

## IPv6 自律システムネットワークトポロジーのベキ乗則

条川 一也<sup>†</sup>電気通信大学 総合情報処理センター<sup>†</sup>

## 1 はじめに

ネットワークのトポロジーを理解することは、トポロジックな性質を考慮したプロトコルの設計をしたり、シミュレーションにおいて利用される現実的なネットワークモデルを作るために重要である。これまでに IPv4 を利用しているインターネットの自律システム (AS) のネットワークトポロジーにおいていくつかのベキ乗則が成り立つことが示されている [1, 2]。

本研究では、次世代インターネットプロトコルである IPv6 を利用して運用されている IPv6 インターネットにおける AS ネットワークのトポロジーにおいてもこれらのベキ乗則が成り立つかどうかを調べた。

## 2 自律システムネットワークトポロジーのベキ乗則

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 AS 番号を持ち、IPv4 と IPv6 の両方で同じ番号を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 はまだ少数であり 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 とで異なっている。

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 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+ 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 の経路が AS 番号の列として表現されている。各 AS をノードとし、各 AS 経路において隣接する AS 間にリンク (エッジ) が存在するものとして無向グラフを構成する。以下では、これを AS グラフと呼ぶ。

以下に IPv4 インターネットの AS グラフにおいて発見されたベキ乗則をまとめる。まず、Faloutsos ら [1] によって発見された 4 つのベキ乗則がある。

- ランク指数 (rank exponent)  $\mathcal{R}$ : あるノード  $v$  の度数  $d_v$  は、度数の降順にソートした場合のノードの順位  $r_v$  をある定数  $\mathcal{R}$  乗したものに比例する ( $d_v \propto r_v^{\mathcal{R}}$ )。
- 次数指数 (outdegree exponent)  $\mathcal{O}$ : 次数  $d$  をもつノードの頻度  $f_d$  は、次数  $d$  をある定数  $\mathcal{O}$  乗したものに比例する ( $f_d \propto d^{\mathcal{O}}$ )。
- ホッププロット指数 (hop-plot exponent)  $\mathcal{H}$ : ホップ数  $h$  がグラフの直径  $\delta$  よりも十分小さい場合、 $h$  ホップ

プ内にある全てのノード対の数  $P(h)$  は、 $h$  をある定数  $\mathcal{H}$  乗したものに比例する ( $P(h) \propto h^{\mathcal{H}}$ ,  $h \ll \delta$ )。

- 固有指数 (eigen exponent)  $\mathcal{E}$ : グラフを隣接行列で表現したとき、その隣接行列の固有値  $\lambda_i$  は、固有値を降順にソートした場合の順位  $i$  をある定数  $\mathcal{E}$  乗したものに比例する ( $\lambda_i \propto i^{\mathcal{E}}$ )。

AS グラフは、メッシュ状の中心部とその周辺の木構造をもつ部分グラフとに分解できる。この木とノード間の最短経路に関して、Magoni と Pansiot [2] によってさらに 4 つのベキ乗則が追加された。

- ペアランク指数 (pair rank exponent)  $\mathcal{P}$ : あるノード対  $p$  間の異なる最短経路の数  $n_p$  は、降順にソートした対のランク  $r_p$  をある定数  $\mathcal{P}$  乗したものに比例する ( $n_p \propto r_p^{\mathcal{P}}$ )。
- 最短経路数指数 (number of shortest path)  $\mathcal{N}$ : あるノード対間の異なる最短経路の数  $n$  の頻度  $f_n$  は、 $n$  をある定数  $\mathcal{N}$  乗したものに比例する ( $f_n \propto n^{\mathcal{N}}$ )。
- ホランク指数 (tree rank exponent)  $\mathcal{T}$ : ある木  $t$  のサイズ  $s_t$  は、降順にソートした木の順位  $r_t$  をある定数  $\mathcal{T}$  乗したものに比例する ( $s_t \propto r_t^{\mathcal{T}}$ )。
- 木サイズ指数 (tree size exponent)  $\mathcal{S}$ : あるサイズ  $s$  を持つ木の頻度  $f_s$  は、木サイズ  $s$  をある定数  $\mathcal{S}$  乗したものに比例する ( $f_s \propto s^{\mathcal{S}}$ )。

## 3 AS 経路データ

IPv6 の AS 経路のデータとして Web サイト [3] で公開されている 3 つの AS における 2002 年 11 月 18 日の BGP ルータの経路表を利用して AS グラフを構成した。比較のために、Web で公開されている同日の IPv4 の BGP 経路表 [4] から導かれた AS グラフについても調べた。

	IPv6	IPv4	ratio (%)
ノード数	284	14329	1.98
リンク数	899	29496	3.05
平均次数	6.33	4.12	153
最大次数	69	2606	2.65

表 1: 各 AS ネットワークにおける緒量

表 1 に IPv4 と IPv6 の各 AS グラフのノード数、リンク数、ノードあたりの平均次数、最大次数をまとめた。まだ IPv6 に対応している AS は少なく IPv4 の

Power Laws of IPv6 Autonomous Network Topology

<sup>†</sup> Kazuya KUMEKAWA (kumekawa@cc.ucc.ac.jp)<sup>†</sup> Information Processing Center, University of Electro-Communications

AS グラフに比較してノード数は 1.98%, リンク数は 3.05%である。一方, 平均次数は, IPv6 のほうが IPv4 よりも 53%大きい。

#### 4 解析結果

IPv4 と IPv6 の各 AS グラフにおいて各指数を評価するために必要な量を図 1 から図 4 のグラフに示す。各グラフは両対数グラフであるので, ベキ乗則に従う場合にはプロットは直線状になる。全てのグラフにおいて, 印と実線が IPv6 のデータ点と回帰直線であり, ×印と破線が IPv4 のデータ点と回帰直線である。

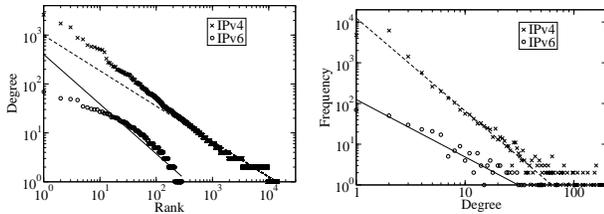


図 1:  $\mathcal{R}$ (左) と  $\mathcal{O}$ (右) に関するグラフ

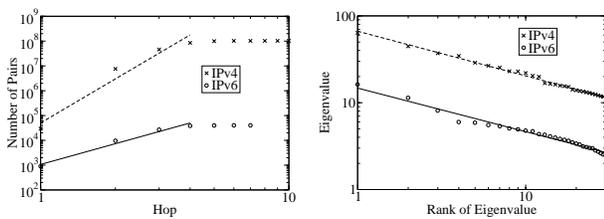


図 2:  $\mathcal{H}$ (左) と  $\mathcal{E}$ (右) に関するグラフ

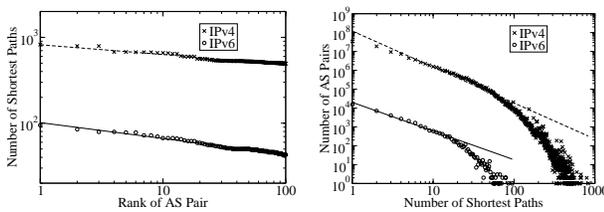


図 3:  $\mathcal{P}$ (左) と  $\mathcal{N}$ (右) に関するグラフ

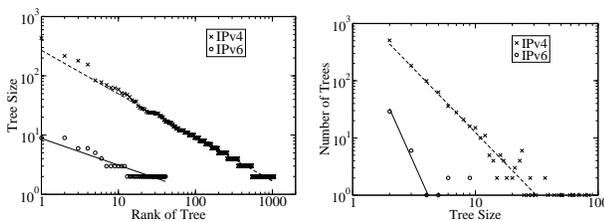


図 4:  $\mathcal{T}$ (左) と  $\mathcal{S}$ (右) に関するグラフ

表 2 に各グラフから直線回帰によって得られた各指

数をまとめた。括弧内は, それぞれの直線回帰における相関係数である。IPv4 における相関係数は全て 0.96 以上であり, これまで発見されているベキ乗則が確認できる。IPv6 では, 相関係数が 0.95 以下となっていたり, 図 4 の  $\mathcal{S}$  のようにデータ点が少ないものもあるが, ベキ乗則に近い関係を示している。

	IPv6	IPv4
$\mathcal{R}$	-1.02(0.947)	-0.723(0.965)
$\mathcal{O}$	-1.41(0.915)	-2.28(0.980)
$\mathcal{H}$	2.78(0.982)	5.89(0.977)
$\mathcal{E}$	-0.502(0.989)	-0.514(0.997)
$\mathcal{P}$	-0.184(0.991)	-0.114(0.973)
$\mathcal{N}$	-1.52(0.995)	-1.91(0.983)
$\mathcal{T}$	-0.450(0.931)	-0.735(0.988)
$\mathcal{S}$	-4.79(0.990)	-2.11(0.981)

表 2: 各指数と相関係数 (acc)

#### 5 まとめと今後の課題

IPv6 インターネットにおける自律システムのネットワークトポロジーのベキ乗則について調べた。IPv6 の自律システムのノード数, リンク数は IPv4 より少ないがいくつかのベキ乗則を示している。

今後の課題として, より多くの異なる AS において取得した経路データを追加して解析することがあげられる。AS ネットワークの解析とモデル化において, 限られた BGP ルータの経路表から構成された AS ネットワークトポロジーは, 実際のトポロジーを完全に再現するものではない。IPv4 のネットワークトポロジーの解析において, さらに多くの AS 経路データを付け加えるとベキ乗則からずれることが指摘されている [5]。本研究で行った IPv6 の場合の解析についても IPv4 の場合と同じことが言えるので, さらに多くの AS における BGP ルータの経路表のデータを追加した場合にどの程度変化するのかを調べる必要がある。

#### 参考文献

- [1] M. Faloutsos, P. Faloutsos, C. Faloutsos, "On Power-Law Relationships of the Internet Topology." ACM SIGCOMM'99.
- [2] D. Magoni, J. Pansiot, "Analysis of the Autonomous System Network Topology." ACM Computer Communication Review, vol. 31, no. 3, pp. 26-37, July 2001.
- [3] H. Imaizumi, "BGP Perspective Homepage" <http://www.ep.net/bgp-perspective/>
- [4] "University of Oregon Route Views Project", <http://www.routeviews.org/>
- [5] Q. Chen, H. Chang, R. Govindan, S. Jamin, S. J. Shenker and W. Willinger, "The Origin of Power Laws in Internet Topologies Revisited", IEEE Infocom 2002.