

オーバレイネットワークにおける経路制御とISPへの影響

長谷川 剛[†] 村田正幸^{††}

[†] 大阪大学 サイバーメディアセンター 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-32

^{††} 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: [†]hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ^{††}murata@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし オーバレイネットワークは、ネットワークアプリケーションを早期にかつ効率よく提供するためのアーキテクチャとして近年注目を集めている。本稿では、オーバレイネットワークにおいて用いられる重要な技術の1つである経路制御(オーバレイルーティング)技術に着目し、その有効性や問題点について、近年の研究動向や著者を含む研究グループでの研究内容について述べる。特に、オーバレイルーティングによるエンド間通信性能の向上、およびIP層における経路制御のと相互作用が原因となって発生する、インターネットサービスプロバイダ(ISP)に与える影響に関して議論する。

キーワード オーバレイネットワーク、オーバレイルーティング、経路制御、インターネットサービスプロバイダ(ISP)、Internet Protocol (IP)

Routing on overlay networks and its impact on ISP

Go HASEGAWA[†] and Masayuki MURATA^{††}

[†] Cybermedia Center, Osaka University 1-32, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka, 560-0043 Japan

^{††} Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University 1-5, Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

E-mail: [†]hasegawa@cmc.osaka-u.ac.jp, ^{††}murata@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Overlay networking technologies have been extensively investigated as possible solutions for quick deployment of new network applications to the Internet environment. In this report, we focus on an overlay routing mechanism, that is one of important functions of overlay networks, and discuss its advantages and disadvantages. Especially, we present the recent research issues on end-to-end performance improvement by overlay routing, and its ill-effects on Internet Service Providers (ISPs) caused by the interactions between IP routing and overlay routing.

Key words Overlay networks, overlay routing, routing, Internet Service Provider (ISP), Internet Protocol (IP)

1. はじめに

物理ネットワークやIPネットワーク上に独自の論理ネットワークを構築しサービスを提供する、オーバレイネットワーク技術が近年注目を集めている。IP層などの下位層プロトコルへ機能を追加し、Quality of Services (QoS) サービス等の新たなネットワークサービスを提供することは、全てのルータやスイッチに機能を追加する必要ある、およびプロトコル標準化作業が必要になるため、導入までの時間や導入するネットワーク規模の関連で問題点が存在する。一方トランスポート層あるいはアプリケーション層においてオーバレイネットワークを構築する手法は、そのような問題はないため、新たなネットワークサービスを早期にかつ段階的に展開するためのアーキテクチャとして有効である。図1に、IPネットワーク上にアプリケー

ション層オーバレイネットワークが構築される例を示す。

オーバレイネットワークにおいて用いられる技術として、オーバレイネットワークにおいて経路制御を行なうオーバレイルーティングがある。例えば Resilient Overlay Network (RON) [1] では、参加ノード間の伝送遅延時間やパケット廃棄率などを計測し、あるノード間のデータ転送を直接行うのか、あるいは他のオーバレイノードを経由して行うのかを判断している(図2)。これにより、IP層におけるルーティングのみを使用する場合と比較して効率の良いデータ転送を実現することができる。また、IPネットワークの障害をすばやく検知し、迂回パスを選択することが可能となる。本稿では、このようなオーバレイネットワーク上で行われるトラヒックのルーティングをオーバレイルーティング、また従来のIPレイヤにおけるパケットルーティングをIPルーティングと呼ぶ。

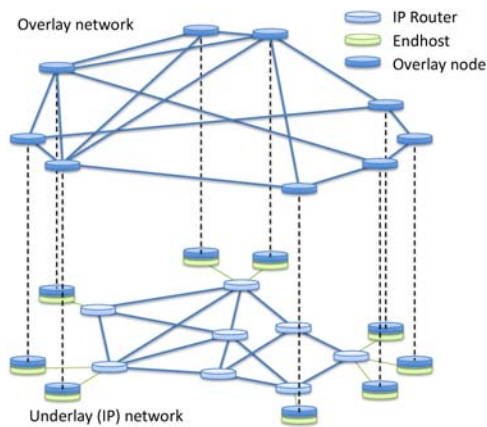


図 1 オーバレイネットワーク

オーバレイルーティングを行うことによって、IP ルーティングのみを使用する場合に比べて、利用するユーザにとってのネットワーク性能（スループットや転送遅延時間など）が改善することが明らかにされてきている。これは、従来行われている Internet Service Provider (ISP) による IP ルーティングとオーバレイルーティングにおいて、ルーティングに用いるポリシーが大きく異なることが主な原因であるとされている。しかし、ほとんどの検討はオーバレイノード間の遅延時間に関する情報のみを用いてオーバレイルーティングを行うことが前提とされている。しかし、ファイル交換ネットワークなどのオーバレイネットワークにおいては、転送されるデータサイズが大きいため、ノード間の遅延時間だけでなく帯域に関する情報（利用可能帯域や物理帯域など）や、TCP スループットなどの指標が重要となる。図 3 に、遅延時間や利用可能帯域をルーティングの指標として用いた場合における、オーバレイルーティングにおいて迂回経路の方がユーザ性能が良い例を示す。

一方、オーバレイルーティングを行い、ユーザ性能に特化したポリシーに基づいて通常とは異なるデータ転送経路を選択することで、ISP が司っている IP ルーティングとのポリシーの不整合から ISP のコスト構造に悪影響を与える問題が発生することが考えられる。この問題を、著者らを含む研究グループではネットワークただ乗り問題と呼んでいる。この問題は P2P ネットワークを含むオーバレイネットワークサービスが普及するにつれて大きな問題となることが予想される。

そこで本稿では、まず、オーバレイルーティングを行なうことによるユーザ性能向上に関する近年の研究動向を概説すると共に、筆者らの研究グループで行っている、PlanetLab [2] の参加ノード間のネットワーク性能の計測結果を使った、オーバレイルーティングの効果に関する研究成果を紹介する。その結果、特に帯域に関する情報を用いてオーバレイルーティングを行なうことで、ユーザ性能は大きく改善されることを示す。次に、ネットワークただ乗り問題に着目する。最初に問題定義を行い、PlanetLab のデータを用いることによって、オーバレイルーティングを行うことでネットワークただ乗り問題がどの程度発生しうるかを評価する。

以下、2. 章ではオーバレイルーティングに関する研究動向や筆者らの研究グループでの研究成果について述べる。?? 章では、ネットワークただ乗り問題について着目し、評価結果を示

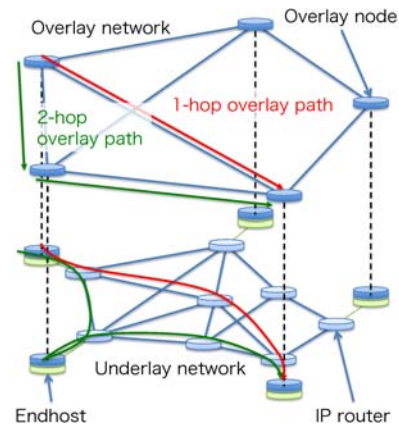


図 2 オーバレイルーティング

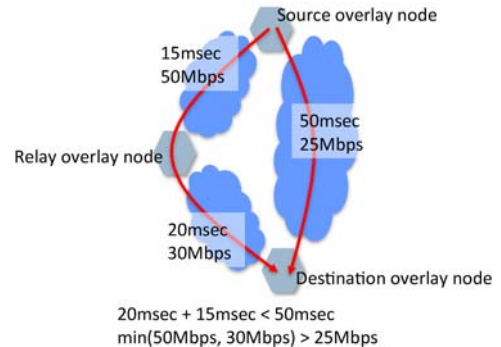


図 3 オーバレイルーティングによるユーザ性能改善

すことにより、この問題が ISP にとって無視することのできない問題になりうることを指摘する。最後に 4 章で本稿のまとめと今後の課題について述べる。

2. オーバレイルーティング

2.1 研究の背景と関連研究

1. 章で述べたように、オーバレイルーティングを用いることによって IP による経路制御のみの場合にくらべてユーザ性能が向上するのは、ISP が行っているネットワーク層経路制御が、必ずしもユーザ性能を指標として用いていないためであると考えられる。ISP が AS 単位の経路制御を行なう際に用いる Border Gateway Protocol (BGP) は、AS 単位のホップ数などを指標として経路制御を行なうことが可能である。また同時に、BGP は ISP が他の ISP との接続関係を考慮して金銭的、政治的な制約によって決定するような、さまざまなポリシーを反映した経路制御を行なうことが可能である。特に、近年の ISP は上位 ISP に対するトランジットリンクだけではなく、同規模の ISP との間に近道、かつネットワーク接続コストを低下させることができるピアリングリンクを設定することが多く、これらの契約関係に基いた複雑な経路制御を行っている。その結果、選択される経路が、遅延時間やスループットなどのユーザ性能を最大化しない場合が存在する。

オーバレイルーティングの有効性に関する評価は [3-9] などで行われており、例えば [5] では国内の地理的に離れた ISP に存在するノード間でデータ転送を行う場合に、ノード間で直接転送するのではなく、別の ISP に存在するノードを 1 つ経由させる迂回経路を用いることで、遅延時間について全体の 28

%のパスにおいて、中継ノードの存在しない直接パスに比べて遅延時間が改善することが示されている。これらの検討はオーバーレイノード間の遅延時間に関する情報のみを用いてオーバーレイルーティングを行った場合を想定している。しかし、ファイル交換ネットワークなどのオーバーレイネットワークにおいては、転送されるデータサイズが大きいため、ノード間の遅延時間だけでなく帯域に関する情報（利用可能帯域や物理帯域など）やTCPスループットなどの直接的な指標が重要となる。しかし、帯域情報の計測結果を用いてオーバーレイルーティングを行った場合の検討はこれまでほとんど行われていない。

これに対して我々の研究グループでは、オーバーレイノード間の利用可能帯域をオーバーレイルーティングの指標として用いる場合の、オーバーレイルーティングがユーザ性能に与える影響の評価を行ってきている [10, 11]。具体的には、世界規模に分散してノードが設置されている実験用オーバーレイネットワークである PlanetLab を対象とし、Scalable Sensing Service (S-cube) [12] において公開されているノード間のネットワーク性能の計測結果を用いて、様々な指標を用いて経路制御を行った場合におけるオーバーレイルーティングの性能評価を行ったものである。次節において、その概要を紹介する。

2.2 PlanetLab を想定したオーバーレイルーティングの性能評価

2.2.1 評価環境

オーバーレイルーティングによりパス選択をする際に必要な遅延時間や利用可能帯域のデータは、S-cube において公開されている、PlanetLab のノード間のネットワーク性能の計測結果を利用した。S-cube においては、PlanetLab ノード間の物理帯域、利用可能帯域、遅延時間、パケット廃棄率などのネットワーク性能がおよそ4時間おきに計測され、その結果が公開されている。本節では、2006年10月25日に計測・公開されていたデータを利用する。オーバーレイルーティングにより選択の候補とするデータ転送経路として、図2に示す、(1)ノード間で直接転送する（直接パス）、(2)1つのノードを中継させて転送する（2ホップ迂回パス）、および(3)2つのノードを中継させて転送する（3ホップ迂回パス）を考える。

パス選択の際に用いるメトリックは下記の通りである。

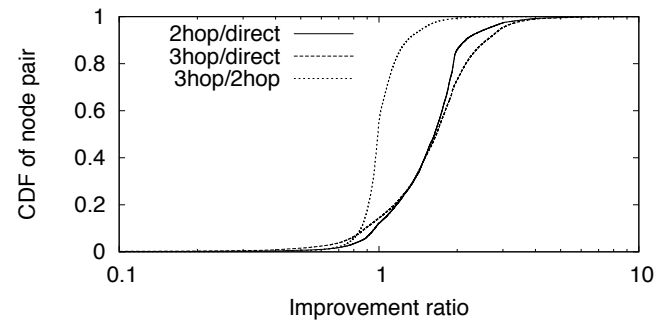
ノード間遅延時間（遅延時間）：直接パスの場合は、S-cube の計測データを用いる。迂回パスの場合は、迂回パスを構成する各パスの遅延時間の計測データの和を用いる。

ノード間利用可能帯域（利用可能帯域）：直接パスの場合は、S-cube の計測データを用いる。迂回パスの場合は、迂回パスを構成する各パスの利用可能帯域の計測データの最小値を用いる。

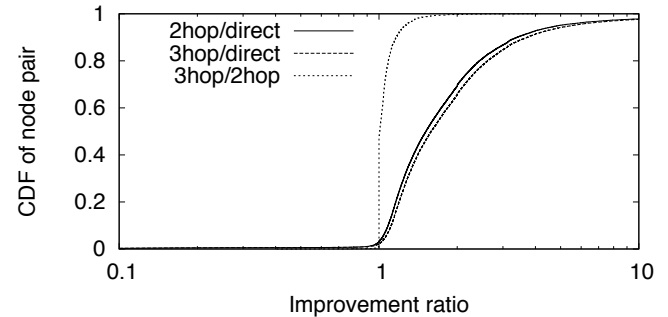
ノード間 TCP スループット（TCP スループット）：直接パスの場合は、S-cube の計測データのうち、遅延時間と利用可能帯域を用いて TCP スループットを推定 [13] した結果を用いる。迂回パスの場合は、迂回パスを構成する各パスの TCP スループットの推定値の最小値を用いる。

2.2.2 評価結果と考察

図4(a)(b)に、オーバーレイルーティングの経路選択の指標として遅延時間と利用可能帯域をそれぞれ用いた場合における、各オーバーレイノード間の転送に、直接パスを用いた場合のユーザ性能に対する、最良の性能を与える2/3ホップ迂回パスを用



(a) 遅延時間用いた場合

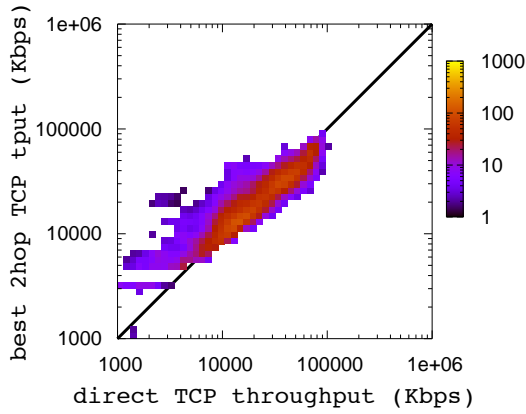


(b) 利用可能帯域用いた場合

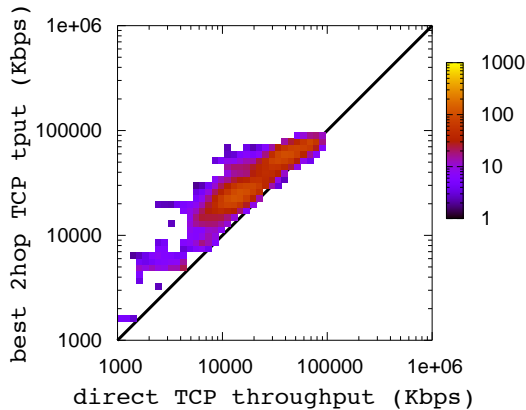
図4 遅延時間および利用可能帯域を用いた場合のオーバーレイルーティングの性能 (1) [11]

いた場合のユーザ性能の比（以下、性能比と呼ぶ）の累積密度分布を示す。2ホップ迂回パスを用いた場合には、遅延時間が指標の場合には87.5%、利用可能帯域が指標の場合には96.6%のノードペア間のデータ転送に対して、ユーザ性能のより良い迂回パスが存在する。また、利用可能帯域に比べて、遅延時間を指標として用いる場合の方が、オーバーレイルーティングによるユーザ性能向上の度合いが小さいことがわかる。これは、ISPが行なうBGPによる経路制御が、遅延時間とある程度相関があると推測されるASレベルのホップ数を基に行っているためであると考えられる。さらに、3ホップ迂回パスの2ホップ迂回パスに対する性能比がほとんどのノードペアについて1.0付近であることから、3ホップ以上の迂回パスを用いる効果は限定的であるといえる。

図5に、オーバーレイルーティングの経路選択の指標としてTCPスループットを用いた場合における、直接パスのユーザ性能と最良のユーザ性能を与える2ホップ迂回パスのユーザ性能の関係の存在分布を示す。なお、図5(a)は、中継ノードにおいてTCPプロキシ [14, 15] を用いずにそのまま中継した場合の結果を、5(b)は中継ノードにおいてTCPプロキシを用いて中継転送を行った場合の結果をそれぞれ示している。図から、TCPプロキシを用いない場合には、オーバーレイルーティングの性能はそれほど高くないことがわかる。これは、迂回パスを経由することによってTCPコネクションのラウンドトリップ時間 (Round Trip Time: RTT) が大きくなり、TCPスループット



(a) TCP プロキシを用いない場合



(b) TCP プロキシを用いる場合

図5 TCP スループットを用いた場合のオーバーレイルーティングの性能 [11]

トが低下する傾向が強いためであると考えられる。一方、TCP プロキシを用いると、オーバーレイルーティングの性能が向上し、ほとんど全てのノードペアに対して、TCP スループットが高くなる 2 ホップ迂回パスが発見できている。これは、TCP プロキシを用いることによって、TCP コネクションの RTT の増大が抑制されるためである [16]。

これらの結果から、特に利用可能帯域や TCP スループットといった帯域に関する情報を経路選択の指標として用いることによって、オーバーレイルーティングによってユーザ性能は大きく向上することが明らかとなった。

3. ネットワークただ乗り問題

3.1 研究の背景と関連研究

前章で述べたように、オーバーレイネットワークにおいて経路制御を行なうオーバーレイルーティングによって、ユーザ性能が大きく向上することが知られている。一方、オーバーレイルーティングによって、ISP が意図しないトラフィックが発生することによって、ISP のコスト構造に影響を与えることが懸念される。オーバーレイルーティングと ISP が行なう IP ルーティング

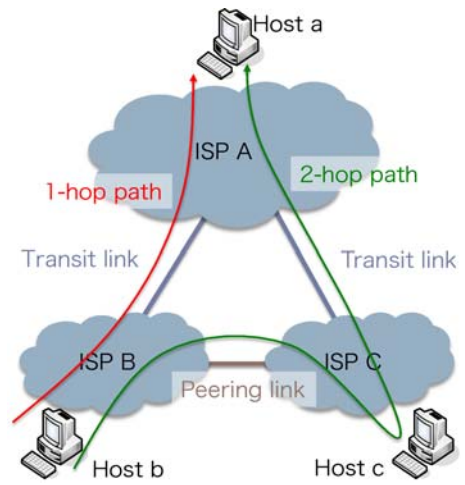


図6 オーバレイルーティングによるネットワークただ乗り問題

の相互影響に関する研究はこれまでも [17, 18] などにおいて行われているが、そのほとんどは経路の安定性に注目しているものであり、また P2P ネットワークなどの特定のオーバーレイネットワークにのみを対象としている。

また、P2P ファイル共有ネットワークの挙動が ISP のコスト構造に与える影響を緩和する手法として、P4P (Provider Portal for Applications) [19, 20] と呼ばれる技術が近年注目されている。P4P は ISP と P2P ネットワークが協調してピア選択を行なうことにより、ネットワーク資源の公平かつ効率的な利用、および ISP のトランジットコストを削減することを目的とした技術である。P4P を利用することにより、P2P ユーザが体感するアプリケーション性能が向上するとともに、トランジットリンクを通るトラフィックの削減効果が期待されている。しかし、P4P は P2P アプリケーションが効率的なピア選択を行なうことのみ着目しており、ピア選択後のデータ転送においてオーバーレイルーティング (他ピアを経由してデータ転送を行なうことによってスループット向上を図る) は考慮されていない。

我々の研究グループにおいては、オーバーレイルーティングが ISP のコスト構造に与える影響をネットワークただ乗り問題として定義し、その問題の大きさを評価してきた [21-24]。その結果、ネットワークただ乗り問題が ISP にとっては無視できない問題であることを指摘している。次節において、その概要を紹介する。

3.2 ネットワークただ乗り問題の評価

3.2.1 問題定義

ネットワークただ乗り問題は、オーバーレイルーティングと IP ルーティングのポリシーの不整合から発生する問題である。オーバーレイルーティングにおいて考慮されているのは遅延時間や利用可能帯域、TCP スループットなどのユーザの感じる性能である。一方、IP ルーティングにおいて考慮されているのはホップ数が主であり、利用可能帯域などを指標としたルーティングは通常行われていない。さらに、ISP は他の ISP との関係によるコスト構造に基づいたルーティングを行っている。ISP は対外接続のためのリンクとして、上位 ISP との接続であるトランジットリンク、および他 ISP とピアリング関係を結び、近道やコスト削減を行なうためのピアリングリンクを持つ。トラ

ンジットリンクは通常、通過するトラフィック量の最大値によって金銭的コストが決定される。一方、ピアリングリンクは、リンクを共有する両 ISP で回線維持コストを折半する点以外にはほとんどコストが発生しないが、接続した両 ISP 内に所属するホストを通信の起点および終点とするトラフィックのみ通過させるのが一般的である。しかし、アプリケーションレベルで行われるオーバーレイルーティングはこのような ISP の都合を考慮せず、ユーザの感じる性能に基いて行われる。そのため、ISP が前提としているコスト構造を無視したトラフィックが発生する。

図 6 のように 3 つの ISP とそれぞれに属するホストが存在するネットワークを用いて具体的な例を示す。図において、Host b から Host a にデータ転送を行なう場合を考える。直接パスを用いる場合には、データは ISP B と ISP A の間のトランジットリンクを経由して運ばれ、転送コストは Host b が所属する ISP B が負担する。しかし、Host c を経由する迂回経路が用いられる場合には、データは ISP B と ISP C の間のピアリングリンク、および ISP C と ISP A の間のトランジットリンクを経由して運ばれる。上述したようにピアリングリンクはコストは発生しないと考えると、このデータ転送のコストは ISP C が負担することになる。このように、データの最終的な送受信ホストではない第 3 の ISP がトランジットコストを負担することになる問題を、ネットワークただ乗り問題と定義する。

Host c がトラフィックを中継することによって何らかの利益を享受している場合には、ISP C はその金銭的コストを Host c から回収することが可能であるが、一般的にオーバーレイルーティングにおいては中継ノードとなるホストはそれに気付いていない場合が多く、現実的にはコストを回収することは困難である。現在、違法なファイル交換がほとんどを占める Winny などのアプリケーショントラフィックに関しては、そのアプリケーションが発生するトラフィックそのものを制限することにより、中継トラフィックを含めたコストの増加を防止しており、その違法性ゆえにユーザからの苦情はそれほど多くないと考えられる。しかし、Skype のように一般に有益と考えられているアプリケーションのトラフィックを制限することは、ユーザの同意を得られないと考えられる。

さらに、オーバーレイルーティングは通常アプリケーションレベルの制御によって実現されるため、ISP C は自身に流入するトラフィックを監視するだけでは、このような中継トラフィックと通常のトラフィックを区別することはできない。また、仮に中継トラフィックと通常トラフィックとの区別ができたとしても、中継トラフィックを遮断・制限することは、オーバーレイルーティングを行なうアプリケーションのサービス品質を大きく損なうことを意味するため、現実的にはそのような制限を行うことはできないと考えられる。

現在のインターネットにおいてはオーバーレイルーティングがまだそれほど盛んではない。例えば [25] では、ISP ネットワークへ出入りするトラフィックに関するトラフィックマトリックスの推定精度を上げる際に、このようなただ乗りに相当するトラフィックは無視できるほど小さい、と仮定している。しかし、将来的に RON のようなオーバーレイルーティングが浸透し、そのトラフィック量が増大すると、ISP にとって無視できない問題になる可能性がある。すなわち、ISP が回線増強などを行って品質の良いネットワークを構築した結果、オーバーレイルーティン

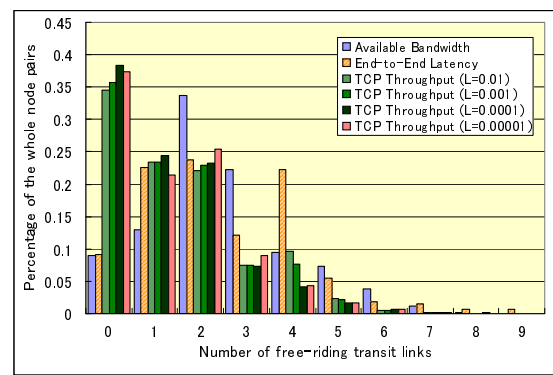


図 7 ただ乗り量の分布 [22]

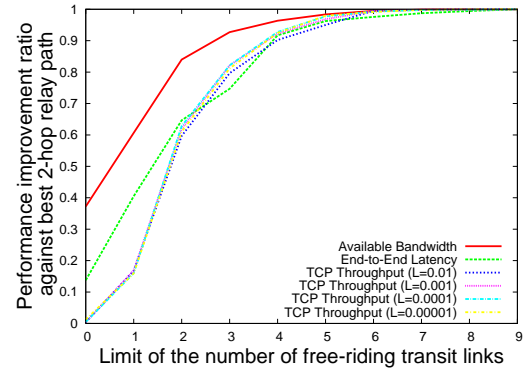


図 8 ただ乗り量の制限とオーバーレイルーティングの効果の関係 [22]

グによってそのネットワークにトラフィックが集中するにもかかわらず、ISP はそのトラフィック送受信のためのコストを回収することが本質的にできない、という問題である。

3.2.2 評価結果と考察

ここでは、ネットワークただ乗り問題の定量的な評価の一例を示す。評価に際しては、2.2 節と同様に、S-cube のデータを用いる。また、ただ乗り量を、オーバーレイルーティングによって迂回経路が選択された場合に、経路上に存在するトランジットリンクの本数と定義する。ただ乗り量を算出するためには、選択した経路を AS レベルで見たとときの AS 間リンクが、ピアリングリンクであるかトランジットリンクであるかを知る必要がある。AS 間リンクの種類の決定には、CAIDA [26] において公開されている、AS 間リンクの種類の調査結果 [27, 28] を使用した。

図 7 に、遅延時間、利用可能帯域、および TCP プロキシを用いずに、パケット廃棄率を変化させた TCP スループットを経路選択の指標として用いた場合に、最良のユーザ性能を与える 2 ホップ迂回パスを使った場合のただ乗り量の分布を示している。図から、遅延時間、利用可能帯域を用いた場合には、性能の良い 2 ホップ迂回パスの 90% 以上が、ただ乗りを発生させることがわかる。すなわち、オーバーレイルーティングによってユーザ性能が向上する迂回経路を選択した場合、そのほとんどがネットワークただ乗り問題を引き起こすと言うことができる。また、TCP スループットを用いた場合には、ただ乗りを発生させるノードペアの割合が減少している。これは、2.2 節において述べたように、TCP プロキシを用いない場合には、オーバーレイルーティングの効果がほとんど認められないためである。

最後に、オーバレイルーティングが引き起こすただ乗り量を制限した場合に、オーバレイルーティングによって得られる効果がどの程度削減されるかを評価した結果を示す。図8に、2ホップ迂回パスを選択する際に設定するただ乗り量の制限と、オーバレイルーティングの効果(ただ乗りを制限しない場合の性能に対する割合)との関係を示す。図から、特に利用可能帯域を経路選択の指標として用いる場合には、ただ乗り量を2本程度に制限したとしても、80%以上の効果を得ることができることがわかる。

4. まとめと今後の課題

本稿では、オーバレイネットワークにおいて経路制御を行なうオーバレイルーティングに着目し、その利点と欠点に関する研究動向を紹介すると共に、我々の研究グループにおける検討結果の一部を示した。具体的には、利点としては、オーバレイルーティングを行なうことによって得られるユーザ性能の向上に関して示し、欠点としてオーバレイルーティングがISPのコスト構造に影響を与えるネットワークただ乗り問題について述べた。

今後の課題としては、ユーザ性能を向上しつつ、ただ乗りの影響を緩和するようなオーバレイルーティング手法の検討や、P4Pなどのプロバイダがオーバレイネットワークに協力するような手法との比較などが挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は、情報通信研究機構からの委託研究「ダイナミックネットワーク技術の研究開発 課題力」によっている。ここに記して謝意を示す。

文 献

- [1] D. G. Andersen, H. Balakrishnan, M. F. Kaashoek, and R. Morris, "Resilient overlay networks," in *Proceedings of 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles*, Oct. 2001.
- [2] PlanetLab | An open platform for developing, deploying, and accessing planetary-scale services. available from <http://www.planet-lab.org/>.
- [3] C. L. T. Man, G. Hasegawa, and M. Murata, "Inferring available bandwidth of overlay network paths based on inline network measurement," in *Proceedings of ICIMP 2007*, May 2007.
- [4] M. Uchida, S. Kamei, and R. Kawahara, "Performance evaluation of qos-aware routing in overlay network," in *Proceedings of ICOIN 2006*, Jan. 2006.
- [5] S. Kamei, "Applicability of overlay routing in Japan using inter-domain measurement data," *Overlay Network Workshop*, Dec. 2006.
- [6] Y. Zhu, C. Dovrolis, and M. Ammar, "Dynamic overlay routing based on available bandwidth estimation: A simulation study," *Computer Networks Journal*, vol. 50, pp. 739–876, Apr. 2006.
- [7] D. G. Andersen, A. C. Snoeren, and H. Balakrishnan, "Best-path vs. multi-path overlay routing," in *Proceedings of ACM SIGCOMM conference on Internet measurement*, pp. 91–100, Oct. 2003.
- [8] A. Nakao, L. Peterson, and A. Bavier, "Scalable routing overlay networks," *ACM SIGOPS Operating Systems Review*, vol. 40, pp. 49–61, Jan. 2006.
- [9] S. Banerjee, C. Kommareddy, K. Kar, B. Bhattacharjee, and S. Khuller, "Construction of an efficient overlay multi-

- cast infrastructure for real-time applications," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2003*, Apr. 2003.
- [10] 平岡 佑一朗, 長谷川 剛, 村田 正幸, "遅延および帯域情報を用いたオーバレイルーティングの有効性評価," 電子情報通信学会技術研究報告 (CQ2007-18), pp. 19–24, July 2007.
- [11] G. Hasegawa, Y. Hiraoka, and M. Murata, "Effectiveness of overlay routing based on delay and bandwidth information," to appear in *IEICE Transactions on Communications*, vol. E92-B, pp. 1222–1232, Apr. 2009.
- [12] Scalable Sensing Service. available at <http://networking.hp1.hp.com/s-cube/>.
- [13] M. Mathis, J. Semke, J. Mahdavi, and T. Ott, "The macroscopic behavior of the TCP congestion avoidance algorithm," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 27, pp. 67–82, July 1997.
- [14] E. M. Allman, S. Dawkins, D. Glover, J. Griner, D. Tran, T. Henderson, J. Heidemann, J. Touch, H. Kruse, S. Ostermann, K. Scott, and J. Semke, "Ongoing TCP research related to satellites," *RFC 2760*, Feb. 2000.
- [15] J. Border, M. Kojo, J. Griner, G. Montenegro, and Z. Shelby, "Enhancing proxies intended to mitigate link-related degradations," *RFC 3135*, June 2001.
- [16] I. Maki, G. Hasegawa, M. Masayuki, and T. Murase, "Performance analysis and improvement of TCP proxy mechanism in TCP overlay networks," in *Proceedings of ICC 2005*, May 2005.
- [17] R. keralapura, N. taft, C. Chuah, and G. Iannacone, "Can ISPs take the heat from overlay networks?," in *Proceedings of ACM HotNets Workshop 2004*, Nov. 2004.
- [18] T. Karagiannis, P. Rodriguez, and K. Papagiannaki, "Should internet service providers fear peer-assisted content distribution?," in *Proceedings of ACM Internet Measurement Conference 2005*, Oct. 2005.
- [19] A. K. H. Xie, A. Silberschatz, and Y. R. Yang. available at <http://www.dcia.info/documents/P4POverview.pdf>.
- [20] H. Xie, Y. R. Yan, A. Krishnamurthy, Y. Liu, and A. Silberschatz, "P4P: Provider portal for applications," in *Proceedings of IEEE SIGCOMM 2008*, Aug. 2008.
- [21] G. Hasegawa, M. Kobayashi, M. Murata, and T. Murase, "Free-riding traffic problem in routing overlay networks," in *Proceedings of ICON 2007*, Nov. 2007.
- [22] G. Hasegawa, Y. Hiraoka, and M. Murata, "Evaluation of free-riding traffic problem in overlay routing and its mitigation method," in *Proceedings of ICNS 2009*, Apr. 2009.
- [23] 長谷川剛, 小林正好, 村田正幸, 村瀬勉, "オーバレイルーティングに起因するネットワークただ乗り問題に関する一検討," 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2006-136), vol. 106, pp. 133–138, Dec. 2006.
- [24] 平岡佑一朗, 長谷川剛, 村田正幸, "オーバレイルーティングによるネットワークただ乗り問題の評価とその緩和手法に関する一検討," 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2007-204), vol. 107, pp. 271–276, Mar. 2008.
- [25] Y. Zhang, M. Roughan, N. Duffield, and A. Greenberg, "Fast, accurate computation of largescale IP traffic matrices from link loads," in *Proceedings of SIGMETRICS 2003*, June 2003.
- [26] CAIDA Web Page. available at <http://www.caida.org/home/>.
- [27] AS-relationship data Page. available at <http://www.caida.org/data/active/as-relationships/index.xml>.
- [28] X. Dimitropoulos, D. Krioukov, M. Fomenkov, B. Huffaker, Y. Hyun, K. claffy, and G. Riley, "AS relationships: Inference and validation," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 37, No.1, Jan. 2007.