社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

ネットワークのスケールフリー構造が TCP 性能に与える影響

八木幸太郎† 大崎 博之† 今瀬 眞†

† 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: †{kou-yagi,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし　近年、インターネットに代表されるさまざまなネットワークが、スケールフリー構造を持つことが報告されている。本稿では、ネットワークのスケールフリー構造が TCP フローのエンド-エンド性能にどのような影響を与えるかを、シミュレーション実験により明らかにする。ネットワークのトポロジとして、ノード数およびリンク数が等しいランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークを用いる。各ネットワーク上での TCP フローのエンド-エンド性能 (スループット、ラウンドトリップ時間、パケット棄却率) を比較する。その結果、(1) ネットワークのスケールフリー構造は、ネットワークのノード数や平均次数によらず TCP フローのラウンドトリップ時間を減少させる効果があること、(2) ネットワークのスケールフリー構造は、ネットワークの平均次数が小さい場合には TCP フローのスループットやパケット棄却率を劣化させる効果があることなどを明らかにする。
キーワード　スケールフリー構造、TCP (Transmission Control Protocol)、エンド-エンド性能、シミュレーション

On the Effect of Scale-Free Structure of Network Topology on TCP Performance

Kotaro YAGI†, Hiroyuki OHSAKI†, and Makoto IMASE†

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka, 565-0871 Japan
E-mail: †{kou-yagi,oosaki,imase}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract　In recent years, it has been reported that several existing networks represented by the Internet have scale-free structure. In this paper, through simulation experiments, we investigate the effect of the scale-free structure of communication networks on the end-to-end performance of TCP flows. As a network topology, a random network and a scale-free network with the equal number of nodes and the equal number of links are used. We compare the end-to-end performance of TCP flows (i.e., throughput, round-trip time, and packet loss rate) in a random network and a scale-free network. Consequently, we show that the scale-free structure of a network has positive effect on the round-trip time of TCP flows regardless of the number of nodes and the average degree of a network. We also show that the scale-free structure of a network has negative effect on the throughput and the packet loss rate of TCP flows when the average degree of a network is small.
Key words　Scale-Free Structure, TCP (Transmission Control Protocol), End-to-End Performance, Simulation

1 はじめに

近年、大規模な通信ネットワークのトポロジ構造への注目が高まっている [1]。通信ネットワークのトポロジ構造に関する研究は古くからなされてきた [2, 3] が、これらの研究は比較的小規模な通信ネットワークを対象としていた。1990 年代後半に、インターネットにおける AS 間のトポロジや、Web ページのハイパーリンクのトポロジなど、現実のさまざまなネットワークがスケールフリー構造を持つことが発見された [4]。

これをきっかけにして、最適な通信ネットワークのトポロジへの関心が高まっている。従来の通信ネットワークのトポロジに関する研究の多くは、スター型・リング型・メッシュ型のような規則的なネットワークトポロジか、もしくはノード間のリンクの接続確率が一定であるというランダムネットワークを対象としたものが大半であった。しかし、スケールフリーネットワークが有するさまざまな特性が明らかになるにつれ、通信ネットワークとスケールフリー構造との関係に注目が集まっている。

スケールフリーネットワークの特性として、例えば、ネットワークの平均距離 (任意のノード間の最短経路長の平均) がランダムネットワークよりもはるかに小さいこと、ノードのランダムな障害に対して堅牢である (ノード間の接続性がより維持されやすい) ことなどが挙げられる。このため、ネットワークの信頼性を向上する大規模な通信ネットワークのトポロジ [5] や、パケットの転送効率を向上する大規模な通信ネットワークのトポロジ [6, 7] に関する研究が行われている。

近年、ネットワークそのものの品質 (通信ネットワークの信頼性・耐故障性や、リンク間の性能など) だけでなく、通信ネットワークにとって重要となる、利用者から見た性能 (エンド-エンド性能) に関する研究も行なわれ始めている。

ネットワークの平均距離が小さいというスケールフリーネットワークの特性は、情報の検索や到達性の維持という点で有利に働く。しかし、ネットワーク上でのトラヒック転送を考えると、スケールフリーネットワークの小さな平均距離は、ハブとなるノードにトラヒックが集中することを意味する。ハブとなるノードにトラヒックが集中すれば、そのハブがネットワークのボトルネックとなり、ネットワーク全体の性能を律速してしまう。つまり、ネットワークのエンド-エンド性能という観点から考えると、スケールフリー構造によってもたらされる小さな平均距離と、ハブへのトラヒック集中は相反する効果をもたらすと考えられる。

我々はこれまで、文献 [8] において、ネットワークのスケールフリー構造がエンド-エンドのスループットに与える影響を、簡単な数値計算により明らかにした。そこでは、各フローへの帯域割当が Max-Min 公平性に従うと仮定し、ランダムネットワークおよびスケールフリーにおける、各フローの平均スループットを導出した。その結果、(1) ネットワークの平均次数が小さい時には、スケールフリーネットワークのスループットがランダムネットワークのスループットよりも大きくなること、(2) 逆に、ネットワークの平均次数が大きい時には、ランダムネットワークのスループットがスケールフリーネットワークのスループットよりも大きくなることを示した。

現在、インターネットのトラヒックの大半は、TCP (Trasmission Control Protocol) によって転送されている [9]。TCP はウィンドウフロー制御や再送制御を行うため、TCP による帯域割当は Max-Min 公平性ではなく、比例公平性 (proportional fairness) に従うことが知られている [10]。また、多数のフローが競合するネットワーク環境下では、TCP のエンド-エンド性能が大きく劣化することも知られている [11]。ネットワークのスケールフリー構造がエンド-エンド性能に与える影響を調査する時には、このようなエンド-エンドの輻輳制御の影響も考慮する必要がある。

また、エンド-エンドのスループットだけでなく、転送遅延やパケット棄却率も利用者にとって重要な性能指標である。このため、ネットワークのスケールフリー構造がこれらのエンド-エンド性能に与える影響も調査する必要がある。

そこで本稿では、ネットワークのスケールフリー構造がエンド-エンドの TCP フローの性能にどのような影響を与えるかを、シミュレーション実験により明らかにする。ネットワークのトポロジとして、文献 [8] と同様に、ノード数およびリンク数が等しいランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークを用いる。各ネットワーク上での、TCP フローのエンド-エンド性能 (スループット、ラウンドトリップ時間、パケット棄却率) を比較する。その結果、(1) ネットワークのスケールフリー構造は、ネットワークのノード数や平均次数によらず TCP フローのラウンドトリップ時間を減少させる効果があること、(2) ネットワークのスケールフリー構造は、ネットワークの平均次数が小さい場合には TCP フローのスループットやパケット棄却率を劣化させる効果があることなどを明らかにする。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2 章では関連研究を紹介する。3 章において、ランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークの基本的な特性を簡単に説明する。4 章では、シミュレーション実験により、ネットワークのスケールフリー構造が、TCP フローのエンド-エンド性能に与える影響を定量的に評価する。最後に 5 章において、本稿のまとめと今後の課題を述べる。

2 関 連 研 究

文献 [12] では、ネットワークのトポロジがルータの負荷 (単位時間当たりにルータを通過するパケット数) に与える影響を調査している。文献 [12] は、(1) 各ノードが一定の割合で全ノードに対してパケットを送信する、(2) ルーティングはホップ数によって決定される (つまり、パケットは最短経路を通過する) という条件のもとでは、各ルータを通過するパケット数とそのルータの次数との間に相関があることを示している。また、ネットワーク中のトラヒック量が増加するにつれ、相関がより強くなることも示している。ただし文献 [12] では、ルータを通過するパケット数というルータ単位の負荷にのみ着目しており、エンド-エンド性能を考慮していない。また、TCP の輻輳制御の影響も考慮されていない。

文献 [13] においても、ネットワークのトポロジがルータの負荷に与える影響を調査している。文献 [13] では、ランダムネットワークやスケールフリーネットワークにおける、ルータの負荷の分布を導出している。文献 [13] では、(1) ノードは長期依存分布に従ってパケットを生成する、(2) パケットは単位時間ごとに隣接するノードに移動する、(3) ルーティングはホップ数によって決定される (つまり、パケットは最短経路を通過する) という条件のもとでは、スケールフリーネットワークの通信性能は、ランダムネットワークの通信性能よりも低いことを示している。しかし文献 [13] では、非常に単純化されたトラヒックモデルを利用しており、ここでの結果を一般化することは困難である。

3 ランダムネットワークとスケールフリーネットワーク

本章では、ランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークの基本的な特性を概説する。また、4 章で用いる、ランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークを生成するモデルもあわせて説明する。

ランダムネットワークとは、各ノード間にリンクが存在する

確率が一様であるネットワークである [14]。

ランダムネットワークを生成する代表的なモデルとして、ER (Erdos-Renyi) モデル [15] が知られている。ランダムネットワークの生成には、ノード数 N、ノード間の接続確率 p の 2 つのパラメータを用いる。N 個のノードを配置し、すべてのノード間に確率 p でリンクを生成することにより、ランダムネットワークを生成することができる。

ランダムネットワークの特性として、次数分布 $P(k)$ が二項分布に従うこと、十分大きな N に対して平均距離が $l \propto \log N$ となることなどが知られている [16]。

スケールフリーネットワークとは、次数分布が以下のようなべき乗則に従うネットワークである [4]。

$$P(k) \propto k^{-\lambda} \tag{1}$$

これまで、スケールフリーネットワークを生成する、さまざまなモデルが提案されている [17–19]。本稿では、その中でも最も代表的なモデルの一つである、BA (Barabasi Albert) モデル [19] を説明する。BA モデルはネットワークの成長およびリンクの優先的選択という性質を持つ。まず、少数のノードにより連結されたネットワークを作成し、ネットワークにノードを一つづつ追加してゆく。この時、既存のノードとの間に、そのノードの次数に比例した確率でリンクを生成することにより、スケールフリーネットワークを生成することができる。BA モデルによって生成されたネットワークは、べき指数 $\lambda = 3$ となることが知られている。

スケールフリーネットワークの特性として、平均距離 l がランダムネットワークのそれよりも非常に小さいということが挙げられる。十分大きな N に対して、$2 < \lambda < 3$ の時、平均距離が $l \propto \log\log N$ となることなどが知られている [16]。

4 シミュレーション

4.1 シミュレーションモデル

以下では、シミュレーション実験により、ネットワークのスケールフリー構造が、TCP フローのエンド-エンド性能に与える影響を調査する。

ネットワークのトポロジとして、ランダムネットワークおよび (BA モデルによって生成した) スケールフリーネットワークを用いる。ネットワーク中のノード (ルータもしくはホスト) 数を N、平均次数 (ノードに接続されているリンク数の平均) を k と表記する。ノード数 N および平均次数 k が等しいランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークにおける、TCP フローのエンド-エンド性能を比較する。これにより、ネットワークのスケールフリー構造が TCP フローのエンド-エンド性能に与える影響を明らかにする。

TCP フローは、ランダムネットワークおよびスケールフリーネットワーク上にランダムに生成した (図 1)。具体的には、ネットワーク上の TCP フローは、ノード数 N および平均次数 ρk (以下、ρ を負荷率と呼ぶ) のランダムネットワークによって与えた。つまり、ランダムネットワークにおいて、ノード i からノード j にリンクが存在する時、ノード i からノード j への TCP フローを生成した。ネットワークのリンク数が $k \times N/2$ であることから、負荷率 ρ はネットワークのリンク数の何倍の TCP フローを生成するかを意味するパラメータである。

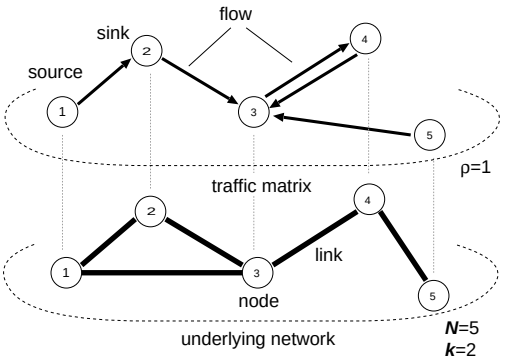

図 1: ネットワークモデルおよび TCP フローモデル
Fig. 1 Flow model and underlying network model

20 個のランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークをそれぞれ生成した。エンド-エンドの性能指標として、それぞれのネットワークにおける各 TCP フローのスループット・ラウンドトリップ時間・パケット棄却率を計測した。また、各ルータを通過する TCP フロー数もあわせて計測した。

以下のシミュレーションでは、特に断わりのない限り、表 1 に示すパラメータを用いている。簡単のため、すべてのリンクの帯域 B および伝搬遅延 τ にはすべて等しい値を設定した。以下のすべてのシミュレーション結果には、95% の信頼区間を含めている。シミュレーションには ns-2 バージョン 2.29 を使用した。

表 1 シミュレーションで用いたパラメータ設定
Table 1 Parameter configuration used in simulation

ノード数	N	100	
平均次数	k	3	
リンクの帯域	B	10	[Mbit/s]
伝搬遅延	τ	10	[ms]
バッファサイズ	L	100	[packet]
負荷率	ρ	5.0	

4.2 シミュレーション結果 (ルータを通過する TCP フロー数)

まず、ランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークにおいて、各ルータを通過する TCP フロー数に着目する。これにより、ネットワーク中のルータが、どの程度均等に利用されているかを調査する。

図 3 に、ノード数 $N = 1,000$ および平均次数 $k = 3$ の時の、ランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークにおいて各ルータを通過する TCP フロー数の分布を示す。

この図より、各ルータを通過する TCP フロー数は、スケールフリーネットワークよりもランダムネットワークのほうが多いことがわかる。実際に、ルータを通過する TCP フロー数の平均を計算したところ、ランダムネットワークでは 47.75 であり、スケールフリーネットワークでは 33.96 であった。ただし、スケールフリーネットワークでは、少数ながら多数の TCP フローを収容するルータが存在することもわかる。つまりこれは、ハ

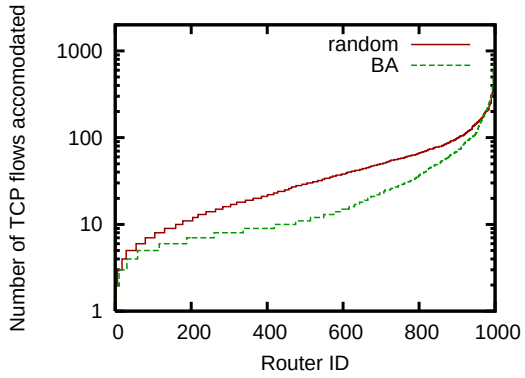

図 2: ルータを通過する TCP フロー数の分布 ($N = 1,000, k = 3$)

Fig. 2 Distribution of the number of TCP flows accomodated in a router ($N = 1,000, k = 3$)

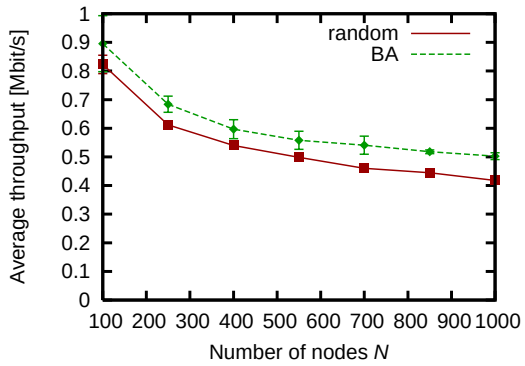

図 3: ノード数 N を変化させた時の TCP フローの平均スループット ($k = 3, B = 10$ [Mbit/s])

Fig. 3 Average TCP flow throughput for the different number of nodes N ($k = 3, B = 10$ [Mbit/s])

ブとなるルータに大量の TCP フローが収容されていることを意味している。

このように、ランダムネットワークでは、ルータを通過する TCP フロー数の偏りは小さく、すべてのルータが比較的均等に利用されている。一方、スケールフリーネットワークでは、ルータを通過する TCP フロー数の偏りが大きく、ハブとなるルータが集中的に利用されている。これは、文献 [13, 20] の結果とも一致している。

以下では、このようなスケールフリーネットワークの性質が、TCP フローのエンド-エンド性能にどのような影響を与えるのかを調査する。

4.3 シミュレーション結果 (TCP フローのスループット)

まず、エンド-エンド性能として、TCP フローのスループットに着目する。

図 3 に、平均次数を $k = 3$ と固定し、ノード数 N を 100 から 1,000 に変化させた時の、TCP フローの平均スループットを示す。この図から、ノード数 N の値によらず、スケールフリーネットワークのほうがランダムネットワークよりも 10% 程度高いスループットを示していることがわかる。

1 章で述べたように、ネットワークのエンド-エンド性能という観点から考えると、スケールフリー構造によってもたらされる小さな平均距離と、ハブへのトラヒック集中は相反する効果をもたらすと考えられる。図 3 では、スケールフリー構造によってもたらされる小さな平均距離というプラスの効果が大きく影響していると考えられる。

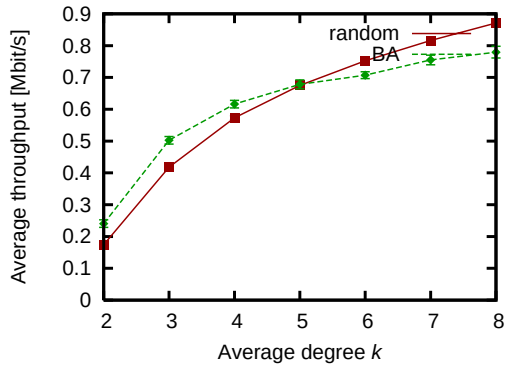

図 4: 平均次数 k を変化させた時の TCP フローの平均スループット ($N = 1,000, B = 10$ [Mbit/s])

Fig. 4 Average TCP flow throughput for the different average degree k ($N = 1,000, B = 10$ [Mbit/s])

ただし、ネットワークの平均次数が変化すると、これとはまったく異なる傾向を示す。図 4 に、ノード数を $N = 1,000$ と固定し、平均次数 k を 2 から 8 に変化させた時の TCP フローの平均スループットを示す。この図より、平均次数が大きくなるにつれて、ランダムネットワークのほうがスケールフリーネットワークよりも高いスループットを示すことがわかる。具体的には、平均次数 $k = 5$ 前後において、ランダムネットワークとスケールフリーネットワークにおける平均スループットの関係が逆転している。

これは、平均次数が大きい時には、スケールフリー構造によってもたらされる、ハブへのトラヒック集中というマイナスの効果が大きく働いているためと考えられる。なお、紙面の都合上結果は省略するが、(TCP の輻輳制御をモデル化していない) 文献 [8] の手法によって平均スループットを計算した場合、平均次数 $k = 6$ 前後において、ランダムネットワークとスケールフリーネットワークにおける平均スループットの関係が逆転していた。この結果から、TCP の輻輳制御が存在する場合には、スケールフリー構造によってもたらされる、ハブへのトラヒック集中というマイナスの効果がより強く働くと考えられる。

以上の結果より、ネットワークのスケールフリー構造は、ネットワークの平均次数が小さい時には TCP フローのスループットを向上させるが、逆にネットワークの平均次数が大きい時には TCP フローのスループットを劣化させる効果があることがわかる。

4.4 シミュレーション結果 (TCP フローのラウンドトリップ時間)

次に、エンド-エンド性能として、TCP フローのラウンドトリップ時間に着目する。

図 5 に、平均次数を $k = 3$ と固定し、ノード数 N を 100 から 1,000 に変化させた時の、TCP フローの平均ラウンドトリップ時間 (各フローの平均ラウンドトリップ時間の平均) を示す。この図より、ノード数 N の値によらず、スケールフリーネット

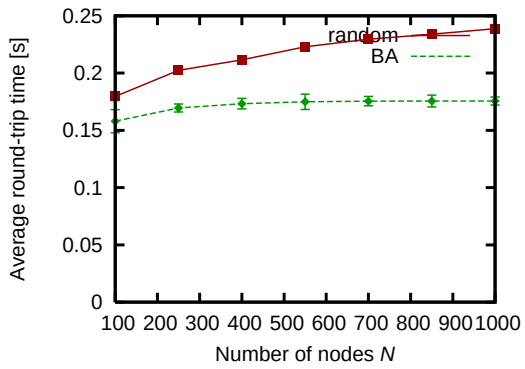

図 5: ノード数 N を変化させた時の TCP フローの平均ラウンドトリップ時間 ($k = 3$, $B = 10$ [Mbit/s])
Fig. 5 Average round-trip time for the different number of nodes N ($k = 3$, $B = 10$ [Mbit/s])

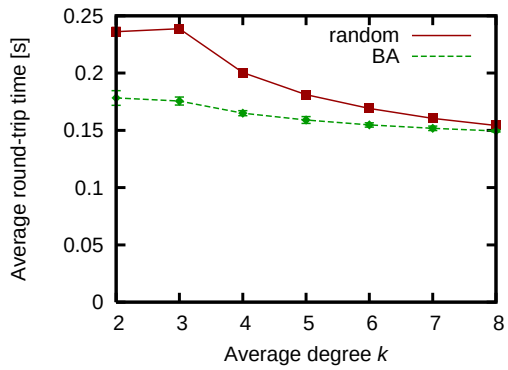

図 6: 平均次数 k を変化させた時の TCP フローの平均ラウンドトリップ時間 ($N = 1,000$, $B = 10$ [Mbit/s]
Fig. 6 Average round-trip time for the different average degree k ($N = 1,000$, $B = 10$ [Mbit/s])

ワークのほうが、ランダムネットワークよりも、平均ラウンドトリップ時間が小さいことがわかる。また、ノード数 N が大きくなるにつれ、平均ラウンドトリップ時間の差が大きくなっていることがわかる。これは 3 章で述べたように、スケールフリーネットワークの小な平均距離が直接影響していると考えられる。

しかもこの傾向は、平均次数 k が変化しても大きく変化しない。図 6 に、ノード数 $N = 1,000$ と固定し、平均次数 k を 2 から 8 に変化させた時の、TCP フローの平均ラウンドトリップ時間を示す。この図より、平均次数 k の値によらず、スケールフリーネットワークのほうが、ランダムネットワークよりも、平均ラウンドトリップ時間が小さいことがわかる。平均次数 k が大きくなるにつれその差は小さくなっているが、平均次数 $k = 8$ までではその大小関係が逆転していない。

TCP フローの平均スループット (図 4) と平均ラウンドトリップ時間 (図 6) を比較すると興味深い性質が見られる。

平均次数 k が大きい時には、ランダムネットワークのほうがスケールフリーネットワークよりも平均ラウンドトリップ時間が大きい (図 6)。一般に、TCP フローのスループットは、ラウンドトリップ時間の逆数に比例することが知られている [21]。しかし、ランダムネットワークのほうが、スケールフリーネットワークよりも平均スループットが大きくなっている (図 4)。これは、スケールフリーネットワークでは、ハブとなるルータに多数の TCP フローが集中し、その結果、スケールフリーネットワークにおける TCP フローのスループットが大きく低下しているためと考えられる。

以上の結果より、ネットワークのスケールフリー構造は、ネットワークのノード数や平均次数によらず TCP フローのラウンドトリップ時間を小さくする効果があることがわかる。

4.5 シミュレーション結果 (TCP フローのパケット棄却率)

最後に、エンド-エンド性能として、TCP フローのパケット棄却率に着目する。

図 5 に、平均次数を $k = 3$ と固定し、ノード数 N を 100 から 1,000 に変化させた時の、TCP フローのパケット棄却率 (全 TCP フローのパケット棄却率の平均) を示す。この図より、ノード数 N の値によらず、ランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークにおける TCP フローのパケット棄却率がほぼ等しいことがわかる。

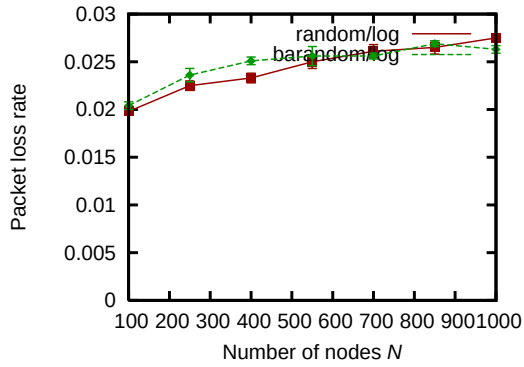

図 7: ノード数 N を変化させた時の TCP フローのパケット棄却率 ($k = 3$, $B = 10$ [Mbit/s])
Fig. 7 Packet loss rate for the different number of nodes N ($k = 3$, $B = 10$ [Mbit/s])

図 6 に、ノード数を $N = 1,000$ と固定し、平均次数 k を 2 から 8 変化させた時の、TPC フローのパケット棄却率を示す。この図より、平均数次数 k の値によって、ランダムネットワークおよびスケールフリーネットワークにおける、TCP フローのパケット棄却率の大小関係が決まることがわかる。

この図では、平均次数 k が変化しても、スケールフリーネットワークにおける TCP フローのパケット棄却率は大きく変化していない。これは、平均次数の大小にかかわらず、スケールフリーネットワークでは、特定のハブとなるルータに TCP フローが集中しているためと考えられる。

一方、平均次数 k が大きくなるにつれ、ランダムネットワークにおける TCP フローのパケット棄却率は減少している。これは、ランダムネットワークでは、平均次数が大きくなるにつれ TCP フローが複数のルータに分散されるためと考えられる。

以上の結果より、ネットワークのスケールフリー構造は、ネットワークの平均次数が小さい時には、TCP フローのパケット棄却率を減少させるが、逆にネットワークの平均次数が大きい時には、TCP フローのパケット棄却率を増加させる効果があるこ

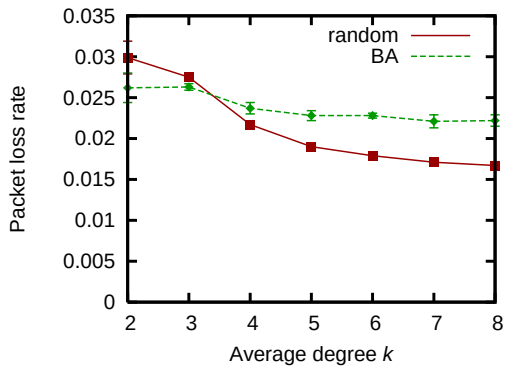

図 8: 平均次数 k を変化させた時の TCP フローのパケット棄却率 ($N = 1,000$, $B = 10$ [Mbit/s])

Fig. 8 Packet loss rate for the different average degree k ($N = 1,000$, $B = 10$ [Mbit/s])

とがわかる。

4.6 考　　察

以上の結果から、ネットワークのスケールフリー構造は、ネットワークのノード数や平均次数によらず、TCP フローのラウンドトリップ時間を減少させる効果があることが分かる。つまり、TCP の輻輳制御の影響を考慮に入れても、ネットワークのスケールフリー構造は、リアルタイム性が要求されるアプリケーション (情報検索やリアルタイム通信) にとってはプラスの影響を与える。また、この性質はネットワークのノード数や平均次数によらないという点も注目に値する。

一方、ネットワークのスケールフリー構造は、ネットワークの平均次数が小さい場合には TCP フローのスループットやパケット棄却率を劣化させてしまう。つまり、パケット交換ネットワークや TCP の輻輳制御の特性により、ネットワークのスケールフリー構造は、転送速度が要求されるアプリケーション (ファイル転送や Web 閲覧) にとってはマイナスの影響を与えてしまう。

確かに、ネットワークの平均次数が小さい時には、ネットワークのスケールフリー構造は、TCP フローのスループットやパケット棄却率を向上させる。しかし、一般的なネットワークの平均次数が 4.7 ~ 6.3 程度である [22] ことを考えると、ネットワークのスケールフリー構造は、転送速度が要求されるアプリケーションにとってはマイナスの影響を与えることもあると考えられる。

5 まとめと今後の課題

本稿では、ネットワークのスケールフリー構造が、エンド-エンド間の TCP フローの性能にどのような影響を与えるかを、シミュレーション実験により明らかにした。その結果、(1) ネットワークのスケールフリー構造は、ネットワークのノード数や平均次数によらず TCP フローのラウンドトリップ時間を減少させる効果があること、(2) ネットワークのスケールフリー構造は、ネットワークの平均次数が小さい場合には TCP フローのスループットやパケット棄却率を劣化させることなどを明らかにした。

今後の課題として、ネットワークのスケールフリー構造と TCP フローのエンド-エンド性能との関係を、数学的解析手法により明らかにすることが挙げられる。また、ネットワークのスケールフリー構造が、さまざまなバージョンの TCP や TCP 以外のトランスポート層プロトコルなどに与える影響を調査することも重要であろう。

文　　献

[1] R. Albert and A. L. Barabasi, "Statistical mechanics of complex networks," *REVIEWS OF MODERN PHYSICS*, vol. 74, pp. 48–98, Jan. 2002.

[2] H. L, "Topology control for multihop packet radio networks," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 41, pp. 1474–1481, Oct. 1993.

[3] R. Albert, H. Jeong, and A. L. Barabsi, "Diameter of the world wide web," *Nature*, vol. 401, pp. 130–131, Sept. 1999.

[4] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "On power-law relationships of the Internet topology," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 29, pp. 251–263, May 1999.

[5] Y. Tu, "How robust is the Internet?," *Nature*, vol. 406, pp. 353–354, May 2000.

[6] B. Tadic and G. J. Rodgers, "Packet transport on scale free networks," *Advances in Complex Systems*, vol. 5, pp. 445–456, July 2002.

[7] C. M. Ghim, E. Oh, K. I. Goh, B. Kahng, and D. Kim, "Packet transport along the shortest pathways in scale-free networks," *The European Physical Journal B*, vol. 38, pp. 193–199, Feb. 2004.

[8] H. Ohsaki, K. Yagi, and M. Imase, "On the effect of scale-free structure of network topology on end-to-end performance," to be presented at *the 2007 International Symposium on Applications and the Internet (SAINT 2007)*, Jan. 2007.

[9] V. Paxson, "Growth trends in wide-area TCP connections," *IEEE Network*, vol. 8, pp. 8–17, July 1994.

[10] M. Vojnovid, J.-Y. L. Boudec, and C. Boutremans, "Global fairness of additive-increase and multiplicative-decrease with heterogeneous round-trip times," in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2000*, vol. 3, pp. 1303–1312, Mar. 2000.

[11] L. Qiu, Y. Zhang, and S. Keshav, "On individual and aggregate TCP performance," in *Proceedings of Internetl Conference on Network Protocols*, pp. 203–212, Oct. 1999.

[12] G. Peli and G. Papp, "Are scale free networks better?." `http://arxiv.org/pdf/cond-mat/0301555`, Feb. 2003.

[13] D. Arrowsmith, M. Bernardo, and F. Sorrentino, "Effects of variations of load distribution on network performance," *IEEE Proceedings of Systems and Circuits*, pp. 3773–3776, May 2005.

[14] B. Bloolbas, *Random Graphs Second Edition*. Cambridge Univ Press, Oct. 2001.

[15] P. Erdos and A. Renyi, "On random graphs," *Mathematicae*, vol. 6, pp. 290–297, 1959.

[16] R. Cohen and S. Havlin, "Scale-free network are ultra small," *Physical Review Letters*, vol. 90, p. 058701, Feb. 2003.

[17] G. Bianconi and A. L. Barabasi, "Competition and multiscaling in evolving networks," *Europhysics Letters*, vol. 54, pp. 436–442, May 2001.

[18] K. Klemm and V. M. Eguiluz, "Highly clustered scale-free networks," *Physical Review E*, vol. 65, p. 036123, Feb. 2002.

[19] A. L. Barabsi and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.

[20] K. I. Goh, B. Kahng, and D. Kim, "Packet transport and load distribution in scale-free network models," *Physica A*, vol. 318, pp. 72–79, Feb. 2003.

[21] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose, "Modeling tcp throughput: A simple model and its empirical validation," *ACM SIGCOMM*, vol. 28, pp. 303–314, Feb. 1998.

[22] P. Mahadevan *et al.*, "The internet AS-Level topology: Three data sources and one definitive metric," *ACM SIGCOMM COMPUTER COMMUNICATION REVIEW*, vol. 36, p. 2006, Dec. 2005.