

# ベキ指数を用いたインターネット バックボーンのネットワーク構造分布

丸田 一

## 【目次】

1. はじめに
2. ネットワーク構造の分析方法
3. バックボーンのネットワーク構造分析
4. まとめ

## [要旨]

インターネットの各階層がベキ法則に従うことが、近年の研究によって明らかになりつつある。ベキ法則に従うネットワークはスケールフリー性や不平等性等の特徴を持ち、インターネットの性格への理解が深まっている。本研究では、インターネット最下層のバックボーン回線を取り上げ、そのネットワーク構造がベキ法則に従うかどうか検討した。分析は、国内の全情報通信の代理変数とみることができるIIJ(株式会社インターネットイニシアティブ)バックボーンを対象に行った。IIJのバックボーンは急速に成長するネットワークであり、ベキ法則に従うことから、インターネットのバックボーンもベキ法則に従うといえる。また、IIJのバックボーンの成長過程をみると、NOC(ネットワークオペレーションセンター)が地理的に固定し、回線総容量が急増した1998年以降、ベキ指数(ジップ次数)が増加し、東京等のハブへの集積が進んでいることがわかる。一方、黎明期である1994～97年のベキ指数は安定しておらず、テレホーダイが開始された1995年が特異値を示している。このように、ベキ指数を用いたネットワーク分析によって、バックボーン回線のネットワーク構造や成長過程を明らかにすることができた。

キーワード: インターネット、バックボーン回線、ベキ法則、ベキ指数、東京一極集中、地域IX、IIJ、ハブ

**[Abstract]**

Recent research has been providing more support for the idea that Internet layers are formed along Power Law lines. Network systems, which follow Power Law principles, show scale-freeness and unequal distributions, and examining them can deepen our understanding of the Internet itself. The present paper focuses on the most basic levels of the Internet backbone, to determine whether or not its network structure is governed by the Power Law. The analysis is based on data for IJ, which is believed to have parameters representative of domestic information systems. IJ is a rapidly expanding network, and it follows the Power Law, which can be inferred to be the case for the Internet backbone as a whole. Taking a closer look at IJ's growth processes reveals that following the geographic stabilization of NOCs and the rapid increase in circuit volume in 1998, there was a numerical increase in Power Law Indexes (Zipf Indexes) and also an increasing concentration of site hubs in Tokyo. It is true that the early years of 1994-97 do not show stabilized Power Law distribution, and 1995, the year in which the Telehodai system went into effect, shows untypical figures. On the whole, however, applying Power Law Indexes to network analysis has shed light on the network structure of and growth process of backbone circuiting.

Keywords; Internet backbone circuiting, Power Laws, Power Law Indexes, Tokyo-based centralization, Regional IX, IJ, "hubs"

# 1. はじめに

近年の研究によって、インターネットの各階層におけるネットワーク構造がベキ法則に従うことが明らかになりつつある。1993年には高安秀樹がインターネットのパケット流量がベキ法則に従うこと<sup>※1</sup>を、1997年には佐藤進也がWebサーバの振舞いがベキ法則に従うこと<sup>※2</sup>を、1999年バラバシらはWWWのリンク数がベキ法則に従うこと<sup>※3</sup>を発見している。ベキ法則に従う性質を持つネットワークは、ネットワークを構成するノードのリンクの分布、あるいはノードの値の分布がベキ乗分布を示す。ベキ乗分布とは、正規分布やランダムな分布とは異なり、結合数の少ない非常に多くのノードと、結合数が非常に多いごく少数のノードからなる偏った分布を示し、スケールフリー性や不平等性等の性格を持つ。なお、結合数が非常に多いごく少数のノードを、一般的にハブと呼んでいる。インターネットがベキ法則に従うということは、インターネットがこれらの性格を持つことを表しており、一連の研究はインターネットの理解を深めることに寄与している。

しかし、インターネットの最下層であるバックボーン回線についての研究はほとんどみられない。これが本研究において、バックボーン回線がベキ法則に従うかどうかを検討することにした消極的理由である。

わが国のインターネットのバックボーン回線の接続形態は、東京を頂点とした一極集中構造を示しているといわれる。インターネット関連企業や技術者が最も多く集積し、最も大きな市場規模を有する東京に回線を集中させることは、わが国全体でみれば合理的な選択であり、バックボーン回線の東京一極集中は、インターネットの急激な成長に伴って効率的な設備投資が繰り返されてきた結果とみることができる。一方、地方の立場からみた場合、バックボーン回線の東京一極集中は、地方において通信遅延の発生、耐障害性の弱さ、運用・管理権限を東京に奪われることなど諸問題をもたらすとともに、こうした条件不利が地域の発展を阻害するという指摘がある<sup>※4</sup>。実際に、こうした問題に対して、地域IX (Internet exchange) をはじめとした問題解決策が行われているが、現時点では実験的かつ局所的である。しかし今後、東京への企業や技術者の一層の集積が進み、あるいは地方分権が進展して地域が今以上に真剣に発展を模索する段階になると、バックボーン回線の諸問題が、全国的な問題として顕在化することも想定される。その段階では、東京一極集中といわれるバックボーン回線のネットワーク構造について、より深い理解が必要となる。

そこで本研究では、東京一極集中といわれるインターネットのバックボーン回線のネットワーク構造を把握することにした。バックボーン回線における東京一極集中とは、東京を最大のハブとしたベキ乗分布を示していると考えることができる。こうしたことから、バックボーン回線が、ベキ法則に従うかどうか検討することにした。

## 2. ネットワーク構造の分析方法

### 2.1 ネットワーク分析方法

本研究では、グラフ理論を用いて、対象となるバックボーン回線を表示することにした。グラフ理論とは、いくつかの“ノード(要素)”と、それを結ぶいくつかの“リンク=ノード(要素)の関係”からなる図形をグラフと定義し、様々な角度からグラフの性質を研究する数学の一分野(組み合わせ論)である。グラフはすべて比較的簡単な図形で表現できるだけでなく、行列で表すことが可能であり、行列を操作することでグラフの性質を探っていくことに特徴がある(図1参照)。

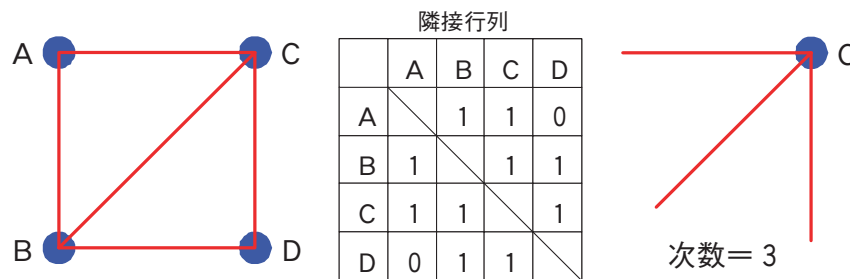


図1 グラフ理論

グラフ理論は、それぞれのノードが持つリンク数を“次数”として表し、隣接行列(図2参照)を作成する。この場合、ノードが持つリンク数だけでなく、リンクの太さや、リンクの方向の有無を考慮する。リンクに方向が有る場合、図2に示すように、ノードに入り込む方向のリンクを「インカミングリンク」、ノードから出ていく方向を「アウトゴーイングリンク」という。

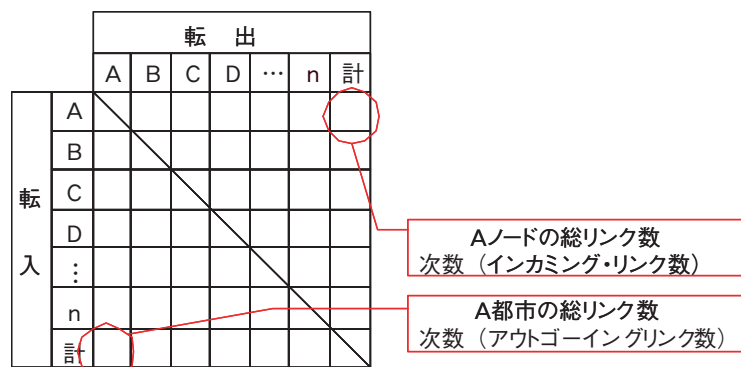


図2 “ネットワーク構造”の例

この隣接行列を用いて次数の集合の分布形を調べることで、つまり次数の集合がベキ法則に従うかどうかを調べることで、対象となるネットワーク構造を明らかにする。具体的には、隣接行列の次数の総数について、次数の総数とその順位の関係が、“ジップの法則”に従うかを見ていくことにする。リンクに方向がある場合は、インカミングリンクとアウトゴーイングリンク別々に次数の総数をとることにする。

## 2.2 ベキ法則の適合

“ジップの法則”とは、“ランクサイズルール(順位・規模法則)”とも呼ばれ、都市の人口規模と規模順位、英単語の出現頻度と出現順位などの規則性を示したものである。アウエルバッハによって初めて指摘され<sup>※5</sup>、米国の言語学者ジップ<sup>※6</sup>によって規則性が見出された。ゼロックス・パロアルト研究センターのラーダ・A・アダミック<sup>※7</sup>は、2000年、ジップの法則が、“ベキ法則”を確率密度関数とする累積確率分布関数として解釈できることを示した<sup>※8</sup>。

ベキ法則とは、2つの変数  $y$  と  $x$  との間に(1)式の関係が成立する場合をいい、ジップの法則やランクサイズルールのみならず、生命現象や社会的事象の分布に広くみられることが知られている。

$$y = bx^{-\gamma} \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方、ジップの法則は、都市の人口規模を  $x$ 、全体における規模順位を  $R$  とした場合に(2)式で示される関係である。ランクサイズルールは、ジップの法則において  $\beta$  の値が1の場合であることがわかる。

$$x = aR^{-\beta} \quad \dots\dots\dots (2)$$

順位とは、その値以上のサンプルがいくつ存在するかを示した指標である。そこで、(2)式を、人口規模が  $x$  以上である都市の数  $R$  を示す関係式に変換すると、以下の(3)式になる。

$$R = a^{1/\beta} x^{-1/\beta} \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、都市の絶対数ではなくて、都市総数  $N$  に対する割合  $r$  の式に書き直せば、以下の(3)'式が得られる。

$$r = (A/N) x^{-1/\beta} \quad A = a^{1/\beta} \quad \dots\dots\dots (3)'$$

さらに、人口規模が  $x$  以上ではなくて以下である都市の割合  $p_x$  をとるならば、上記 (3)' 式は以下の (4) 式のように示せる。これは変数  $x$  に関する累積確率分布関数とみなせる。

$$p_{x|X<x} = 1 - (A/N) x^{-1/\beta} \quad \dots\dots\dots (4)$$

次に、この累積確率分布関数((4)式)の導関数を求めることで、確率密度関数(5)式が得られる。そして、それがベキ法則((1)式)と同形であることから、ベキ法則は、ジップ法則の背後にある確率密度関数を示す関係と考えることができる。

このように都市の人口規模の分布がジップ法則に従うとすれば、都市の人口規模はベキ法則に従っているということが出来る。同様に、次数とその順位の関係が、ベキ法則に従っているということが出来る。

$$p_x' = (A/N \cdot \beta) x^{-(1/\beta+1)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

### 2.3 ベキ法則の特徴

ジップの法則の背後にあるベキ法則について、その特徴を整理したい。  
ベキ法則を示す関係式(1)の両辺を常用対数に変換すれば、以下の(1)'式となる。

$$\log y = \log b - \gamma \log x \quad \dots\dots\dots (1)'$$

このようにベキ法則の示す分布は、両対数グラフ上でマイナス  $\gamma$  の傾きを持つ対数線型の分布である。正規分布のように平均値の周辺にほとんどが集中する分布ではなく、 $x$  の規模(スケール)とは無関係に一樣(スケールフリー)な分布を示す(図3参照)。これをここでは「ス

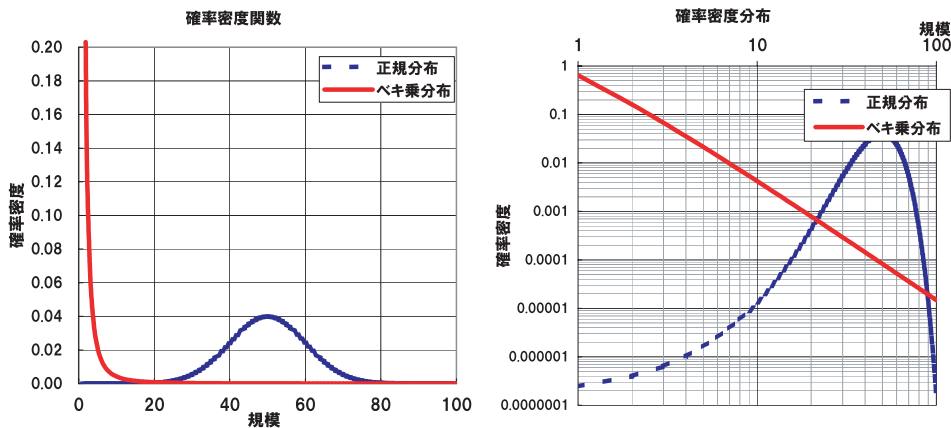


図3 正規分布とベキ乗分布

ケールフリー性”と呼ぶことにする。これは、“上には上が下には下がいる関係”がどの順位帯にも同じように現れることや、部分にみられる関係が全体の関係と一致することを示している。

また、ベキ法則の場合、大多数が最小値の近辺に集まっている一方で、ごく少数がきわめて大きな値(最大値に近い値)を持つ。その結果として、パレートの法則<sup>※9</sup>が示す“80対20”と呼ばれるような関係、つまり2割ほどの少数者が全体量の8割を手にするという不平等な関係が生まれる。これを“不平等性”と呼ぶことにする。実際に、2002年の住民基本台帳人口を用いて、全国の市町村の中で人口第1位の東京23区から、全順位の20%にあたる641位の東予市までの累積人口を算出すると、総人口の78.9%に相当する。このように、2割の大規模都市が8割の人口を抱えるという“80対20”の規則性が表れている。

このような少数者への集中度を示すのがベキ指数 $\gamma$ である。つまり、 $\gamma$  値が小さければ小さいほど(あるいはジップの法則における $\beta$  値が大きければ大きいほど)、相対的に少数者が相対的に多くを独占することになる。正規分布を示す母集団の特性は、“平均値”と“分散”によって集約的に表現できるとすれば、ベキ法則に従う母集団の特性は、“ネットワーク構造”(転入・転出人口)の変化が、タイムラグを生じて“点の値”“最大値(もしくは最小値)”と“ベキ指数”によって集約的に表現できる。

さらに、ベキ乗分布では、平均値の周辺に分布の偏りがなく、分散が無限大になる。一般的に無限大の分散の場合は、いくらエネルギーを入力しても発散して、系は定常状態にはならないが、ベキ乗分布を持つ集合は、エネルギーを入力すると無限に分散して、系から出力しなくとも、分散無限大という定常状態に収束するという性格を持っている<sup>※10</sup>。

これは、ベキ法則が発生する理由に深くかかわっている。つまり、ベキ法則が生まれる条件として、①たえず系への入力があること、②それを出力することなく内部で凝縮を重ね一時的な定常状態を作ること、と整理することができる。構造物理学者バラバシは、ネットワーク上にベキ法則に従う分布が現れる理由として、ノードが増えるあるいはリンク数が増えるというネットワークの“成長”と、リンクの張り方がランダムではなく、強いノードにリンクするなど成長にある傾向を持つ“優先的選択”の2つの条件をあげており<sup>※11</sup>、先の2条件と同じことを示している。なお、これらの2条件をまとめて、成長する自律系(ネットワーク)と言い換えることもできる。

## 3. バックボーンのネットワーク構造分析

### 3.1 本研究の分析対象等

本研究では、IIJ(株式会社インターネットイニシアティブ)における自社バックボーンネットワークを対象に、ネットワーク分析を行うことにした。IIJのバックボーンネットワークは、北は札



幌から南は沖縄まで全国をカバーする21のNOC(ネットワークオペレーションセンター)間を、高速デジタル回線で接続し、構成されており、また、東京と大阪からは米国への回線が、同じく東京からはアジア(A-Bone)への回線が確保されている。

分析対象をIIJのバックボーンネットワークに限定したのは、バックボーンネットワークの整備過程がすべて公開されていることが最大の理由である。それに加え、バックボーンネットワーク規模が国内最大級であることや、独立系大手ISPであることからユニバーサルサービスを免れており、バックボーンに対する投資が経済原則に則って行われていると想定されることから、実際にやりとりされているすべての情報通信の代理変数とみなすことが可能であること<sup>\*12</sup>、などが理由である。

グラフ理論では、対象の集合を、“ノード”と“リンク”とで単純にモデル化することから始める。本研究では、全国に存在するNOCを“ノード”、NOC間の関係性を“リンク”と置き換えることにした。

NOC間の関係性については、NOC間の接続の有無だけを調べても、東京一極集中という特徴は現れにくい。東京には、多くのNOCからリンクが張られているばかりか、他NOCよりも太い通信回線容量(速い回線速度)を持つリンクが張られている。こうしたことから、NOC間の関係性は、NOC間的高速デジタル回線における通信回線容量を用いることにした。なお、NOC間の通信回線容量において、リンクの方向はみられない。

### 3.2 IIJのバックボーンの詳細

2002年末時点での各ノード間の回線容量を表1に整理した。21のNOCがあることから21×21の行列が形成されるが、実際にリンクが存在するのはごく一部に過ぎない。NOC間の回線容量は東京～大阪が4,800Mbpsで最高となっており、次いで大きい順に東京～横浜(2,700Mbps)、東京～名古屋(1,200Mbps)となっていることから、東京が国内最大のハブであることがわかる。

これをもとに、バックボーンネットワーク構造をグラフ化したものが図4である。国内最大ハブである東京を中心に木(TREE)構造を示している。この東京に次いで、大阪が第2のハブとなり、名古屋、札幌、福岡の3都市が第3のハブとなっている。また、これらのハブは、域内でも複数のノードを有しており、域内で大容量の回線を抱えていることも特徴である。さらに、ハブ以外のノードのリンク数(次数)は1であるが、広島および仙台が2つのハブからリンクが張られており、リンク数が2になっている。

「札仙広福(さっせんひろふく)」と呼ばれ、同じ地方政令指定都市として横並びで扱われることの多い札幌、仙台、広島、福岡をみると、札幌と福岡がハブとして位置づけられているのに対して、広島と仙台は単なるノードにしかすぎない。これは、ネットワーク構成上の地理的な条件の影響と想定される。

	東京	大阪	横浜	名古屋	富山	仙台	札幌	浦和	柏	千葉	浜松	岡崎	福岡	広島	岡山	京都	神戸	金沢	高松	熊本	沖縄	アジア	米国	計		
東京	16170	4800	2700	1200	150	390	345	12	6	15													100	3875	29763	
大阪	4800	1902		600									600	150	150	345	195	195	150						605	9692
横浜	2700																								2700	
名古屋	1200	600		150							45	6													2001	
富山	150																	45							195	
仙台	390						45																		435	
札幌	345						150																		495	
浦和	12																								12	
柏	6																								6	
千葉	15																								15	
浜松				45									6												51	
岡崎				6				6																	12	
福岡		600											156	150							12	45			963	
広島		150											150												300	
岡山		150																	45						195	
京都		345																							345	
神戸		195														0									195	
金沢		195			45																				240	
高松		150													45										195	
熊本													12												12	
沖縄													45												45	
アジア	100																								100	
米国	3875	605																							4480	
計	29763	9692	2700	2001	195	390	540	12	6	15	51	12	963	300	195	345	195	240	195	12	45	100	4480	52446		

備考) 単位 [Mbps]

網掛け部分は域内の幹線容量を示す。他ネットワーク (WIDE 等) との接続回線や域内 NOC 間の回線が対象となる。

資料) <<http://www.ijj.ad.jp/network/backbone-history.html>> (図 4、図 6 も同様)

表1 2002年度末時点のIIJのNOC間の回線容量

他にも、富山～金沢、浜松～岡崎、京都～神戸、岡山～高松には、容量は大きくないものの末端ノード間にリンクが張られ、局所的な閉域を作ることで上位ノードの負荷の低減を図っていることがわかる。

### 3.3 IIJのバックボーンのネットワーク構造分析

全NOCの回線総容量について分布を調べた。

図6は、2002年のIIJのNOCの回線総容量の分布を示したものである。東京が26,763Mbpsと群を抜いて高く、次いで大阪(9,692Mbps)、横浜(2,700Mbps)、名古屋(2,001Mbps)の順となっている。ハブといわれる数少ないNOCが高い総容量を持つ一方、大多数のNOCが低い総容量しか持たない偏った分布を示している。

次に、NOCの回線総容量を目的変数、NOCのランク(順位)を説明変数とした関数式をベキ乗曲線に回帰させた。結果は表2の通りである。修正済決定係数0.91という高い説明力を持つことなどから、バックボーンネットワークにおけるNOCの回線総容量の分布はベキ法則に従うといえる。なお、ここでのベキ指数( $\beta$ =ジップ次数)は、-2.66という高い値で

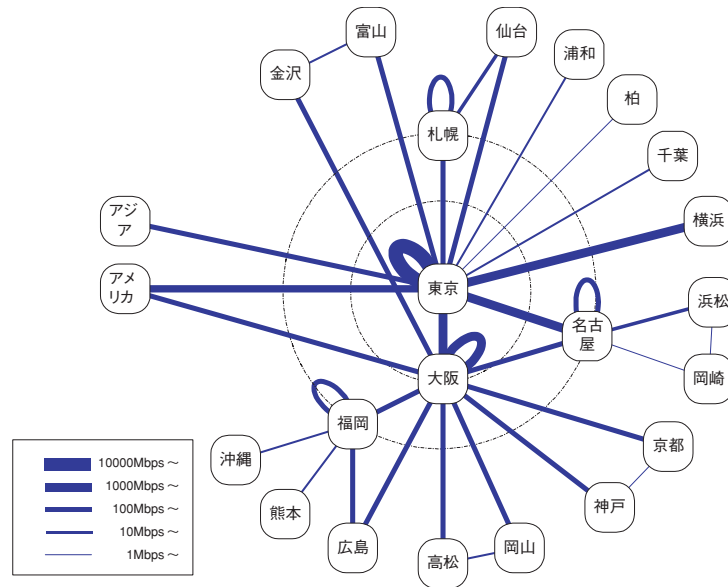


図4 IIJのバックボーンネットワーク構造

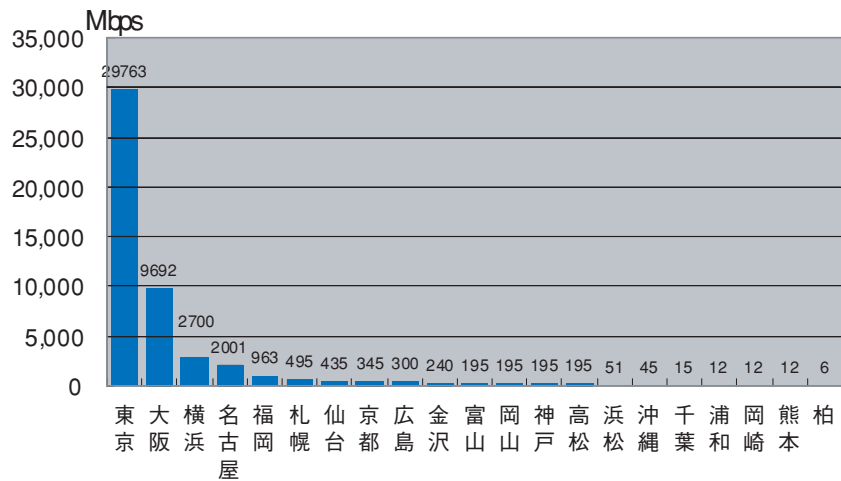


図5 IIJノードの回線総容量

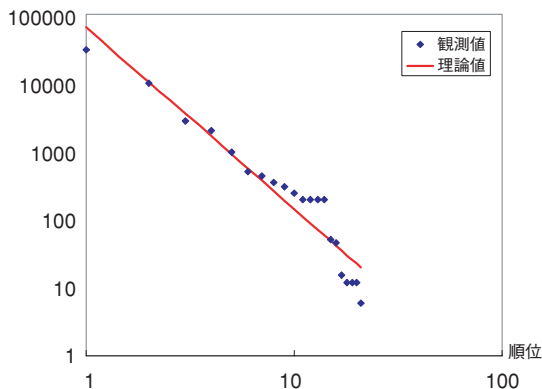


図6 IIJ NOCの回線総容量とランクとの関係

サンプル数	21
平均	2279.33
偏差平方和	8.8E+08
分散	4.2E+07
標準偏差	6487.02
$< y = a x ^ b >$	
係数 a	64862
定数項 b	-2.66053
決定係数	0.9154
修正済決定係数	0.9109
重相関係数	0.9568
修正済重相関係数	0.9544
タービンワットソ比	0.4207

表2 関数式のべき乗曲線への回帰結果

あり、ハブへの集中度が高いことがわかる。

## 3.4 成長過程におけるネットワーク構造分析

ここでは、1994～2002年の間における、IIJバックボーンのネットワーク構造の経年変化を検討した。

### 3.4.1 IIJバックボーンの成長過程

図7は、1994～2002年の間のNOCの成長とランクの変化を整理したものである。1994年には4 NOCであったバックボーンは、翌1995年には早くも8 NOCに倍増し、2001年には21 NOCとなるなど8年後で5倍、17 NOCが追加されている。また、1996年以降、東京と大阪の順位は不動であるものの、それ以下の順位は大きく変動している。例えば、東京、大阪に次ぐ第3位のNOCをみると1999年に名古屋から横浜に変動し、4位・5位をみると3都市が入れ替わっている。下位に降りれば降りるほど順位変動が激しくなることが特徴である。一方、2001年以降上位5都市の順位が固定されていることをみると、順位変動を繰り返しながら、徐々に上位都市が確定していく様子が見てとれる。このように、バックボーンの急成長に伴って、NOC間の盛んな順位の入れ替えが起こり、次第にハブが形成されていくことがわかる。

一方、IIJバックボーン回線の総容量をみると、より一層インターネットの急成長が見てとれる(図9)。1994年の総容量はたかだか6.7Mbpsであったが、2002年には47,866Mbpsとなり、8年間で実に7千倍以上に拡大している。

### 3.4.2 ベキ法則発生 の条件

2.3 で述べたように、ベキ法則が生まれる条件は、①ノードが増えるあるいはリンク数が増えるというネットワークの「成長」と、②リンクの張り方がランダムではなく、強いノードにリンクするなど成長にある傾向を持つ「優先的選択」である。

IIJバックボーンは、1994～2002年において総容量が7千倍以上に成長するとともに、中下位のNOC間の順位変動が盛んに行われ、ハブへの集積度が高まりつつあることから、成長の条件は満たしている。また、経済原則に則ったNOCへの投資が行われていることから優先的選択の条件にも合致しているといえる。

### 3.4.3 IIJバックボーンのベキ指数の変化

このようにネットワークが急成長するなかで、1994～2002年におけるノードの回線総容量とランクとの関係を両対数グラフ上で表したものが図8である。ベキ指数(ジップ次数)は1995年を除き約2.1～2.7の傾きを保ちながら、経年で上側に移動していることがわかる。上側への移動は、ネットワーク規模の拡大を示しており、また、ベキ指数(ジップ次数)がほぼ一定と

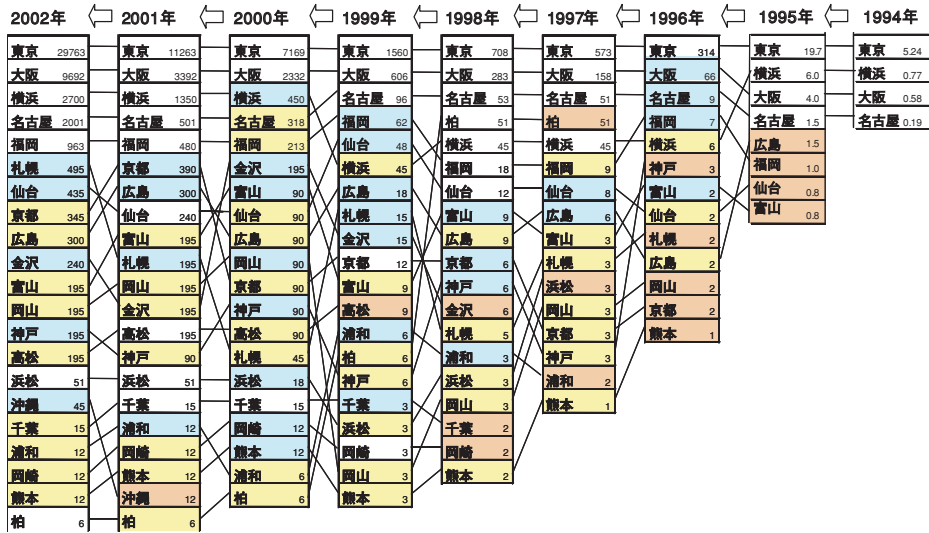


図7 IJバックボーンのNOCの成長とランクの推移

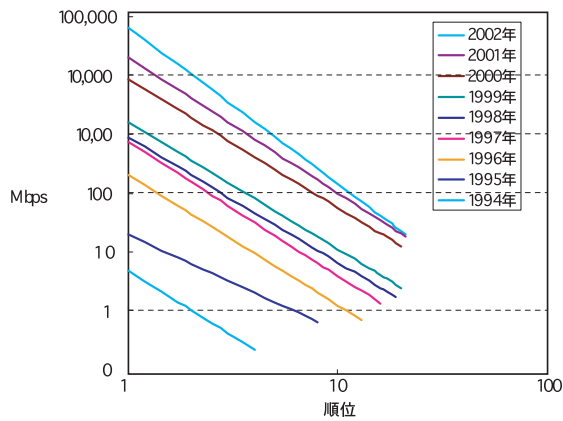


図8 1994～2002年におけるIJノードの回線総容量とランクとの関係の変化

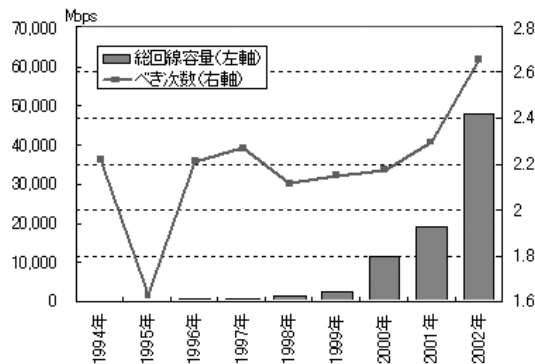


図9 IJバックボーンの総回線容量とベキ指数の推移

いうことは、ネットワークは急成長しながらも、この間、東京を中心に同じ集積度を維持していることを示している。

次に、ベキ指数(ジップ次数)の経年変化をみると(図9)、ある程度ノードが地理的に固定化するとともに、バックボーン回線の総容量の急激な増加がみられる1998年からは、ベキ指数(ジップ次数)も総容量の増加にあわせて増加を示しており、1998～2002年の4年間で約0.5ポイントも増加している。ベキ指数(ジップ次数)の増加はネットワーク上の上位ノード(ハブ)への集積度の高まりを表すことから、1998年以降、バックボーンネットワークの急成長に伴って、東京等のハブへの集積が進んでいることがわかる。

一方、黎明期といえる1994～97年においては、ベキ指数(ジップ次数)は乱高下しているように見える。しかし、1995年の1.61を特異値と考えると、1994～97年の間は2.2台の比較的安定したベキ指数(ジップ次数)を示していることがわかる。

1995年のベキ指数が激減した理由としては、テレホーダイのサービス開始が指摘できる。テレホーダイとは、23時から翌8時までの夜間と早朝、特定電話番号へいくらかけても通話・通信料金が定額で利用できる月極定額料金サービスである。1995年8月からNTTがサービスを開始し、ダイヤルアップのインターネット利用を激増させた。全国一様にバックボーン需要が増加したことから、一時的にノード総容量の分布が分散したと考えられる。さらに、1994年のNetscape創業を受けたWebブームの始まり、Windows 95でTCP/IPを標準サポートし、インターネットにアクセスできるPCの数が激増した年でもある。

また、1997年と1998年との間にギャップが生じているが、この理由はいくつか想定される。一つは、1997年7月、商用インターネットエクステンジであるJPIX(旧KDD系)やMEX(IIJ系)が誕生したことや、OCN、ODN、DIONなどのキャリアが軒並みISP市場に参入し、BekkoameやRIMNETといったベンチャーISPにとって代わったことなどが指摘できる。それまで、バックボーンに対する投資は経済原則に則って行われていたと想定されるが、競合他社が登場したことで投資パターンに変化が生じたと考えられる。

## 4. まとめ

本研究で得られた結論は、以下の通りである。

- ① IIJバックボーンのネットワーク構造は、ベキ法則に従う性質を持つ。IIJのバックボーンは、規模が国内最大級であること、ユニバーサルサービスを免れていること、経済原則に則って投資が行われていることなどから、全情報通信の代理変数とみなすことが可能である。こうしたことから、国内インターネットのバックボーンは、ベキ法則に従うといつてよい。

- ② ベキ法則が出現する条件として、(1)成長と、(2)リンクの優先的選択があげられる。実際に、IIJバックボーンをみると、1994～2002年において総容量が7千倍以上に成長するとともに、中下位のNOC間の順位変動が盛んに行われ、ハブへの集積度が高まりつつあることから(1)成長の条件は満たしている。また、経済原則に則ったNOCへの投資が行われていることから、(2)リンクの優先的選択の条件に合致しているといえる。
- ③ 1994～2002年におけるベキ指数(ジップ次数)の推移をみると、ある程度NOCが地理的に固定化するとともに、バックボーン回線総容量の急増がみられる1998年以降は、総容量の増加にあわせてベキ指数(ジップ次数)も増加を示している。これは、バックボーンネットワークの急成長に伴って、東京等のハブへの集積が進んでいることがわかる。
- ④ 一方、黎明期といえる1994～97年においては、ベキ指数(ジップ次数)は安定しておらず、特に1995年が前後と比較して特異値を示している。この理由としては、テレホーダイのサービス開始や、Netscape創業を受けたWebブームの始まり、Windows 95でTCP/IPを標準サポートしたことでインターネット利用可能なPCが激増したことなどがあげられる。
- ⑤ 1997～98年との間にベキ指数(ジップ次数)のギャップが生じている。この理由は、1997年にJPIX(旧KDD系)やMEX(IIJ系)が誕生したことや、通信キャリアが軒並みISP市場に参入し、Bekkoame等のベンチャーISPにとって代わったことなどが指摘できる。それまで、バックボーンに対する投資は経済原則に則って行われていたが、競合他社が登場したことで投資パターンに変化が生じたと考えられる。

丸田 一(まるた・はじめ)

主幹研究員 助教授

## 注・参考文献

- ※1 M.Takayasu, and H.Takayasu [1993] "*Fractals 1.*" 371
- ※2 佐藤進也 (NTT光ネットワークシステム研究所) 他 [1997] 「アクセス履歴を利用したWebサーバの状態の推定」。ここではWebサーバの振舞いがベキ法則に従うことを導出するだけでなく、サーバ成長や活性度とベキ指数の関係など一歩踏み込んだ分析をしている。
- ※3 アルバート=ラズロ・バラバシ [2002] 『新ネットワーク思考—世界のしくみを読み解く』NHK出版、pp.96-115
- ※4 中川郁夫 [2002] 「地域IXの挑戦—地域を支えるインフラモデル」
- ※5 Auerbach.F [1913] "*Das Gesets der Bevolkerungsknzentration.*" Petermann's Mitteilungen, 59, pp.74-76
- ※6 <<http://linkage.rockefeller.edu/wli/zipf/>>
- ※7 Lada A. Adamic "Zipf, Power-laws, and Pareto - a ranking tutorial" Xerox Palo Alto Research Center  
<<http://ginger.hpl.hp.com/shl/papers/ranking/ranking.html>>
- ※8 公文俊平 [2003] 「新ネットワーク理論と地域情報化」
- ※9 イタリアの社会・経済学者ヴィルフレード・パレートは、各個人の所得金額  $x$  と所得金額  $x$  以上の所得者数  $R_x$  との間に、「 $R_x = Ax^{-\alpha}$ 」という関係 (パレートの法則) が成立していることを見出した。
- ※10 高安秀樹 [1998] 「1. 複雑系のフラクタルゆらぎ」『ゆらぎの科学8』森本出版
- ※11 アルバート=ラズロ・バラバシ [2002] 『新ネットワーク思考—世界のしくみを読み解く』NHK出版
- ※12 鞍谷雅敏、遠藤幸彦「東京は知識経済化の主舞台となりうるか」『知的資産創造』2003.4、野村総合研究所