

IPv6 自律システムネットワークトポロジーの解析

桑川 一也[†] 加藤 聰彦[†] 伊藤 秀一[†]

[†] 電気通信大学 大学院情報システム学研究科 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

E-mail: †{kumekawa,kato,itoh}@is.uec.ac.jp

あらまし インターネットトポロジーについての解析は、これまで主に IPv4 について行われてきたが、今後は IPv6 のトポロジーについても解析する必要がある。これまでの IPv4 のトポロジーの解析では、いくつかのべき乗則 (power law) や small world 的性質が明らかにされている。そこで本研究では、IPv6 の自律システムのネットワークについてもこれらの性質が成り立つかどうかを調べた。そして、IPv6 の場合も IPv4 と同様にべき乗則や small world 的な性質をもつことを明らかにした。また、2003 年 5 月から 2004 年 3 月までのこれらの性質の時間変化について解析した結果を報告する。

キーワード IPv6, 自律システム, ネットワークトポロジー, 狭い世界, クラスタリング

Analysis of IPv6 Autonomous System Network Topology

Kazuya KUMEKAWA[†], Toshihiko KATO[†], and Shuichi ITOH[†]

[†] Graduate School of Information Systems, University of Electro-Communications, 1-5-1 Chofugaoka, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

E-mail: †{kumekawa,kato,itoh}@is.uec.ac.jp

Abstract Recent studies have shown that the Internet topologies exhibit power laws and small world properties. Since the discovery of these properties, there exist many studies on IPv4 network topologies but a few on IPv6 ones. In this report, we study the topological properties of the IPv6 network at the autonomous system level. We show that the IPv6 network also exhibits the power laws and small world properties. In addition, we report the time variation of the quantities that characterize these properties from May 2002 to March 2004.

Key words IPv6, autonomous system, network topology, small world, clustering

1. はじめに

ネットワークトポロジーを理解することは、プロトコルの設計や性能評価のシミュレーションを実行するために重要である。これまでに、インターネットのネットワークトポロジーの性質として、ノードに接続されたリンクの数の分布がべき乗 (累乗) 分布になるというべき乗則が発見されている [1] [2]。この他にも、WWW のハイパーリンク構造 [3] [4] や Peer-to-Peer ネットワーク [5] [6] など、多くの現実に存在するネットワークの次数分布がべき乗分布になることが示されている。これらのべき乗分布に従うネットワークは、分布に特徴的なスケールがないことからスケールフリーネットワークとも呼ばれている [3]。また、このべき乗則に加えて、インターネットや社会や生物において現れる複雑なネットワーク構造に共通する性質として、small world [7] と呼ばれる性質が見い出されている。これは、ネットワーク内に多数のノードが存在するにもかかわらずノード間の距離が短くなるという性質である。近年、これらの性質を

も複雑ネットワークに関する研究が数多く行われている [8]。

これまで、IPv4 を利用しているインターネットの AS レベルのトポロジーについて多数の研究が存在するが、次世代インターネットプロトコルである IPv6 のネットワークトポロジーについての研究はまだ少い [9] [10] [11]。そこで本論文では、IPv6 を利用して構成されている IPv6 AS ネットワークについて、これまで IPv4 で見出されているいくつかのべき乗則と small world 的性質について調べる。

以下、2. で IPv6 AS ネットワークについて説明し、本論文で利用した IPv6 AS ネットワークのデータについて説明する。3. において次数分布について述べる。4. で small world 的性質について調べる。5. でまとめを行う。

2. IPv6 自律システムネットワーク

2.1 IPv4 との相違

インターネットにおける経路制御は、AS と呼ばれる管理ドメイン間での経路制御と、AS 内部での経路制御の 2 つの階層

で行われている。各 AS は 特有の AS 番号で識別され、IPv4 ネットワークの運用で利用しているものと同一の AS 番号を IPv6 ネットワークの運用においても利用することができる。しかし、IPv6 インターネットに参加している AS の数は IPv4 と比較して少数であり、また、IPv4 と IPv6 で AS 間のピア関係が異なる場合が多いので、AS ネットワークトポロジーは IPv4 と IPv6 とでは異なっている。IPv6 AS ネットワークと IPv4 AS ネットワークとの主な違いとしては以下のことがあげられる [12]。

- 実験用アドレス空間 (6bone) と地域レジストリから割り当てられる実用アドレス空間 (RIR) が混在するネットワークである。

- 6bone アドレス空間のみをアナウンスする AS、RIR アドレス空間のみをアナウンスする AS と、両方をアナウンスする AS がある。

- ほとんどの AS が経路のフィルタをしていない。

- IPv6 in IPv4 トンネル接続が多い。そのため AS ネットワークトポロジーは、物理的トポロジーを直接反映していない。

以上のように、IPv6 と IPv4 とでは AS ネットワークの構成が異なっているので、これまでに IPv4 の自律システムネットワークで知られている性質を IPv6 において調べることに意義がある。

2.2 AS バスデータ

この節では、本研究で用いた AS バスデータについて述べる。IPv4 インターネットにおける AS 間の経路制御プロトコルには BGP-4 [13] が利用され、IPv6 インターネットにおいてはそれを拡張した BGP4+ [14] が利用される。どちらのプロトコルでも BGP ルータの経路表には、あるアドレスプレフィックスに到達するために通過する AS が AS 番号の列として表現されている。各 AS 内に存在する BGP ルータは、パケットの宛先のアドレスプレフィックスに到達することができる経路を経路表から探して、ネクストホップルータにパケットを転送する。

経路表の各アドレスプレフィックスへの AS パスに存在する各 AS をノード (点) とし、AS パスにおいて隣接する AS 間にリンク (辺) が存在するとして、重みなしの無向グラフを構成する。以下では、これを AS グラフと呼ぶことにする。このとき、1つのアドレスプレフィックスに対して複数の AS パスが存在する場合、実際のパケット転送においては最短経路が利用されるが、本研究では最短でない AS パスに含まれるリンクも AS グラフに取り入れて解析を行う。ただし、プライベート AS 番号をもつノードは無視した。また、AS set に含まれている AS 間の正確なリンク構造は決定できないので AS set は無視した。

1つの AS の BGP ルータの経路表には、その AS から見たネットワークトポロジーしか表現されていないので、AS ネットワーク全体を表す正確な AS グラフを構成することはできない。そのため、なるべく実際の IPv6 AS ネットワークの構造に近い AS グラフを構成するためには複数の AS における BGP ルータの経路表を組み合わせて AS グラフを構成する必要がある。そこで、本研究では Oregon 大学 Routeviews プロジェクト [15] のデータアーカイブのデータを利用する。ここ

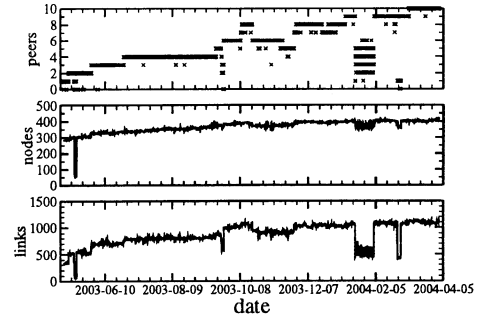


図 1 ピア数、ノード数、リンク数の時間変化

でデータを取得している BGP ルータは、複数の AS とマルチホップ BGP セッションを確立することによって複数の AS の BGP ルータのもつ経路表を収集し、2 時間毎のそのスナップショットを 1 つのファイルにして蓄積している。Routeviews プロジェクトのアーカイブは、これまで IPv4 の AS トポロジーの研究に利用されてきたが、IPv6 のデータの蓄積は 2003 年 5 月 3 日から開始されている。本稿では、この日から 2004 年 3 月 31 日までの 333 日分のデータを解析の対象とした。ピアの数は、データの蓄積開始直後は 1 箇所であったが、順次追加されて 2004 年 3 月 4 日から 10 箇所になっている。

図 1 に横軸を日付 (date) とし、上段にピア数 (peers)、中段にノード数 (nodes)、下段にリンク数 (links) をそれぞれプロットした。ピア数のプロットで所々ピア数が小さくなっている箇所がある。特に 2003 年 10 月 17 日から 11 月 25 日の間、2004 年 1 月 16 日から 2 月 2 日の間、そして 2004 年 2 月 23 日から 2 月 26 日の間に連続的にピアの数が減っている。これは、この期間に経路表を収集している BGP ルータと隣接する BGP ルータ間の接続が切断されてしまったためである。図 1 からリンク数は、ピア数の変化に対して大きく影響されることがわかる。特に 2004 年 1 月 16 日から 2 月 2 日の間は、その前後に存在するリンク数の半分以下のリンクしか観測されていない。このように経路表を取得するピア数が減るとリンク数も大きく減少することは、グラフのサンプリングについての研究結果 [16] と定性的に一致している。一方、ノード数は、リンク数に比較してピア数の変化に対してあまり影響されないことがわかる。

2003 年 5 月からの約 10ヶ月間のデータにおいてノード数は 283 から最大 418 まで約 48% 増加し、リンク数は、331 から 1134 まで約 243% 増加している。この増加になかには BGP 経路表を取得するピア数が増えることによって、以前から存在していたノードやリンクが新しく発見された場合も含まれる。特に、リンク数はピア数の増加に大きく影響されるので、実際の IPv6 AS ネットワークでのリンク数の増加率はこれより小さいと考えられる。リンク数の増加の様子をより正確に調べるためには、多数のピアでの測定を長期間安定して行なう必要がある。

3. ベキ乗則

3.1 ベキ指数の定義

この節では、IPv4 AS ネットワークトポロジーにおいて発見されているベキ乗則 [2] とそれを特徴づけるベキ指数を定義する。文献 [1] [2] では、IPv4 の AS グラフについて、順位分布、次数分布、隣接行列の固有値に関する 3 つのベキ乗則が良く成り立つことと、ホップ数内に存在するノード対の数の関係が近似的にベキ乗則にしたがっていること計 4 つの関係が示されており、それらの特徴づける量として、順位指数、次数指数、固有値指数、ホッププロット指数が以下のようにそれぞれ定義されている。

ベキ乗則 1 (順位指数): ある与えられたグラフにおいて、あるノード v の次数 d_v は、次数の大きさの降順に整列したときのそのノードの順位 r_v をある定数 R 乗したものに比例する。

$$d_v \propto r_v^R \quad (1)$$

ここで次数指数 R は、ノードの順位に対してそのノードの次数を両対数スケールでプロットしたときのプロットの傾きである。

ベキ乗則 2 (次数指数): ある与えられたグラフにおいて、ある次数 d の CCDF D_d は、次数をある定数 D 乗したものに比例する。

$$D_d \propto d^D \quad (2)$$

ここで CCDF は次数がある次数 d よりも大きい次数となる累積分布関数であり、次数が k であるノードの数を $n(k)$ 、全ノード数を N とすれば、 $D_d = \sum_{k>d} n(k)/N$ である。また、次数指数 D は、次数に対して CCDF を両対数スケールでプロットしたときのプロットの傾きである。

ベキ乗則 3 (固有値指数): ある与えられたグラフにおいて、そのグラフを表現する隣接行列の固有値 λ_i は、固有値の大きさの降順に整列したときの順番 i をある定数 ε 乗したものに比例する。

$$\lambda_i \propto i^\varepsilon \quad (3)$$

ここで固有値指数 ε は、固有値の順番 i に対して固有値を両対数スケールでプロットしたときのプロットの傾きである。

近似的ベキ乗則 (ホッププロット指数): ある与えられたグラフにおいて、ある h ホップ内に存在するノード対の数 $P(h)$ は、ホップ数 h をある定数 \mathcal{H} 乗したものに比例する。

$$P(h) \propto h^{\mathcal{H}}, \quad h \ll \delta \quad (4)$$

ここでホッププロット指数 \mathcal{H} は、ホップ数 h に対して $P(h)$ を両対数スケールでプロットしたとき、グラフの直径 δ よりも十分小さいホップ数 h におけるプロットの傾きである。

なお、これらの関係の他に IPv4 AS グラフにおいて、さらにいくつかのベキ乗則が見出されている [17]。IPv6 におけるそれらの関係については [10] で調べられている。

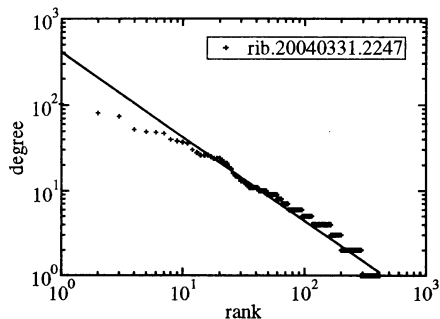


図 2 順位に対する次数

3.2 各指数の計算例

次節で Routeviews から取得した全期間の IPv6 AS パスデータについて上の 4 つの指数を調べるが、ここでは、まず、ある特定の日時のデータについて解析した例を示す。例示するデータとして、期間中最後のデータである 2004 年 3 月 31 日 22 時 47 分のファイル rib.20040331.2247 を使用する。このデータから構成した IPv6 AS グラフの全ノード数は 415、全リンク数は 1127 である。

まず、順位指数を調べるために次数の降順に整列したときのノード順位と次数の関係を図 2 にプロットした。横軸がノードを次数の昇順にしたときの順位 (rank) で、縦軸がその順位のノードの次数 (degree) である。プロットは両対数プロットであり、もし、ベキ乗則に従うならプロットは直線状になる。プロットの傾きと直線性を調べるために直線回帰を行い回帰直線を図 2 に実線で描いた。この回帰直線の傾きが順位指数であり、直線回帰によってその値は -0.984 と求められる。また、プロットの相関係数の絶対値 (absolute value of the correlation coefficient, ACC) は直線性の程度を表わし、この値が 1 近いほど直線に近い。この場合の ACC の値は 0.973 であり、プロットは良い直線性を示している。

次に次数指数を調べるために次数の CCDF を図 2 にプロットした。横軸が次数 (degree) で、縦軸が CCDF (CCDF) である。プロットは両対数プロットであり、もし、ベキ乗則に従うならプロットは直線状になる。プロットの傾きと直線性を調べるために直線回帰を行い回帰直線を図 3 に実線で描いた。この回帰直線の傾きが次数指数であり、直線回帰によってその値は -1.190 と求められる。この場合の ACC の値は 0.978 であり、プロットは良い直線性を示している。

ここで、順位指数 R と次数指数 D は、次数の分布を別の角度から眺めたものであり、もし次数の分布が厳密にベキ乗則に従うならば、 $R = 1/D$ となる [18]。上の例で、次数指数から順位指数を求めると -0.840 となる。この不一致は、測定の不完全さと不正確さのために起こると考えられる。この不一致は IPv4 のネットワークトポロジーについての解析においても存在し、トポロジーを特徴づける際に順位指数と次数指数の両方を報告することが有用であると文献 [2] で指摘されている。

固有値指数を調べるために降順に最初の 50 個の固有値を図

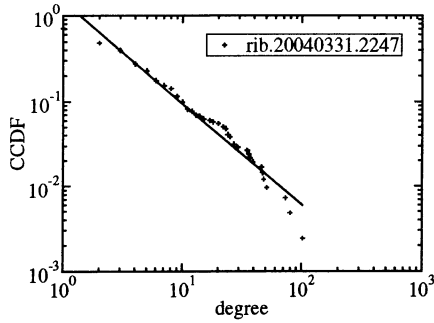


図3 次数のCCDF

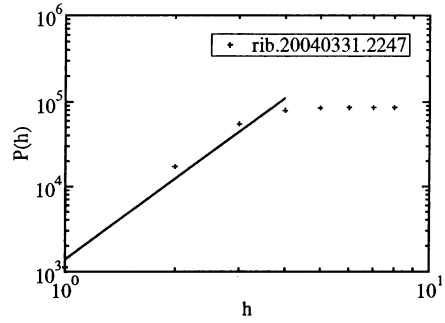


図5 ホッププロット

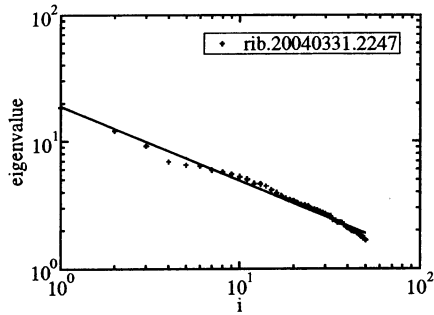


図4 固有値

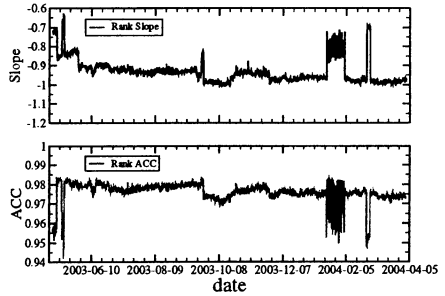


図6 順位指数と相関係数の時間変化

4にプロットした。横軸が固有値の降順に付けた番号(i)で、縦軸が i 番目の固有値(eigenvalue)である。プロットは両対数プロットであり、もし、べき乗則に従うならプロットは直線状になる。プロットの傾きと直線性を調べるために直線回帰を行い回帰直線を図4に実線で描いた。この回帰直線の傾きが固有値指数であり、直線回帰によってその値は -0.586 と求められる。この場合のACCの値は 0.993 であり、プロットは良い直線性を示している。

最後にホッププロット指数を調べるためにあるホップ数内に含まれるノード対の数を図5にプロットした。横軸がホップ数(h)で、縦軸が h ホップ内に含まれるのノード対の数($P(h)$)である。プロットは両対数プロットであり、もし、べき乗則に従うならプロットは直線状になる。プロットの傾きと直線性を調べるために $h \leq 4$ について直線回帰を行い回帰直線を図5に実線で描いた。この回帰直線の傾きがホッププロット指数であり、直線回帰によってその値は 3.158 と求められる。この場合のACCの値は 0.986 であり、プロットは良い直線性を示している。

以上のように、IPv4で発見されたべき乗則がIPv6でも成り立っていることがわかった。

3.3 指数と相関係数の時間変化

ここでは、IPv6 ASグラフの各べき乗則を特徴づける指数とそれを求めるのに利用したプロットの相関係数の時間変化を調べる。図6、図7、図8そして図9に順位指数、次数指数、固有値指数そしてホッププロット指数のそれぞれについて、横軸

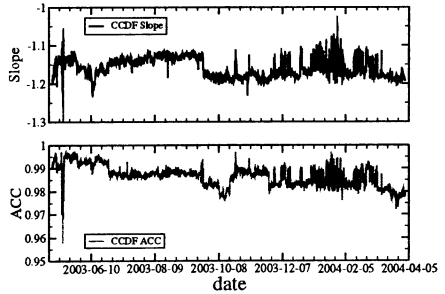


図7 次数指数と相関係数の時間変化

を日付(date)として、上段に各指数指数となる回帰直線の傾き(Slope)、下段に相関関数の絶対値(ACC)の時間変化をプロットした。

図6から順位指数の値はピア数が減少した時期を除けば -1.0 から -0.9 の間であり、ACCは 0.97 以上であることがわかる。そして、長期的にみると両方ともやや減少する傾向にあることがわかる。

図7から次数指数の値はピア数が減少した時期を除けば -1.2 から -1.1 の間であり、ACCは 0.97 以上であることがわかる。そして、長期的にみると両方ともやや減少する傾向にあることがわかる。

図8から固有値指数の値はピア数が減少した時期を除けば

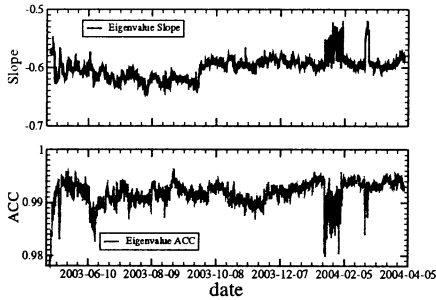


図 8 固有値指数と相関係数の時間変化

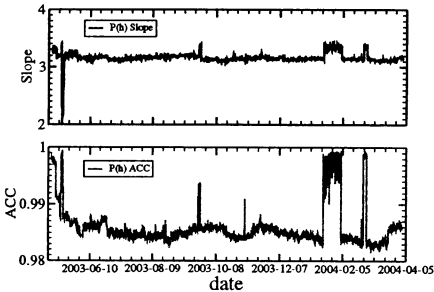


図 9 ホッププロット指数と相関係数の時間変化

-0.65 から -0.57 の間であり、ACC は 0.98 以上であることがわかる。そして、長期的にみると両方ともやや増加する傾向にあることがわかる。

図 9 からポッププロット指数の値はピア数が減少した時期を除けば 3.0 から 3.4 の間であり、ACC は 0.98 以上であることがわかる。そして、長期的にみるとポッププロット指数はほぼ一定であり、ACC はやや減少する傾向にあることがわかる。

以上のすべてのグラフにおいて、経路情報を収集している BGP ルータとピアとの接続が切断された期間の指数の変化から、指数と相関係数の評価はデータを取得したピア数に大きく依存する。また、解析を行なった全期間における長期的な指数と相関係数の変化量は、数日単位での変化量とあまり変わらない。そのため今回解析した全期間（約 10 ヶ月）でみられる指数と相関係数の時間変化の傾向がこのまま続くかどうかは、さらに長期にわたって調べる必要がある。

4. Small world

複雑なネットワークが共通して持つ性質として small world 的性質 [7] がある。これまでに、IPv4 インターネットの AS ネットワークは、small world 的性質を示すことが明らかにされている [19]。この節では IPv6 AS グラフが small world 的性質を持つかどうかを調べる。

Small world 的性質を図る尺度として、平均経路長 (mean path length または characteristic path length) と呼ばれ

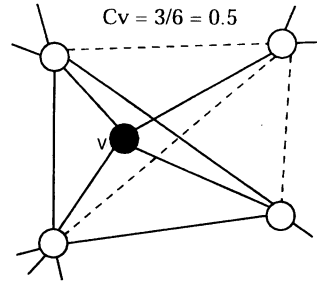


図 10 クラスター係数の例

る [7]) L とクラスタリング係数 C がある。平均経路長 L はグラフ内のノード間の最短経路長 (そのノード間に存在するリンク数の最小値) を全てのノード対について平均したものである。また、 C は次のように定義される。ノード v が k_v 個の隣接ノードをもつとする。それらの隣接ノード間には、最大 $k_v(k_v - 1)/2$ 個のリンクが存在することができる。そしてノード毎のクラスタリング係数 C_v をそれに対する実際に存在するリンクの数の比として定義する。ただし、 $k_v \leq 1$ の場合は $C_v = 0$ として計算する。例として図 10 の黒丸のノード v の C_v の計算例を示す。この v の次数は 4 であり、図中の白丸で表わした 4 つの隣接ノード間には最大で $4(4 - 1)/2 = 6$ 本のリンクが存在可能であるが、この場合は 3 本のリンクしか存在しない。したがって、この例では $C_v = 3/6 = 0.1$ となる。 C は、グラフ内の全ノード v についての C_v の平均値である。文献 [7] では、実際のネットワークのクラスタリング係数 C 、平均経路長 L とそのネットワークと等しいノード数とリンク数をもつランダムグラフ [20] のクラスタリング係数 C_{rand} 、平均経路長 L_{rand} とをそれぞれ比較して、

$$C \gg C_{rand} \text{ かつ } L \gtrsim L_{rand} \quad (5)$$

となるようなネットワークを “small world ネットワーク” と呼んでいる。

例として 2.2 のデータのうち 3.2 で使用したデータファイル rib20040331.2247 から構成した IPv6 AS グラフが small world 的性質をもつかどうかを調べる。まず、この IPv6 AS グラフで C と L を求めると $C = 0.285$ 、 $L = 3.24$ となる。一方、このグラフと同じノード数 $N = 415$ 、リンク数 $E = 1127$ をもつようにノード数 415、リンクの生成確率 $p = 2E/N(N - 1)$ として生成したランダムグラフでは $C_{rand} = 0.011$ 、 $L_{rand} = 3.65$ となる。したがって、式 (5) を満たすので IPv6 AS グラフが small world 的性質をもつことがわかる。

図 11 に横軸を日付 (date) として、上段に平均経路長 (L)、下段にクラスタリング係数 (C) の時間変化をプロットした。図 1 でピア数が小さい時期を除けば、平均経路長は 3.0 から 3.4 の間であり、クラスタリング係数は 0.15 から 0.31 であることがわかる。長期的にみると平均経路長は、初期の約 50 日間は減少しているがその後はほぼ一定である。一方、クラスタリング係数は、やや増加する傾向にある。また、これらの値は、ベキ乗則の各指数や相関係数と比較して、ピア数の減少に大きく

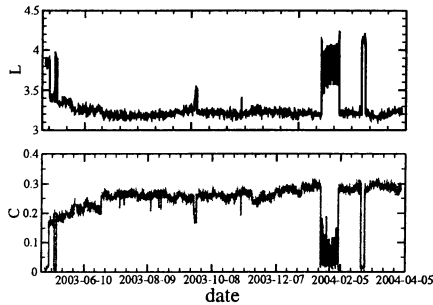


図 11 平均経路長とクラスタリング係数の時間変化

影響を受けている。

5. まとめと今後の課題

本稿では、Oregon 大学 Routeviews プロジェクトで収集されたデータをもとに、IPv6 AS ネットワークのトポロジ的な性質について調べた。これまでに IPv4 AS ネットワークの性質で知られているいくつかのベキ乗則を特徴づける指数と small world 的な性質に関連する平均経路長とクラスタリング係数を計算した。その結果、現在 IPv6 ネットワークに参加している AS 数は IPv4 と比べて少数であるが、これらの性質を同様を持つことがわかった。

今後の課題としては、このようなトポロジーを生成するモデルの提案が考えられる。このような次数分布のベキ乗則を再現するネットワークトポロジーの生成モデルはすでにいくつか提案されている [21]。しかし、これらのモデルではノード数が大きい極限においてこのような分布になることが示されているので、IPv6 の場合のようにノード数が比較的少ない場合においてどの程度分布を再現することができるかどうかをさらに調べる必要がある。

文 献

- [1] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "On power-law relationships of the Internet topology," *Proc. ACM SIGCOMM*, pp. 251–262, 1999.
- [2] G. Siganos, M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "Power Laws and the AS-Level Internet Topology," *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 11, No. 4, pp. 514–524.
- [3] R. Albert and A.-L. Barabási, "Diameter of the World-Wide Web," *Nature*, vol. 401, pp. 130–131, 1999.
- [4] B. Huberman and L. A. Adamic, "Growth dynamics of the World-Wide Web," *Nature*, vol. 401, pp. 131, 1999.
- [5] M. A. Jovanović, F. S. Annexstein, and K. A. Berman, "Modeling Peer-to-Peer network topologies through "Small-world" models and power laws," *IX TELECOMMUNICATIONS FORUM TELFOR*, 2001.
- [6] I. Clarke, S. Miller, T. Hong, O. Sandberg, and B. Wiley, "Protecting free expression online with Freenet," *IEEE Internet Computing*, 6(1), pp. 40–49, 2002.
- [7] D. J. Watts and S. H. Strogatz, "Collective dynamics of small-world networks," *Nature*, vol. 393, pp. 440–442, 1998.
- [8] R. Albert and A.-L. Barabási, "Statistical mechanics of complex networks," *Review of Modern Physics*, vol. 74, pp. 47–97, 2002.
- [9] G. Huston, "BGP Routing Table Analysis Reports,"

- <http://bgp.potaroo.net/>
- [10] 桑川一也, "IPv6 自律システムネットワークポロジーのベキ乗則," 情報学会第 65 年全国大会講演論文集 (3), pp. 265–267, 2003.
- [11] B. Huffaker, "IPv4 BGP Geopolitical Analysis," <http://www.caida.org/analysis/geopolitical/bgp2country/>
- [12] G. Döring, "An overview of the global IPv6 routing table," <http://www.space.net/~gert/RIPE/R44-v6-table/>, 2003.
- [13] Y. Rekhter and T. Li, "A border gateway protocol 4 (BGP-4)," *RFC1771*, March 1995.
- [14] T. Bates, R. Chandra, D. Katz, and Y. Rekhter, "Multiprotocol extensions for BGP-4," *RFC2283*, March 1998.
- [15] D. Meyer, "University of Oregon Route Views Project," <http://www.routeviews.org/>
- [16] A. Lakhina, J. W. Byers, M. Crovella and P. Xie, "Sampling Biases in IP Topology Measurements," *IEEE INFOCOM* 2003.
- [17] D. Magoni, J. Pansiot, "Analysis of the Autonomous System Network Topology," *ACM Computer Communication Review*, vol. 31, no. 3, pp. 26–37, July 2001.
- [18] L. A. Adamic, "Zipf, power laws, and Pareto — A ranking tutorial," <http://www.parc.xerox.com/iea/>
- [19] R. Pastor-Satorras, A. Vázquez and A. Vespignani, "Dynamical and correlation Properties of the Internet," *Physical Review Letters*, vol. 87, no. 25, 258701, 2001.
- [20] Erdős and Rényi, "On the evolution of random graphs," *Publication of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences*, vol. 4, pp. 17–60, 1960.
- [21] A. Medina, I. Matta, and J. Byers, "On the Origin of Power Laws in Internet Topologies," *ACM Computer Communications Review*, vol. 30, no. 2, pp. 18–34 2000.