

## リンクメトリックの不確実性が経路制御に与える影響の評価

児玉 瑞穂<sup>†</sup> 亀井 聡<sup>††</sup> 長谷川 剛<sup>†††</sup>

川原 亮一<sup>††</sup> 村田 正幸<sup>†</sup> 吉野 秀明<sup>††</sup>

<sup>†</sup> 大阪大学 大学院情報科学研究科 〒 560-0871 大阪府吹田市山田丘 1-5

<sup>††</sup> 日本電信電話株式会社 NTT サービスインテグレーション基盤研究所

〒 180-8585 東京都武蔵野市緑町 3-9-11

<sup>†††</sup> 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

E-mail: <sup>†</sup>{m-kodama,hasegawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp,

<sup>††</sup>{kamei.satoshi,kawahara.ryoichi,yoshino.hideaki}@lab.ntt.co.jp

あらまし インターネットの普及と技術進化にともない、IP ネットワークにおいて、ネットワークの広域化、多ノード化といった変化が起きている。既存のトラフィック制御手法は IP ネットワークのこのような変化を想定していない。そのため、このような変化に対応し、ネットワーク性能を大域的に最適化できるトラフィック制御手法が求められている。特に経路制御に着目すると、大規模ネットワークにおいて経路制御を行う際に、必要となるリンクメトリックを完全に取得することは困難であるため、推定値や最新ではない値を用いざるを得ない場合がある。すなわち、リンクメトリックの信頼性が低い場合においても効率的な経路を選択できることが、大域的最適化を可能とする経路制御を実現するためには必要となる。本報告では、リンクメトリックの不確実性が経路制御に与える影響を評価する。具体的には、3 種類のネットワークトポロジを用いて、リンクメトリックが大幅に変化した際に最短経路を選ぶことができなくなる制御ミス率を評価し、大域的最適化を行う経路制御に必要な条件を考察する。

キーワード ルーティング, リンクメトリック, IP, オーバレイネットワーク, シミュレーション

## Impact of unreliable link metric on traffic routing performance

Mizuho KODAMA<sup>†</sup>, Satoshi KAMEI<sup>††</sup>, Go HASEGAWA<sup>†††</sup>,

Ryoichi KAWAHARA<sup>††</sup>, Masayuki MURATA<sup>†</sup>, and Hideaki YOSHINO<sup>††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

Yamadaoka 1-5, Suita, Osaka, 565-0871 Japan

<sup>††</sup> NTT Service Integration Laboratories, NTT Corporation

Midori-cho 3-9-11, Musashino, Tokyo, 180-8585 Japan

<sup>†††</sup> Cybermedia Center, Osaka University Machikaneyama 1-32, Toyonaka, Osaka, 560-0043, Japan

E-mail: <sup>†</sup>{m-kodama,hasegawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp,

<sup>††</sup>{kamei.satoshi,kawahara.ryoichi,yoshino.hideaki}@lab.ntt.co.jp

**Abstract** In this report, we focus on network control mechanisms, especially traffic routing mechanisms, for achieving global optimization of the network performance. With the widespread and development of internet, the IP networks have been used in diverse environments. Because the existing traffic engineering did not designed for the environment, traffic engineering is required for wide area. Although routing mechanisms for global optimization require precise and up-to-date information on link metric of all links in the network, it is difficult to obtain it in low cost and short time in large-scale networks. Therefore, we need the routing mechanism which can achieve good performance even with incomplete and unreliable link metric. In this report, we evaluate of unreliable link metric the impact on routing from performance by using simulation experiments and examine the requirement for global optimum routing mechanism for large-scale networks.

**Key words** Routing, Link metric, IP, Overlay networks, Simulation

## 1. はじめに

インターネットの普及、およびその発展により、今日では IP ネットワークの利用形態が大きく変化している。インターネット利用者数の増加にともない、エンドホスト、ルータ、およびスイッチなどのノードが増加し、ネットワークが広域化している。また、ワイヤレスネットワーク、および P2P ネットワークのようなエンドホストが主体となるオーバーレイネットワークにおいては、ノードが浮動的に分布するという状況が生まれつつある。

既存の経路制御アルゴリズムはこのような状況を想定して設計されていない。例えば、IP ネットワークにおいて、既存の経路制御アルゴリズムは AS 内の経路制御である IGP (Routing Information Protocol; RIP [1], Open Shortest Path First; OSPF [2] など) と AS 間の経路制御である EGP (Border Gateway Protocol version 4; BGP-4 [3] など) を組み合わせたものである。AS 内経路制御においては、Differentiated Services (DiffServ) [4], Multi-Protocol Label Switching (MPLS) [5] などの高度なトラフィック制御技術により局所的最適化を行うことが可能である。しかし、AS 間経路制御においては、ネットワーク性能の効率化をそもそも目的としておらず、上位 ISP とのトランジットリンクの課金体系や、パブリック/プライベートピアリングを行っている他 ISP との契約関係などの経済的および政治的理由によって経路が決定される。そのため、大量のノードが浮動的かつ広域的に分布する状況下において大域的最適化を行うことが可能な、経路制御などのトラフィック制御技術が求められている。

大規模ネットワークにおいて大域的最適化を可能とする経路制御、およびトラフィック制御を実現するためには、制御層と伝搬層の両方においてスケラビリティを確保することが必要となる。制御層においては、P2P ネットワーク技術などのオーバーレイネットワーク技術により、IP ネットワークを下位層としてその上に独自の論理ネットワークが構築できるようになったこと、および Distributed Hash Table (DHT) [6] などのノード管理技術により大量のノード情報の管理検索を容易にできるようになったことから、問題は解決されつつあるといえる。一方、伝搬層では実際のパケット転送や経路表作成を担うが、必要となるノード間のリンク<sup>(注1)</sup>に関する情報(遅延時間、リンク利用率、パケット廃棄率など)であるリンクメトリックを取得する際に発生する、ネットワーク規模に対するスケラビリティ確保の問題は解決されておらず、大規模ネットワークでの大域的最適化における障害となり得る。

リンクメトリックを取得するためには、実際に通信が行われる経路に沿ってプローブトラフィックを送信することにより、ノード間リンクの遅延や損失率を測定する必要がある。ネットワーク内の全てのリンクに対するリンクメトリック(以下、リンクメトリック集合と呼ぶ)を取得するには、各々のノードが全てのノードに対してプローブトラフィックを送信する、また、

(注1): ここでは、ノードは IP ネットワークにおけるルータや、オーバーレイネットワークにおけるオーバーレイノードを指す。また、リンクは IP ネットワークによって構成される物理リンク、およびオーバーレイネットワークによって構成される論理リンクの両方を意味する。

各ノードが保持しているリンクメトリックの情報をノード間で交換することが必要となる。しかし、どちらの場合も通信には直接関係のないトラフィックを発生させるため、ノード数が増加すると、これらの通信はネットワークに大きな負荷を与える。また、特にワイヤレスネットワークやオーバーレイネットワークにおいては、リンクメトリックは常に変動するため、常に最新のリンクメトリックを得るためには、リンクメトリックを頻繁かつ継続的に測定する必要がある。つまり、大量のノードが広域的に分散して存在するネットワークにおいて、常に変動するリンクメトリックを正確に測定・取得することはネットワークに大きな負荷となるため、実現は非常に困難である。

測定負荷を減らすためには、測定頻度を減らし、効率的にリンクメトリック集合を取得することが必要となる。測定数を減らすには、実際には測定していないリンクメトリックについて推定値を用いるという方法がある。[7] では、ネットワーク内のノードをクラスタ化することによって測定頻度を減少させる手法が提案されている。具体的には、ネットワーク内のノードをクラスタ化し、各ノードが属するクラスタの代表ノード間のリンクメトリックの測定結果を用いて、クラスタに属する各ノード間のリンクメトリックを推定する。このようにリンクメトリックとして真の値を用いず、推定値や最新ではない値を用いる場合においても、効率的な経路を選択できることが、大域的最適化を可能とする経路制御を実現するには必要となる。

そこで本報告では、リンクメトリックが不確実な場合に経路制御手法に与える影響をシミュレーションを用いて調査し、真のリンクメトリック集合を用いることができない場合においても効率的に経路を選択するために、経路制御に必要な条件を考察する。具体的には、3 種類のネットワークトポロジを用いたシミュレーションにより、リンクメトリックが変化したときに最短経路を選ぶことができなくなる制御ミス率を評価し、ネットワークトポロジやネットワーク規模が与える影響について考察する。

本報告の構成は以下のとおりである。第 2 章ではシミュレーション評価の方法について述べ、第 3 章ではその結果と考察を示す。最後に第 4 章で、まとめと今後の課題について述べる。

## 2. 評価環境

### 2.1 評価方法

本報告では、下記のような方法を用いて、リンクメトリックの不確実性が経路制御に与える影響の評価を行う。図 1 に、評価環境の概略を示す。与えられたネットワークトポロジおよびリンクメトリック集合に対して、まずダイクストラ法 [8] によって、全てのノード間の最短経路を算出する。その後ネットワーク中の一部のリンクのリンクメトリックを増大させ、再度ダイクストラ法により最短経路を算出する。このとき、元のリンクメトリック集合(偽のリンクメトリック集合)の下における最短経路(以下、評価対象経路と呼ぶ)が新しいリンクメトリック集合(真のリンクメトリック集合)の下においても最短経路であるか否かを評価する。

シミュレーションでは、次の 2 通りの方法でリンクメトリック変化を発生させた。なお以降では、リンクメトリックの変化

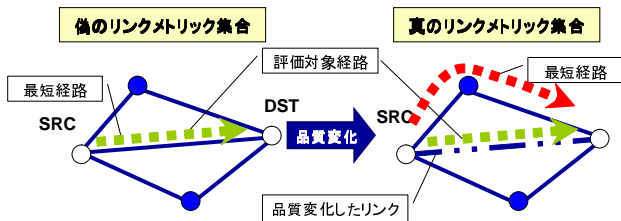
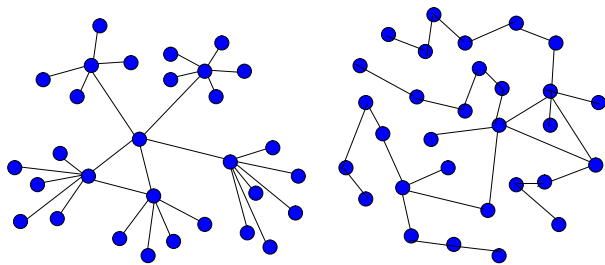


図 1: シミュレーション環境



(a) リンク次数がべき乗則にしたがうネットワーク

(b) ランダムネットワーク

(c) フルメッシュ

図 2: 評価対象のネットワークポロジの例

を、単に品質変化と記す。

### (1) リンク単位で品質変化が発生する場合

ネットワークの全リンクからランダムにリンクを選択し、品質変化を発生させる。これは、例えば IP ネットワークにおいて、輻輳などによってリンクの品質が急激に悪化する状況を想定している。

### (2) ノード単位で品質変化が発生する場合

ネットワークの全ノードからランダムにノードを選択し、そのノードが持つ全てのリンクに対して品質変化を発生させる。これは、例えば IP ネットワークにおける特定のルータの負荷が急激に増大するような状況を想定している。

なお、3 章における評価では、ノード単位での品質変化が発生した場合においても、品質変化が発生したリンク数に換算して評価を行っている。

## 2.2 ネットワークポロジ

評価に際しては一樣乱数を用いて 2 次元空間上に配置したノードに対してリンクを設定することでネットワークポロジを生成する。評価対象とするネットワークポロジとして、ランダムネットワーク、およびノードのリンク次数の分布がべき乗則にしたがうネットワークを想定する。前者はセンサネットワークのような端末数の多いネットワークに、後者はインター

表 1: ノード数、ネットワークポロジごとの平均ホップ数

ネットワークポロジ ノード数	ネットワークポロジ		
	BA	Waxman	Fullmesh
300	4.09	4.91	1
1000	4.86	6.11	1

ネット全体のモデルに近いと考えられる [9, 10]。また、比較のために、各ノードが他の全てのノードに対してリンクを持つフルメッシュネットワーク (Fullmesh) についても評価を行う。各ネットワークポロジの例を図 2 に示す。ネットワークポロジの生成には BRITE [11] を用いた。ランダムネットワークの生成には Waxman モデル [12] を、リンク次数がべき乗則にしたがうネットワークの生成には Barabasi-Albert (BA) モデル [13] を適用している。ネットワークポロジは、1000 × 1000 の空間上に一樣乱数を用いてノードを配置し、続いてリンクをそれぞれのアルゴリズムに基づいて生成した。リンクメトリックの初期値にはノード間のユークリッド距離を用いた。

## 2.3 パラメータ

実験において、変化させるパラメータを下記に示す。

- ネットワークポロジ (Waxman, BA, Fullmesh)
- ノード数
- 全リンク数に対する品質を変化させるリンク数の割合 (品質変化発生率)

- リンクメトリックを増加させる割合 (品質変化倍率)

また、ランダムなネットワークとべき乗則に従うネットワークにおいては、ノードあたりの平均リンク次数は 2 とする。表 1 に、ノード数が 300 および 1000 の場合の、各ネットワークポロジにおけるノード間の平均ホップ数を示す。以降のグラフ内におけるラベルの括弧内の数値はノード数を「X 10」および「X 20」は品質変化倍率を表すものとする。

## 2.4 評価指標

実験において、評価する指標を下記に示す。

- 評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合
- 評価対象経路が品質変化発生後のネットワークにおいて最短経路とならない確率 (以下、制御ミス率と呼ぶ)
- 品質変化発生後品質変化したリンクを含む評価対象経路が最短経路となる割合
- 品質変化発生後の最短経路が品質変化したリンクを含む割合

## 3. 評価結果と考察

### 3.1 リンク単位で品質変化が発生する場合

図 3 に、各ネットワークポロジにおいて、ノード数を 300 および 1000、品質変化倍率を 10 倍および 20 倍とした場合における、品質変化発生率に対する、評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合の変化を示す。なお、グラフの各点は 10 回のシミュレーションの平均値を示し、エラーバーは 95 % の信頼区間を示す。ただし、フルメッシュネットワークについては、ノード数を変化させても結果が変化しないため、ノード数が 300 の場合のみを示している。

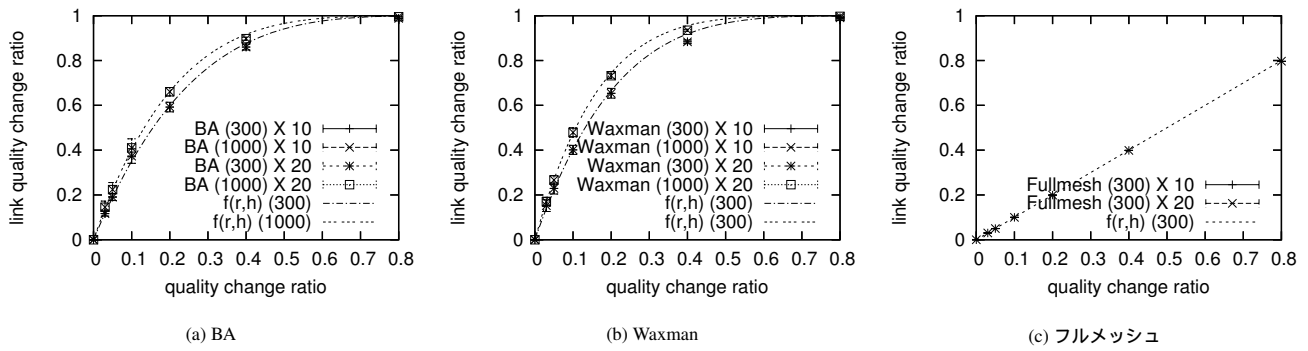


図 3: 評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合 (リンク単位で品質変化が発生した場合)

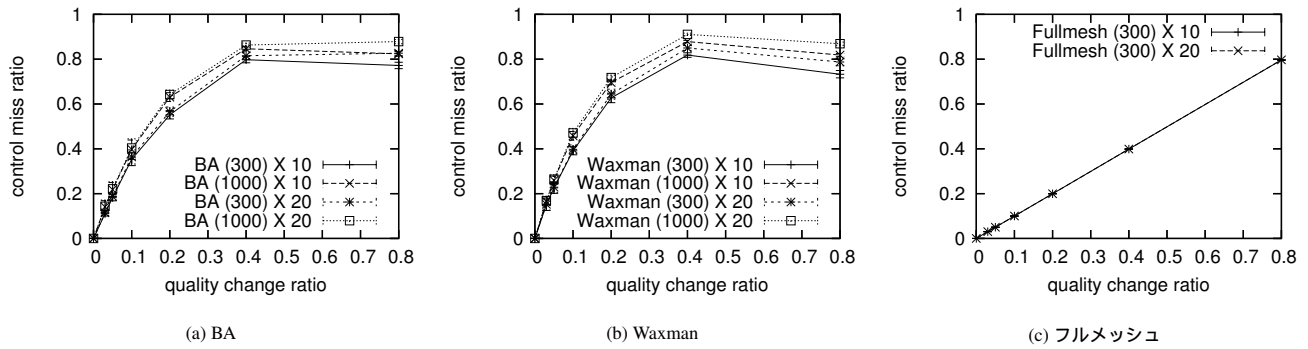


図 4: 制御ミス率 (リンク単位で品質変化が発生した場合)

これらの図から、ノード数が大きくなると評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合が高くなるのがわかる。また、BA ネットワークにくらべて、Waxman ネットワークの方が割合が高くなっている。これらのことは、各ネットワークにおけるノード間の平均ホップ数 (表 1) が影響を与えている。評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合は、品質変化発生率を  $r$ 、送受信ノード間経路の平均ホップ数を  $h$  とすると、 $f(r, h) = 1 - (1 - r)^h$  で表すことができる。これは、評価対象経路を構成するどのリンクも品質変化が起きていない事象に対する余事象の確率に相当する。グラフ中には、同じ環境における関数  $f(r, h)$  を合わせてプロットしており、シミュレーション結果と一致していることが確認できる。

また、品質変化倍率は評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合に影響しないことがわかる。これは、品質変化によりリンクメトリックが大幅に増加するため、そのリンクが品質変化後の最短経路に含まれる確率が、品質変化倍率に依存せず非常に低いためである。

図 4 に、同じ環境における制御ミス率の結果を示す。この図から、品質変化発生率が 40% 以下の場合には、図 3 の結果とほぼ同じになっていることがわかる。これは、品質変化が発生したリンクを含む経路は、品質変化発生後には最短経路である可能性が極めて低いためである。一方、品質変化発生率が 80% の場合には、制御ミス率は 40% の場合とほぼ同程度となっている。これは、大部分のリンクのリンクメトリックが増大するた

め、品質変化発生後の最短経路が品質変化したリンクを含み、元のリンクメトリック集合において最短経路であった経路が、品質変化発生後においても最短経路になる場合があるためである。

### 3.2 ノード単位で品質変化が発生する場合

図 5 に、ノード単位で品質変化が発生する場合における、評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合の評価結果を示す。この図から、図 3 の場合と同様に、ノード数が増加すると、評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合が大きくなっていることがわかる。また、ネットワークポロジやノード数が与える影響も図 3 の場合とほぼ同様である。ノード単位で品質変化が発生する場合、評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合は全ノード数に対する品質変化が発生しているノードの割合  $r'$  を用いて、近似的に  $g(r', h) = 1 - (1 - r')^{h+1}$  と表すことができる。ここで、 $h+1$  は送信ノード、受信ノード、および中継ノードの数の和に相当する。これは、経由するどのノードも品質変化が発生するノードに選ばれない事象に対する余事象の確率に相当する。

また、図 3 と図 5 を、品質変化が発生するリンクの割合が同じ場合において比較すると、評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合は、ノード単位で品質変化が発生する場合の方が小さくなっていることがわかる。これは、ノード単位で品質変化が発生する場合、品質変化したリンクが選択されたノードの周辺に集中してあらわれるため、品質変化

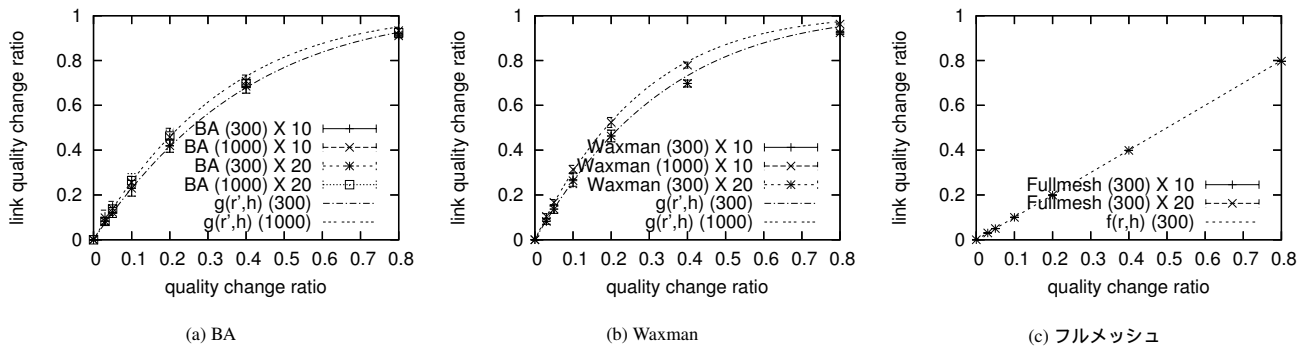


図 5: 評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合 (ノード単位で品質変化が発生した場合)

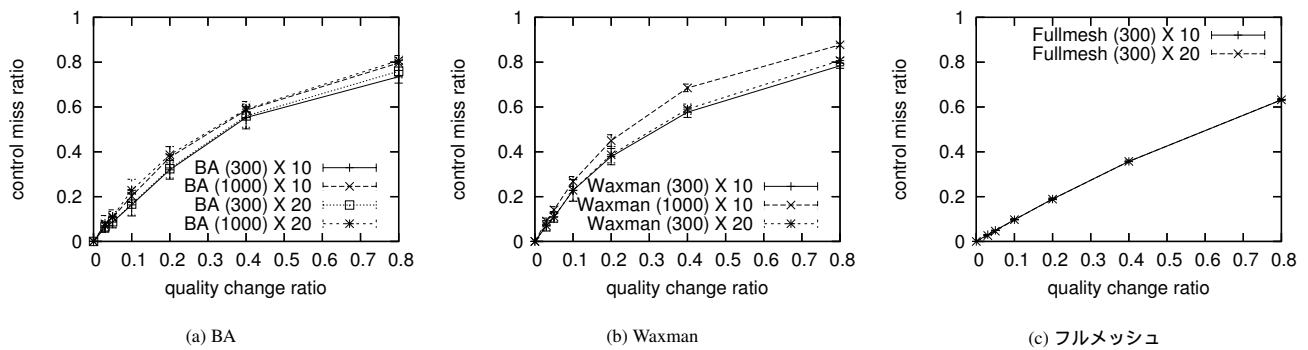


図 6: 制御ミス率 (ノード単位で品質変化が発生した場合)

したリンクを経由しない経路が増えるためである。

図 6 に、制御ミス率の結果を示す。図から、リンク単位で品質変化が発生した場合と同様に、品質変化発生率が 40 % 以下の場合には、図 5 の結果とほぼ同じになっていることがわかる。一方、図 4 の場合と違い、品質変化発生率が 80 % になった場合においても、制御ミス率は増加している。これは、リンク単位で品質変化が発生する場合は、品質変化が発生するリンクがネットワーク中に分散して現れるのに対し、ノード単位で品質変化が発生する場合は、選択されたノードの周辺に集中して現れるため、品質変化発生後に最短経路が変化しやすいためである。

図 4 と図 6 を比較すると、制御ミス率はリンク単位で品質を変化させた場合より、ノード単位で品質を変化させた場合の方が全体的に低くなっている。これは、ノード単位で品質を変化させた場合に、送信ノードあるいは受信ノードが品質変化が発生するノードになると、最短経路は必然的に品質変化が発生したリンクを含むため、結果として、制御ミスが少なくなっている。

### 3.3 考 察

リンク単位、およびノード単位で品質変化が発生した両場合において、評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合と制御ミス率はおおよそ近い値になるということがわかった。また、評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合はどちらの場合においても品質変化発生率、および平均ホップ数を含む関数で表すことができるため、

制御ミス率も品質変化発生率、および平均ホップ数に影響を受ける。つまり、品質変化発生率が低く、平均ホップ数が少ないネットワークは制御ミス率が低くなるということがいえる。

また、制御ミス率はリンク単位で品質を変化させた場合より、ノード単位で品質を変化させた場合の方が全体的に低くなっている。しかし、品質変化発生率が 40 % から 80 % に推移する際に注目すると、リンク単位で品質を変化させた場合では制御ミス率の変化はあまりないが、ノード単位で品質を変化させた場合では制御ミス率が増大している。図 7 および図 8 に、それぞれリンク単位、ノード単位で品質変化が発生した場合における、品質変化発生後の最短経路が品質変化したリンクを含む割合を示す。ノード単位で品質変化が発生した場合においては品質変化発生率の値に関わらず傾きの変動がないが、リンク単位で品質変化が発生した場合においては品質変化発生率が高くなるにつれて傾きが急になっている。さらに、図 9 および図 10 に、それぞれリンク単位、ノード単位で品質変化が発生した場合における、品質変化発生後品質変化したリンクを含む評価対象経路が最短経路となる割合 (評価対象経路が品質変化発生後に品質変化したリンクを含む割合と制御ミス率の差に相当) を示している。図から、リンク単位で品質変化が発生した場合は、品質変化発生率が 40 % から 80 % に推移する際にその割合が急激に大きくなるのに対し、ノード単位で品質変化が発生した場合は、大きな変化はないことがわかる。つまり、品質変化発生率が 40 % から 80 % に推移する際、リンク単位で品質変化が発生する場合においては最短経路が品質変化したリンクを含む割合

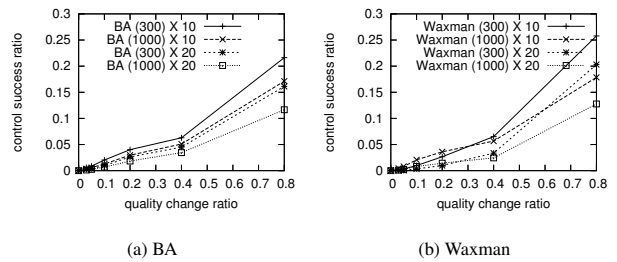
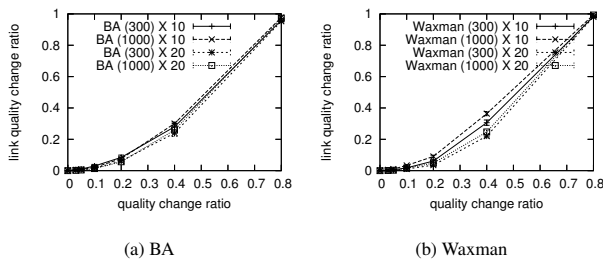


図7: 品質変化発生後の最短経路が品質変化したリンクを含む割合（リンク単位で品質変化が発生した場合）

図9: 品質変化発生後品質変化したリンクを含む評価対象経路が最短経路となる割合（リンク単位で品質変化が発生した場合）

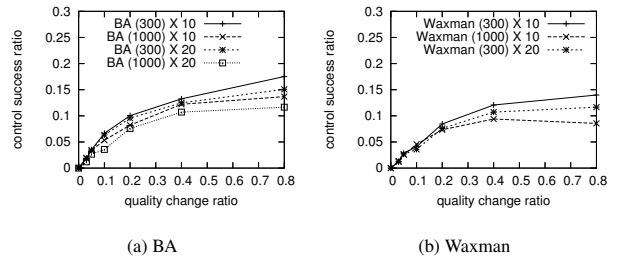
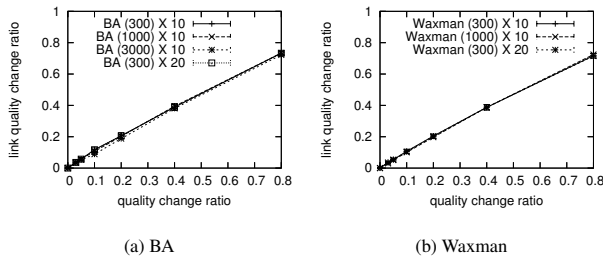


図8: 品質変化発生後の最短経路が品質変化したリンクを含む割合（ノード単位で品質変化が発生した場合）

図10: 品質変化発生後品質変化したリンクを含む評価対象経路が最短経路となる割合（ノード単位で品質変化が発生した場合）

が高くなるため、評価対象パスが最短経路となる割合が高くなり、制御ミス率の変化が少なくなっている。このことが、制御ミス率の変化の違いに影響していると言することができる。

また、ノード単位で品質変化が発生する場合の方が制御ミス率が小さいことから、例えば、リンクメトリックとして部分的に推定値を用いる場合においては、推定値を用いるリンクをノード単位で選択すべきである、ということがいえる。ただし、品質変化発生率が50%以上という非常に高い場合においては、有意差はない。

#### 4. おわりに

本報告では大域的最適化を可能とするルーティングを実現するために、リンク情報の不確実性が経路制御に与える影響をシミュレーションを用いて調査した。その結果、リンクメトリックの変化により最短経路を選ぶことができない割合が、品質変化発生率およびネットワークの平均ホップ数に影響を受けるといったことがわかった。また、品質変化発生率が低い場合には、ノード単位でリンクメトリックとして推定値を用いるリンクを選択する方が、制御ミス率が低くなることがわかった。

今後の課題として、実ネットワーク環境における品質変化発生率、品質変化倍率がどの程度なのかを調査し、実ネットワークに近い環境で評価を行うということが挙げられる。また、本報告においては制御ミス率を主に評価したが、伝搬遅延時間やパケット損失率などの、エンドホスト間の性能指標に与える影響についても評価したい。さらに、それらの評価結果を基に [7] などのネットワーク計測負荷の削減手法の効果を評価したい。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省科学技術振興調整費「先端融合領域イノベーション創出拠点の形成：ゆらぎプロジェクト」の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

#### 文献

- [1] G. Malkin, "RIP Version 2," *RFC 2453*, Apr. 1998.
- [2] J. Moy, "OSPF Version 2," *RFC 2328*, Apr. 1998.
- [3] Y. Rekhter and T. Li, "A border gateway protocol 4 BGP-4," *RFC 1771*, Mar. 1995.
- [4] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss, "An architecture for differentiated services," *RFC 2475*, Dec. 1998.
- [5] E. C. Rosen, A. Viswanathan, and R. Callon, "Multi-Protocol Label Switching Architecture," *RFC 3031*, Jan. 2001.
- [6] H. Balakrishnan, M. F. Kaashoek, D. Karger, R. Morris, and I. Stoica, "Looking up data in P2P systems," *Communication of the ACM*, Feb. 2003.
- [7] 亀井聡, 川原亮一, "大規模分散環境における品質把握に向けたクラスタ化手法とそのシミュレーション評価," 電子情報通信学会技術研究報告, Feb. 2006.
- [8] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numerische Mathematik 1*, pp. 269–271, 1959.
- [9] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "On power-law relationships of the internet topology," in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, vol. 29, pp. 251–262, Aug. 1999.
- [10] 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.
- [11] A. Medina and I. Matta, "BRITE: A flexible generator of internet topologies," Tech. Rep. BU-CS-TR-2000-005, Boston University, Boston, Mar. 2000.
- [12] B. M. Waxman, "Routing of multipoint connections," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 6, pp. 1617–1622, Dec. 1988.
- [13] A.-L. Barabasi and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.