

特別研究報告

題目

べき乗則に従うネットワークにおける
トラヒック増加に対する耐性を備えた経路制御手法の提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

福元 良太

2005 年 2 月 17 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

べき乗則に従うネットワークにおける

トラフィック増加に対する耐性を備えた経路制御手法の提案と評価

福元 良太

内容梗概

インターネットへのアクセス回線のブロードバンド化にともない、バックボーンネットワークのトラフィック量の急激な増加が問題となっている。現状のネットワーク設計では、トラフィック量の増大に対しては、バックボーンネットワークの回線容量を再度設計することにより対応が行われている。しかし、バックボーンネットワークの回線容量を增強したとしても、ネットワークのボトルネックはルータのインターフェースにシフトするのみであり、ネットワークに収容可能なトラフィック量はルータの技術的制約により制限されることとなる。

その一方で、現状のインターネットにおいて AS 間・ルータ間の接続状況を観測した結果、AS およびルータ（以下、ノードと呼ぶ）の出線数の分布はべき乗則に従うことが示されている。べき乗則に従うネットワークとは、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、他の多くのノードには少数のリンクが接続される。べき乗則に従うネットワークのトポロジ特性およびリンク負荷特性の評価に関する従来の研究では、その評価トポロジとして AS レベルのインターネットトポロジが用いられてきた。近年には、ルータレベルのインターネットトポロジに着目し、ルータのバックプレーン処理能力、インターフェース速度による技術的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した結果としてべき乗則を有する構造となること示されている。ところが、トポロジ特性やべき乗則に従う理由を示すのみでは実用上不十分であり、トポロジ特性を利用したネットワーク設計、設備量予測、トラフィック制御に応用していく必要がある。

そこで本報告では、アクセス回線の大容量化に耐えうる経路制御手法を確立することを目的とし、以下の評価に取り組む。まず、ルータレベルのインターネットトポロジにおいて、アクセス回線の大容量化がバックボーンネットワークの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調査し、問題点を指摘する。次に、フロー偏差法に基づく最適経路制御手法を適用して収容可能なトラフィック量を評価し、アクセス回線容量の増加に対して効率よくトラフィックを収容できるトポロジ形状を明らかにする。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、最小ホップ経路選択手法による結果と比較して収容可能トラフィック量は約3倍となることが明らかとなった。しかし、フロー偏差法に基づく経路制御で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、本報告ではルータの技術的制約に関する情報を利用した経路制御方式を新たに提案し、べき乗則に従うインターネットトポロジに適した経路制御手法を提案する。計算機シミュレーションによって評価を行った結果、提案方式では、従来の最小ホップ経路選択方式に比べて最大リンク利用率は45%減少し、収容可能トラフィック量は約1.8倍となることがわかった。

主な用語

経路制御、べき乗則、Power-Law、PRLG (Power-Law Random Graph)、ルータレベルトポロジ、ASレベルトポロジ、フロー偏差法、最適経路制御

目次

1	はじめに	5
2	べき乗則に従うネットワークのトポロジ特性	8
2.1	べき乗則に従うネットワークのトポロジ	8
2.1.1	AS (Autonomous System) レベル	8
2.1.2	ルータレベル	9
2.2	トポロジ生成モデル	9
2.2.1	BA (Barabási–Albert) モデル	9
2.2.2	ER (Erdős–Rényi) モデル	11
3	ルータレベルインターネットにおける負荷特性の評価	13
3.1	シミュレーションモデル	13
3.1.1	経路制御手法	16
3.1.2	回線容量設定手法	18
3.2	評価指標	21
3.3	計算機シミュレーションによる従来手法の性能評価	21
3.3.1	最大リンク利用率の比較	21
3.3.2	リンク利用率の分布の比較	22
4	べき乗則に従うネットワークに適した経路制御手法の提案	27
4.1	提案手法	27
4.2	計算機シミュレーションによる提案手法の性能評価	28
4.2.1	最大リンク利用率の比較	28
4.2.2	リンク利用率の分布の比較	29
5	まとめ・今後の課題	34
	謝辞	35

図目次

1	ルータレベルのインターネットトポロジ例	10
2	BA モデルで生成されたトポロジ：ノード数 100 の場合	11
3	トポロジの出線数分布: Sprint ネットワーク	14
4	トポロジの出線数分布: BA ネットワーク	15
5	トポロジの出線数分布: ER ネットワーク	15
6	ルータの技術的制約 [1]	20
7	ノードの出線数に対するリンク利用率：ER ネットワーク	24
8	ノードの出線数に対するリンク利用率：BA ネットワーク	25
9	ノードの出線数に対するリンク利用率：Sprint ネットワーク	26
10	リンク利用率の分布：Sprint ネットワーク	31
11	リンク利用率の分布：BA ネットワーク	32
12	リンク利用率の分布：ER ネットワーク	33

表目次

1	関連研究の分類	7
2	各トポロジの最大収容トラヒック量	22
3	各トポロジの最大収容トラヒック量	29

1 はじめに

ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) や FTTH (Fiber To The Home) による高速通信環境が手軽に利用できるようになったことで、インターネットへのアクセス回線のブロードバンド化が急速に普及しつつある。それにともない、インターネットの利用者も増加しており、インターネットのバックボーン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 [2-4]。さらに近年では、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、バックボーンネットワークにおいてアクセス回線網で生じるトラフィックを効率よく収容することは急務の課題である。

現状のネットワーク設計では、トラフィック要求の増大に対しては、1) バックボーンネットワークの回線容量を再度設計する、もしくは、2) 最小負荷経路選択などのトラフィック量に応じた動的ルーティング方式を導入する、ことにより対応が行なわれてきた。1) に関しては、バックボーンネットワークの回線容量を増強したとしても、ネットワークのボトルネックはルータのインターフェースにシフトするのみであり、ネットワークに収容可能なトラフィックはルータの技術的制約により制限される。2) に関しても、インターネットに接続されるノード数の増大にともない広告される経路情報のトラフィックが増大、および、経路収束までの時間が問題となる [5]。

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はべき乗則に従うことが示されている [6]。べき乗則に従うネットワークとは、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, 8]。ノード出線数の分布がべき乗則に従うネットワーク (以降では、PLRG: Power-Law Random Graph と呼ぶ) において、平均ホップ長などのトポロジ特性・リンク負荷・有効な経路制御方式の評価が盛んに行われている (表 1 参照)。例えば、文献 [8] では、PLRG において接続されているリンク数が大きいノード (ハブノード) とリンク数が小さいノード (非ハブノード) 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。

べき乗則に従うことが観測されているインターネットにおいても、トポロジ特性・リンク負荷特性の評価に関する研究がなされてきている [9-14]。その多くの研究では、文献 [7] のトポロジを生成する手法である BA モデルを用いて評価を行っている。BA モデルで生成されるトポロジは、AS レベルのインターネットトポロジに近く、ハブノードに多くのトラヒックが集中する [10]。一方、ルータレベルのインターネットトポロジに着目し、ルータのバックプレーン処理能力、インターフェース速度による技術的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した結果としてべき乗則を有する構造となることが文献 [1] で示されている。しかし、トポロジ特性や構造を示すのみでは実用上不十分であり、トポロジ特性を利用したネットワーク設計、設備量予測、トラヒック制御に応用していく必要がある。

そこで本報告では、特にアクセス回線の大容量化に耐えうる経路制御手法を確立することを目的とし、以下の評価に取り組む。まず、ルータレベルのインターネットトポロジにおいて、アクセス回線の大容量化がバックボーンネットワークの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調査し、現状の経路制御手法を適用することによる問題点を指摘する。次に、フロー偏差法に基づく最適経路制御手法を適用して収容可能なトラヒック量を評価し、アクセス回線容量の増加に対して効率よくトラヒックを収容できるトポロジ形状を明らかにする。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 AS レベルのインターネットトポロジ形状では多くのトラヒックを収容できることが明らかとなった。しかし、フロー偏差法に基づく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、本報告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する。

本報告の内容は以下の通りである。まず 2 章において現在のインターネットに現れるべき乗則の説明と、べき乗則による PRLG のトポロジの性質を述べる。3 章では、現状の経路制御手法および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、アクセス回線の大容量化への耐性を評価する。4 章では、3 章において明らかとなる問題点を解決するために、ルータの技術的特性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。最後に本報告のまとめと今後の課題を 5 章で述べる。

表 1: 関連研究の分類

	PRLG	Internet (AS)	Internet (Router)
トポロジ生成モデル	[15],[16]	[7]	[1],[17]
トポロジ特性の評価	[8],[18]	[9],[10]	–
リンク負荷評価	[11] (analysis)	[11] (simulation) , [9],[12]	[1],[19]
経路制御手法の評価	–	[13]	–
耐故障性	[20]	[14]	–

2 べき乗則に従うネットワークのトポロジ特性

本章では、現在のインターネットと同じ性質を持つと言われているべき乗則に従うネットワークについて簡単に述べる。まず 2.1 節では、べき乗則に従うネットワークの出線分布から推測可能なトポロジ構造の議論を行い、同一の出線分布を有しつつ、異なるトポロジ特性を有するインターネットトポロジに分類する。具体的には AS (Autonomous System) レベル、ルータレベルである。次に、2.2 節では AS レベルのべき乗則に従うネットワークの生成モデルの一つである BA モデルの特徴と生成方法を紹介し、BA モデルが生成するトポロジの性質について述べる。

2.1 べき乗則に従うネットワークのトポロジ

1 章でも述べたように、べき乗則に従うネットワークとは、隣接ノード数およびリンクの回線容量 k の分布がべき乗則に従うネットワークのことである。べき乗則に従うとは、例えば隣接ノード数の場合、あるノードの隣接ノード数が k である確率が、 $P(k) = ck^{-\gamma}$ という関係式を満たす (c, γ は定数)。つまり、べき乗則に従うネットワークでは、少数のノードが多く隣接ノードを持つ一方で、多数のノードが隣接ノードをあまり持たないという構造となっている。しかしながら、出線数の分布が求まればトポロジが唯一に決定されるわけではない。文献 [1] では、同一の出線数分布を持つ複数のトポロジを挙げ、それらのトポロジ特性と性能の関係を示している。

以降では、AS レベルおよびルータレベルでのべき乗則に従うネットワークのトポロジ構造を詳しく述べる。

2.1.1 AS (Autonomous System) レベル

AS (Autonomous System) 間の接続状況を観測した結果、そのトポロジ形状はべき乗則に従うことが明らかとなっている [6]。1 つの AS を 1 ノード、AS 間をつなぐ相互リンクをリンクとしたトポロジにおいて、隣接ノード数の分布がべき乗則に従う。AS レベルのべき乗則は、AS 間で使用されているルーティングプロトコルである BGP (Border Gateway

Protocol) のルーティングテーブルによって確認されており、比較的多くの出力リンクを持つ AS 同士が接続している傾向が見られる。AS レベルのインターネットのトポロジを生成する手法としては、BA (Barabási–Albert) モデル [7] がある。

2.1.2 ルータレベル

AS レベルと同様にルータレベルでも隣接ノード数の分布はべき乗則に従うとされている。これは、traceroute コマンドによる計測によって示されており、べき乗則に従うネットワークになる理由として、様々なものが考えられている。例えば、1) 電話局 (収容局) や ISP (Internet Service Provider) からユーザー宅までの接続回線の距離、いわゆる、ラストワンマイルの距離を短くする [17]、2) ネットワークの信頼性を高めようとする結果 [16]、3) ルータ機器の製品の能力 [1] などがあげられている。

文献 [1] では、ルータ機器の製品の能力による制限により、出線数の多いノードは比較的回線容量の小さいアクセス回線の収容に用いられ、出線数の少ないノードは大容量回線の収容に用いられる傾向があるという点に着目している。その上で、ある出線数分布に対してスループットが最大となるトポロジー形状を求めた結果が図 1 のような 3 レベルの階層構造になることが示されている。図 1 からわかるように、ルータレベルのトポロジでは、ハブノードがアクセスノードのトラヒックの収容に使用されている。これは、先ほど述べた AS レベルのトポロジとはハブノードの位置が大きく異なる。

2.2 トポロジ生成モデル

2.2.1 BA (Barabási–Albert) モデル

べき乗則に従うネットワークのトポロジ生成モデルの一つである、BA (Barabási–Albert) モデルを説明する [7]。BA モデルでは、ネットワークの成長過程が表現されている (*Incremental Growth*)。また、出力リンク数 k_i が大きい程、ノード i へリンクが接続される確率 $\Pi(k_i)$ が高くなるように接続確率を与えている (*Preferential Attachment*)。BA モデルでは、これら 2 つの特徴に基づいてネットワークトポロジが生成される (図 2 参照)。

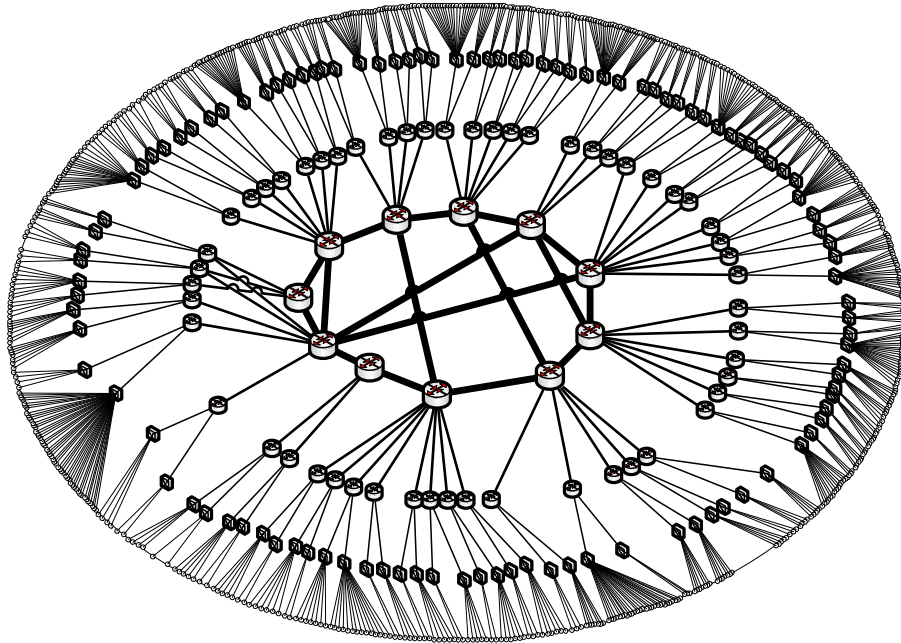


図 1: ルータレベルのインターネットトポロジ例

Step 1: 初期ノードとして m_0 個のノードを配置する。

Step 2: ネットワークのノード数が N 未満である場合、Step 3 へ。ノード数が N であればトポロジ生成を終了する。

Step 3: ノードを 1 個追加する (*Incremental Growth*)。

Step 4: 追加したノードから式 (1) の確率に従い、他の $m (\leq m_0)$ 個の相異なるノードへリンクを接続する (*Preferential Attachment*)。Step 2 へ。

$$\Pi(k_i) = k_i / \sum_j k_j \quad (1)$$

次節においてべき乗則に従うネットワークのトポロジ特性を明確にするため、比較のトポロジ生成モデルとして ER (Erdős-Rényi) モデルを述べる。

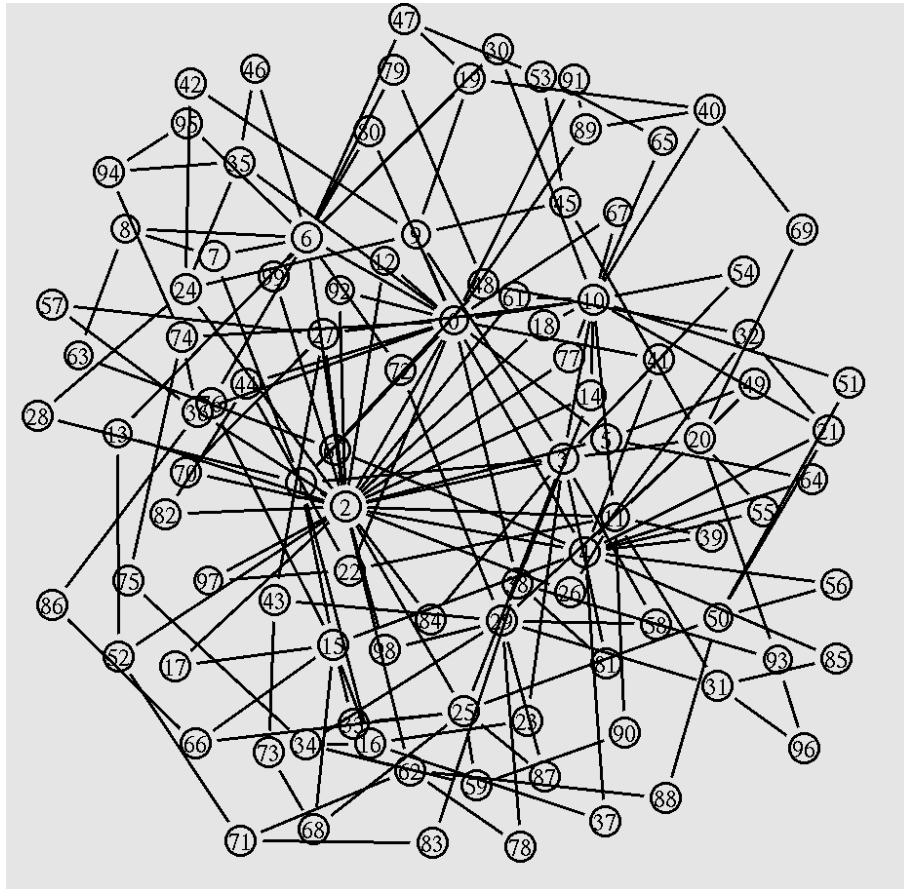


図 2: BA モデルで生成されたトポロジ：ノード数 100 の場合

2.2.2 ER (Erdős-Rényi) モデル

ER モデルはランダムネットワークを生成するモデルの一つである。ネットワークの規模（ノード数）が固定であること、各ノードペア間のリンク接続確率が一定であることが特徴である。ER モデルでは、ネットワークのトポロジ生成に以下の 2 つのパラメータを用いる。

N : ノード数 ($N > 0$)。

p : ノード間を接続する確率 ($0 < p < 1$)。

上記の 2 つのパラメータを用い、次の 2 つのステップによりトポロジを生成する。

Step 1: N 個のノードを配置する。

Step 2: 全てのノードペア間に確率 p でリンクを張る。

3 ルータレベルインターネットにおける負荷特性の評価

本章では、現状で使用されている経路制御手法および、従来検討されてきた経路制御手法について述べる。まず現在のインターネットにおいてもっとも利用されている経路制御手法として、OSPF (Open Shortest Path First) [21] を紹介する (3.1.1 節)。次に 3.1.1 節で従来検討されてきた経路制御手法のうち、最適な経路制御を行うものの 1 つである、フロー偏差法を使用した経路制御手法を紹介する。最後に、3.3 節でそれらの経路制御手法を、べき乗則に従うネットワークに適用した場合の結果を、計算機シミュレーションによって評価し、ルータレベルインターネットにおける負荷特性の評価を行う。

3.1 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 社のルータレベルネットワークのトポロジを使用する。本報告で使用する Sprint ネットワークトポロジは、Rocketfuel [22] 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 3 のようになり、出力リンク数の分布がべき乗則を満たしていることがわかる。また、現実のトポロジである Sprint 社のルータレベルネットワークトポロジとの比較を行うため、同時に、2.2 節で述べた BA モデルと 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 ネットワーク、ER ネットワークと呼ぶ) も使用した。作成したこれらのトポロジは、いずれも Sprint 社のルータレベルネットワークトポロジと、総ノード数、総リンク数を等しくして作成している。これらのトポロジの出力リンク数の分布は図 4、5 のようになっている。

また、シミュレーションでは、上記のトポロジに対し、全ノードペア間に同量のトラヒックを発生させる。各ノードの処理能力は 320 Gbps とする。この値は、バックボーンネットワークにおいて現在最もよく使用されていると考えられる Cisco 社の Cisco 12416 ルータ [23] をモデルとしている。さらに、各リンクの回線容量については、単一リンクコストを与えた OSPF (最小ホップ経路制御) を使用したときに、Cisco 12416 ルータの技術的な制約を考慮したうえで、もっとも効率的に設備投資をおこなったときに割り当てられるであろう

リンクの回線容量を与えている。リンクの回線容量の決定方法については、3.1.2 節にて詳しく述べる。

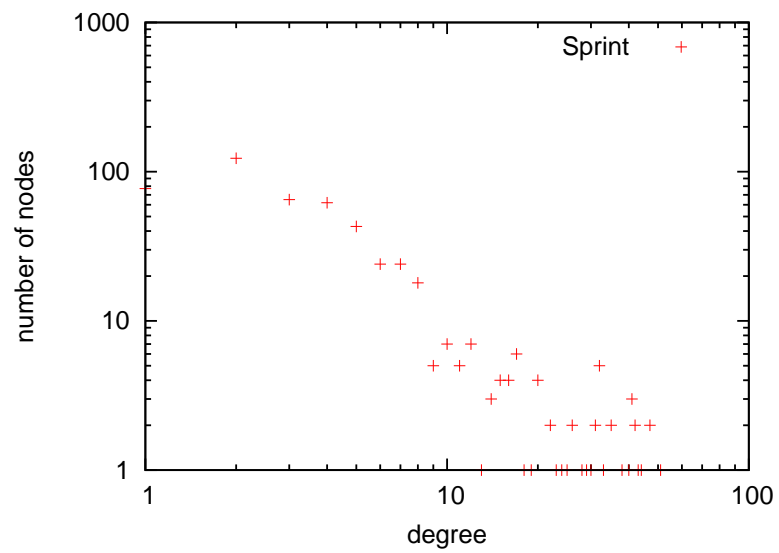


図 3: トポロジの出線数分布: Sprint ネットワーク

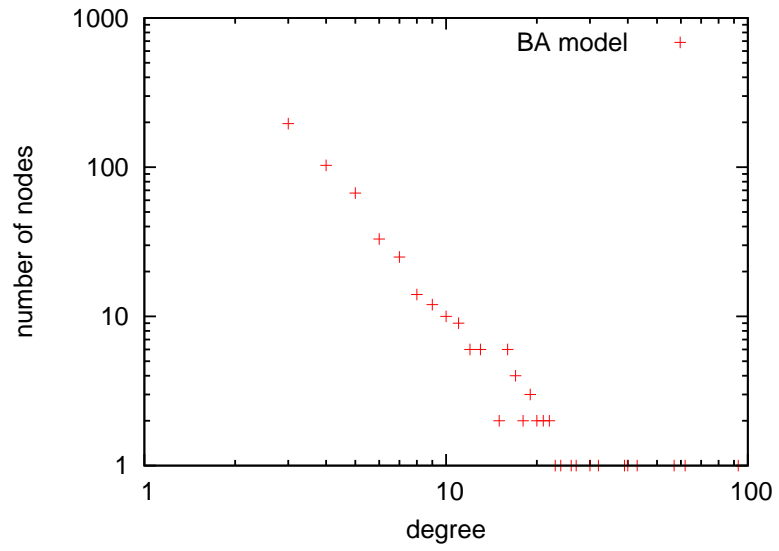


図 4: トポロジの出線数分布: BA ネットワーク

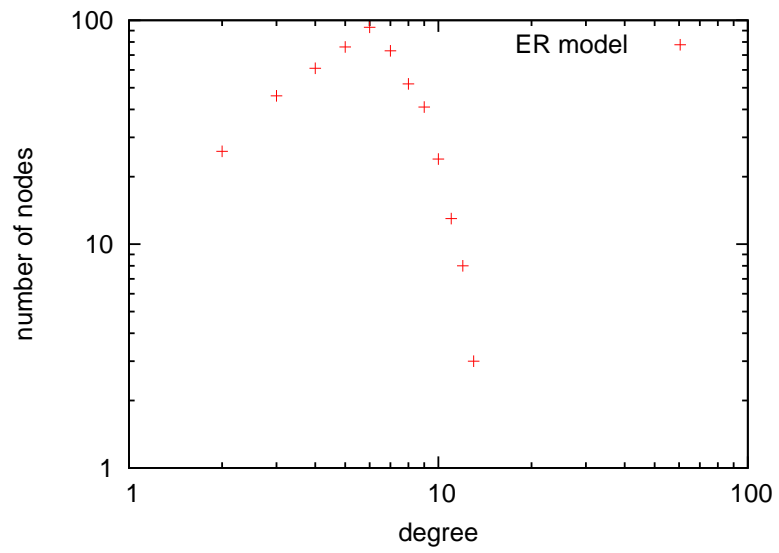


図 5: トポロジの出線数分布: ER ネットワーク

3.1.1 経路制御手法

本報告では、ルータレベルインターネットにおける負荷特性の評価を行うための経路制御手法として、OSPF (Open Shortest Path First) とフロー偏差法を使用した経路制御手法を用いる。前者はルータレベルのインターネットでもっとも一般的に使用されているものであり、後者は何らかの評価指標が与えられたときに最適な経路を決定する手法のうちのひとつである。本報告では、これらの2つの経路制御を比較することにより、ルータレベルインターネットにおける現状でのトラヒック耐性とネットワークが持つ潜在的なトラヒック耐性との比較および、負荷特性の評価を行うことを目的としてこの2つの経路制御手法の評価を行う。以下は各経路制御手法の説明である。

OSPF (Open Shortest Path First) に基づく経路制御手法

OSPF (Open Shortest Path First) はドメイン内の (ルータレベル) の経路制御プロトコルとして最も一般的に使用されているリンクステート型の経路制御方式である。OSPF ではすべてのリンクにコストが与えられ、ノード i から j へのトラヒックは i から j への経路の中で、経由するリンクのコストの合計値が最も小さくなる経路を選択して送信される。また、OSPF では、リンクの利用状況に変動があると、LSU (Link State Update) メッセージの広告を行い、その際に各ノード間の経路の再計算をそれぞれのノードが行う。OSPF のリンクコストは、ネットワークのオペレータが変更することができる。コストの与え方としては、1) 実際の距離に比例した値、2) リンクの回線容量に反比例した値、3) すべて同じ値、などが挙げられる。本報告では、最も一般的に使用されている 3) の方法でリンクコストを与えた場合に、アクセス回線の高速化がべき乗則に従うネットワークに与える影響を評価する。

フロー偏差法に基づく最適経路制御アルゴリズム

フロー偏差法とは、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である。フロー偏差法は、各送受信ノードペア間のフローが最適に割り当てられたとき、各フローは、最小にすることを目的とする遅延時間などの関数を微分した値が最小となるように割り当てられているという事実を利用したものである。この事実を利用して、フロー偏差法では、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。

決定された各ノードペア間の経路は、リンクの最大利用率を抑えるという点でほぼ最適な経路となる。この手法の具体的なアルゴリズムは以下のように表される。

Step 0: Dijkstra のアルゴリズムを用いてパス集合 $x = \{ x_p \}$ を求める

Step 1: リンク i に対して

$$D_i = 1/(C_i - F_i) \quad (2)$$

を求める (F_i はリンク i を流れるフロー量、 C_i はリンク i の持つ伝送能力)。

Step 2: 式 2 の F_i での偏微分

$$\partial D_i / \partial F_i = 1/(C_i - F_i)^2 = w_i \quad (3)$$

を求める。

Step 3: リンク i のコストを w_i とし、Dijkstra のアルゴリズムで SP (Shortest Path) を求める。

Step 4: Step 3 によって求めた経路集合を $x' = \{ x'_p \}$ とする

Step 5: 経路集合 x と x' を比較し、異なる経路の集合を y とする

Step 6: y のある部分集合を y_s とする

Step 7: x のうち y_s だけ経路を変更した時の経路集合を z とする

Step 8: 各 z に対して、

$$D = \sum_i D_i \quad (4)$$

を求め、もっとも D が小さくなるような z を求める

Step 9: z の D が x の D より小さくなる場合には、 z を x として step 2 へ戻る。 z の D が x の D より大きい場合には終了

3.1.2 回線容量設定手法

本報告で評価を行ったネットワークのリンクの回線容量は、3.1 節で述べたように、Cisco 12416 ルータの技術的な制約を考慮したうえで、最小ホップ経路制御を使用したときに最も効率的に設備投資を行ったときに設定されるであろう回線容量を与えている。具体的には、最小ホップ経路制御を使用した際に、ネットワークが最大のトラヒック耐性を持ち、かつ、ルータの能力を最大限に利用できるようなリンクの回線容量を割り当てる。このように回線容量を割り当てることにより、最小ホップ経路制御を使用したときの対象トポロジの最大収容トラヒック量を計算機シミュレーションにより評価することができる。技術的制約のモデルとする Cisco 12416 ルータは、16 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 以下の場合には最大 10 Gbps のリンクを接続することが可能である。しかし、接続するリンクの数が 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（図 6 参照）。

本報告では、このルータの技術的な制約を以下のように簡単化し、リンクの回線容量を決定している。

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 のうちのどれかである

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

以上の制約を考慮して回線容量の決定を行う。基本的には、あるトラヒック要求を仮定し、そのトラヒック要求のトラヒックを発生させたと仮定したときに、各リンクを流れるトラヒック量を計算して、そのトラヒック量を下回らないように、回線容量を与えてゆく。仮定するトラヒック要求が小さい場合には、ルータの技術的制約が問題となることはないが、仮定するトラヒック要求を徐々に増やしていき、1 つのリンクを流れるトラヒック量が 10 Gbps を超えたり、ノードの出線数が多いためにリンクに流れるトラヒック量以上の回線容量をリンクに割り当てることができなくなった場合には、割り当てを行うことができなくなる直前に行った回線容量割当が、対象とするネットワークに対して行う回線容量の割当とな

る。そのときのトラフィック要求はそのままそのネットワークの収容可能トラフィック量となる。

具体的な手順は、以下の通りである。

Step 0: 各ノードから発生するトラフィック量を 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 1: 各リンク i の回線容量 C_i をすべて 10 Gbps とする。

Step 2: 選択を行っていないノードで、もっとも出線数の大きいノードを選択。

Step 3: 選択したノードに接続するリンクの回線容量の和が 320 Gbps 以下である場合には Step 7 へ、そうでない場合は次へ。

Step 4: 選択したノードに接続する各リンク i のランクを 1 ランク落とす (例: $10G \rightarrow 4.8G$)。ただし、ランクを落とした場合、 $F_i > C_i$ となるならばランクは落とさない。また、リンクのランクが、(隣接ノードの影響によって) 落とす予定のランクにすでに落とされている場合にもランクは落とさない。

Step 5: ノードに接続するリンクの回線容量の合計値を計算。

Step 6: 合計値がノードの制約に反している場合には、Step 4 へ戻ってさらにランクを落とす。これ以上 Step 4 へ戻ってランク下げることができない場合には異常終了する。制約に反していなければ次へ。

Step 7: リンクの回線容量の再割当てを行っていないノードがあるならば Step 2 へ、すべてのリンクの回線容量の再割当てを行った場合には次へ。

Step 8: 任意のリンク i において $F_i < C_i$ ならば、正常終了。

以上の手順をトラフィック量 d が大きい値から繰り返して行き、異常終了した場合には、 d を下げて上記の手順を繰り返す。最初に手順が正常に終了したときに各リンクに割り当てられた回線容量 C_i をシミュレーションで使用するリンク i の回線容量とする。

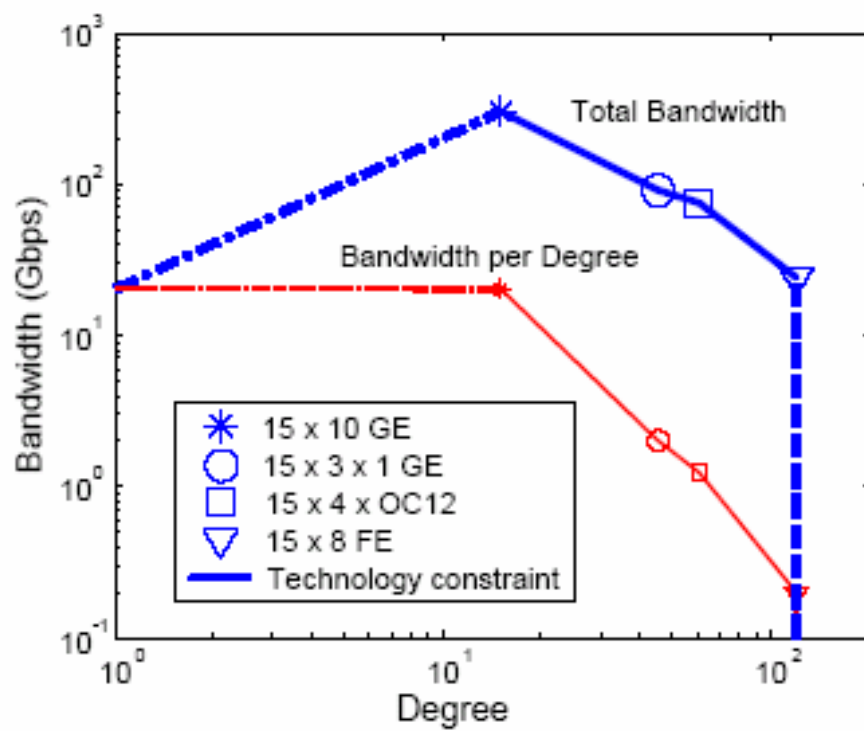


図 6: ルータの技術的制約 [1]

3.2 評価指標

各経路制御手法の性能指標として、リンクの利用率を用いた。ここでのリンクの利用率とは、リンク i に 1 秒間に到着するデータの量を F_i 、リンク i が 1 秒間に送出できるデータの量を C_i とすると、 F_i/C_i で表すものとする。同じ量のトラフィックが流れるネットワークにおいて、バックボーンネットワークのリンクの利用率の最大値が低ければ低いほど収容できるトラフィックの量が多いということを表す。

3.3 計算機シミュレーションによる従来手法の性能評価

本節では、前節までに述べた 2 つ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アクセス回線の高速化に対するバックボーンネットワークの耐性の評価をおこなう。

3.3.1 最大リンク利用率の比較

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表 2 に示す。ratio はフロー偏差法を用いて最適な経路制御を行ったとき、最小ホップ経路制御を行ったときの何倍のトラフィックをコアネットワークが収容できるのかを表している。表からわかるように、Sprint ネットワーク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フィック量が約 600Mbps の時点で最大リンク利用率が 1.0 を超えてることがわかる。これより、最小ホップ経路制御を適用した場合、Sprint のネットワークでは、アクセス回線が 1 Gbps 以上になるとバックボーンネットワークが確実に破綻することがわかる。

また一方で、BA ネットワークにおいては約 590Mbps で最大リンク利用率が 1.0 を超え、ER ネットワークにおいては約 6.0 Gbps で最大リンク利用率は 1.0 を超えることがわかる。これより、ルータの技術的な制約を考えると ER ネットワークのようなランダムネットワークの方がべき乗則に従うネットワークよりもトラフィック量に対する耐性を備えていることがわかる。また、フロー偏差法を用いて最適な経路制御を行った場合、Sprint ネットワークにおいて 2.91 倍ものトラフィック量を収容できることがわかった。ER ネットワークに適用した

表 2: 各トポロジの最大収容トラヒック量

	Sprint	BA モデル	ER モデル
最小ホップ	600 Mbps	590 Mbps	6000 Mbps
フロー偏差法	1750 Mbps	9190 Mbps	14500 Mbps
ratio	2.91	15.6	2.42

場合には約 2.4 倍となり、BA ネットワークにいたっては 15.6 倍のトラヒックを収容可能となることが明らかとなった。

これらの結果より、べき乗則に従うネットワークに対して現状の最小ホップ経路制御手法を適用し続けた場合、バックボーンネットワークが破綻することは明らかであるが、最適な経路制御手法を用いれば、トラヒック増加に対する耐性を大きく改善することができることがわかる。

3.3.2 リンク利用率の分布の比較

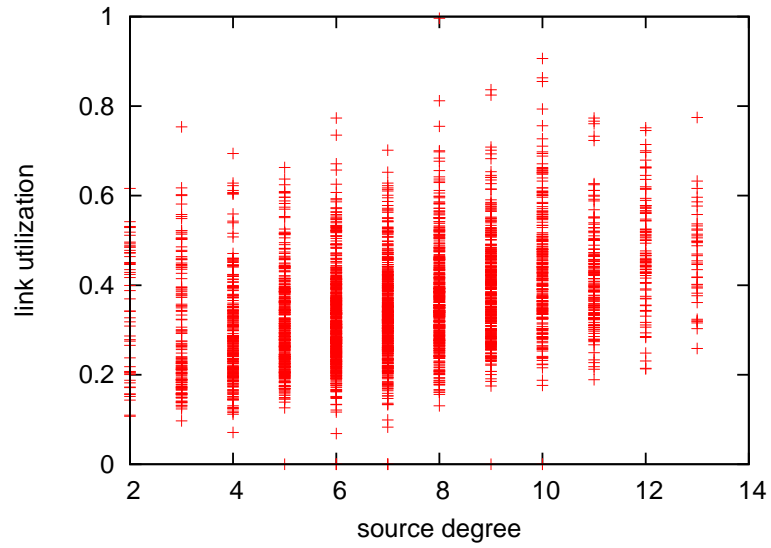
次に、図 7、8、9 にて、計算機シミュレーションによって得られたリンクの利用率の出線数ごとの分布を示す。これらの図では、それぞれのトポロジにおいて、最小ホップ経路制御を使用したときに最大リンク利用率が 1.0 となるときのトラヒックを与えた時の結果を使用している。横軸がリンクのソースノードの出線数、縦軸がそのリンクの利用率である。また、(a) が最小ホップ経路制御手法、(b) がフロー偏差法を使用した経路制御手法を適用したときの結果である。

ER ネットワークでは、最小ホップ経路制御を適用した場合、リンクの利用率に大きな偏りは見られず比較的効率よくネットワークを使用できていることがわかる (図 7(a))。また、フロー偏差法を使用した最適経路制御を適用した場合、リンクの利用率のばらつきはさらに小さくなり、どのリンクもほとんど等しい利用率となっていることがわかる。

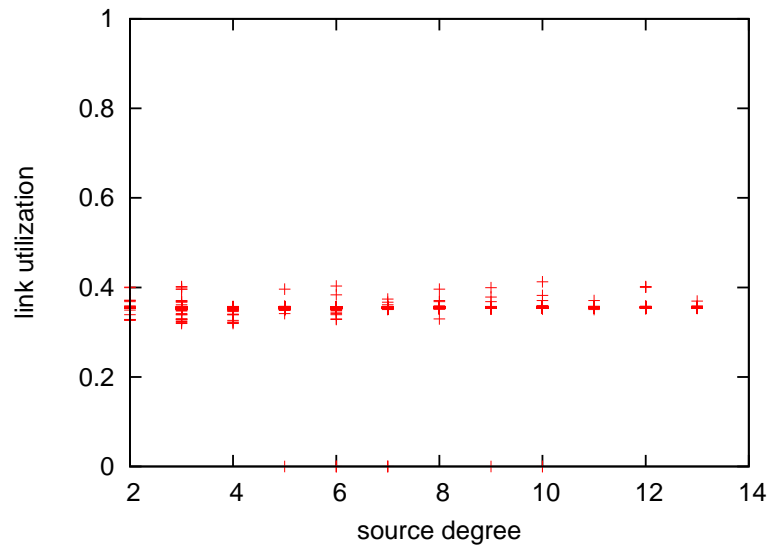
BA ネットワークでは、最小ホップ経路制御を適用するとリンクの利用率に大きなばらつきがあることが観測される。特に、出線数が小さいノードに接続しているリンクはほとんど

使用されていない。一方で、接続するノードの出線数が大きくなるにしたがってリンクの利用率の最小値が大きくなっていくという傾向が見られる。また、出線数の大きなノードから出ているリンクのすべてが高い利用率を持っているわけではなく、逆に、出線数の小さなノードから出力しているリンクの負荷が必ずしも低い利用率であるわけではないということもわかる (図 8(a))。図 8(a) と図 8(b) を比較すると、フロー偏差法を使用した最適経路制御を行った場合、ネットワーク全体のリンクの負荷が大きく下がった。これは、ほとんど利用されていないリンクへ最適経路制御によって負荷が分散されるためである。

一方、Sprint ネットワークでは最小ホップ経路制御手法を適用した場合、リンクの利用率と接続するノードの出線数の相関は少なく、リンクに対する負荷の分散が大きいことがわかる。この傾向は、同じくべき乗則に従う BA ネットワークの場合とは大きく異なる (図 9(a))。フロー偏差法を使用した最適経路制御手法を適用した場合、リンク利用率は全体的に下がってはいるが、その分布はほとんど変わることがなく、この点に関して BA ネットワークの傾向とは大きく異なっていると見える。さらに、出線数が小さなノードに接続しているリンクで、最小ホップ経路制御時に利用率の低かったリンクに着目すると、最適経路制御手法を適用した場合にもその利用率がほとんど変わっていないことがわかる。これより、ルータレベルのべき乗則に従うネットワークである Sprint ネットワークに対しては、他の 2 つのトポロジと比べて最適経路制御の効果が小さいことがわかる (図 9(b))。

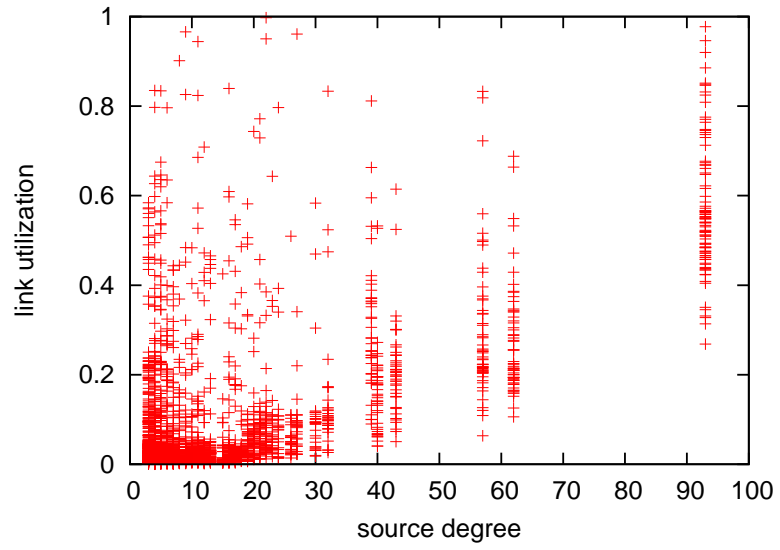


(a) 最小ホップ経路制御

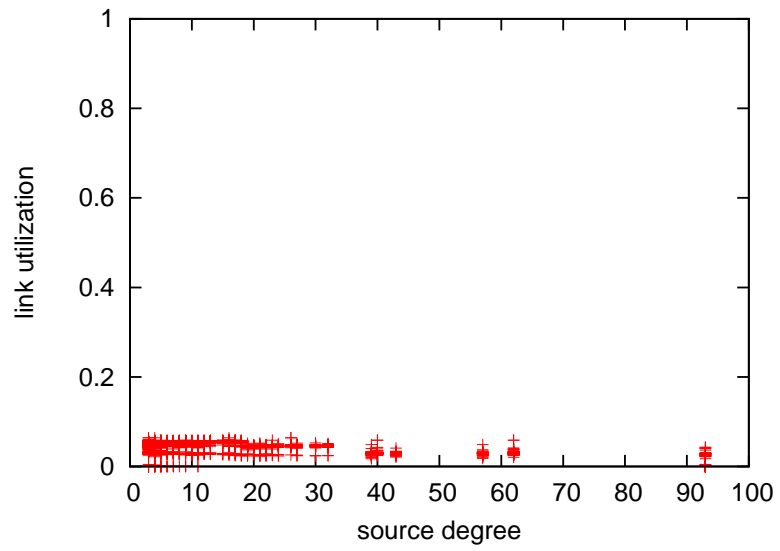


(b) フロー偏差法を使用した経路制御

図 7: ノードの出線数に対するリンク利用率 : ER ネットワーク

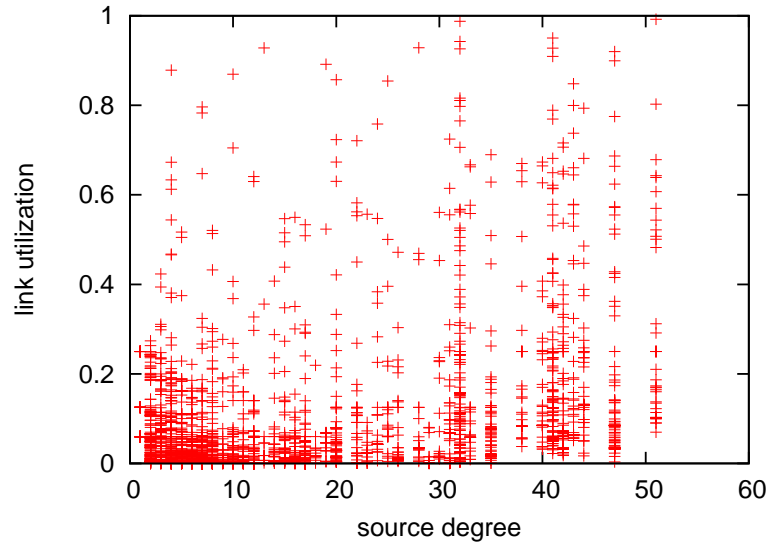


(a) 最小ホップ経路制御

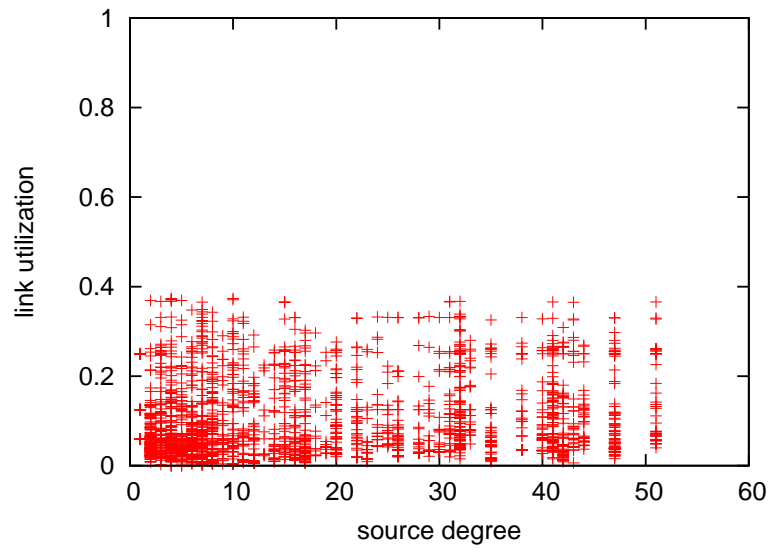


(b) フロー偏差法を使用した経路制御

図 8: ノードの出線数に対するリンク利用率 : BA ネットワーク



(a) 最小ホップ経路制御



(b) フロー偏差法を使用した経路制御

図 9: ノードの出線数に対するリンク利用率 : Sprint ネットワーク

4 べき乗則に従うネットワークに適した経路制御手法の提案

3章では、べき乗則に従うルータレベルのトポロジにおいて最適経路制御手法を用いることで、最大リンク負荷が大幅に下がることわかった。しかし、最適経路制御選択手法は計算時間が膨大となり、実用上利用することは困難である。そこで、本章では、ルータの技術的制約を考慮した発見的手法による経路制御手法を提案する。次に、提案手法を最適経路制御手法と同様の計算機シミュレーションによって調査を行い、その性能を評価する。

4.1 提案手法

本節では、ルータレベルにおいてべき乗則が成り立つ原因であるルータの技術的な制約を考慮し、べき乗則に従うルータレベルのネットワークにおいてトラヒック増加に対する耐性を備えた提案経路制御手法について説明する。

3.1.2節においても述べたように、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大容量回線のものを接続可能であり、ルータの出線数がある一定の値(10~16)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という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、トラヒックに偏りがあるとリンクの利用率が1.0を超える可能性がある。また、出線数の小さなルータに関して、接続するリンクの両端のルータの技術的な制約が影響してくるために、大容量回線であるとは限らない。

そこで本報告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) 回線容量の小さいリンクよりも大きいリンクを優先的に選択することにより、各ルータまでの経路を計算する。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、本報告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Dijkstraの最短経路アルゴリズムを使用し、経路制御の対象となるトポロジとすべてのルータの出線数および、すべてのリンクの回線容量を指標として、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。アルゴリズムの詳細は以下の通りであり、これによ

りルータ i から他のルータまでの経路を決定する。

Step 0: 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、そのリンクの宛先ルータの出線数に比例した値とする。

Step 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、経路の決定していないルータでルータ i から最も小さなコストで到達できるルータ j への経路を決定。

Step 2: Step 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だけ増加させる。

Step 3: ルータ i からの経路が決定していないルータが存在するならば、Step 1 へ、他のすべてのルータへの経路が決定した場合には終了する。

4.2 計算機シミュレーションによる提案手法の性能評価

4.1 節ではルータの技術的制約を考慮し、べき乗則に従うネットワークの性質を反映した経路制御手法を提案した。本節では、べき乗則に従うネットワークにおいて提案手法を用いた場合の性能を計算機シミュレーションにより明らかにする。評価指標、シミュレーションモデルについては、3.1 節で述べたものと同じである。

4.2.1 最大リンク利用率の比較

計算機シミュレーションでは、3.3.1 節と同じく、各ノードペア間に発生させるトラフィック量を増加させてゆき、ボトルネックとなるリンクの利用率が 1.0 を超えたときに、各ノードペア間で生じているトラフィックの量をまず調査した。それぞれのトポロジにおいて、先に述べた条件を満たしたときに各ノードペア間で発生しているトラフィック量を、経路制御手法ごとに表 3 に示す。表 3 からわかるように、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 を超える時のトラフィック量は、Sprint ネットワークにおいて最小ホップ経路制御手法を適用したときの約 1.8 倍となり、フロー偏差法を用いた最適経路制御と適用したときの

表 3: 各トポロジの最大収容トラヒック量

	Sprint	BA モデル	ER モデル
最小ホップ	600 Mbps	590 Mbps	6000 Mbps
フロー偏差法	1750 Mbps	9190 Mbps	14500 Mbps
提案手法	1085 Mbps	5260 Mbps	7670 Mbps

結果に近づいていることがわかる。また、BA ネットワークにおいては Sprint ネットワーク以上に大幅に収容可能トラヒック量を増やすことができている。また、ER ネットワークにおいてはべき乗則に従う他の 2 つのネットワークほど効果は見られなかった。これは、ER ネットワークにおいて、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存在しないたことにより、すべてのリンクの回線容量が 10Gbps となってしまうためである。また、ルータの持つ出線数の数がどのルータにおいてもほとんど変わらないことも原因であると考えられる。

4.2.2 リンク利用率の分布の比較

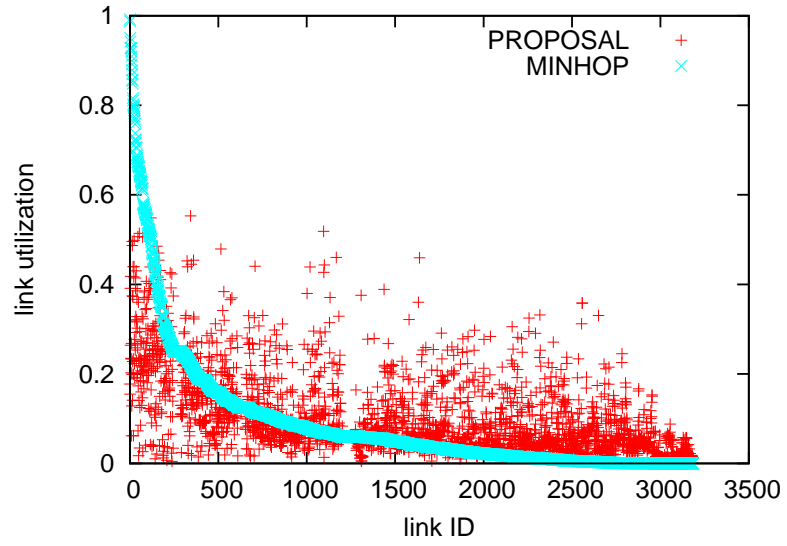
次に、図 10(a)、11(a)、12(a) に計算機シミュレーションによって得られた、最小ホップ経路制御手法を適用したときのリンクの利用率の分布と、提案経路制御手法を適用したときのリンク利用率の分布の比較を示す。これらの図では、それぞれのトポロジにおいて最小ホップ経路制御を使用したときに最大リンク利用率が 1.0 となるトラヒック量を与えた時の結果を示している。図は横軸がリンクの ID となっており、ID は最小ホップ経路制御を適用したときに利用率が高くなる順番にリンクに付与している。また、縦軸はリンク利用率となっている。さらに、最適経路制御手法を適用した時のリンク利用率の分布と最小ホップ経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 10(b)、11(b)、12(b) に示す。

図 10(a) から、Sprint ネットワーク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の分布は最小ホップ経路制御手法を適用したときの分布と大きく異なっていることがわかる。分布を見ると、最小ホップ経路制御において利用率の高いリンクの負荷は分散し、

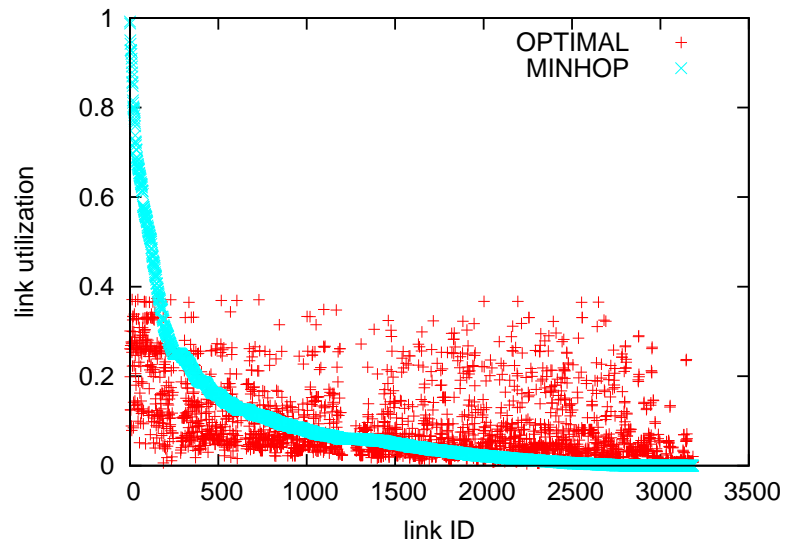
リンク利用率が大きく減少していることがわかる。また、図 10(b) と比較してみると、一部負荷の高い部分が残るものの、最適経路制御を適用した場合と同様の分布を示していることがわかる。

BA ネットワークにおいても、提案経路制御手法を適用した時のリンク利用率の分布は Sprint ネットワークでの結果と同様の傾向を示している (図 11(a))。しかし、BA ネットワークにおいては、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ており、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 ネットワークでは、Sprint ネットワーク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 ネットワークで評価したときと同様の傾向が見られている (図 11(b))。

ER ネットワークにおいては、提案経路制御手法を適用した場合、その他の 2 つのべき乗則に従うネットワークに比べてリンクの回線利用率にばらつき見られた (図 12(b))。これは、今回シミュレーションを行った ER ネットワークに出線数の大きなノードがなく、リンクの回線容量がすべて 10Gbps となってしまうことから、提案手法の回線容量の小さいリンクよりも大きいリンクを優先的に選択するという効果がまったくなかったためであると考えられる。しかし、実在するネットワークでは、リンクの回線容量がすべて同じであるということはほとんどなく、実際には、回線容量に違いがあるため、ランダムネットワークに対しても十分な性能を示すことができると考えられる。

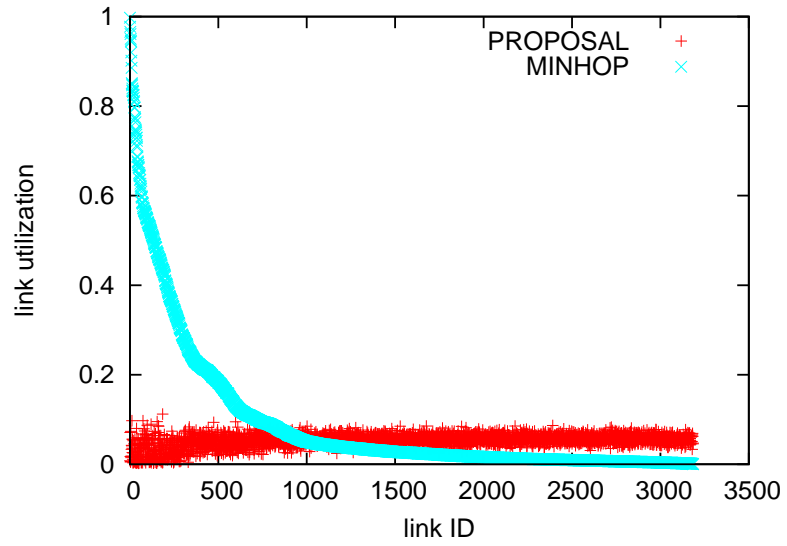


(a) 提案手法による経路制御

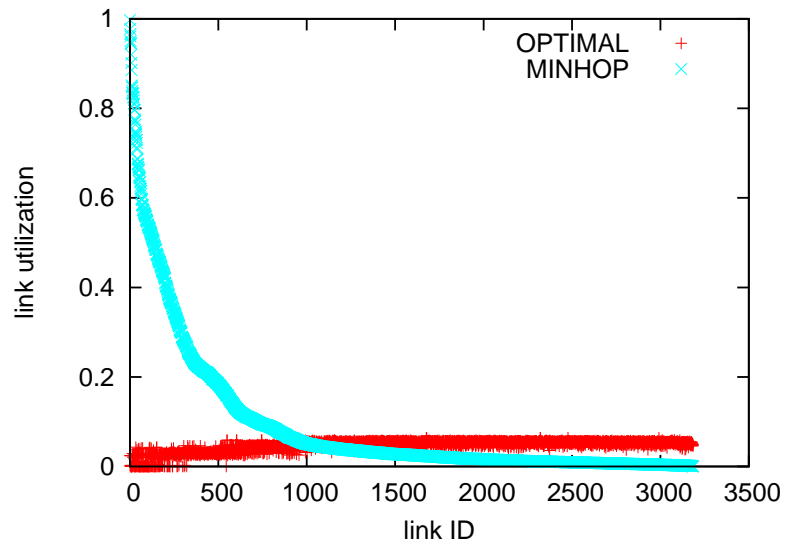


(b) フロー偏差法を使用した最適経路制御

図 10: リンク利用率の分布 : Sprint ネットワーク

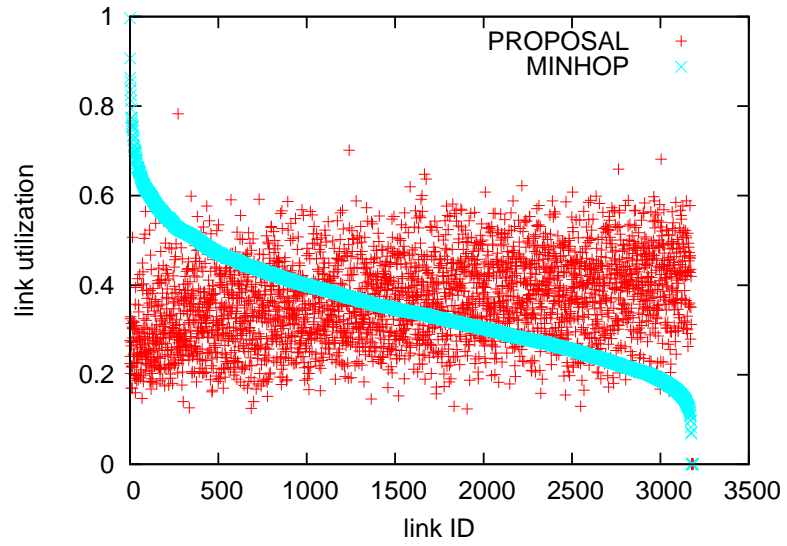


(a) 提案手法による経路制御

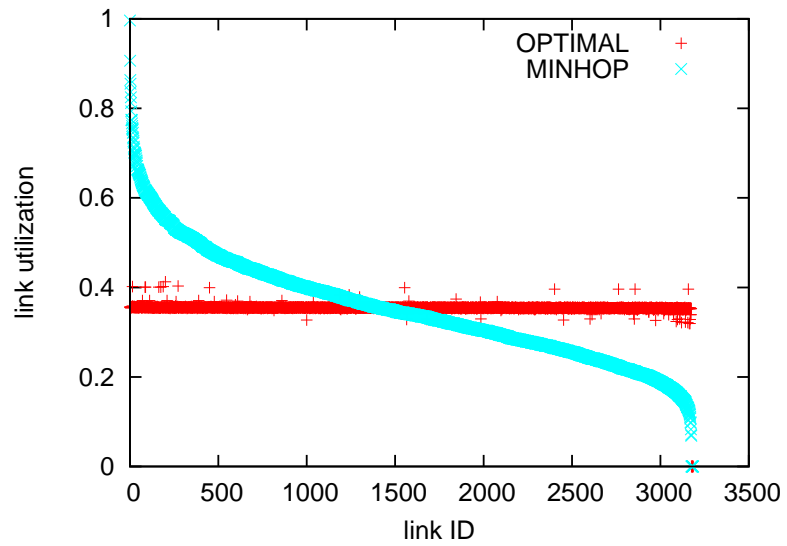


(b) フロー偏差法を使用した最適経路制御

図 11: リンク利用率の分布 : BA ネットワーク



(a) 提案手法による経路制御



(b) フロー偏差法を使用した最適経路制御

図 12: リンク利用率の分布 : ER ネットワーク

5 まとめ・今後の課題

本報告では、インターネットのノードの出線数がルータの技術的な制約によりべき乗則に従うということに着目し、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3分の1に抑えられることがわかった。本報告では、これらの結果を踏まえ、アクセス回線の大容量化に耐えう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るように経路を選択、2) 回線容量の小さいリンクよりも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。このことにより、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低下させることが可能となる。計算機シミュレーションによる評価の結果、実測によって得られた Sprint 社のネットワークにおいて最大リンク利用率を約45%抑えられることが明らかになった。

本報告でシミュレーションを行ったべき乗則に従う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ーを使用している。したがって、今後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ーのモデル化手法は必要不可欠であり、そのようなモデル化手法を考案することが今後の課題として挙げられる。

謝辞

本報告の作成にあたり、ご指導、ご教授いただきました大阪大学情報科学研究科の村田正幸教授に心より感謝を申し上げます。

また、本報告において終始ご指導頂きました大阪大学経済学研究科の荒川伸一助手に深く感謝いたします。

ならびに、日頃からの的確な助言をいただきました大阪大学情報科学研究科の若宮直紀助教授、大阪大学サイバーメディアセンターの長谷川剛助教授、大阪大学情報科学研究科の牧一之進助手、大阪大学サイバーメディアセンターの笹部昌弘助手に心から感謝いたします。

最後に、日頃から様々な相談に応じていただきました福島行信氏、石田晋也氏、徳隆宏氏、牧野暢孝氏をはじめとする村田研究室および中野研究室の皆様方に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 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*, Aug. 2004.
- [2] インターネット白書. インプレス社, 2004.
- [3] “JPIX: Daily traffic,” <http://www.jpix.ad.jp>.
- [4] “わが国のインターネットにおけるトラフィック総量の把握,” http://www.soumu.go.jp/s-news/2005/050125_3.html.
- [5] L. Gao and J. Rexford, “Stable Internet routing without global coordination,” in *Proceedings of ACM SIGMETRICS 2000*, pp. 307–317, June 2000.
- [6] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, “On power-law relationships of the Internet topology,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, pp. 251–262, 1999.
- [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.
- [10] W. Willinger, R. Govindan, S. Jamin, V. Paxson, and S. Shenker, “Scaling phenomena in the Internet: Critically examining criticality,” *Self-organized Complexity in the Physical, Biological, and Social Sciences*, Mar. 2001.

- [11] C. Gkantsidis, M. Mihail, and A. Saberi, “Conductance and congestion in power law graphs,” in *Proceedings of ACM SIGMETRIC*, June 2003.
- [12] K. L. Goh, B. Kahng, and D. Kim, “Universal behavior of load distribution in scale-free networks,” *Physical Review Letters*, vol. 87, Dec. 2001.
- [13] L. Qiu, Y. R. Yang, Y. Zhang, and S. Shenker, “On selfish routing in Internet-like environments,” in *Proceedings of SIGCOMM 2003*, 2003.
- [14] R. Cohen, K. Erez, D. Avraham, and S. Havlin, “Breakdown of the Internet under intentional attack,” *Physical Review Letters*, vol. 86, Apr. 2001.
- [15] M. E. J. Newman, *Random graphs as models of networks*, ch. 2, pp. 35–68. Berlin: WILEY-VCH, 1 ed., Nov. 2002.
- [16] J. M. Carlson and J. Doyle, “Highly optimized tolerance: A mechanism for power laws in designed systems,” *Physical Review E*, vol. 60, pp. 1412–1427, Aug. 1999.
- [17] A. Fabrikant, E. Koutsoupias, and C. H. Papadimitriou, “Heuristically optimized trade-offs: A new paradigm for power law in the Internet,” in *Proceedings of the 29th International Colloquium on Automata, Languages and Programming*, pp. 110–122, July 2002.
- [18] R. Albert and A.-L. Barabási, “Statistical mechanics of complex networks,” *Reviews of modern physics*, vol. 74, pp. 47–97, Jan. 2002.
- [19] S. Arakawa, T. Takine, and M. Murata, “An evaluation of routing algorithms in power-law networks,” *submitted to IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC 2005)*.
- [20] M. Kim and M. Médard, “Robustness in large-scale random networks,” in *INFOCOM 2004*, Mar. 2004.
- [21] John Moy, “OSPF Version 2,” *IETF RFC 2328*, Apr. 1998.

[22] "Rocketfuel: An ISP Topology Mapping Engine," <http://www.cs.washington.edu/research/networking/rocketfuel/>.

[23] "Cisco systems," <http://www.cisco.com/>.