

特別研究報告

題目

インターネットのトポロジ構造が輻輳伝播現象に与える影響

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

平山 孝弘

平成 20 年 2 月 19 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

インターネットのトポロジ構造が輻輳伝播現象に与える影響

平山 孝弘

内容梗概

インターネットのトポロジを観測した結果、出線数分布がべき則に従うことが明らかとなっている。出線数分布がべき則に従うとは、 k 本のリンクを持つノードの出現確率 $P(k)$ が $k^{-\gamma}$ (γ は定数) に比例することであり。出線数に関するべき則の性質は、インターネットトポロジに限らず、社会ネットワーク、代謝ネットワークなどの大規模ネットワークにおいても観測されることが知られている。しかし、近年は、インターネットトポロジと社会ネットワークとはトポロジ構造が異なることが指摘されている。すなわち、べき則というトポロジ特性のひとつのみに着目してネットワーク性能の良し悪しを議論するのは不十分であり、現実の ISP のルータレベルトポロジが有する特性として何を説明したいか、適用領域として何を考えるか、が重要である。本報告ではインターネットにおけるパケットの混雑に着目し、インターネットトポロジにおいてパケットの混雑状況がどのように伝播するのかを明らかにする。既存のトポロジ生成手法で生成されたトポロジとインターネットトポロジを対象とし、ルータ間でフロー制御が行われた場合のパケットの混雑状況を計算機シミュレーションによって明らかにする。評価の結果、既存のトポロジ生成手法で生成されたトポロジはパケットの混雑がネットワーク全体に伝播しやすい性質を持つ一方で、インターネットトポロジでは混雑が伝播しにくい構造を有することが明らかになった。また、既存のトポロジとインターネットトポロジの構造比較の結果、混雑の伝播のしにくさがトポロジのモジュール構造によるものであることが明らかになった。

主な用語

べき則、インターネットトポロジ、ルータレベルトポロジ、輻輳、フロー制御、BA モデル

目次

1	はじめに	4
2	関連研究	6
2.1	スケールフリートポロジ	6
2.1.1	BA(Barabási-Albert)モデル	6
2.2	インターネットのトポロジ	6
2.2.1	AS(Autonomous System)レベルトポロジ	7
2.2.2	ルータレベルトポロジ	7
2.3	輻輳伝播現象	7
3	ISPトポロジにおける輻輳伝播現象	10
3.1	シミュレーションモデル	10
3.1.1	ネットワークトポロジ	10
3.1.2	トラヒックモデル	10
3.1.3	ノード処理モデル	11
3.1.4	経路制御	11
3.2	評価結果	11
3.2.1	輻輳の発生状況	11
3.2.2	輻輳伝播の様子	12
3.3	輻輳を伝播しにくいトポロジ構造	20
3.3.1	PZ指標によるトポロジ構造の比較	20
3.3.2	モジュール構造による輻輳伝播の抑制	23
4	おわりに	25
	謝辞	26
	参考文献	27

目 次

1	輻輳伝播現象	8
2	BA トポロジにおける輻輳の発生状況	13
3	AT&T トポロジにおける輻輳の発生状況	14
4	Sprint トポロジにおける輻輳の発生状況	15
5	各トポロジにおけるパケット発生率 R と輻輳したリンク数の相関関係	16
6	BA トポロジにおける輻輳したリンク数と最大の部分グラフの大きさの推移	17
7	AT&T トポロジにおける輻輳したリンク数と最大の部分グラフの大きさの推移	18
8	Sprint トポロジにおける輻輳したリンク数と最大の部分グラフの大きさの推移	19
9	パケット発生率 R と輻輳したリンクによる部分グラフの数の相関関係	20
10	Participation coefficient と Within module degree を用いたノードの役割の 分類	21
11	PZ 指標を用いたノード特性の分類	22
12	BA トポロジ、ISP トポロジの構造モデル	24

1 はじめに

インターネット利用者数の増大によるネットワークの大規模化にともない、分散ネットワーク制御の重要性が高まっている。その一方で、いくつかのインターネットのトポロジに関する研究の結果、インターネットのトポロジはノードの出線数分布がべき則に従うことが明らかとなっている。べき則に従うトポロジでは、 k 本のリンクを持つノードの出現確率 $P(k)$ が $k^{-\gamma}$ (γ は定数) に比例する。そのため、一部のノード (以降、ハブノードと呼ぶ) に多数のリンクが接続され、多数のノードはごく少数のリンクが接続される。

近年、出線数分布がべき則に従うトポロジの性質について、広く研究がなされている。例えば、[1] では出線数分布がべき則に従うトポロジ生成手法である BA モデルが示されている。BA モデルは、トポロジに1つずつノードを追加していく Incremental Growth と、新たなリンクを持つ確率が既存のリンク数に比例する Preferential Attachment の2つの規則に基づくトポロジ生成手法である。また、文献 [2] ではべき則に従うトポロジにおいて、最短経路制御を適用するとノードを経由するノードペア数の分布がべき則に従うことが明らかにされている [2]。しかし、これらの文献においては、べき則に従うトポロジとして BA モデルで生成したトポロジが広く用いられているものの、BA モデルで生成したトポロジと現実のインターネットのトポロジとは構造およびネットワーク性能が大きく異なるという指摘もなされている [3, 4, 5]。特に、現実のインターネットではルータ間、エンドホスト間でそれぞれフロー制御が行われることから、[2] のように、経由するノードペア数のみでトポロジの性質を議論することは不十分である。

文献 [3] では、同じ出線数分布を有するいくつかのトポロジを挙げ、ノードが処理可能なトラフィック量の制約下でそれぞれのトポロジの収容可能なトラフィック量を比較している。その結果、同じ出線数分布を持つトポロジであっても、構造上の違いに依存して収容可能なトラフィック量には大きな違いがあることが示されている。

文献 [6] では、WWW を模した大規模トポロジを対象にして、輻輳の伝播に関する研究がなされている。ここでいう輻輳とは、ノードが持つ有限長のバッファに空きがなくなり、新たにパケットを受け取れなくなった状態のことを指す。受け取れなくなったパケットは隣接ノードのバッファで待機し、待ち行列が形成される。待ち行列が解消されなければ、隣接ノードもまた輻輳を起こして、パケットを受け取らなくなり、さらに多くの待ち行列が形成される。輻輳による隣接ノードでの待ち行列の形成、待ち行列によって生じる輻輳、新たに生じた輻輳による待ち行列の形成を繰り返して、輻輳が周辺ノードへと広がっていく。これを輻輳の伝播と呼ぶ。文献 [6] では、多くのリンクを持つハブにパケットが集中するために輻輳を起こしやすく、ハブとハブが短い距離でつながっていることが多いために、輻輳が拡散しやすいと述べている。輻輳を伝播しやすいトポロジでは、ある一点で生じた輻輳がネッ

トワーク全体に広がり、パケットが一切転送できなくなるという事態が起り得るとい脆弱性を持つ。

結局のところ、べき則というトポロジ特性のひとつのみに着目してネットワーク性能の良し悪しを議論するのは不十分であり、そのために [3] や [7] が提案されているが、現実の ISP のルータレベルトポロジが有する特性として何を説明したいか、適用領域として何を考えるか、が重要である。本報告ではインターネットにおける輻輳に着目し、インターネットトポロジにおいて輻輳がどのように伝播するのかを明らかにする。輻輳が発生しやすいノード／リンク、また、どのようにして輻輳が伝播していくのかを知ることで、ルータの接続関係や回線容量などの効率のよい設計手法へと応用することが可能になる。

そのため、インターネットのトポロジが輻輳を伝播しやすい構造かどうかを明らかにするためには、トポロジ生成手法により作られたトポロジを対象にした研究だけではなく、実際の ISP トポロジを対象にした調査も必要である。本報告では、トポロジ生成手法で生成されたトポロジとインターネットトポロジを対象とし、ルータ間でフロー制御が行われた場合の輻輳状況を計算機シミュレーションによって明らかにする。評価の結果、BA モデルで生成されたトポロジは輻輳がネットワーク全体に伝播しやすい性質を持つ一方で、インターネットトポロジが輻輳を伝播しにくい構造を有することが明らかになった。さらに、文献 [7] のトポロジ生成手法を用いていくつかのトポロジを生成して評価を行った結果、輻輳の伝播のしにくさが、トポロジのモジュール構造によるものであることが明らかになった。

本報告の内容は以下の通りである。まず 2 章において研究の対象となるトポロジの特徴や、輻輳伝播現象についての関連研究の内容を述べる。3 章では、各トポロジを対象にしたシミュレーションの結果から、ISP トポロジが輻輳を伝播しにくい構造であることを述べ、輻輳の伝播しにくさが、ISP トポロジのモジュール構造にあることを明らかにする。最後に本報告のまとめと今後の課題を 4 章で述べる。

2 関連研究

2.1 スケールフリートポロジ

出線数分布がべき則に従うネットワークは、スケールフリーなネットワークとも呼ばれ、 k 本のリンクを持つノードの出現確率 $P(k)$ が、 $P(k) = k^{-\gamma}$ (γ は定数) で表されるという性質を持つ。このようなネットワークでは少数のノードが多数のリンクを占める一方で、多数のノードが持つリンク数は少ないという特徴がある。ただし、出線数分布が定まれば、トポロジが唯一に決定される訳ではない。文献 [3] では、同じ出線数分布を持つ複数のトポロジを列挙し、それらの特性と性能の関係が示されている。

2.1.1 BA(Barabási-Albert) モデル

べき則に従うトポロジを生成する手法の1つにBAモデルがある [1]。BAモデルは、(1) ノードを1つずつ追加する Incremental Growth と、(2) リンク数が大きいほど新たなリンクを得る確率が高くなる Preferential Attachment の2つの規則によるトポロジ生成手法である。BAモデルでは以下の手順でトポロジを生成する。

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 未満であれば 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 : 追加したノードが式 (1) の確率に従い、他の $m(\leq m_0)$ の相異なるノードへリンクを接続する (Preferential Attachment)。Step 2 へ。

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

BAモデルで生成されるトポロジには多数のリンクを持つハブが存在し、ハブ同士が少ないホップ数でつながっていることが多いために、ノード間の最小ホップ数が小さくなるスモールワールド (Small-World) 性を持つことが明らかにされている [8]。

2.2 インターネットのトポロジ

近年、いくつかの研究において、インターネットのトポロジがべき則に従うことが明らかにされている [9, 10, 11]。

2.2.1 AS(Autonomous System) レベルトポロジ

AS間の接続状況を計測した結果、ASレベルトポロジがべき則に従うことが示されている[9]。ASレベルとは、1つのASをノード、AS間を接続する相互リンクをリンクとみなした場合のことである。AS間の接続状況は、AS間で使用されるルーティングプロトコル、BGP (Border Gateway Protocol) の経路表により確認できる。AS間の接続状況を計測した結果、比較的多くの出力リンクを持つAS (ハブノード) 同士が接続され、ハブノードがトポロジーの中心に位置する傾向が観測された。

2.2.2 ルータレベルトポロジ

ASレベルのトポロジーと同様に、ルータレベルのトポロジーもべき則に従うことが明らかにされている。ルータ間の接続状況は、traceroute コマンドにより確認できる。ルータレベルのトポロジーがべき則に従う理由には、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) から利用者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結果 [12]、2) ネットワークの信頼性を高めようとする結果 [13]、3) ルータ機器などの製品の能力 [3] などが挙げられている。

2.3 輻輳伝播現象

近年では、出線数分布がべき則に従うトポロジにおける輻輳の伝播現象についての研究もされている [6, 14]。これらの文献ではスケールフリーなトポロジにおいて、各ノードに有限長のバッファを設け、ルータ間でフロー制御を行うと、ネットワーク全体に輻輳が伝播する現象について述べている。ここでいう輻輳とは、バッファに空きがなくなり新たにパケットを受け取ることができなくなった状態を指す。受け取られなかったパケットは隣接ノードのバッファ先頭で受け取り可能になるまで待機し、隣接ノードのバッファには待ち行列が形成される。待機状態が続くと、隣接ノードのバッファも待ち行列によって空きがなくなり、隣接ノードもまた輻輳する。こうしてネットワークの広い範囲に輻輳が伝播していく (図1)。

文献 [6] では、WWWを模したトポロジでは、パケット生成率が上昇するにつれて輻輳の伝播現象が変化していく現象について述べている。生成率に比例した数のパケットが毎秒発生し、ランダムに選んだ2つのノード間を移動する。パケット生成率が低ければ、輻輳が起こればパケットは安定して目的のノードに届く。パケット生成率が高くなるにつれて輻輳が発生するようになり、パケット生成率が閾値を超えると、輻輳がネットワーク全体に拡散し、ネットワークがパケットを一切転送できなくなってしまう。文献 [6] では、使用したト

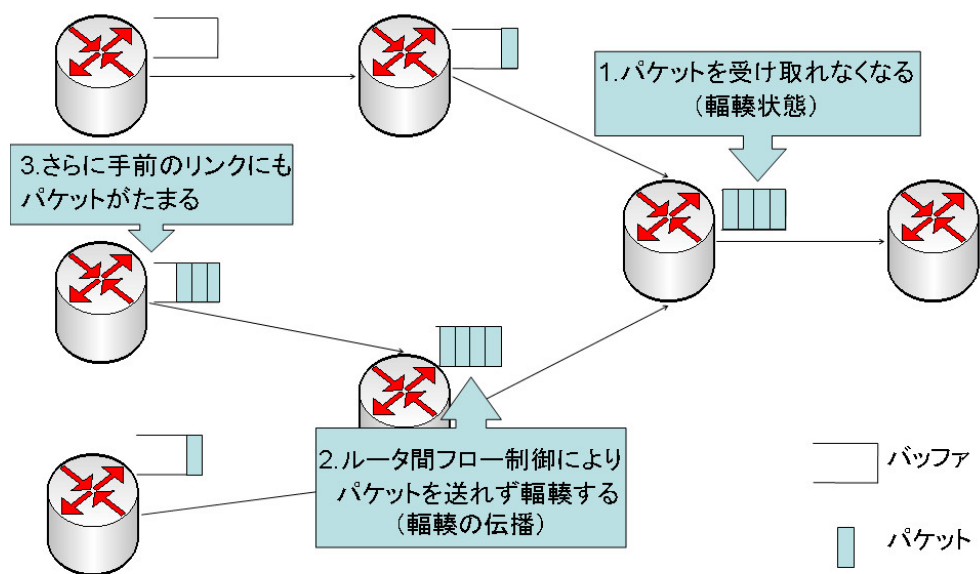


図 1: 輻輳伝播現象

ポロジがハブとハブが短い距離でつながっているために、あるハブで起きた輻輳が別のハブにも伝播し、それらのハブからネットワーク全体に輻輳が拡散していくと述べている。

文献 [14] では、輻輳を回避するための手段として、ルーティングアルゴリズムにランダム性を組み込むことと、一定時間輻輳が続いたノードのバッファからパケットを廃棄する手法を提案している。この文献では BA モデルを用いて生成したトポロジを対象としてシミュレーションを行っており、全てのパケットが目的ノードまでの最短経路移動すると、はじめはリンク数の多いハブで輻輳が起り、リンク数の少ないノードへと輻輳が伝播していくと述べている。ここで、1割～2割程度のパケットが最短ではない経路を移動するようにルーティングアルゴリズムを変更すると、輻輳がネットワーク全体に拡散するまでの時間を遅くすることができ、さらに一定時間輻輳が続いたノードのパケットを廃棄させることで、ネットワークがパケットを転送できない状態に陥ることを防ぐことができると述べている。

いずれの文献でも、トポロジ生成手法に基づいて生成されたトポロジを対象にした研究の結果であり、現実の ISP トポロジを対象にした評価はされていない。ISP ルータレベルトポロジは、従来のトポロジ生成手法に基づくトポロジとは構造が大きく異なる。そのため、生成モデルによって作られたトポロジを対象にした性能評価だけでは不十分であり、現実の ISP トポロジを対象にした評価を行うことは、輻輳を伝播しやすいトポロジ、伝播しにくいトポロジが持つ構造的特徴を明らかにするために重要である。

3 ISP トポロジにおける輻輳伝播現象

この章では、AT&T 社と Sprint 社のトポロジ、BA モデルを対象にしたシミュレーションを行った結果を比較し、ISP トポロジが輻輳を伝播しにくい構造であるかを検証する。

3.1 シミュレーションモデル

まず、本報告で使用したシミュレーションのモデルについて説明する。

3.1.1 ネットワークトポロジ

ネットワークのモデルとして、米国の通信会社である AT&T 社と Sprint 社のルータレベル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[] ツールを用いて計測されたものである。これらのトポロジの出力リンク数の分布はべき則に従う。また、比較のために Sprint トポロジと等しいノード数とリンク数を持つ BA トポロジを使用したシミュレーションも行った。

ルータレベルトポロジでは、ルータ機器の製品の能力に制限があるため、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。ハブノードはアクセスノードのトラヒックの収容に使用され、多くのリンクを持つノード同士が接続している傾向が強い BA トポロジとはハブノードの位置が大きく異なる。

3.1.2 トラヒックモデル

ネットワーク内の全てのノードは、バッファに空きがあれば毎秒確率 R でパケットを生成する。ただし、自身が持つ全てのリンクのバッファに空きがないノードはパケットを生成しないため、輻輳したリンクが増えると、実質パケット生成率は R よりも低くなる。あるノードで発生したパケットは、ランダムに選んだ別のノードへ向かって移動する。ランダムに選んだノードをパケットの送信ホストとすることは、実際のインターネットとはかけ離れている。しかし、実装が容易なことと、ネットワークトポロジのこういった箇所輻輳が発生し、それが伝播していくかを知るには、このモデルで十分であると判断し、このモデルを使用した。

3.1.3 ノード処理モデル

各ノードは自身が持つリンク毎にそれぞれ同じサイズのバッファを持っており、毎秒バッファ先頭の packets を 1 つ隣接ノードに送る。1 秒間に 2 個以上の packets を受け取った場合、処理しきれない packets は各リンクのバッファに貯えられる。リンクのバッファに空きがなくなった場合、そのリンクへ向かう packets の受け取らなくなる。これを輻輳状態と定義する。受け取られなかった packets は 1 ホップ手前のリンクのバッファ先頭で受け取られるまで待機する。packets が長時間移動しなければ、バッファ内には packets がたまり、やがて輻輳する。

3.1.4 経路制御

各ノードは packets を受け取る際、その packets の宛先が自身の周辺にあるかを検索する。宛先となるノードが見つければ、そのノードへ向かう最短経路となるリンクのバッファに packets を入れる。このとき、選んだリンクバッファに空きがなければ、packets の受け取りを拒否する。自身の周辺を検索しても宛先のノードが見つからなかった場合、自身の持つリンクからバッファに空きがあるリンクをランダムに選び、そのバッファに packets を入れる。この経路制御手法を用いることで、完全にランダムに移動するよりも輻輳が伝播しやすく、最短経路制御を用いた場合よりも輻輳が広域に伝播するまでの時間を遅くすることができる。変化の速度を遅くすることができるため、より詳細な分析が行えると判断し、この経路制御手法を用いた。

3.2 評価結果

3.2.1 輻輳の発生状況

図 2 は、BA トポロジにおける系内 packets 数の推移 (図 2(a)) と、バッファに空きがなくなり、輻輳を起こしたリンク数の推移 (図 2(b)) をプロットしたものである。なお、系内 packets 数が限界に達した段階でシミュレーションは停止している。BA モデルでは、 R が低ければ系内 packets 数は少なく、平均値周辺をゆらぎをながら推移しているが、 R が高くなると、系内 packets 数、輻輳リンク数の両方が急激に上昇し、回復が不可能な状況になってしまう。この結果は、文献 [6] とも一致している。一方、現実の ISP トポロジである AT&T トポロジ (図 3) や Sprint トポロジ (図 4) では、BA トポロジと比べると低い packets 生成率でも、ネットワーク内を packets が移動できなくなってしまう。しかし、2 つの ISP トポロジでは、ともに系内 packets 数は急上昇することなく、緩やかに上昇している。図 2 と図 4 を比較すると、輻輳したリンクの数が急激に増加する直前、Sprint トポロジ

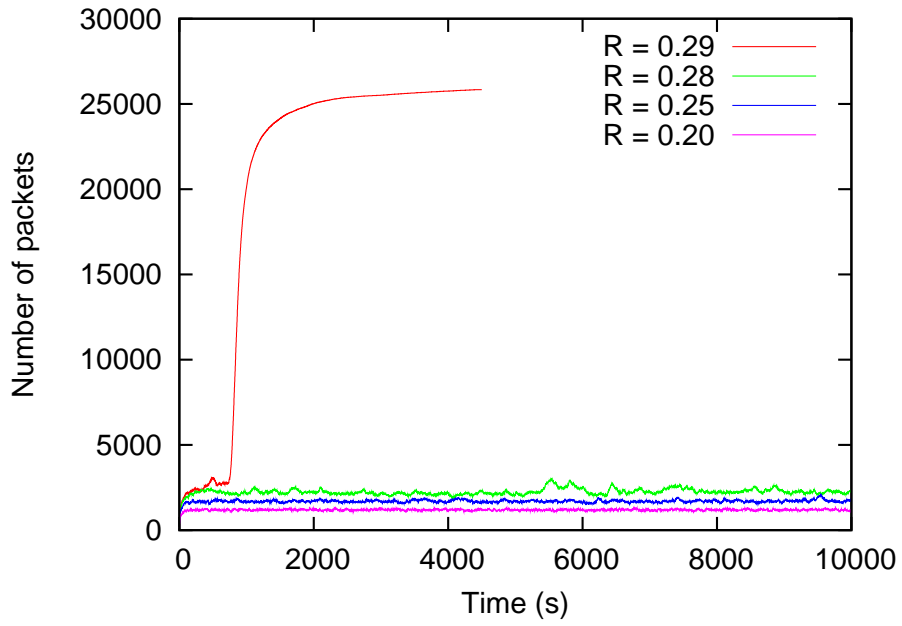
では 20,000 を超える数のパケットを収容しているのに対して、BA トポロジで収容しているパケット数は 3000 個前後と少ない。さらに輻輳を起こしたリンクの数も、100 本未満という非常に少ない状態から、数百秒の間に 2000 本以上のリンクが輻輳を起こしている。このことから、BA トポロジでは、パケット発生率が高くなると、系内パケット数が少なくても一部にパケットが集中することで輻輳が起り、さらにその輻輳がネットワーク全体に短い時間で伝播してしまい、パケットが転送できなくなってしまうことがわかる。つまり、BA トポロジでは、ある場所で輻輳が発生すると、それが致命的なダメージとなってネットワーク全体でパケットを転送できなくなるという事態に陥る可能性が考えられる。一方、ISP トポロジでは、BA トポロジよりも低いパケット生成率でパケットを転送できなくなっているが、転送機能が失われるまでに収容できるパケットの数は BA トポロジに比べると高い。つまり、一部で発生した輻輳が、ネットワーク全体でパケット転送ができなくなるほど致命的なものとはなっておらず、BA トポロジよりも輻輳を伝播しにくいためにこういう現象が起こっていると考えられる。

各トポロジにおける輻輳が発生する様子を比較するために、 R を上昇させていったときに輻輳したリンク数がどのように変化するかを調査した。図 5 は、パケット発生率 R と、定常状態における輻輳したリンク数の平均値の相関関係をプロットしたものである。BA トポロジでは、 R の値が 0.28 以下の状態では輻輳したリンクの数が約 10 本程度と非常に少ないが、0.29 に上がると 2000 本を超え、急激に増加していることがわかる。一方、ISP トポロジでは、BA トポロジと比べると、パケット生成率の変化への反応は鈍く、 R が 0.01 上昇しただけで輻輳したリンク数が 100 倍以上増加することもなく、緩やかに増加している。このことから、ISP トポロジは、BA トポロジに比べるとパケット生成率の変化には強いものと考えられる。

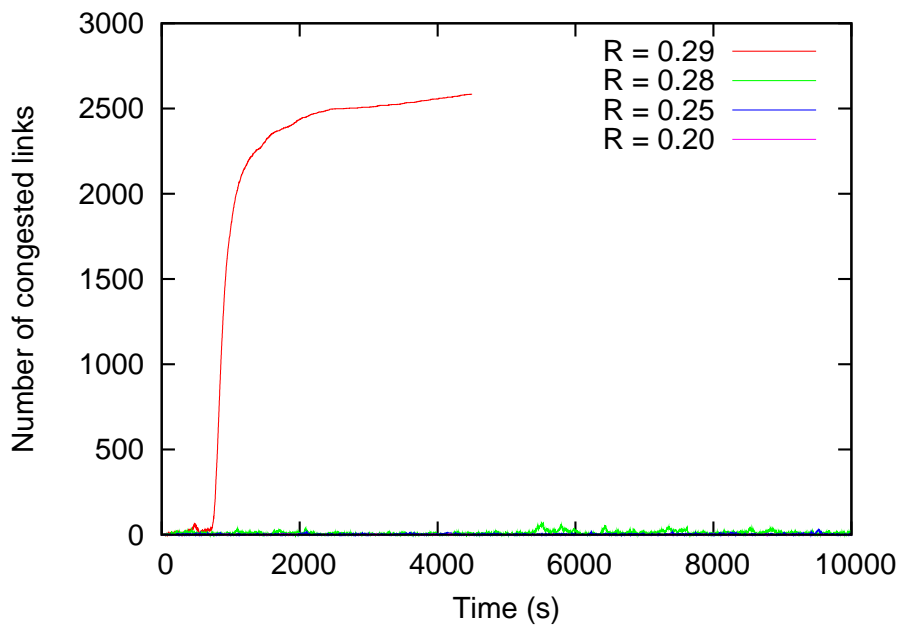
3.2.2 輻輳伝播の様子

輻輳を起こしたリンクが離れた場所に位置していれば、それらのリンクの間で輻輳は伝播していないと言える。そこで、もとのトポロジから輻輳を起こしたリンクのみを抜き出した部分グラフの大きさと出現数を計測した。

図 6～図 8 は、各トポロジにおける、輻輳したリンク数の合計と、輻輳したリンクによってできる部分グラフの大きさの最大値の推移をプロットしたものである。それぞれ、シミュレーション時間中パケットを滞りなく転送できていた場合と、パケットを全く転送できなくなった場合の結果を載せている。図 6 では、輻輳したリンク数の合計と最大の部分グラフの大きさが非常に近い値で推移していることがわかる。つまり、輻輳したリンク同士が近い場所に存在しており、それらのリンクの間で輻輳が伝播している可能性が高い。一方、2つの

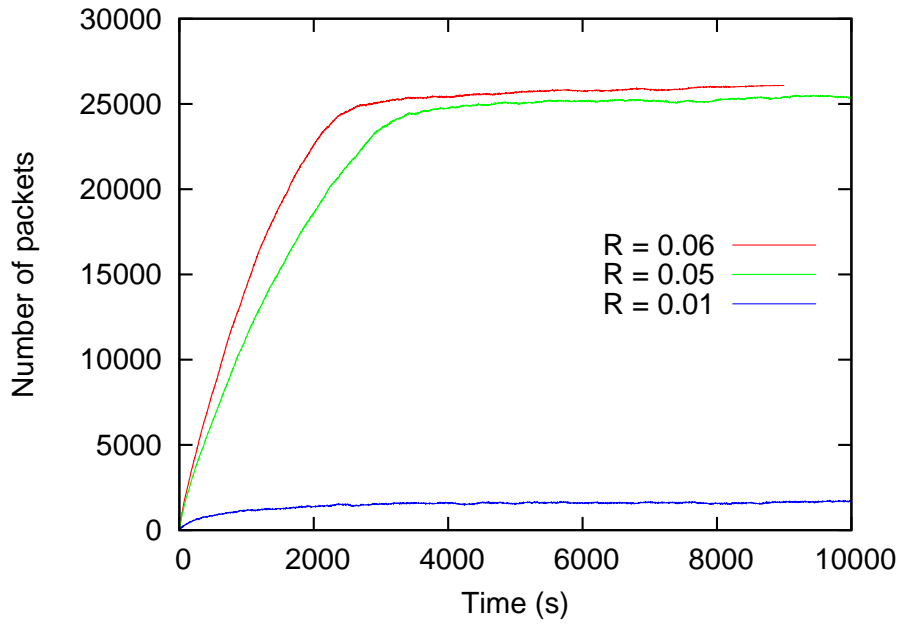


(a) 系内パケット数

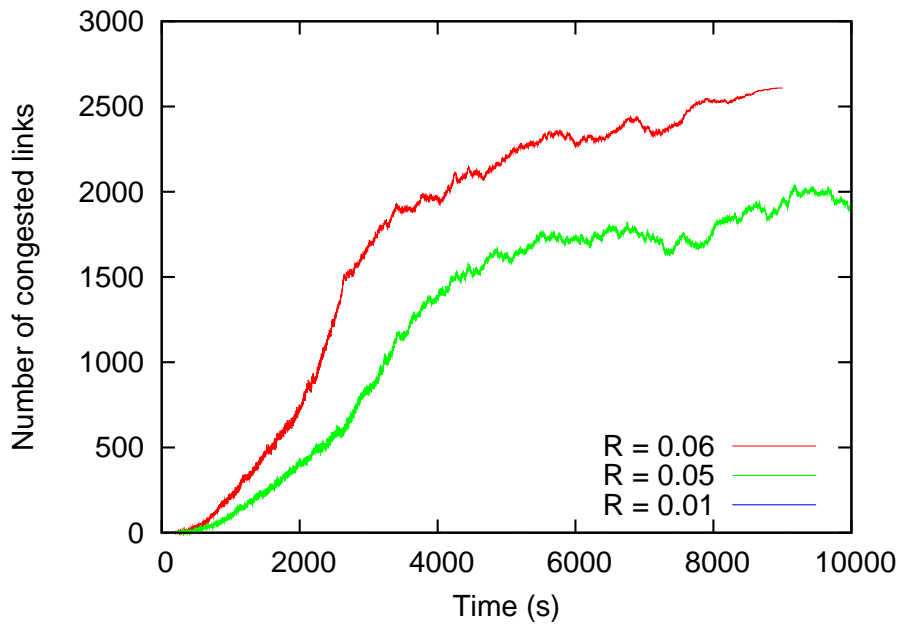


(b) 輻輳を起こしたリンク数

図 2: BA トポロジにおける輻輳の発生状況

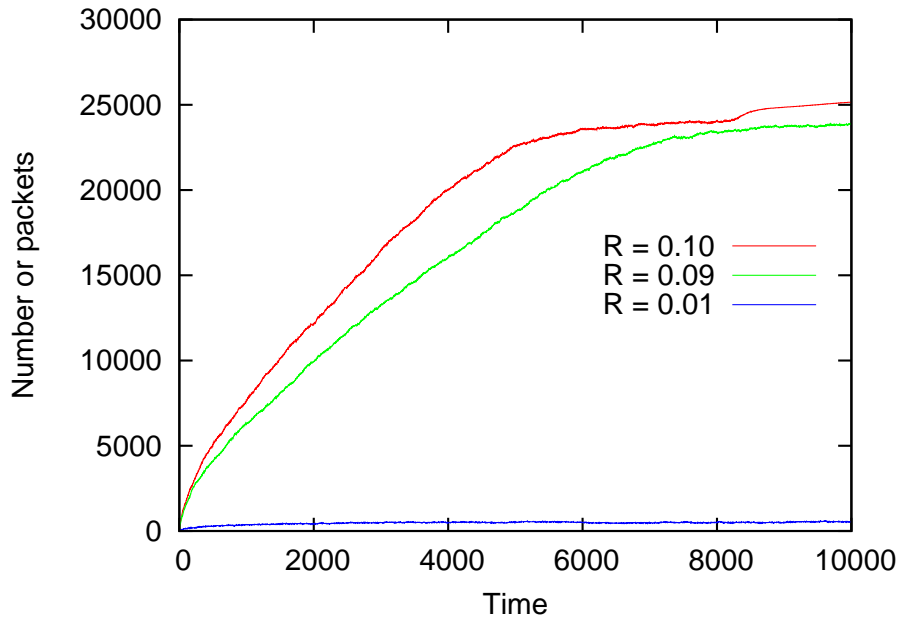


(a) 系内パケット数

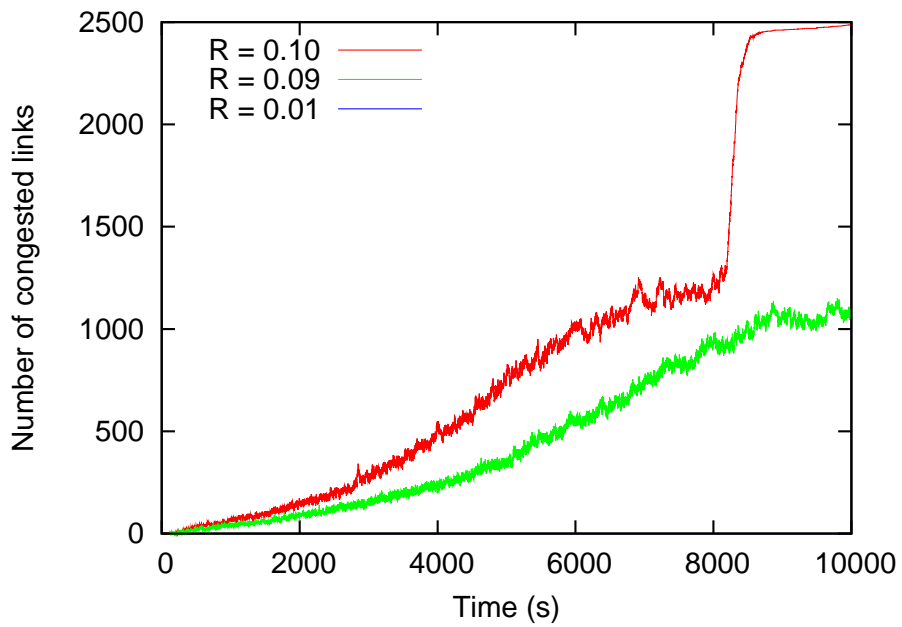


(b) 輻輳を起こしたリンク数

図 3: AT&T トポロジにおける輻輳の発生状況



(a) 系内パケット数



(b) 輻輳を起こしたリンク数

図 4: Sprint トポロジにおける輻輳の発生状況

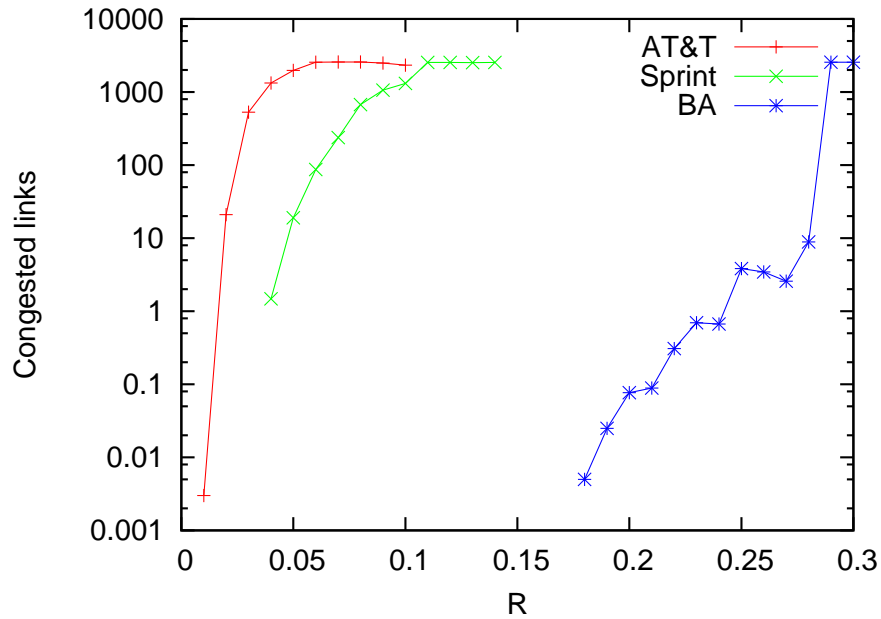
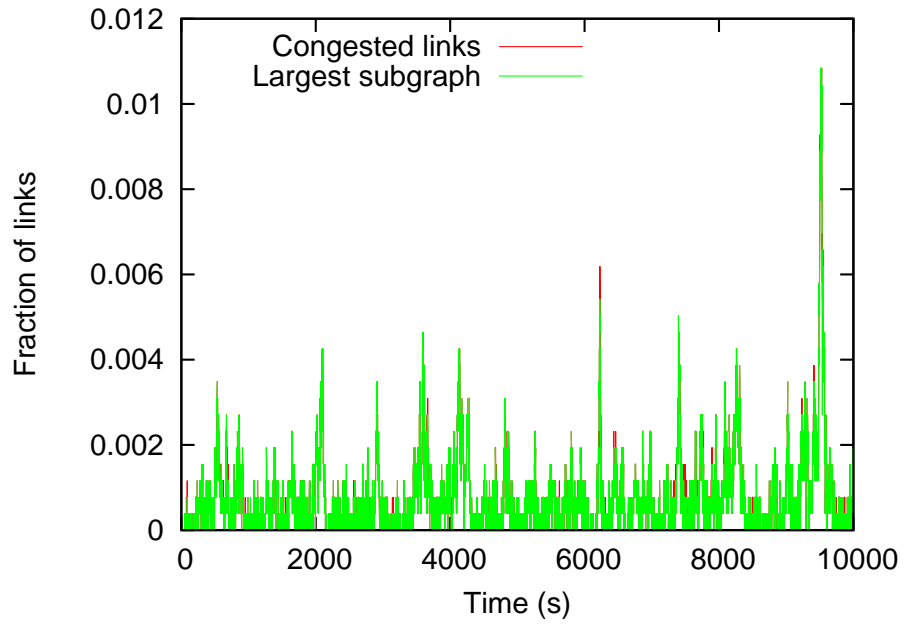


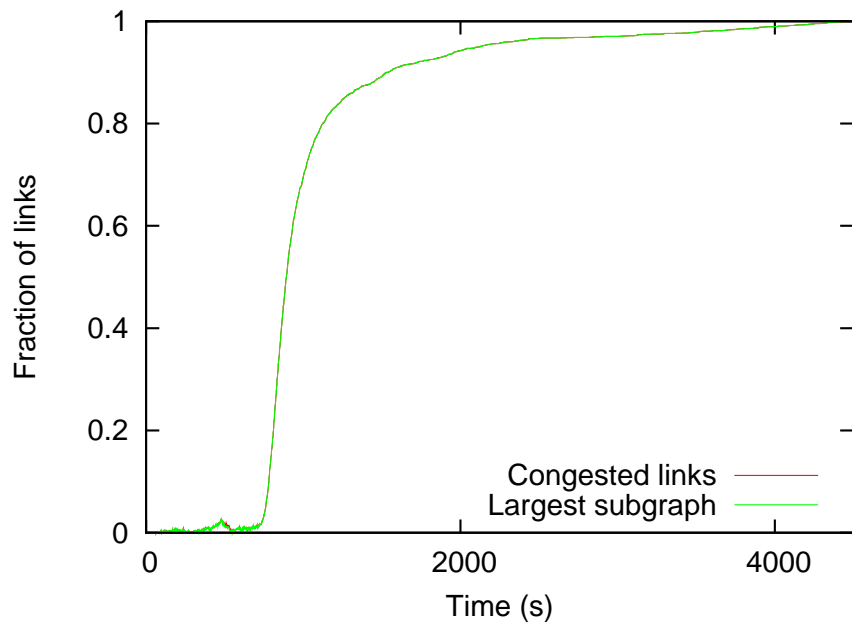
図 5: 各トポロジにおけるパケット発生率 R と輻轉したリンク数の相関関係

ISP トポロジでは、図 7(a)、図 8(a) からわかるように、輻轉したリンク数と最大の部分グラフのサイズには大きな差があり、小さいサイズの部分グラフが複数存在していると考えられる。

そこで、 R の値を変化させたときに、部分グラフの数がどのように変化するかを計測した。図 9 は、定常状態での部分グラフの個数の平均値と、 R の相関関係をプロットしたものである。ISP トポロジでは、輻轉したリンクの数が少ない場合と、全てのリンクが輻轉した場合の部分グラフの数は少ないが、輻轉したリンクの数が多く、かつ全てのリンクが輻轉していない状態では、数十個の部分グラフが形成されていることがわかる。一方、BA トポロジでは輻轉したリンクの数が増えても、部分グラフの数は増えず、輻轉したリンクの大半が 1 つの部分グラフとなっていることがわかる。つまり BA トポロジでは、輻轉したリンクは 1 つの部分グラフに集中しており、その部分グラフの範囲が拡大することで、ネットワーク全体に輻轉が伝播していくと考えられる。しかし ISP トポロジでは、離れた場所で発生した輻轉が、周辺へと伝播して部分グラフが拡大、収束していくものと考えられる。

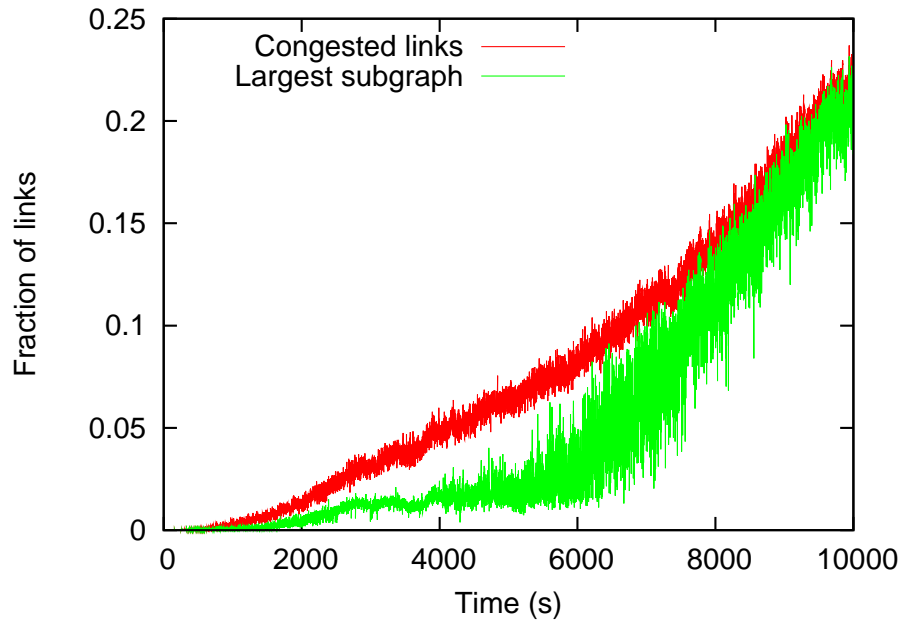


(a) $R=0.25$

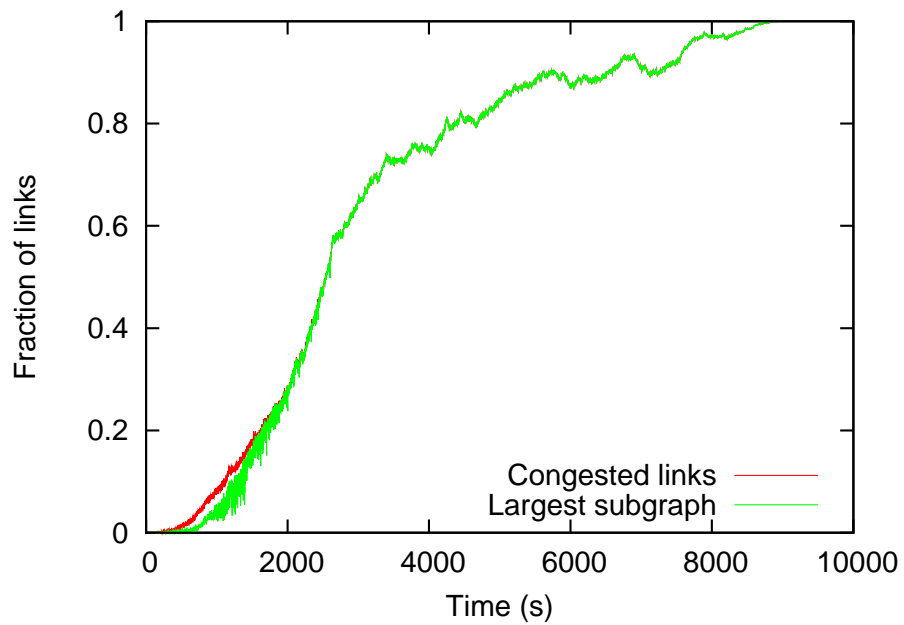


(b) $R=0.29$

図 6: BA トポロジにおける輻輳したリンク数と最大の部分グラフの大きさの推移

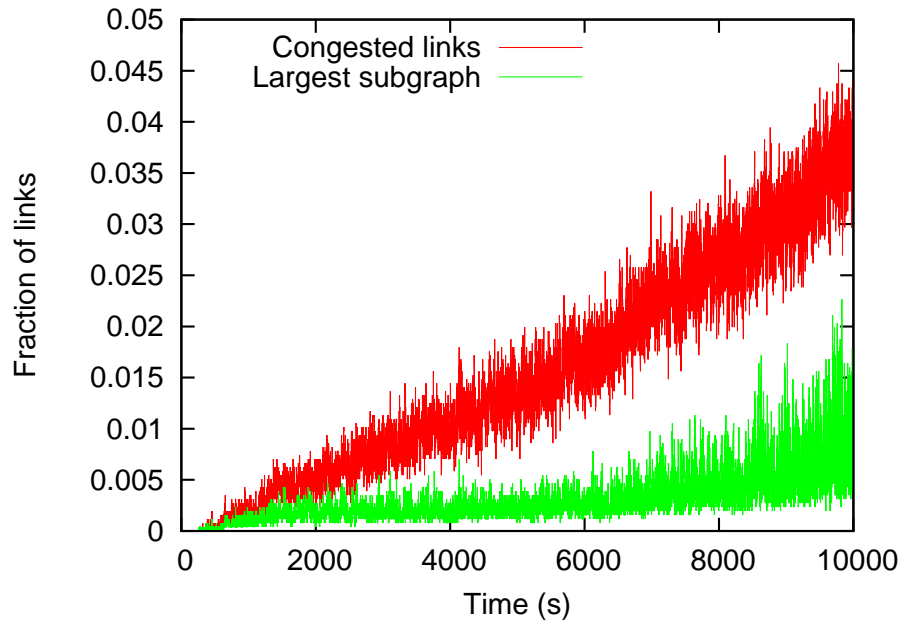


(a) $R=0.03$

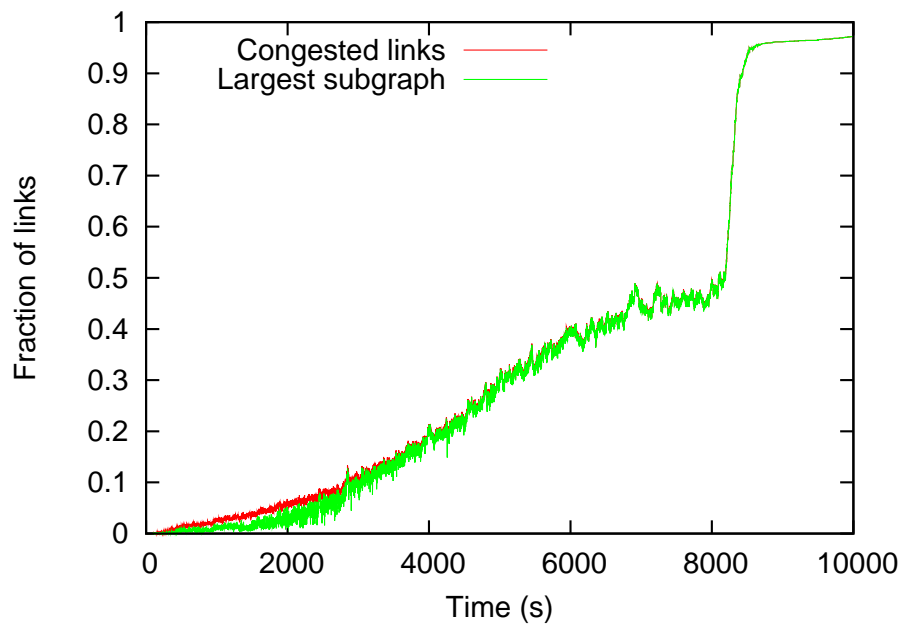


(b) $R=0.06$

図 7: AT&T トポロジにおける輻輳したリンク数と最大の部分グラフの大きさの推移



(a) $R=0.06$



(b) $R=0.10$

図 8: Sprint トポロジにおける輻輳したリンク数と最大の部分グラフの大きさの推移

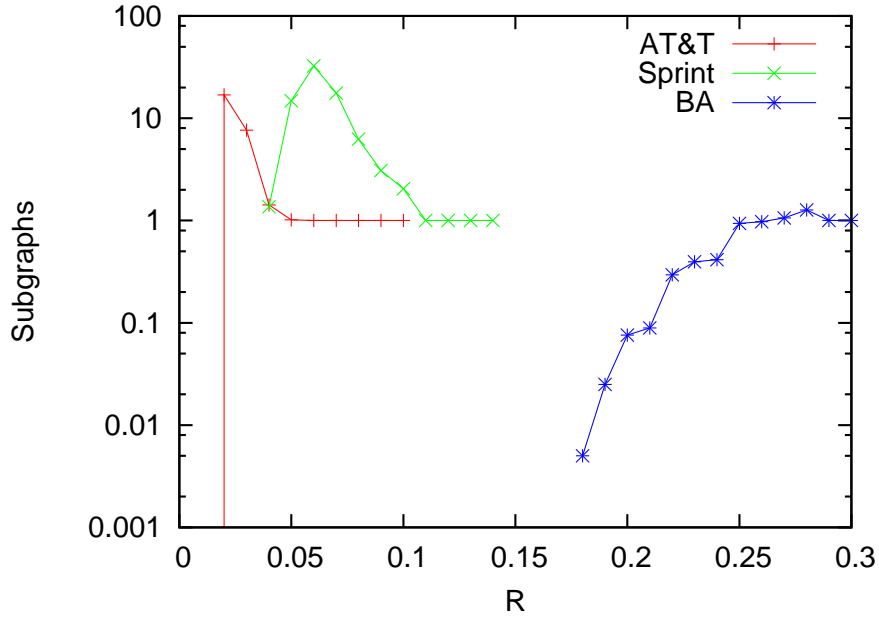


図 9: パケット発生率 R と輻輳したリンクによる部分グラフの数の相関関係

3.3 輻輳を伝播しにくいトポロジ構造

3.3.1 PZ 指標によるトポロジ構造の比較

文献 [15] 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 module degree 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。

$$Z_i = \frac{k_i - \langle k_{s_i} \rangle}{\sigma_{s_i}} \quad (2)$$

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} 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、

$$P_i = 1 - \sum_{s=1}^{N_m} \left(\frac{k_{is}}{k_i} \right)^2 \quad (3)$$

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

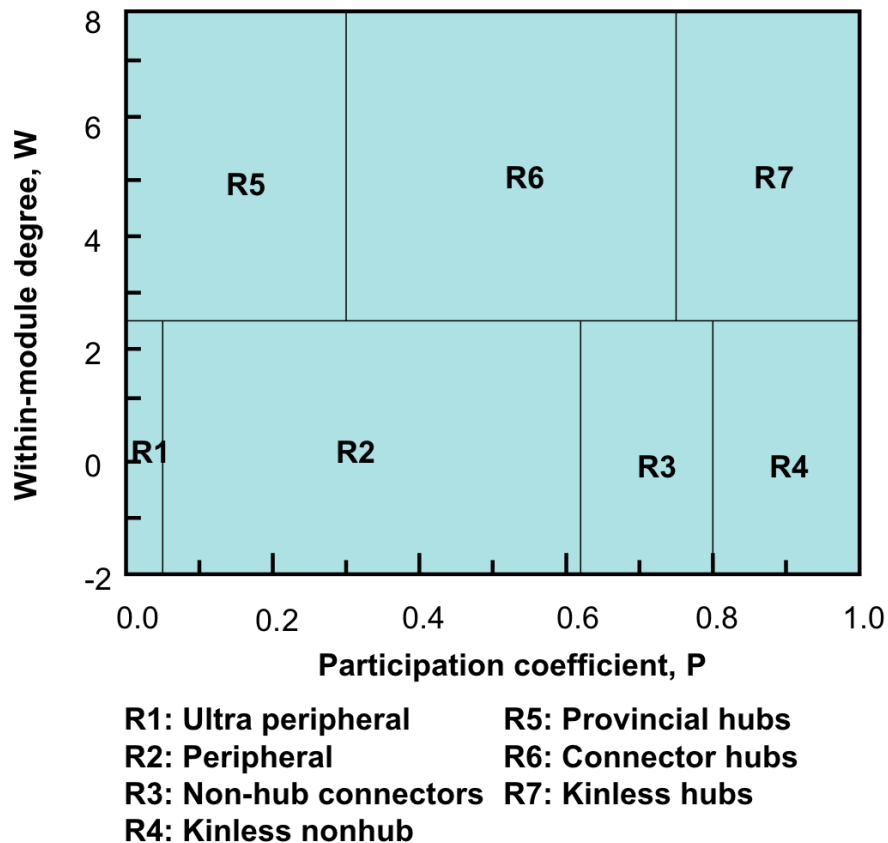
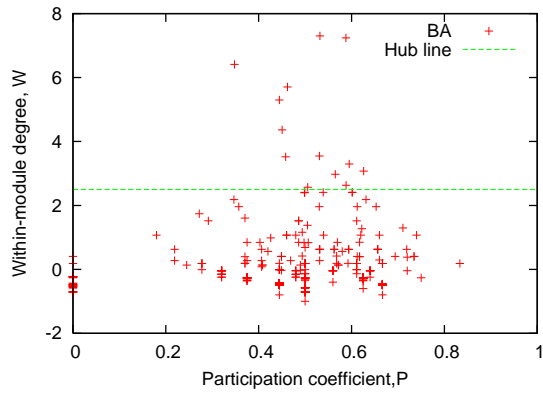


図 10: Participation coefficient と Within module degree を用いたノードの役割の分類

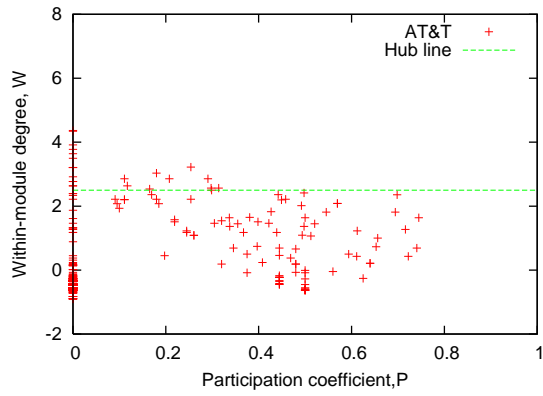
宛先ノードが全て同一モジュールである場合は0、すべて s と異なるモジュールの場合、1 となる指標である。文献 [15] では、図 10 に示すように各ノードの Z_i と P_i の値に応じて、ノードの役割が分類されることを述べている。

図 11 は、各トポロジを対象に PZ 指標を用いてノードの役割を分類したものである。BA トポロジでは、他の 2 つのトポロジに比べて、Connector Hub、Non-hub connector が多く存在している。図 12(a) は、BA トポロジのように Connector Hub、Non-hub connector が多く存在しているトポロジ構造のモデルである。3 つのモジュールがハブや非ハブノードで繋がれており、モジュール同士の連結性が高いという特徴を持つ。

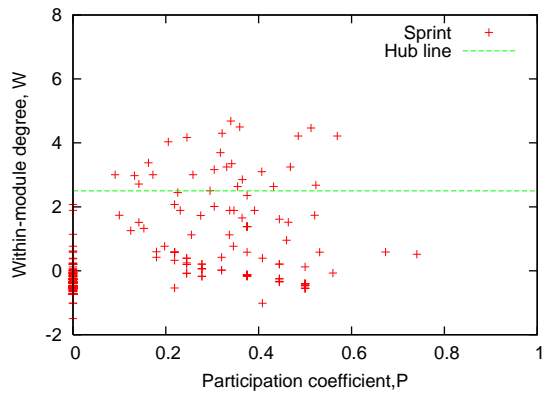
一方、ISP トポロジでは、Connector Hub、Non-hub connector の存在確率は低い。こうしたトポロジ構造のモデルが 12(b) である。ハブはモジュール間を連結しておらず、モジュール内のリンクを集約する働きを担っている。こうしたハブは Provincial Hub と呼ばれ、モジュール間の接続は少数の connector hub が担っている。つまり、ISP トポロジは BA トポロジに比べてモジュール間の連結性が弱く、モジュール性が高いトポロジ構造をしているこ



(a) BA トポロジ



(b) AT&T トポロジ



(c) Sprint トポロジ

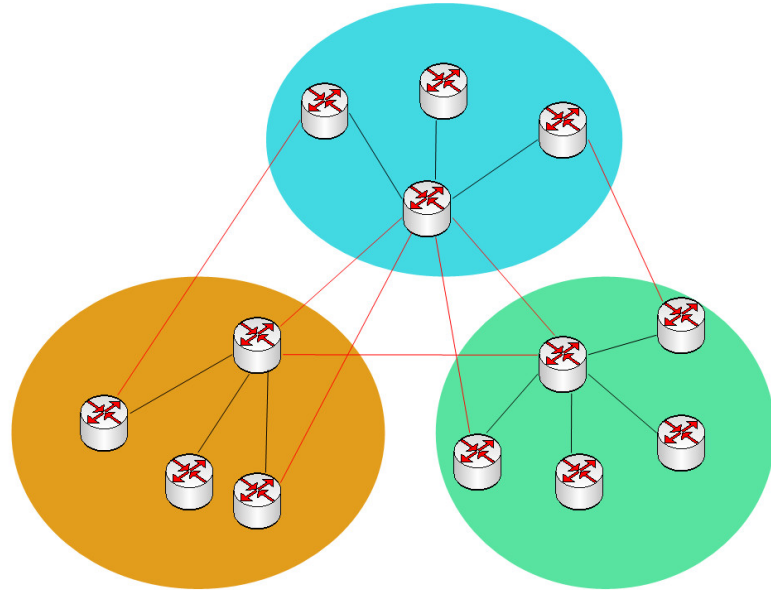
図 11: PZ 指標を用いたノード特性の分類

とがわかる。

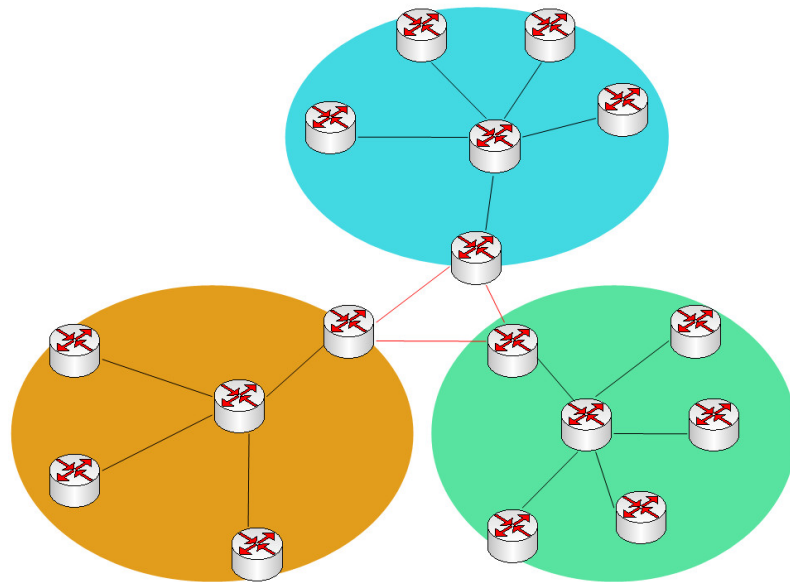
3.3.2 モジュール構造による輻輳伝播の抑制

出線数分布がべき則に従うトポロジでは、ハブはパケットが集中しやすいために輻輳を起ししやすい。Connector hub が多く存在する、モジュール性の低いトポロジでは、輻輳を起ししやすいハブがモジュールと別のモジュールを結ぶ役割を担っている。Connector hub が持つリンクで輻輳が起きると、Connector hub を介して別のモジュールへと輻輳が伝播していくため、輻輳が伝播しやすい構造となっている。

一方、Connector hub が存在せず、少数の Non-hub connector によってモジュール同士が連結しているトポロジでは、モジュール内のパケットを集約する Provincial hub 周辺で輻輳が起りやすい。しかし、モジュール間を繋ぐ働きを Non-hub connector が担っているため、ハブの持つリンクで発生した輻輳が、別のモジュールへは伝播しにくい。つまり、モジュール性の高い構造を持つために、ISP トポロジは輻輳伝播を抑制していると考えられる。



(a) BA トポロジの構造



(b) ISP トポロジの構造

図 12: BA トポロジ、ISP トポロジの構造モデル

4 おわりに

本報告では既存のトポロジ生成手法で生成されたトポロジとインターネットトポロジを対象とし、ルータ間でフロー制御が行われた場合の輻輳の伝播状況を調査した。その結果、既存のトポロジ生成手法で生成されたトポロジはパケットの混雑がネットワーク全体に伝播しやすい性質を持つ一方で、インターネットトポロジでは混雑が伝播しにくい構造を有すること、そして輻輳の伝播のしにくさがトポロジのモジュール構造によるものであることを示した。

今後、エンドホスト間でのフロー制御、ルータのパケット処理能力などの制約を加味したシミュレーションを行う必要がある。

謝辞

本報告を終えるにあたり、ご指導、ご教授を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に心より感謝申し上げます。また、本報告において終始ご指導頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一助教には多くの適切な助言をして頂きました。深く感謝致します。ならびに、日頃から適切な助言をいただきました大阪大学大学院情報科学研究科の若宮直紀准教授、大阪大学大学院経済学研究科の天下裕一助教に感謝申し上げます。

最後に、常日頃から様々な相談に応じて頂きました Suyong Eum 氏、日高直人氏、倉田園子氏をはじめとする村田研究室の皆様方に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] A. -L. Barabasi and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [2] K.-I. Goh, B. Kahng, and D. Kim, “Universal behavior of load distribution in scale-free networks,” *Physical Review Letters*, vol. 87, Dec. 2001.
- [3] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, “A first-principles approach to understanding the Internet’s router-level topology,” in *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 34, pp. 3–14, Oct. 2004.
- [4] T. Bu and D. Towsley, “On distinguishing between Internet power law topology generators,” in *Proceedings of INFOCOM*, pp. 1587–1596, June 2002.
- [5] S. Arakawa, R. Fukumoto, T. Takine, and M. Murata, “Analyzing and modeling router-level internet topology,” *Technical Report of IEICE*, Oct. 2005.
- [6] B. Tadić, S. Thurner, and G. Rodgers, “Traffic on complex networks: Towards understanding global statistical properties from microscopic density fluctuations,” *Physical Review E*, vol. 69, Mar. 2004.
- [7] P. Machadevan, D. Krioukov, K. Fall, and A. Vahdat, “Systematic topology analysis and generation using degree correlation,” in *Proceedings of SIGCOM 2006*, Aug. 2006.
- [8] X. Wang and G. Chen, “Complex networks: Small-world, scale-free and beyond,” *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, vol. 3, pp. 6–20, Sept. 2003.
- [9] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, “On power-law relationships of the internet topology,” in *SIGCOMM ’99: Proceedings of the conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*, pp. 251–262, ACM, Aug. 1999.
- [10] G. Siganos, M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, “Power laws and the as-level internet topology,” in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, pp. 514–524, IEEE Press, 2003.

- [11] N. Spring, R. Mahajan, D. Wetherall, and T. Anderson, “Measuring isp topologies with rocketfuel,” in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, pp. 2–16, IEEE Press, 2004.
- [12] A. Fabrikant, E. Koutsoupias, and C. H. Papadimitriou, “Heuristically optimized trade-offs: A new paradigm for power laws in the internet,” in *ICALP '02: Proceedings of the 29th International Colloquium on Automata, Languages and Programming*, pp. 110–122, July 2002.
- [13] 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.
- [14] Z. X. Wu, W. X. Wang, and K. H. Yeung, “Congestion diffusion and decongestion strategy in networked traffic,” arXiv:0711.1655v1, Nov. 2007.
- [15] R. Guimera and L. A. N. Amaral, “Functional cartography of complex metabolic networks,” *Nature*, vol. 433, p. 895, 2005.
- [16] P. Mahadevan, D. Krioukov, K. Fall, and A. Vahdat, “Systematic topology analysis and generation using degree correlations,” in *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 36, pp. 135–146, Aug. 2006.