.2 シミュレーションモデル

本節では、ソースルーティングが動作するIPネットワーク上でオーバーレイルーティングを行った際の性能を評価するためのシミュレーションモデルについて述べる。

シミュレーションで使用するトポロジ、トラフィックパターン、リンクの回線容量、リンクの伝播遅延時間、3.1節と同じとする。IPネットワークにおいては、ソースルーティングを行うノードを複数配置することで動的に経路を制御し、最大リンク利用率の最小化を図る。IPネットワーク上のオーバーレイネットワークではPure distributed overlay routingが行われており、3.1と同様にすべてのノードがオーバーレイノードであるとしている。なお、Pure distributed overlay routingとIPネッ

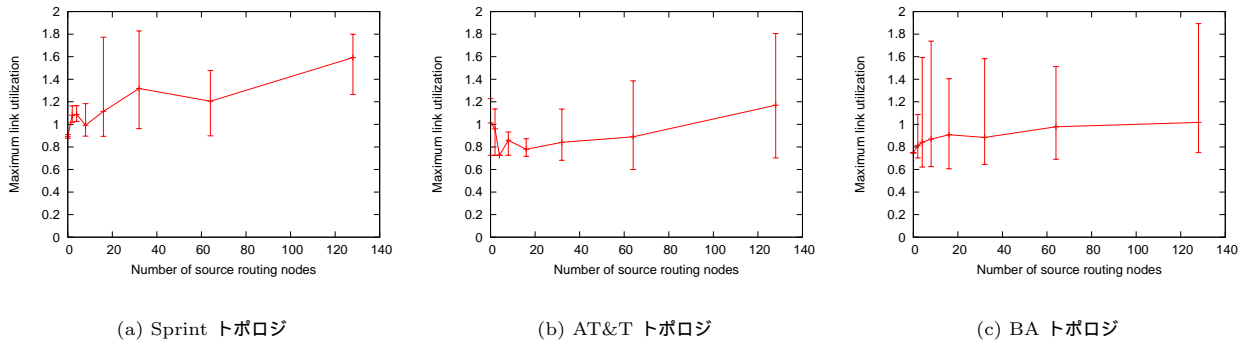


図 3 最大リンク利用率：出線数降順にソースルーティングノードを配置

ネットワークの経路制御の指標は異なっており、そのため、シミュレーション中では 5 回のうち 1 回を IP ネットワークの経路制御とし、残りの 4 回はオーバーレイルーティングによる経路制御が行われるものとする。

4.3 評価

図 3 に、オーバーレイルーティングと IP ネットワークの動的経路制御を行った際の各トポロジの最大リンク利用率を示す。横軸はソースルーティングノードの数であり、その数が増える IP ネットワークで経路制御されるトラフィック量は多くなる。なお、図 3 では、ソースルーティングノードは出線数に関する降順にネットワークに配置している。

シミュレーションでは、オーバーレイルーティングとソースルーティングがそれぞれ動的に経路を変更するため、最大リンク利用率は一意的値にはならずシミュレーション中で変化する。そこで図には、シミュレーション中に最も最大リンク利用率が高くなったときの値を最大値、最も小さくなったときの値を最小値、シミュレーション中での平均値を示している。

この図を見ると、すべてのトポロジにおいて、最小値はソースルーティングノードの数が 0 の場合のリンク利用率から減少していることがわかる。しかし、ソースルーティングのノードの数が増えるとともに、最大値および平均値が大きくなる。すなわち、IP ネットワークで動的な経路制御がある場合には、オーバーレイルーティングにより最大リンク利用率が減少する可能性はあるが、多くの場合はオーバーレイルーティングと IP ネットワークの動的な経路制御が相互に干渉し、最大リンク利用率が上昇する結果となることがわかる。

しかし、AT&T トポロジにおいては、ソースルーティングノードの数が少ない場合にのみ、最大リンク利用率が低くなることが図 3 から観察できる。この理由を説明するために、Sprint, BA トポロジと AT&T で出線数の大きいノードの役割がどのように異なるのかを次節で説明する。

4.4 ソースルーティングノードの構造的特徴

文献 [10] では、ネットワークをいくつかのモジュールに分割し、ノード i に対して Within modularity Z と Participation coefficient P を定義している。それぞれの指標は以下のように表される。

$$Z_i = \frac{k_i - \langle k_{s_i} \rangle}{\sigma_{s_i}} \quad (1)$$

k_i はノード i のリンクのうち、あて先ノードがノード i と同じモジュール内に含まれるようなリンクの数である。また、 σ_{s_i}

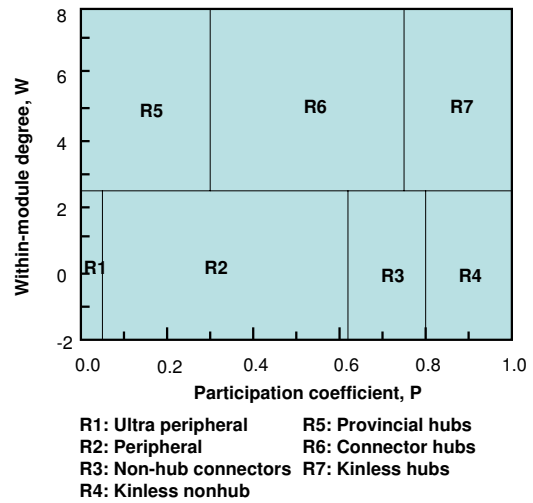


図 4 Participation coefficient と Within module degree を用いたノードの役割の分類

はノード i の属するモジュール s における出線数の分散であり、 $\langle k_{s_i} \rangle$ は平均である。定義により、モジュール内のノードの平均出線数にたいして、ノード i の出線数が大きい場合に Z_i が大きくなる。

また、Participation coefficient P は、

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

で定義される。ただし、 k_{is} は、ノード i に接続しているリンクのうち、その宛先ノードが同じモジュール s に含まれるリンクの数である。すなわち、ノード i に接続しているリンクの宛先ノードが全て同一モジュールである場合は 0、すべて s と異なるモジュールの場合、1 となる指標である。文献 [10] では、図 4 に示すように各ノードの Z_i と P_i の値に応じて、ノードの役割が分類されることを述べている。

本稿では、文献 [11] で述べられているモジュール分割法を用い、図 4 の分類法を Sprint, AT&T, BA の各トポロジに適用した結果を図 5 に示す。図 5 では、横軸は Participation coefficient であり、縦軸は Within module degree である。図 5 から、4.3 節で、ソースルーティングノードとして配置した出線数の大きなノードは、Sprint トポロジ、BA トポロジにおいて、“Connector hubs” に分類されることがわかる。“Connector

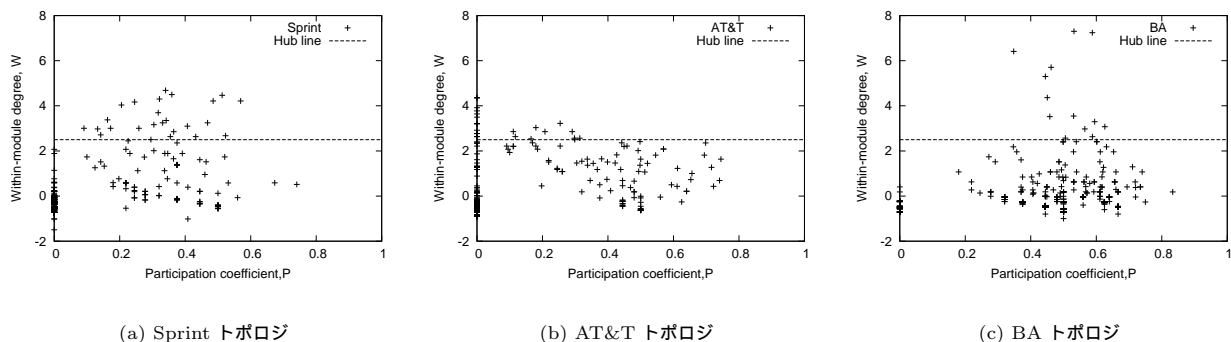


図5 文献 [10] の指標を用いたノード特性の分類

hubs”は大きな出線数を持ち、かつ、モジュール間のコネクタの役割を担い大量のトラフィックを運ぶ。従って、“Connectors hubs”にソースルーティングノードを配置した場合、モジュール間を横断する大量のトラフィックをソースルーティングノードが迂回させることとなり、その結果、オーバレイルーティングとの経路制御の相互干渉が発生する。

一方で、図 5(b)を見ると、AT&T トポロジにおいては、“Connectors hub”はほとんど表れず、“Provincial hubs”が多く存在していることがわかる。“Provincial hubs”は、ネットワークポロジが階層化されている場合に、下位層のノードからのトラフィックを集約して上層のノードへトラフィックを中継する役割を果たすノードであり、“Connector hubs”に属するノードに比べて、他のノード間のトラフィックを中継する可能性が少なくなる。従って、“Provincial hubs”にソースルーティングノードを配置することで、オーバレイルーティングとIPネットワークのソースルーティングとの経路制御の相互干渉は抑えつつ、下位層から集約したトラフィックのみをリンク利用率の低いリンクへ迂回することができる。以上の考察のもと、AT&T トポロジに対して、“Provincial hubs”にソースルーティングノードを配置し、4.3 節と同様のシミュレーションを行ったところ、ソースルーティングノードを配置しない場合には最大リンク負荷が1.0であるのに対し、最大リンク利用率を0.65にしつつ最大リンク利用率の最大値と最小値の差も抑えていることを確認した。

5. まとめと今後の課題

本稿では、オーバレイルーティングに着目し、利己的なオーバレイルーティングが大規模なインターネットレベルトポロジに与える影響を評価した。オーバレイルーティングとして、エンドユーザによるオーバレイルーティングと、ネットワークによ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の均衡状態において、リンク利用率の分布がどのように変化するかを明らかにした。

評価の結果、ISP トポロジ上でのオーバレイルーティングによる性能向上は、BA モデルを用いて確率的に作成されたトポロジ上でのオーバレイルーティングの性能向上と比較して低いことがわかった。さらに、IP ネットワークにおいて動的な経路制御が行われている環境で、エンドユーザによるオーバレイルーティングが行われると、ほとんどの場合において、オーバ

レイルーティングとソースルーティングは相互に干渉しあい、ネットワークに悪影響を及ぼすことを明らかにした。ただし、アクセス回線からのトラフィックを集約し、バックボーンへ転送するようなノードにおいてIPトラフィックを制御する場合には、オーバレイネットワークとIPネットワークの経路制御が共存可能であることも明らかにした。

今後の課題としては、オーバレイネットワークの振る舞いを考慮したIPネットワークの経路制御法およびネットワーク設計法を考案することが挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究 (A) 18200004 によっている。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] P. M. Zhi Li, “QRON: QoS-aware routing in overlay networks,” *IEEE Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 29–40, Jan. 2004.
- [2] D. Andersen, H. Balakrishnan, F. Kaashoek, and R. Morris, “Resilient overlay networks,” *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, vol. 35, no. 5, pp. 131–145, Oct. 2001.
- [3] 福元良太, 荒川伸一, 村田正幸, “ISP トポロジにおけるオーバレイルーティングの効果,” 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2006-12), pp. 67–72, May 2006.
- [4] B. Fortz and M. Thorup, “Internet Traffic Engineering by Optimizing OSPF Weights,” in *Proceedings of INFOCOM (2)*, pp. 519–528, 2000.
- [5] 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.
- [6] “Rocketfuel: An ISP Topology Mapping Engine,” <http://www.cs.washington.edu/research/networking/rocketfuel/>.
- [7] 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.
- [8] A. Barabasi and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [9] 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.
- [10] R. Guimera and L. A. N. Amaral, “Functional cartography of complex metabolic networks,” *Nature*, vol. 433, p. 895, 2005.
- [11] M. E. J. Newman, “Modularity and community structure in networks,” *PROC. NATL. ACAD. SCI. USA*, vol. 103, p. 8577, 2006.