

特別研究報告

題目

インターネットトポロジの計測とその構造特性の評価

指導教授

村田 正幸 教授

報告者

原 佑貴

平成 18 年 2 月 20 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

インターネットトポロジの計測とその構造特性の評価

原 佑貴

内容梗概

インターネットのトポロジを計測した結果、その出線数分布はべき乗則に従うことが示されている。べき乗則に従うトポロジでは、多数のノードが少数の出線数を有する一方で少数のノードは多数の出線数を有する特徴を持つ。べき乗則に従うトポロジを生成するためのモデル化手法がいくつか検討されているものの、これらのモデルで生成されるトポロジと、ルータレベル、特に ISP のトポロジは、トポロジ構造が大きく異なることが近年指摘されている。その結果、経路制御手法などのネットワーク制御手法の評価にこれらのトポロジを用いた場合には、その手法の性能に大きな相違が現れることが明らかになっている。

ISP トポロジの計測は海外の ISP に対してのみ行われており、国内の ISP トポロジの構造についてはべき乗則に従うかどうかも含めて明らかになっていないのが現状である。従って、ネットワークの研究において、ネットワーク制御手法の有効性を海外の ISP トポロジを利用して検証したとしても、国内の ISP トポロジに手法を適用した際に性能が大きく異なる可能性がある。

そこで、本報告では、国内の 3 つの ISP を対象としたトポロジを計測し、その計測によって得られたトポロジを海外の ISP 内トポロジおよび BA モデルで生成した BA トポロジと比較を行うことで、国内 ISP 内トポロジの構造特性の評価を行う。計測の結果、国内のいずれの ISP 内トポロジにおいても、その出線数分布がべき乗則に従うことがわかった。また、その構造特性を評価した結果、国内の 2 つの ISP 内トポロジの構造は北米の ISP 内トポロジと特性が異なり、BA モデルで生成されるトポロジの構造特性に近い性質を示すことが明らかとなった。一方、もう 1 つの国内の ISP 内トポロジに関しては、海外の ISP 内トポロジ、および国内の 2 つの ISP 内トポロジ、また BA トポロジのいずれのトポロジとも異なる構造特性を有することも明らかとなった。

主な用語

べき乗則、ルータレベルトポロジ、AS レベルトポロジ、ISP 内トポロジ、構造特性

目次

1	はじめに	6
2	べき乗則に従うネットワークのトポロジ	8
2.1	べき乗則に従うネットワークのトポロジ	8
2.1.1	AS (Autonomous System) レベルのトポロジ	8
2.1.2	ルータレベルのトポロジ	8
2.2	トポロジ生成モデル	9
2.2.1	BA (Barabási–Albert) モデル	9
2.2.2	FKP モデル	11
2.2.3	ER (Erdos–Rényi) モデル	12
3	ISP 内トポロジの計測	13
3.1	計測方法	13
3.2	計測結果	13
4	ISP 内トポロジの構造特性	18
4.1	評価指標	18
4.2	トポロジの構造特性の比較	18
5	おわりに	37
	謝辞	38
	参考文献	39

図目次

1	ルータレベルのインターネットトポロジ例	9
2	BA トポロジの例: ノード数 100 の場合	10
3	出線数分布: BA トポロジ	11
4	出線数分布: ER トポロジ	12
5	トポロジマップ: ISP A	14
6	トポロジマップ: ISP B	15
7	トポロジマップ: ISP C	16
8	出線数分布: ISP A	19
9	出線数分布: ISP B	19
10	出線数分布: ISP C	20
11	累積補分布: ISP A	20
12	累積補分布: ISP B	21
13	累積補分布: ISP C	21
14	Degree centrality と Betweenness centrality の相関: ISP A	23
15	Degree centrality と Betweenness centrality の相関: ISP B	24
16	Degree centrality と Betweenness centrality の相関: ISP C	25
17	Degree centrality とクラスタ係数の相関: ISP A	26
18	Degree centrality とクラスタ係数の相関: ISP B	27
19	Degree centrality とクラスタ係数の相関: ISP C	28
20	平均ホップ数: ISP A	30
21	最大ホップ数: ISP A	30
22	Degree centrality: ISP A	31
23	Betweenness centrality: ISP A	31
24	クラスタ係数: ISP A	32
25	平均ホップ数: ISP B	32
26	最大ホップ数: ISP B	33
27	Degree centrality: ISP B	33
28	Betweenness centrality: ISP B	34
29	クラスタ係数: ISP B	34
30	平均ホップ数: ISP C	35
31	最大ホップ数: ISP C	35
32	Degree centrality: ISP C	36

33	Betweenness centrality: ISP C	36
34	クラスタ係数: ISP C	41

表目次

1	計測結果: ノード数、リンク数	13
---	---------------------------	----

1 はじめに

近年、いくつかの研究においてインターネットトポロジの計測が行われている [1-3]。その結果、インターネットのトポロジはべき乗則に従うことが明らかにされている [1]。べき乗則に従うトポロジとは、ノードに連結されるリンク数が k である確率 $P(k)$ が $k^{-\gamma}$ (γ は定数) に比例するトポロジである。べき乗則に従うトポロジでは、正規分布やランダム分布とは異なり、一部のノードに多数のリンクが接続される一方で、多数のノードには少数のリンクが接続されるという特性をもつ [4, 5]。さらに、文献 [4] では、べき乗則に従うトポロジは、リンク数が大きいノード (ハブノード) とリンク数が小さいノード (非ハブノード) 間のホップ数が小さくなり、その結果、ネットワークのノード間が極めて小さいホップ数で接続されるというスモールワールド特性を持つことが示されている。また、文献 [2] では、BGP の経路表を用いたトポロジの計測が行われており、AS (Autonomous System) をノードとするドメイン間ネットワークのトポロジがべき乗則に従うことが示されている。さらに、文献 [3] においては、traceroute を用いた ISP のネットワークトポロジ計測手法が提案されており、その手法による計測結果から、ISP 内のネットワークトポロジもまたべき乗則に従うことが示されている。

一方、べき乗則に従うトポロジに関する多くの研究では、BA モデル [5] によって生成されるトポロジを対象としている [6, 7]。また、文献 [8] では、ルータ機器の製品の能力による制限により、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という点に着目したトポロジのモデル化手法が提案されている。しかし、これらのモデルで生成されるトポロジと、ルータレベル、特に ISP のトポロジでは、その構造が大きく異なることが近年指摘されており、ネットワーク制御手法の評価に適用した際には、その結果に大きな相違が現れることが明らかになっている [9]。

インターネットトポロジの計測については、海外の ISP に対してのみ行われており、東京一極集中型のトポロジ (スター型トポロジ) と推測されている日本の ISP のトポロジの形状については全く明らかにされていない。したがって、経路制御手法などのネットワーク制御手法の評価をする際には、海外の ISP トポロジもしくはモデルにより生成されたトポロジを利用するしかなく、国内の ISP トポロジに適用した際の性能を評価することはできない。そこで、本報告では、ISP トポロジ、特に国内の ISP トポロジを対象としたトポロジ計測を行い、その結果から国内の ISP 内トポロジの構造特性を明らかにする。

traceroute を用いた国内の 3 つの ISP を対象としたトポロジ計測の結果、いずれのトポロジに関してもその出線数分布がべき乗則に従うことが明らかとなった。また、海外の ISP 内トポロジ、および BA トポロジと比較評価を行った結果、国内の ISP 内トポロジのうち 2 つ

は、海外の ISP 内トポロジより BA トポロジに近い構造特性を有することがわかった。しかし、もう 1 つの国内の ISP 内トポロジに関しては、海外の ISP 内トポロジ、および国内の 2 つの ISP 内トポロジ、また BA トポロジのいずれのトポロジとも異なる構造特性を有することがわかった。

本報告の内容は以下の通りである。まず 2 章において現在のインターネットに現れるべき乗則の説明と、べき乗則に従うトポロジの性質を述べる。3 章では、国内の ISP 内トポロジの計測結果を示す。4 章では、3 章において得られた結果から、海外の ISP 内トポロジと比較評価を行うことで国内の ISP 内トポロジの構造特性を明らかにする。最後に本報告のまとめと今後の課題を 5 章で述べる。

2 べき乗則に従うネットワークのトポロジ

本章では、現在のインターネットと同じ性質をもつといわれているべき乗則に従うネットワークのトポロジについて簡単に述べる。

2.1 べき乗則に従うネットワークのトポロジ

べき乗則に従うネットワークとは、ノードに連結されるリンク数の分布がべき乗則に従うネットワークのことである。べき乗則に従うとは、あるノードに連結されるリンク数が k である確率 $P(k)$ が、 $P(k) = ck^{-\gamma}$ という関係式を満たす (c, γ は定数)。すなわち、べき乗則に従うネットワークでは、少数のノードに多数のリンクが接続される一方で、多数のノードに少数のリンクが接続されるという特性をもつ。しかし、出線数の分布が求まればトポロジが唯一に決定されるわけではない。文献 [8] では、同一の出線数をもつ複数のトポロジを挙げ、それらのトポロジの特性と性能の関係が示されている。

以降では、AS レベルおよびルータレベルにおける、べき乗則に従うネットワークのトポロジの構造を詳しく述べる。

2.1.1 AS (Autonomous System) レベルのトポロジ

AS 間の接続状況を計測した結果から、そのトポロジ形状はべき乗則に従うことが明らかになっている [1]。具体的に、1つの AS を 1 ノード、AS 間をつなぐ相互リンクをリンクとした場合、ノードに連結されるリンク数の分布がべき乗則に従う。AS 間におけるべき乗則は、AS 間で使用されるルーティングプロトコルである BGP (Border Gateway Protocol) の経路表によって確認されており、比較的多くのリンクをもつ AS 同士が接続されている傾向が見られる。AS レベルのトポロジを生成する手法としては、BA (Barabási-Albert) モデル [5] がある。

2.1.2 ルータレベルのトポロジ

AS レベルと同様にルータレベルでもノードに接続されるリンク数がべき乗則に従うことが示されている。これは、traceroute コマンドによる計測によって示されており、べき乗則に従うネットワークになる理由として、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 からユーザ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 [10]、2) ネットワークの信頼性を高めようとする結果 [11]、3) ルータ機器の製品の能力 [8] などが挙げられている。

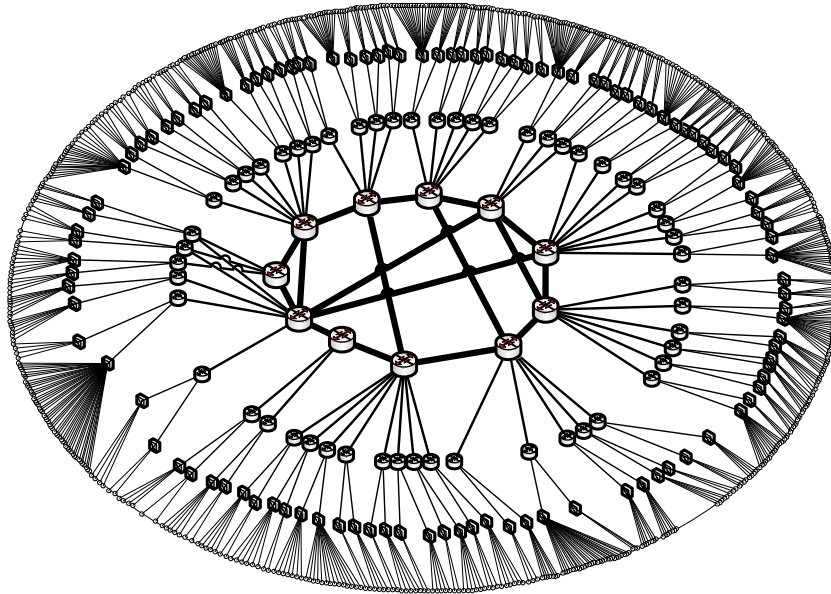


図 1: ルータレベルのインターネットトポロジ例

文献 [8] では、ルータ機器の製品の能力による制限により、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という点に着目している。その上で、ある出線数分布に対してスループットが最大となるトポロジ形状を求めた結果が図 1 のような 3 レベルの階層構造になることが示されている。図 1 から分かるように、ルータレベルのトポロジでは、ハブノードがアクセスノードのトラヒック収容に使用されている。このハブノードの位置は、先ほど述べた AS レベルのトポロジと大きく異なる。

2.2 トポロジ生成モデル

本章では、べき乗則に従うネットワークのトポロジ生成モデルとして、BA (Barabási–Albert) モデルおよび FKP モデルの 2 つのモデルの特徴を説明する。また、べき乗則のトポロジ特性を明確にするため、比較のトポロジ生成モデルとして ER モデル (Erdos–Rényi) についても説明を行う。

2.2.1 BA (Barabási–Albert) モデル

べき乗則に従うネットワークのトポロジ生成モデルの 1 つである BA モデル [5] について説明する。BA モデルでは、ネットワークの成長過程が表現されている (*Incremental Growth*)。

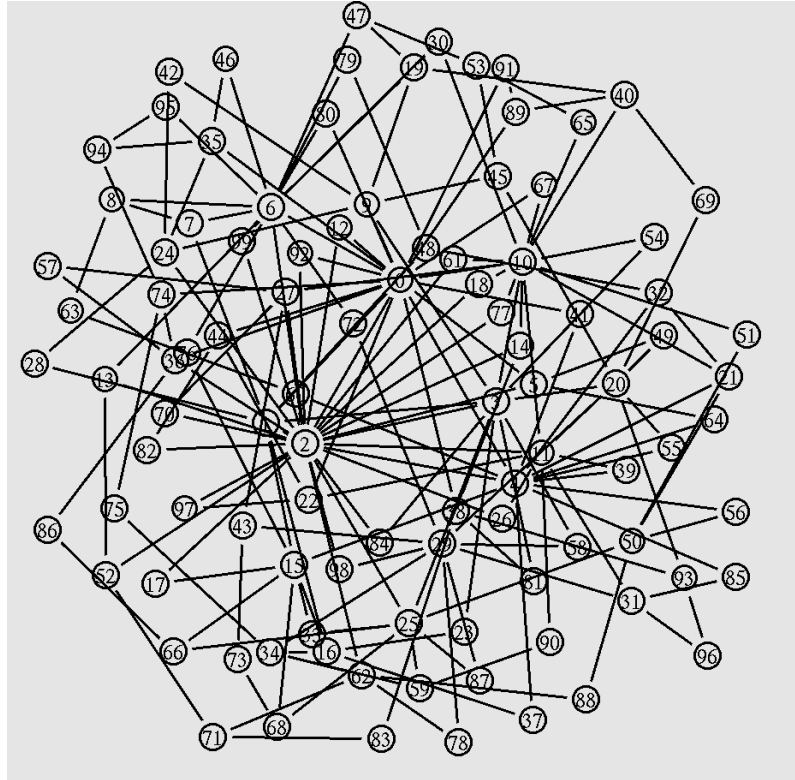


図 2: BA トポロジの例: ノード数 100 の場合

また、出力リンク数 k_i が大きい程、ノード i へリンクが接続される確率 $\Pi(k_i)$ が高くなるように接続確率を与えている (*Preferential Attachment*)。BA モデルでは、これらの 2 つの特徴に基づいてネットワークトポロジが生成される (図 2 参照)。

Step1: 初期ノードとして m_0 個のノードを配置する。

Step2: ネットワークのノード数が N 未満である場合、Step3 へ。ノード数が N であればトポロジ生成を終了する。

Step3: ノードを 1 個追加する (*Incremental Growth*)。

Step4: 追加したノードが式 (1) の確率に従い、他の $m(\leq m_0)$ 個の相異なるノードへリンクを接続する (*Preferential Attachment*)。Step2 へ。

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

BA モデルによって生成されたトポロジの出線数分布の例を図 3 に示す。

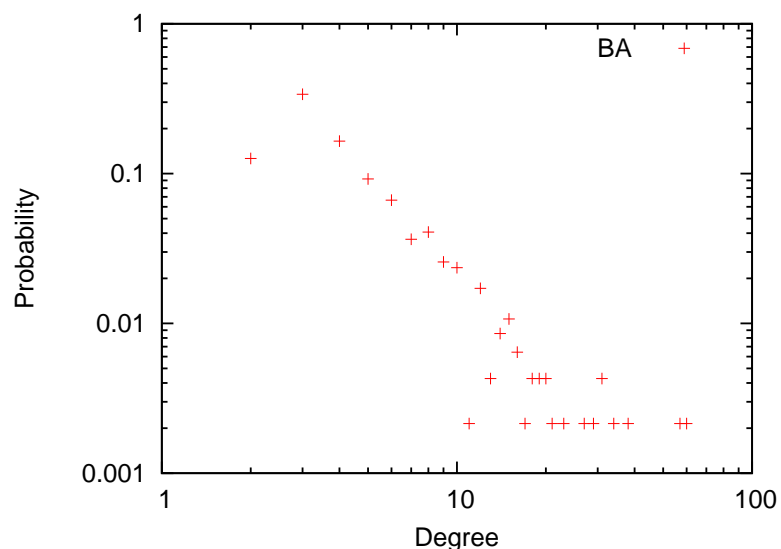


図 3: 出線数分布: BA トポロジ

2.2.2 FKP モデル

べき乗則に従うネットワークのトポロジ生成モデルの1つである FKP モデル [10] について説明する。FKP モデルでは、BA モデルと同様にネットワークの成長過程が表現されているが、リンクを接続する際のコストが BA モデルとは異なり、ノードを追加する際、ノード間の物理的距離とトポロジのホップ数の重み付き和が最小となるノードに対してリンクが接続される。

具体的に、ノード i を追加する際、次の式 (2) を満たすノード j に対してリンクが接続される。

$$\alpha \cdot w_{ij} + l_{0j} \tag{2}$$

(w_{ij} : ノード間の物理的距離、 l_{0j} : ノード j と初期配置のルートノードとのホップ数、 α : ノード間の物理的距離に対する重み)

α の値が小さければ、各ノードはより多くのリンクが接続されているノードに対してリンクを接続される。特に、 $\alpha = 0$ は、スター型のトポロジを生成する特別な場合である。逆に、 α の値が大きければ、各ノードは最も近いノードにリンクを接続し、ER トポロジのようなふるまいを示す。さらに、文献 [12] において、AS レベルトポロジにも適用できるように拡張もなされている。

次節においてべき乗則に従うネットワークのトポロジ特性を明確にするため、比較のトポ

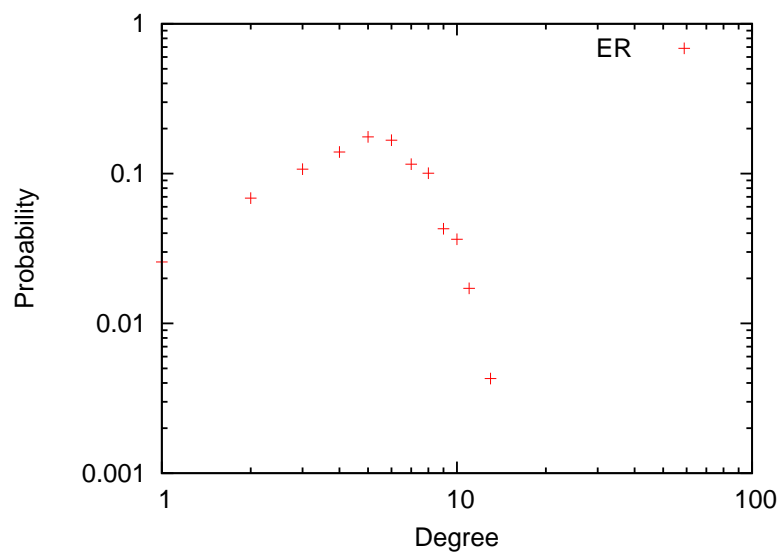


図 4: 出線数分布: ER トポロジ

ロジ生成モデルとして ER (Erdos–Rényi) モデルを述べる。

2.2.3 ER (Erdos–Rényi) モデル

ER モデルはランダムネットワークを生成するモデルの 1 つである。ネットワークの規模 (ノード数) が固定であること、各ノードペア間のリンク接続確率が一定であること特徴である。ER モデルでは、ネットワークのトポロジ生成に以下の 2 つのパラメータを用いる。

N : ノード数 ($N > 0$)。

p : ノード間を接続する確率 ($0 < p < 1$)。

上記 2 つのパラメータを用い、次の 2 つのステップによりトポロジを生成する。

Step1: N 個のノードを配置する。

Step2: 全てのノードペア間に確率 p でリンクを張る。

ER モデルによって生成されたトポロジでは、出線数分布が図 4 のように平均値の周辺に分布が集中するといった性質が現れる。

表 1: 計測結果: ノード数、リンク数

	ノード数	リンク数
ISP A	514	958
ISP B	2250	3187
ISP C	1883	3304

3 ISP 内トポロジの計測

本章では、国内の3つのISP (以後、それぞれのISPを順にISP A、ISP B、ISP Cと呼ぶ) を対象としたトポロジ計測の手法とその計測結果を述べる。まず、3.1節において、ISP 内トポロジの計測方法を述べる。それによるISP 内トポロジの計測結果を3.2節で述べる。

3.1 計測方法

本節では、実際にISPのトポロジの計測を行う方法を述べる。まず、トポロジの計測はtracertコマンドを用いて行った。tracertによって、あるホストまでのネットワーク経路上のルータがリスト表示され、経路上にどのようなルータが位置しているかを知ることができる。

まず、トポロジ計測の前提として、対象としているISPのトポロジを構成するルータは、IPアドレスの逆引きによるDNS情報を用いてホスト名にISP名が含まれるものとしている。既に発見できているISPのルータのIPアドレスと隣接するIPアドレス(同じプレフィックスに属するIPアドレス)を対象としてtracertを実行し、新たなルータが発見できなくなるまでこれを繰り返すことによりISPのルータとそのリンクを調査する。

3.2 計測結果

本節では、3.1節の方法による3つのISP内トポロジの計測結果を示す。まず、計測により調査できたノード数およびリンク数を表1に示す。また、実際にどのような構造を有しているかを可視化するため、計測により得られたトポロジマップをそれぞれ図5から図7に示す。ただし、図中のリンクの長さは物理的距離に関係したものではない。

次に、それぞれのトポロジの出線数分布、および累積補分布 (CCDF: Complementary Cumulative Distribution Function) をそれぞれ図8から図10、図11から図13に示す。累積補分布は、リンク数に対してそのリンク数以上のリンクが接続されているノード数の割合

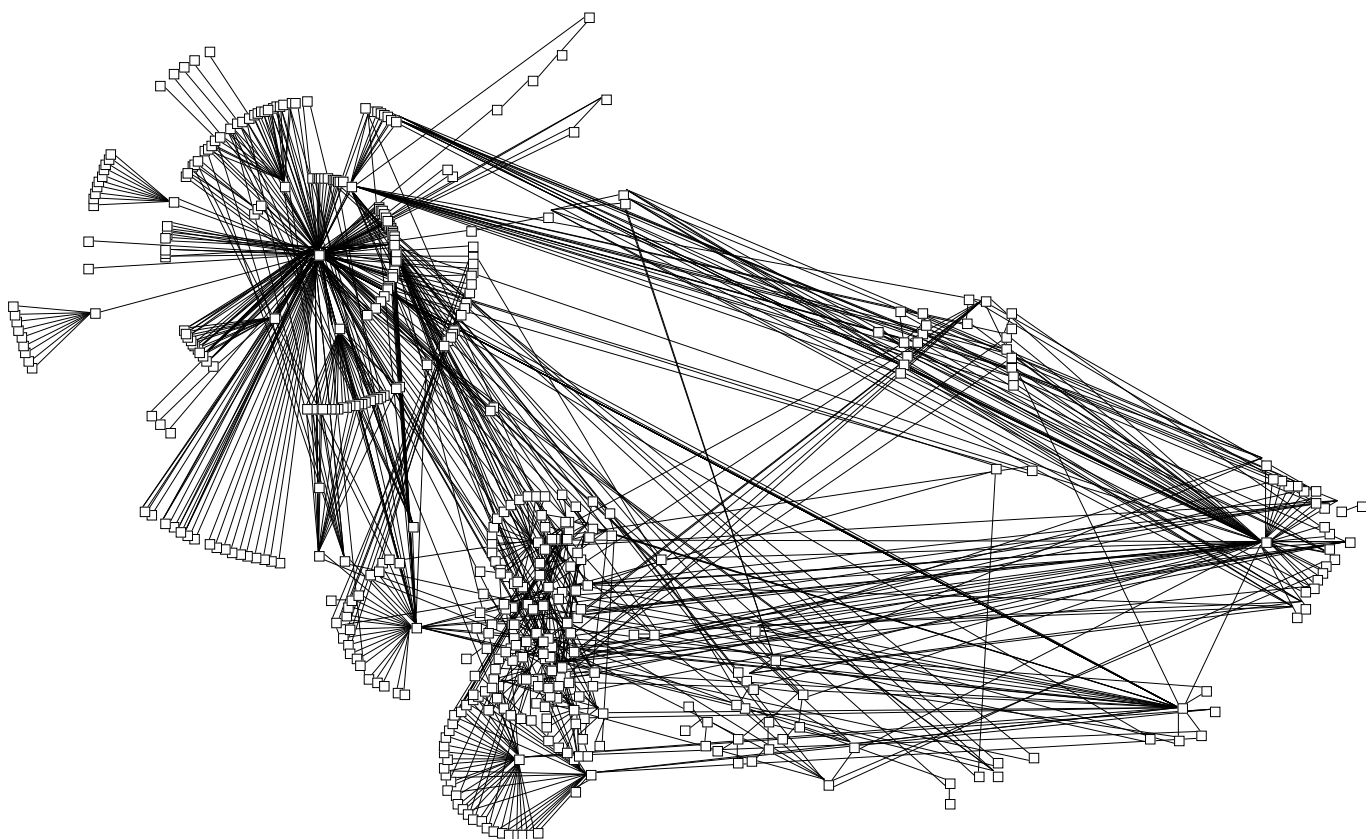


図 5: トポロジマップ: ISP A

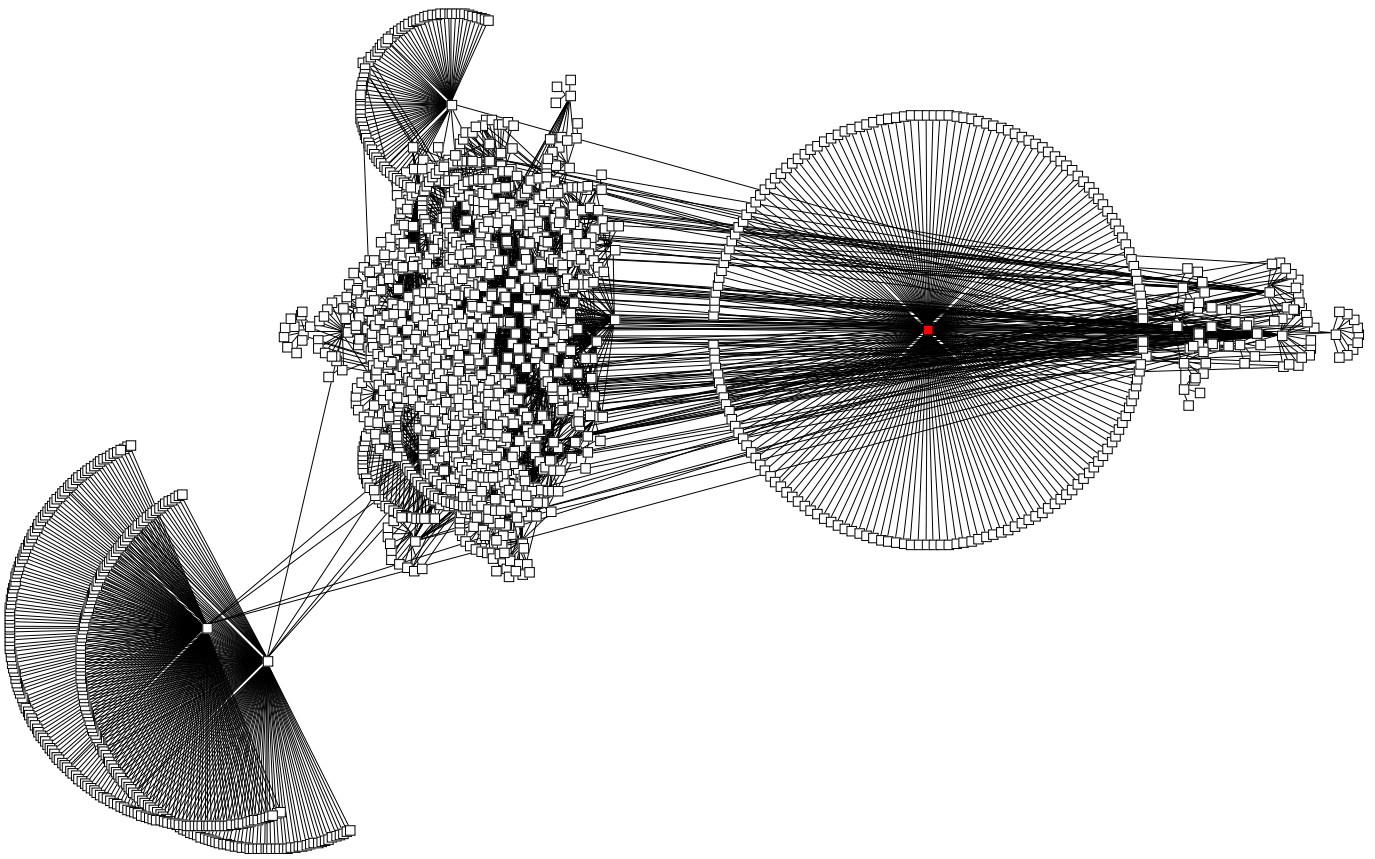


図 6: トポロジマップ: ISP B

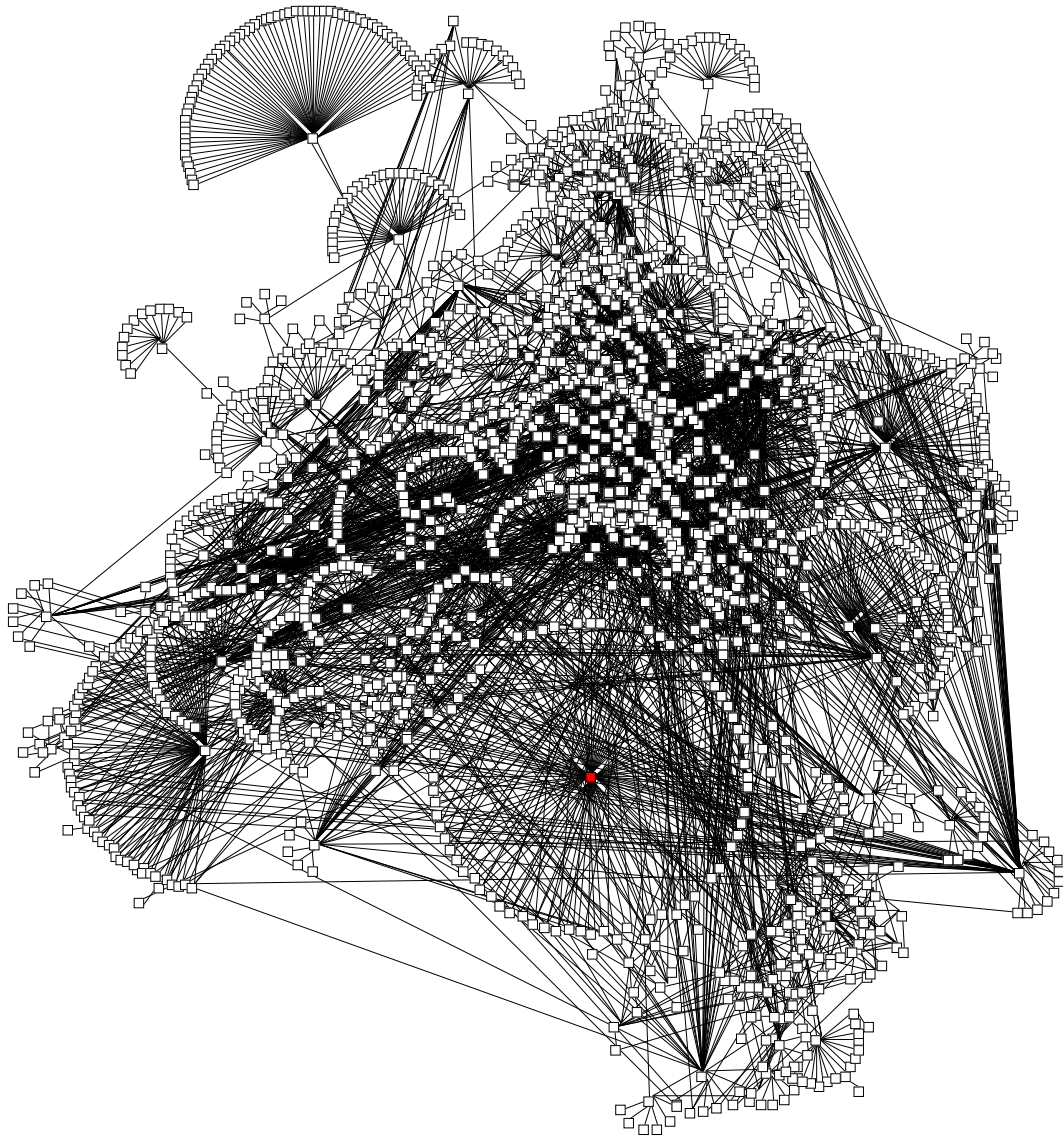


図 7: トポロジマップ: ISP C

を表すものである。図 8 から図 10 の出線数分布より、いずれの ISP 内トポロジに関してもべき乗則に従うとトポロジであることが分かる。また、図 11 から図 13 の累積補分布より、いずれのトポロジにおいてもほぼ右下がりの直線をなしており、約 8 割のノードに 3~4 以下の少数のリンク数が接続され、ごく少数のノードに多数のリンクが接続されており、これもべき乗則に従うトポロジの特性を満たしていることが分かる。

4 ISP 内トポロジの構造特性

本章では、3章により得られた国内のISP内トポロジの構造特性について述べる。まず、トポロジの構造特性を評価するための指標を4.1節で示す。次に、4.2節において、4.1節で定義した指標に基づいて、国内のISP内トポロジ、海外のISP内トポロジ、ASレベルトポロジ、既存のモデル化手法によるトポロジの構造を示し、比較評価を行うことで国内のISP内トポロジの構造特性を明らかにする。

4.1 評価指標

トポロジの構造特性を評価するにあたって、ノード i に対する以下の指標を用いる。

- Average path length $A(i)$: ノード i から他のノードへの平均ホップ数
- Diameter $D(i)$: ノード i から他のノードへの最大ホップ数
- Cluster coefficient $C_e(i)$: ノード i におけるクラスタ係数

$$C_e(i) = \frac{2E_i}{d_i(d_i - 1)}$$

(d_i : ノード i のリンク数、 E_i : ノード i の隣接ノード間のリンク数)

- Degree centrality: ノード i の出線数
- Betweenness centrality: ノード i を経由するノードペア数

4.2 トポロジの構造特性の比較

本節では、4.1節の評価指標を用いて、国内のISP内トポロジの構造特性を既存のモデル化手法によるトポロジおよび海外のISP内トポロジと比較することで明らかにする。既存のモデル化手法によるトポロジとして、べき乗則の特性を持つBAトポロジ、およびランダムネットワークの特性を持つERトポロジを用いる。また、海外のISP内トポロジとして、米国の通信大手であるSprint社、AT&T社、Level3社、およびVerio社のトポロジを使用する。4.1節の評価指標による各トポロジの結果を図20から図34に示す。ただし、各トポロジでノード数が異なるため、600ノードを基準に正規化を行っている。

まず、図22、図27、図32より、べき乗則に従うトポロジにおいては、一部のノードの出線数が突起しており、これらがハブノードであると分かる。しかし、図32より、ISP Cに関しては、他のISPおよびBAトポロジではハブノードが一部に集中しているのに対し、ハブノードが一部に集中せず分散していることが分かる。

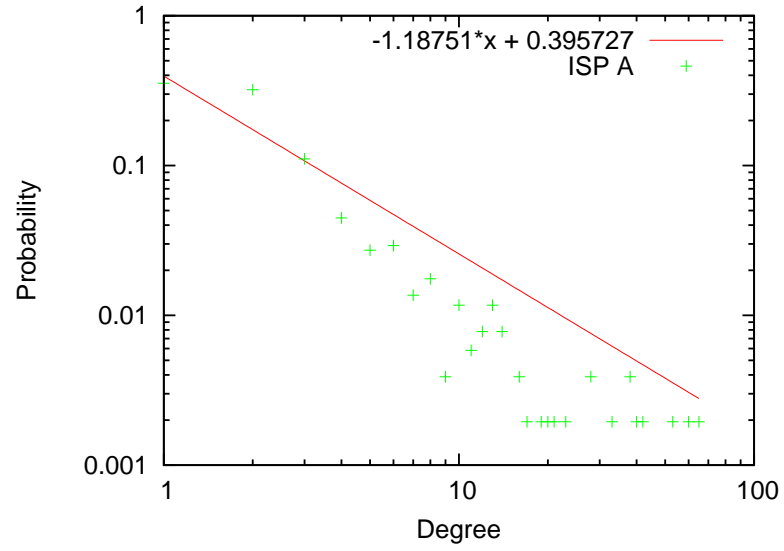


図 8: 出線数分布: ISP A

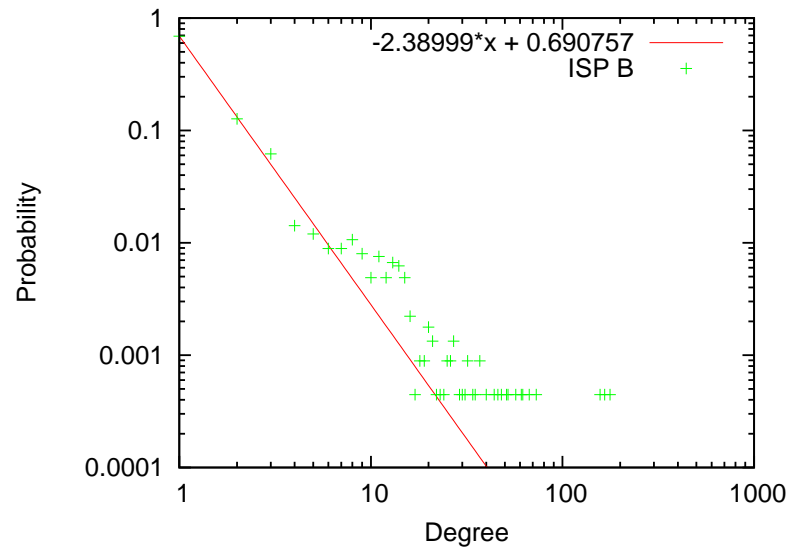


図 9: 出線数分布: ISP B

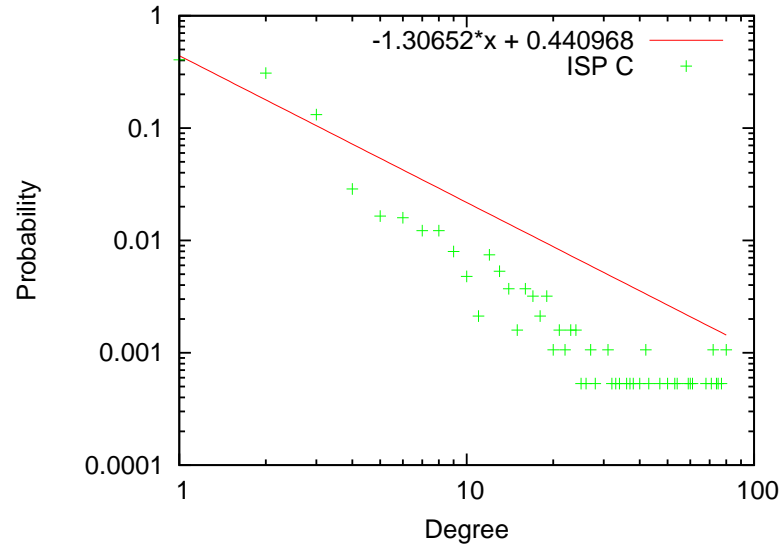


图 10: 出線数分布: ISP C

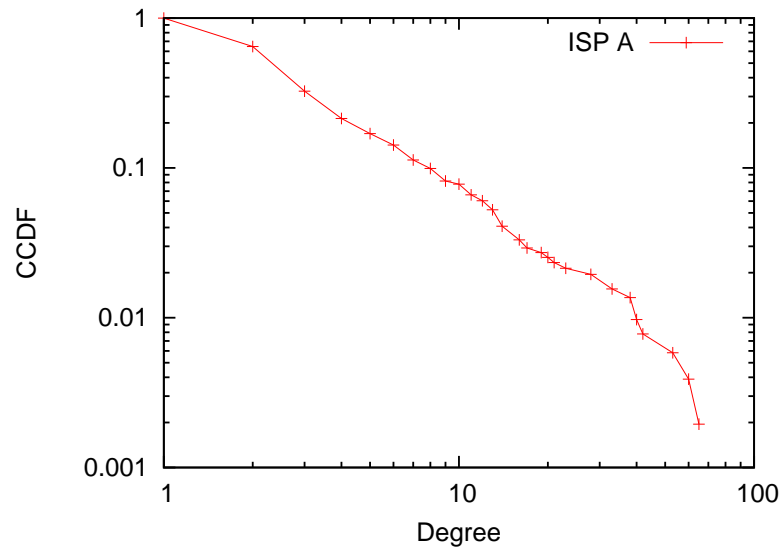


图 11: 累積補分布: ISP A

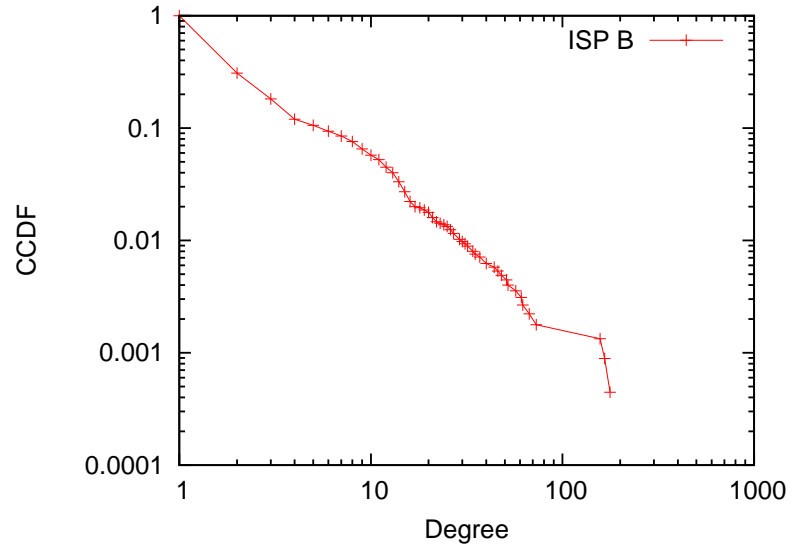


图 12: 累积补分布: ISP B

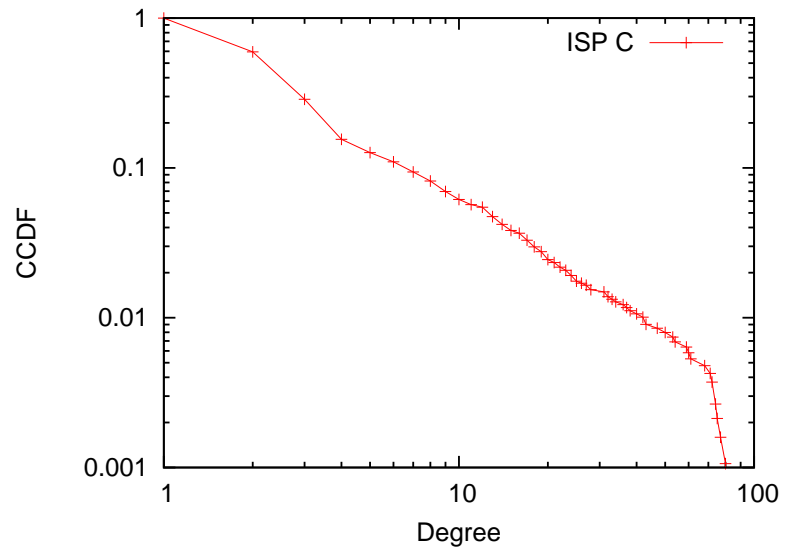


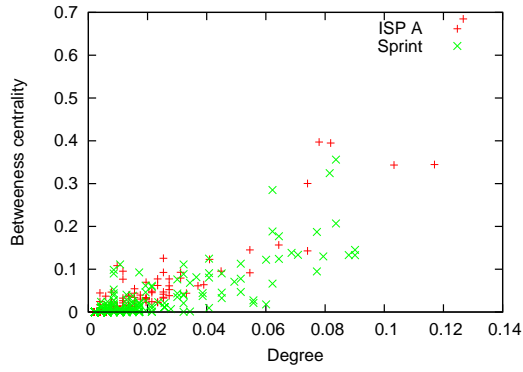
图 13: 累积补分布: ISP C

図 23、図 28 から、いずれの ISP トポロジにおいてもハブノードでの Betweenness centrality の値が大きくなるという共通の傾向が見られる。また、図 20、図 25 から、ハブノードから他のノードへの平均ホップ数が他のノードからに比べ比較的小さいという点もべき乗則に従うトポロジに共通する性質であるといえる。しかし、図 33 より、ISP C に関しては、これら傾向が見られないハブノードもあるため、先に挙げた他の ISP トポロジおよび BA トポロジとの相違も含め、その構造特性が独特であることが読み取れる。ER トポロジに関しては、当然ながらランダムなトポロジであるためハブノードは存在せず、これら傾向は見られない。非ハブノードにおける Betweenness centrality の値の分布状況も把握する必要があるので、図 14 から図 15 に Degree centrality と Betweenness centrality の相関を示す。これらの図より、海外 ISP トポロジはばらつきが大きいですが、ISP A、ISP B は強い正の相関関係が現れており、最も BA トポロジに近い分布を示していることが分かる。一方、ISP C に関しては、BA トポロジのような強い相関関係は見られず、海外 ISP トポロジ、特に Verio の相関に近いといえる。

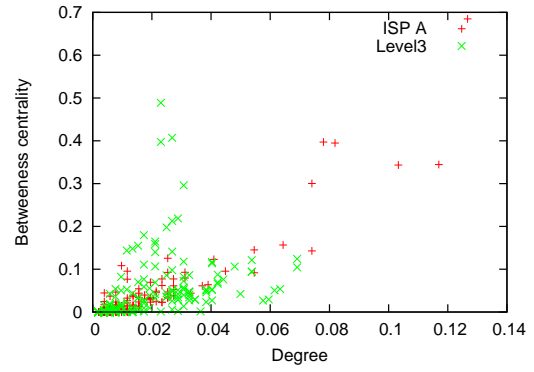
図 24、図 29、図 34 より、国内のいずれの ISP 内トポロジにおいてもハブノードのクラスタ係数がほぼ 0 となっており、ハブノードに隣接するノード同士のつながりがほとんどないといえる。この点については BA トポロジにも同様の傾向が見られる。一方、他の海外 ISP では、ハブノードのクラスタ係数がこれらより比較的高い値をとっている。例えば、AT&T 社のトポロジの場合、クラスタ係数が 0.1 ~ 0.2 と国内より比較的高い値付近にハブノードが集中していることが分かる。非ハブノードにおけるクラスタ係数の分布状況も知るため、図 17 から図 18 に Degree centrality とクラスタ係数の相関を示す。これらの図より、ISP A、ISP B、ISP C のいずれの国内 ISP トポロジにおいても BA トポロジに近い分布を示すことが分かる。

これまでの指標の観点から、国内の ISP 内トポロジは比較的 BA トポロジにより近いということがいえる。また、BA トポロジでは、ハブノードがネットワークの中心付近に配置されているが、海外 ISP では、ネットワークのエッジ付近にハブノードが配置されるというトポロジ形状を有している。そこで、ISP A および ISP B のトポロジにおいて、ハブノードの配置を DNS 情報を用いて調査したところ、東京に集中していることがわかった。すなわち、ネットワークの中心部にハブノードが集中しており、BA トポロジと同様のトポロジ形状になっていると考えられる。また、これにより ISP A、ISP B におけるトポロジ形状が東京一極集中型であるということもわかった。ISP C に関しては、残念ながら DNS 情報は得られないという理由から東京一極集中型と判断することは現状不可能である。

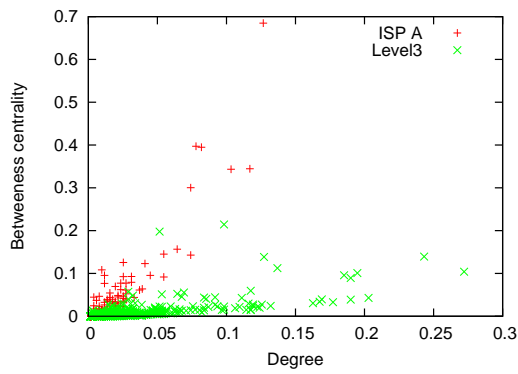
しかし、図 20、図 25、図 30 から、ノード全体における平均ホップ数を BA トポロジと比較した場合、BA トポロジでは平均ホップ数が 2 ~ 4 とノードペア間が小さいホップ数で接続されているのに対し、国内の ISP 内トポロジのいずれに関してもこれより大きな位置に値



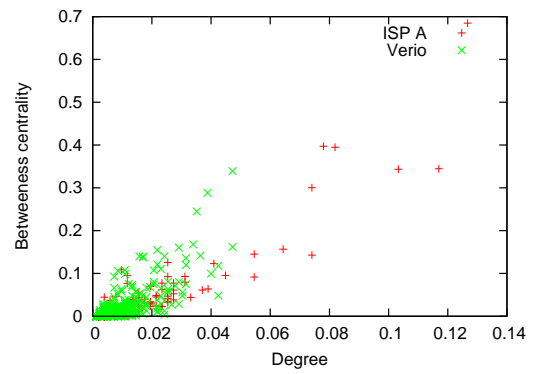
(a) Sprint



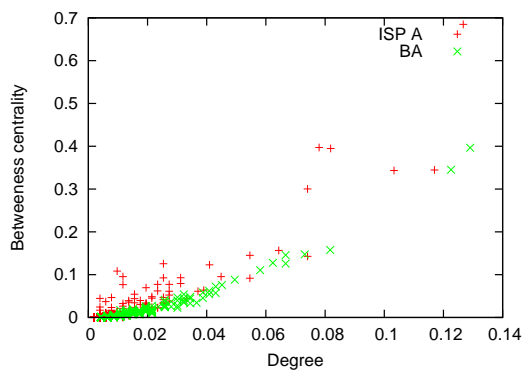
(b) AT&T



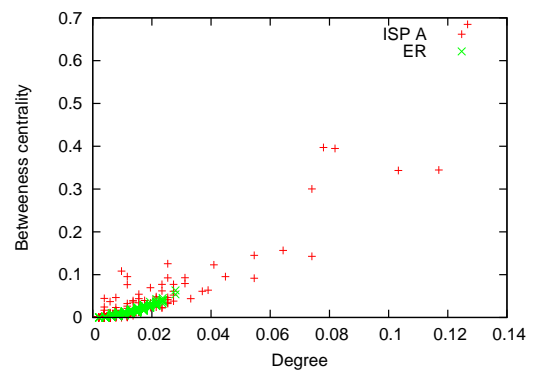
(c) Level3



(d) Verio

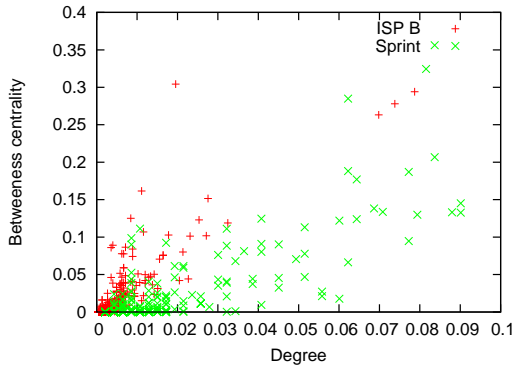


(e) BA

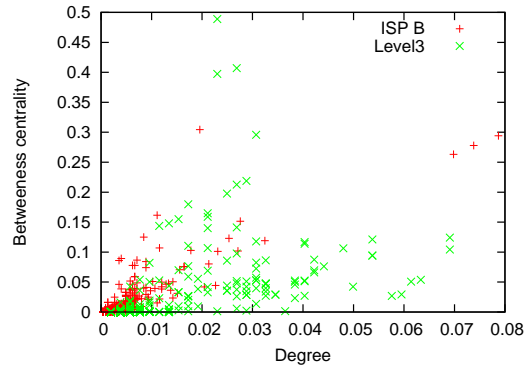


(f) ER

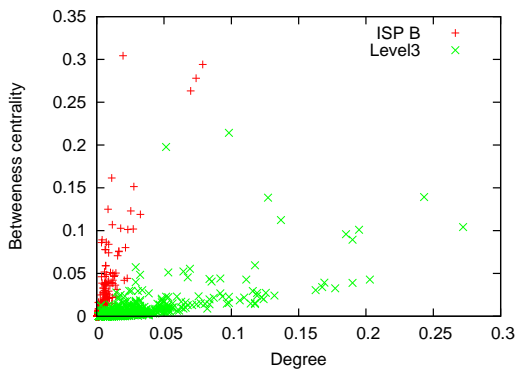
図 14: Degree centrality と Betweenness centrality の相関: ISP A



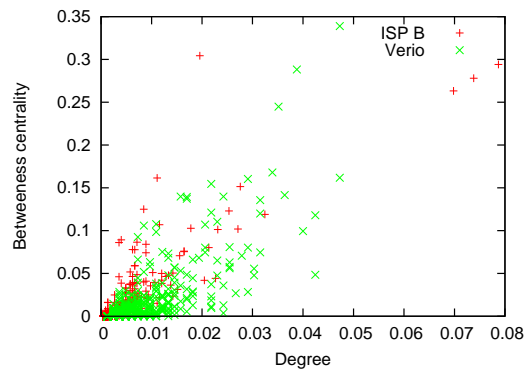
(a) Sprint



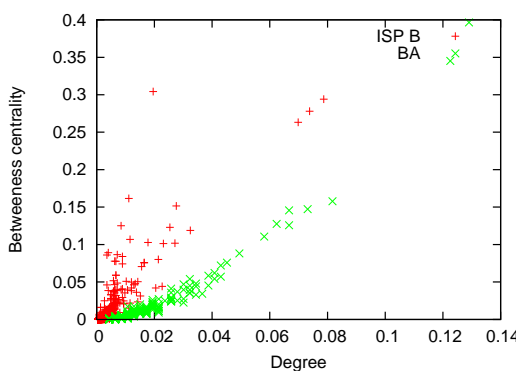
(b) AT&T



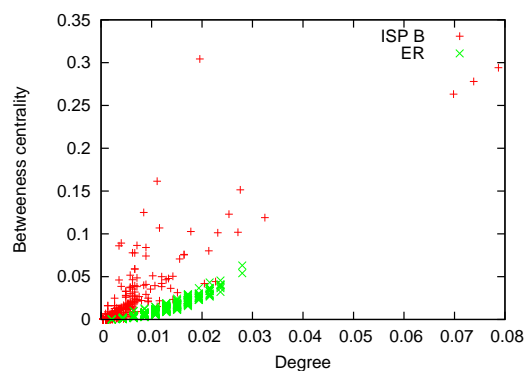
(c) Level3



(d) Verio

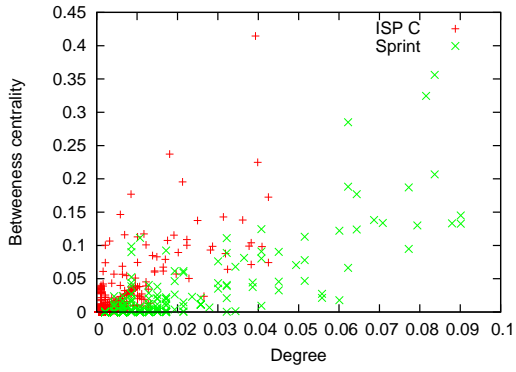


(e) BA

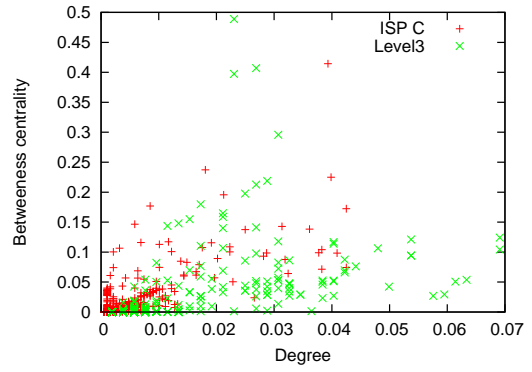


(f) ER

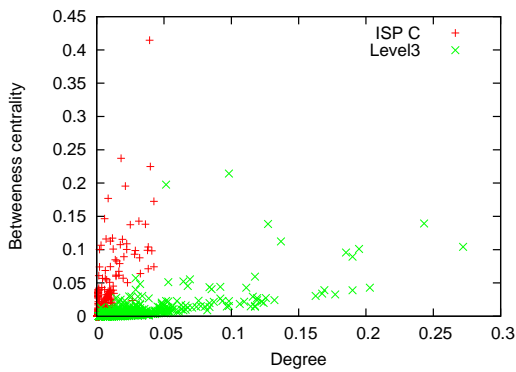
図 15: Degree centrality と Betweenness centrality の相関: ISP B



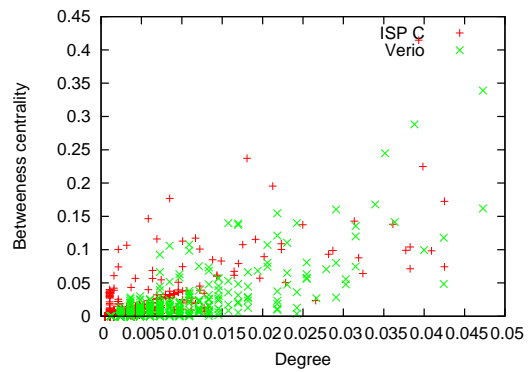
(a) Sprint



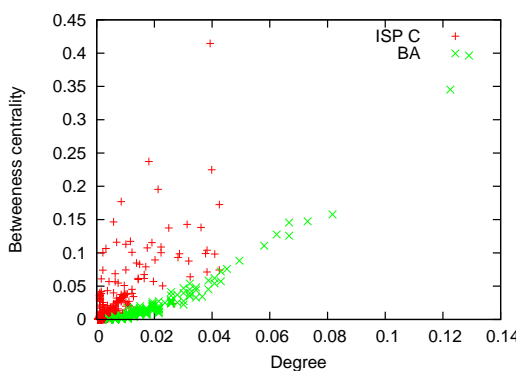
(b) AT&T



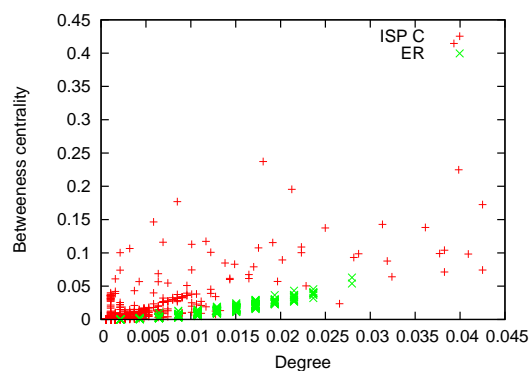
(c) Level3



(d) Verio



(e) BA



(f) ER

図 16: Degree centrality と Betweenness centrality の相関: ISP C

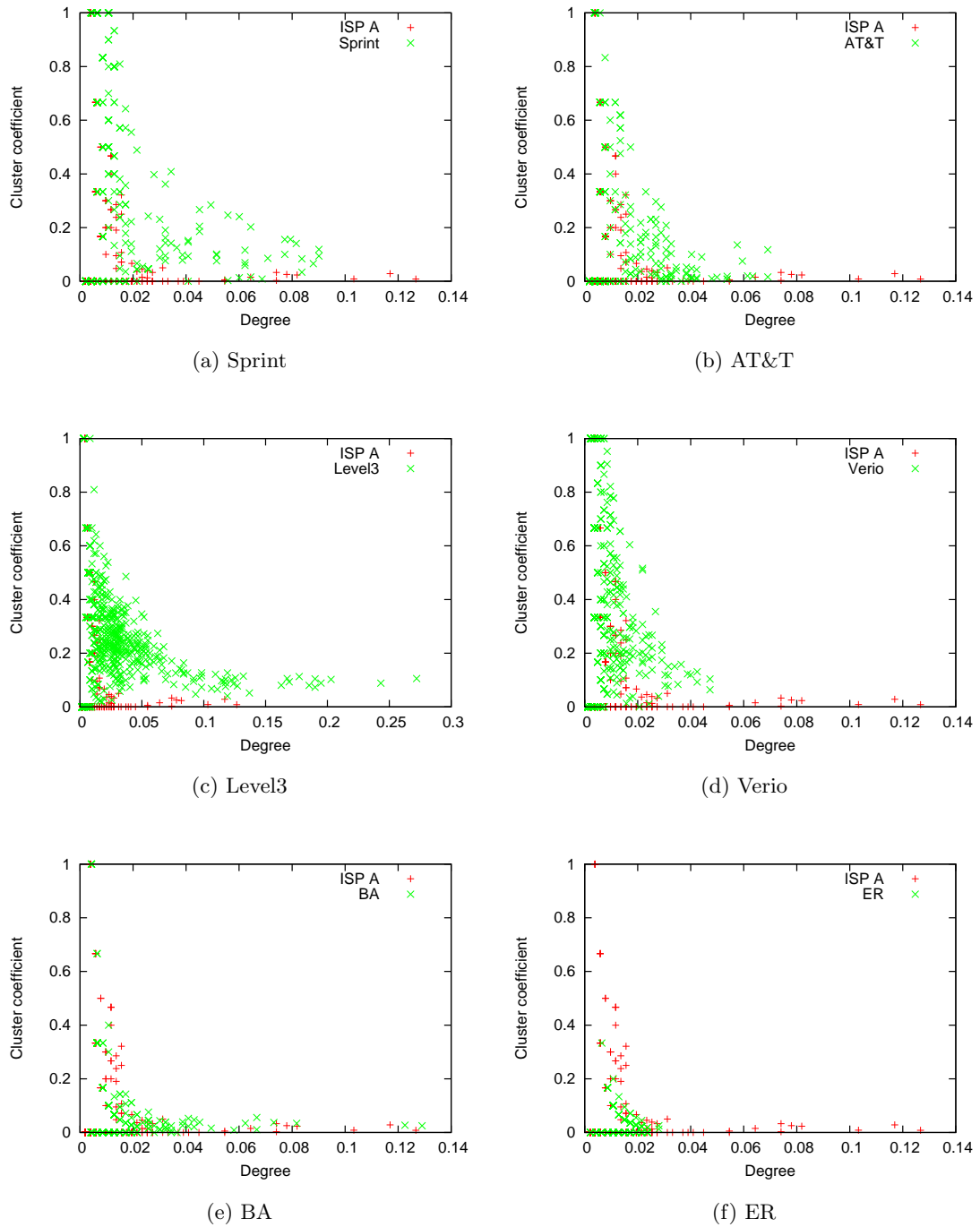
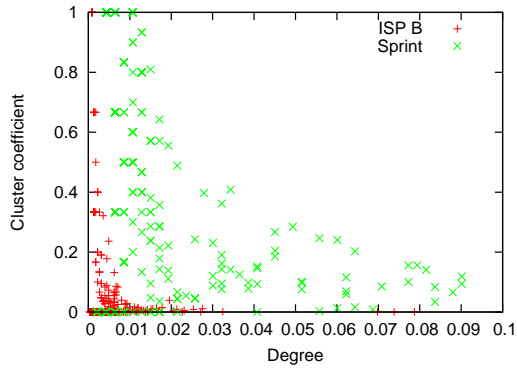
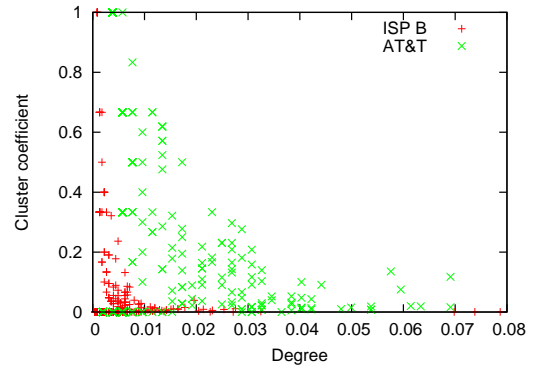


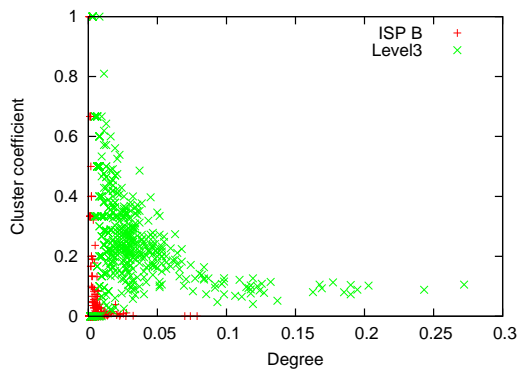
図 17: Degree centrality とクラスタ係数の相関: ISP A



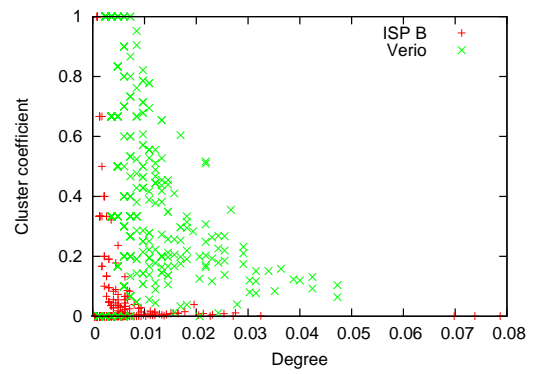
(a) Sprint



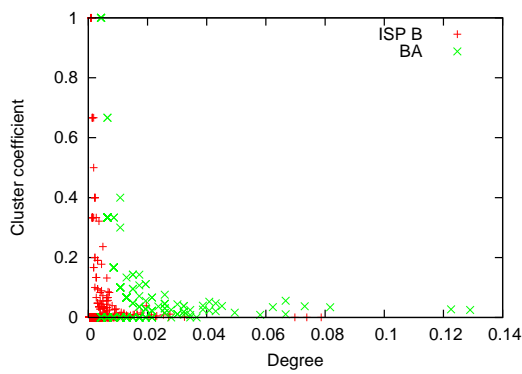
(b) AT&T



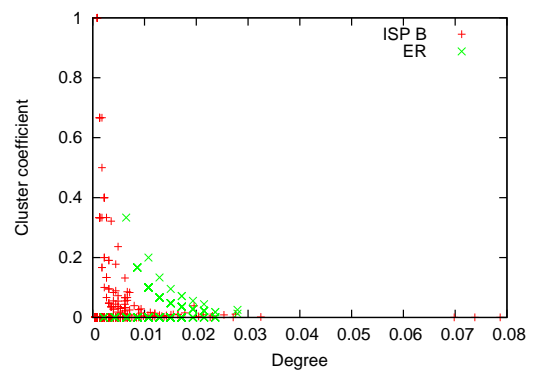
(c) Level3



(d) Verio

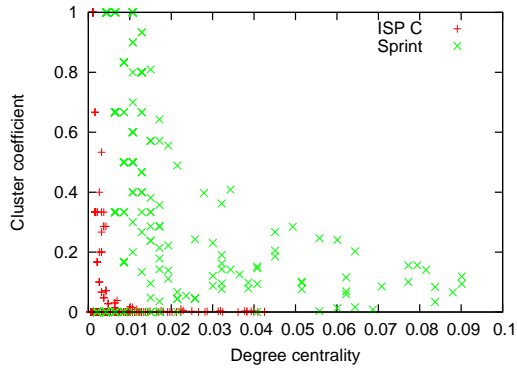


(e) BA

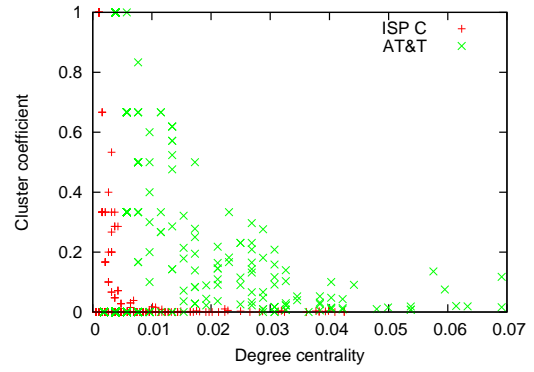


(f) ER

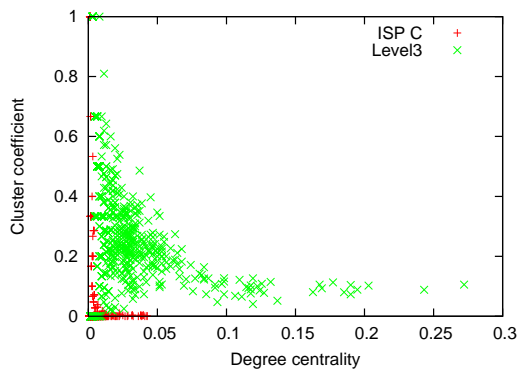
図 18: Degree centrality とクラスタ係数の相関: ISP B



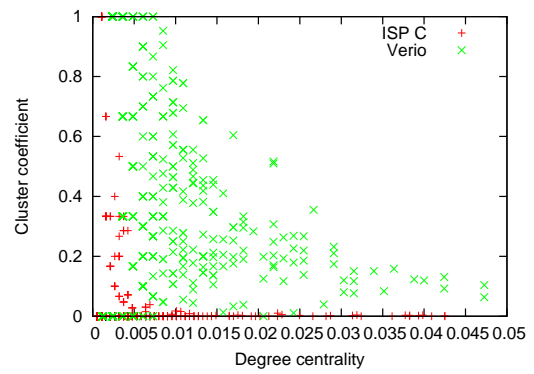
(a) Sprint



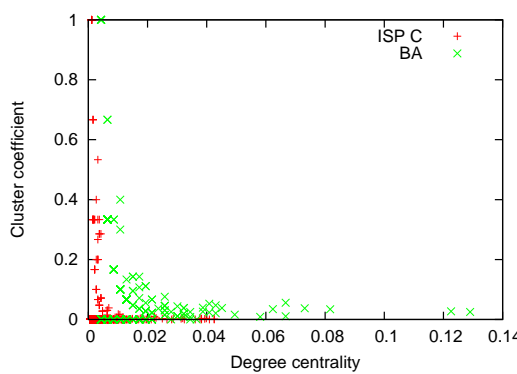
(b) AT&T



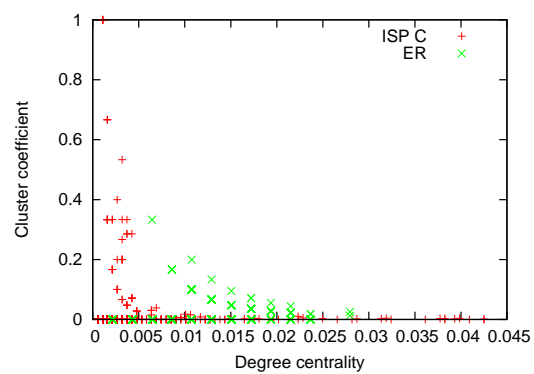
(c) Level3



(d) Verio



(e) BA



(f) ER

図 19: Degree centrality とクラスタ係数の相関: ISP C

が分布している。特に、ISP C に関しては、そのばらつきが 4~10 と極端に大きく、ISP A および ISP B とも相違が生じている。

以上の分析により、下記のことになった。まず、ISP A、ISP B に関しては、海外の ISP 内トポロジと比べると比較的 BA トポロジに近い構造特性を有している。しかし、平均ホップ数という観点のみで見た場合は、BA トポロジとは異なることがわかった。ISP C に関しては、海外および他の国内の ISP 内トポロジ、また、BA トポロジとも異なる構造特性を有しているも明らかとなった。

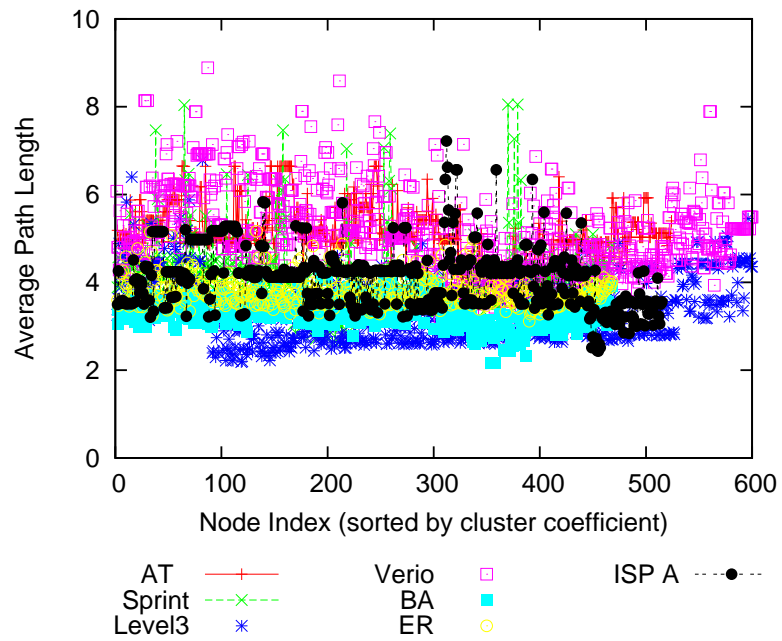


図 20: 平均ホップ数: ISP A

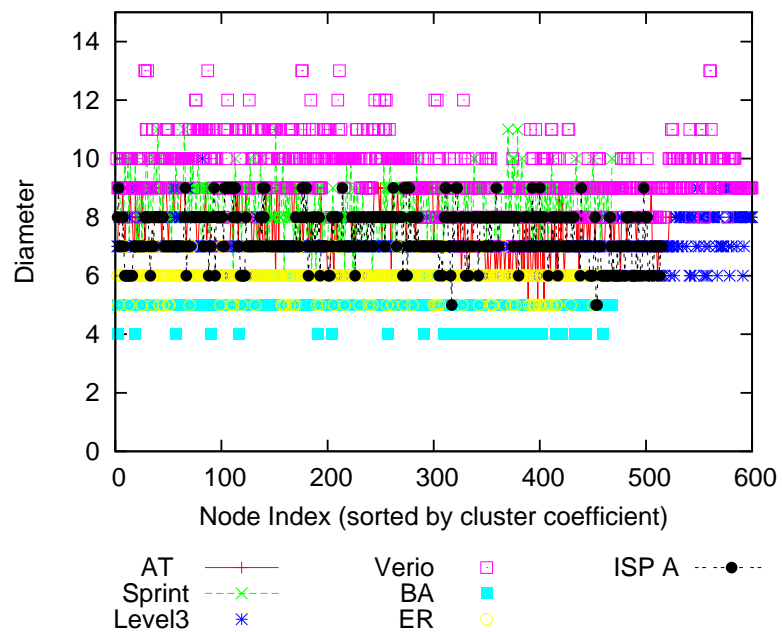


図 21: 最大ホップ数: ISP A

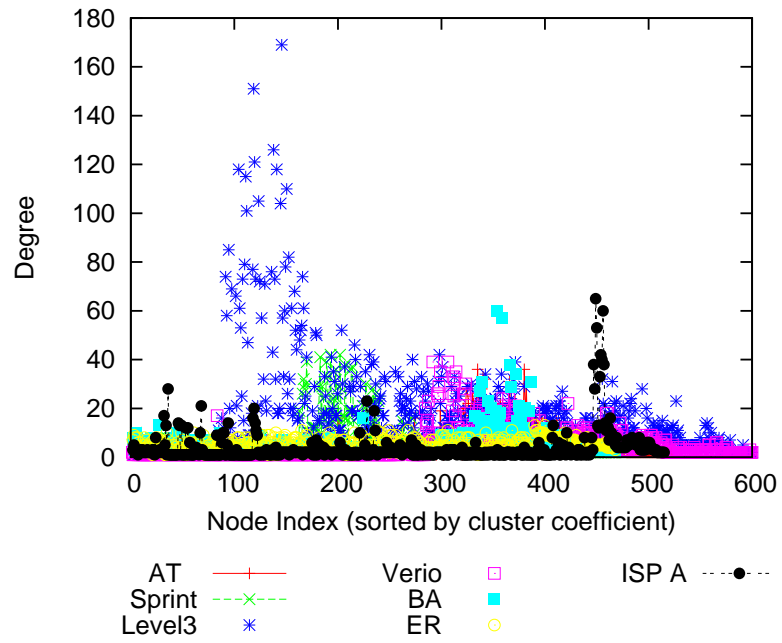


Figure 22: Degree centrality: ISP A

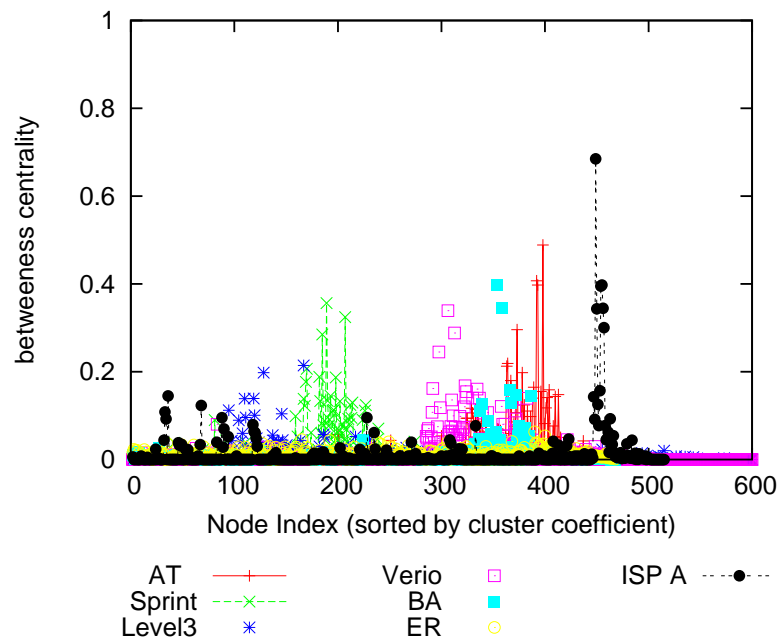


Figure 23: Betweenness centrality: ISP A

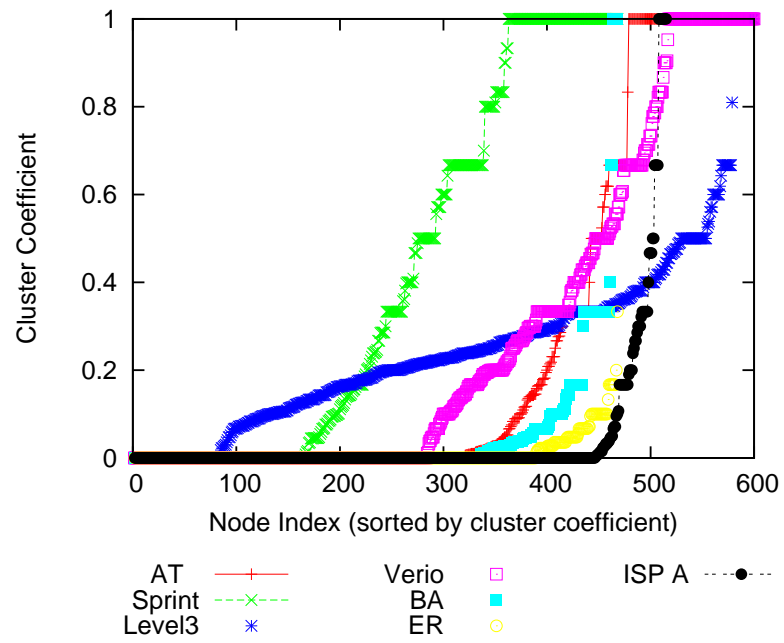


図 24: クラスタ係数: ISP A

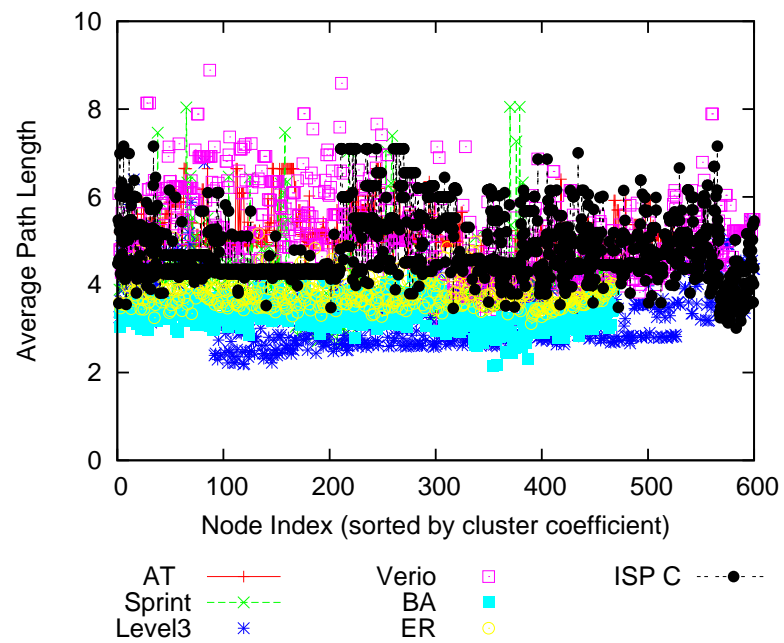


図 25: 平均ホップ数: ISP B

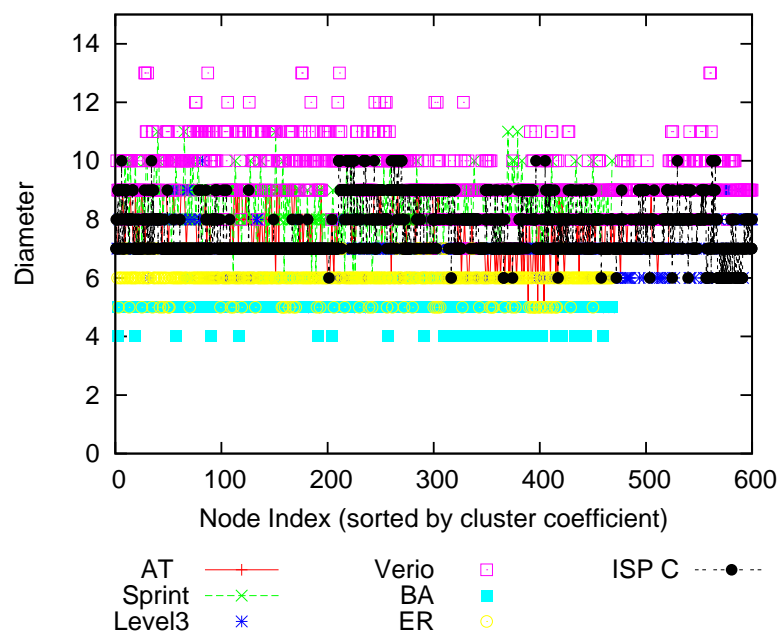


図 26: 最大ホップ数: ISP B

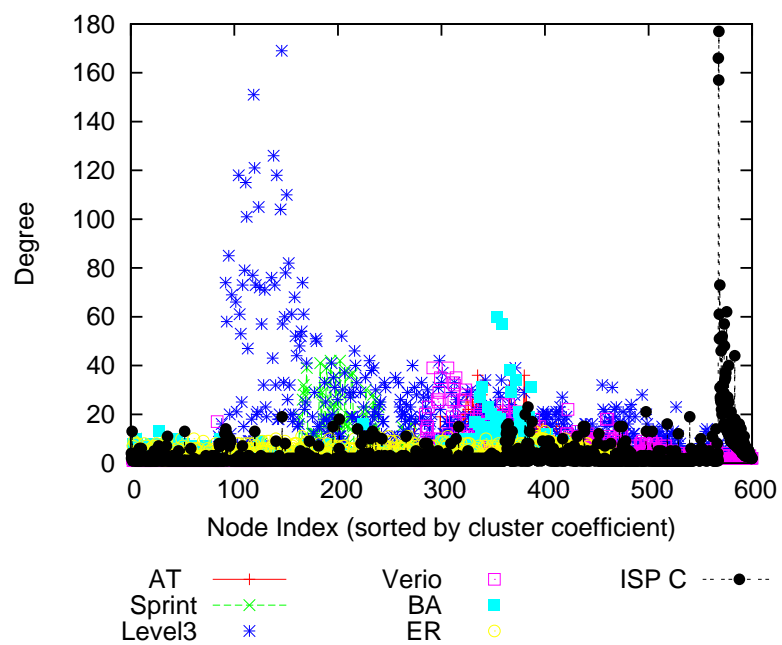


図 27: Degree centrality: ISP B

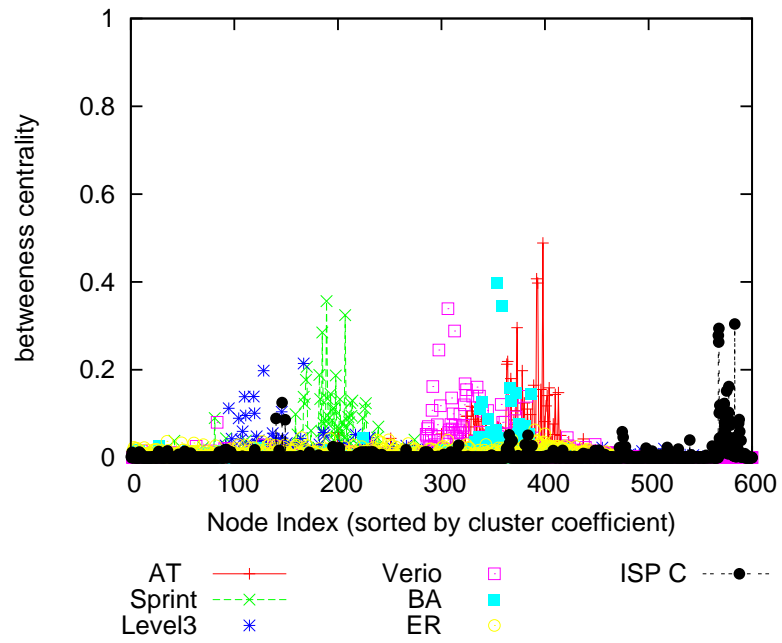


図 28: Betweenness centrality: ISP B

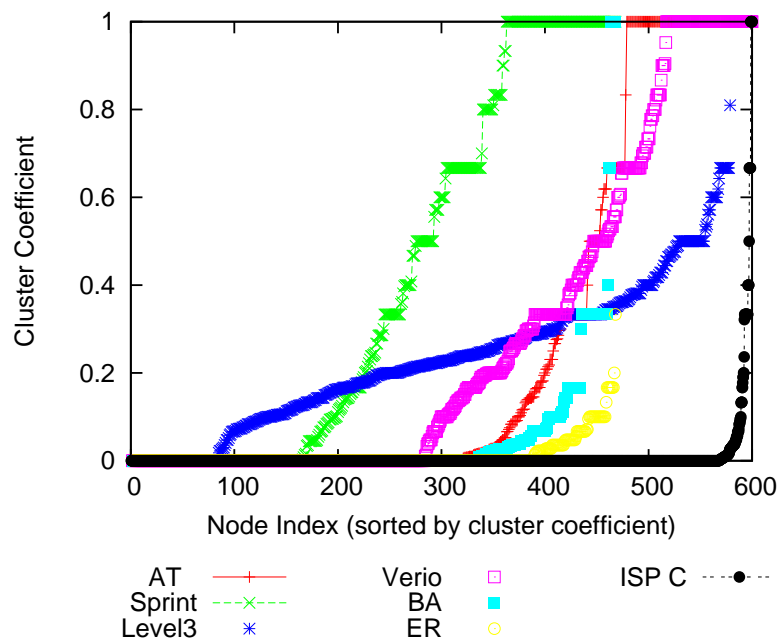


図 29: クラスタ係数: ISP B

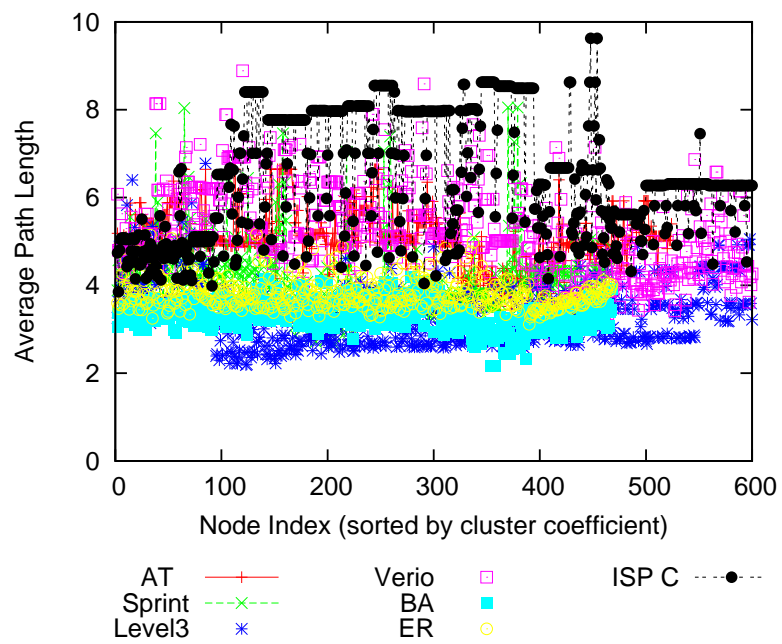


図 30: 平均ホップ数: ISP C

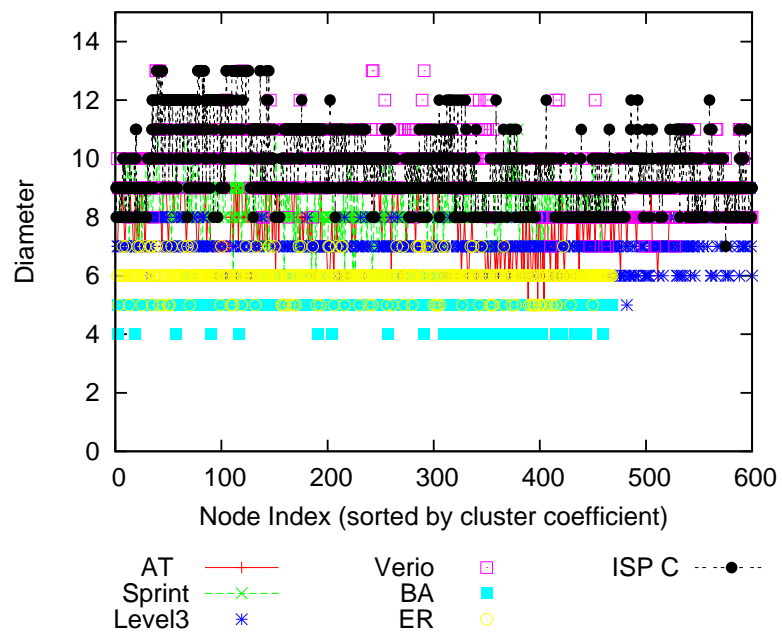


図 31: 最大ホップ数: ISP C

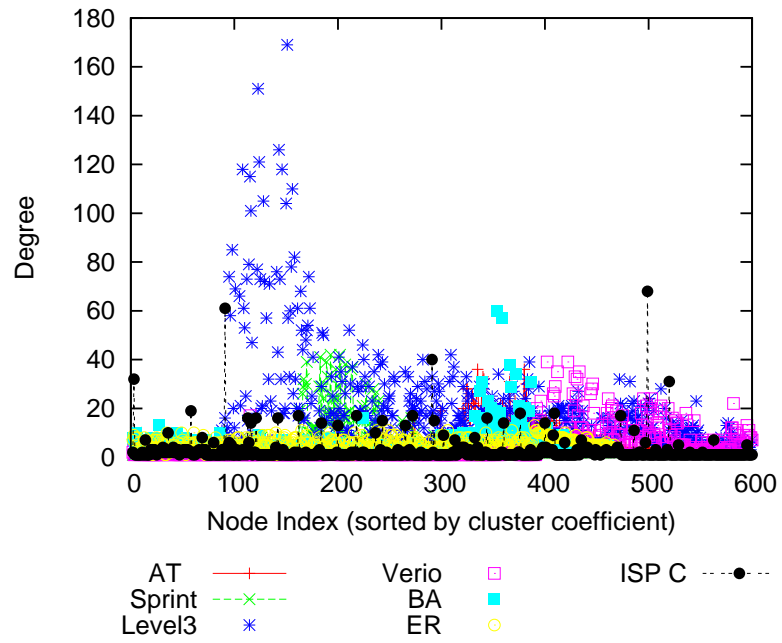


Figure 32: Degree centrality: ISP C

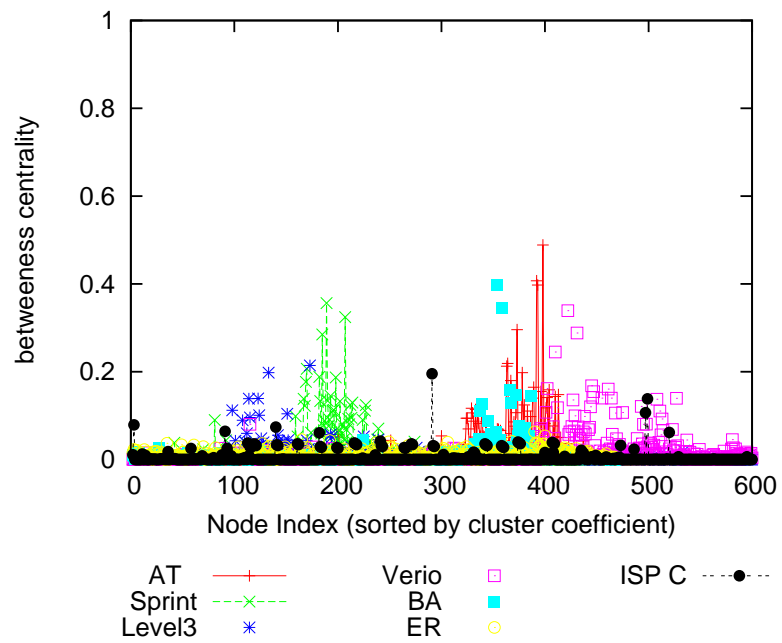


Figure 33: Betweenness centrality: ISP C

5 おわりに

本報告では、まず、国内の ISP を対象とした ISP 内トポロジの計測を行い、そのトポロジ構造特性の比較評価を行った。その結果、国内の ISP に関しても、海外 ISP と同様に出線数がべき乗則に従うトポロジ構造を有していることがわかった。

また、国内の ISP 内トポロジのうち 2 つは、海外の ISP 内トポロジより BA トポロジに近い構造特性を有することがわかった。しかし、もう 1 つの国内の ISP 内トポロジに関しては、海外の ISP 内トポロジ、および国内の 2 つの ISP 内トポロジ、また BA トポロジのいずれのトポロジとも異なる構造特性を有することがわかった。

1 章で、既存のモデル化手法により生成されるトポロジと、ルータレベル、ISP 内トポロジとでは構造的な違いがあり、ネットワーク制御手法の評価に適用させた場合、結果に相違が生じることを述べた。また、トポロジの形成には回線容量が深く関係していることが指摘されており、適切な回線容量のモデル化手法が今後必要とされる。しかし、ISP で用いられている回線容量に関しては、トポロジ同様セキュリティ上の理由から公開されていないのが現状であるため、回線容量の計測によって得られる結果から回線容量のモデル化手法を示す必要がある。そのためには回線容量の計測が不可欠である。現在、今回得られたトポロジマップをもとに国内 ISP の回線容量の計測を実施しており、その結果に基づいて ISP における回線容量分布のモデル化手法を考案することを今後の課題として挙げ、本報告のまとめとする。

謝辞

本報告の作成にあたり、ご指導、ご教授いただきました大阪大学情報科学研究科の村田正幸教授に心より感謝を申し上げます。

また、本報告において終始ご指導いただきました大阪大学経済学研究科の荒川伸一助手に深く感謝いたします。

ならびに、日頃からの的確な助言をいただきました大阪大学情報科学研究科の若宮直紀助教授、大阪大学サイバーメディアセンターの長谷川剛助教授、大阪大学サイバーメディアセンターの笹部昌弘助手に心から感謝いたします。

最後に、日頃から様々な相談に応じていただきました福島行信氏、石田晋也氏、牧野暢孝氏、小泉佑揮氏、福元良太氏、大橋正稔氏、木利友一氏をはじめとする村田研究室および中野研究室の皆様方に心より御礼申し上げます。

参考文献

- [1] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, “On power-law relationships of the Internet topology,” in *Proceedings of SIGCOMM '99*, (New York, NY, USA), pp. 251–262, ACM Press, Oct. 1999.
- [2] G. Siganos, M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, “Power laws and the AS-level Internet topology,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, pp. 514–524, Aug. 2003.
- [3] N. Sprint, R. Mahajan, D. Wetherall, and T. Anderson, “Measuring ISP topologies with rocketfuel,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, pp. 2–16, Feb. 2004.
- [4] R. Cohen, S. Havlin, and D. Avraham, *Handbook of Graphs and Networks – From the Genome to the Internet*, ch. 4. WILEY-VCH GmbH & Co., 2003. Structural Properties of scale-free networks.
- [5] A.-L. Barabasi and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [6] K. L. Goh, B. Kahng, and D. Kim, “Universal behavior of load distribution in scale-free networks,” *Physical Review Letters*, vol. 87, Dec. 2001.
- [7] L. Qiu, Y. R. Yang, Y. Zhang, and S. Shenker, “On selfish routing in Internet-like environments,” in *Proceedings of ACM SIGCOMM 2003*, pp. 151–162, Aug. 2003.
- [8] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, “A first-principles approach to understanding the Internet’s router-level topology,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 34, pp. 3–14, Oct. 2004.
- [9] S. Arakawa, R. Fukumoto, T. Takine, and M. Murata, “Analyzing and modeling router-level Internet topologies,” *submitted to Networking 2006*.
- [10] A. Fabrikant, E. Koutsoupias, and C. H. Papadimitriou, “Heuristically optimized trade-offs: A new paradigm for power laws in the Internet,” in *Proceedings of the 29th ICALP*, pp. 110–122, July 2002.

- [11] 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, Apr. 1999.
- [12] J. I. Alvarez-Hamelin and N. Schabanel, “An Internet graph model based on trade-off optimization,” *European Physical Journal B*, vol. 38, pp. 231–237, Mar. 2004.

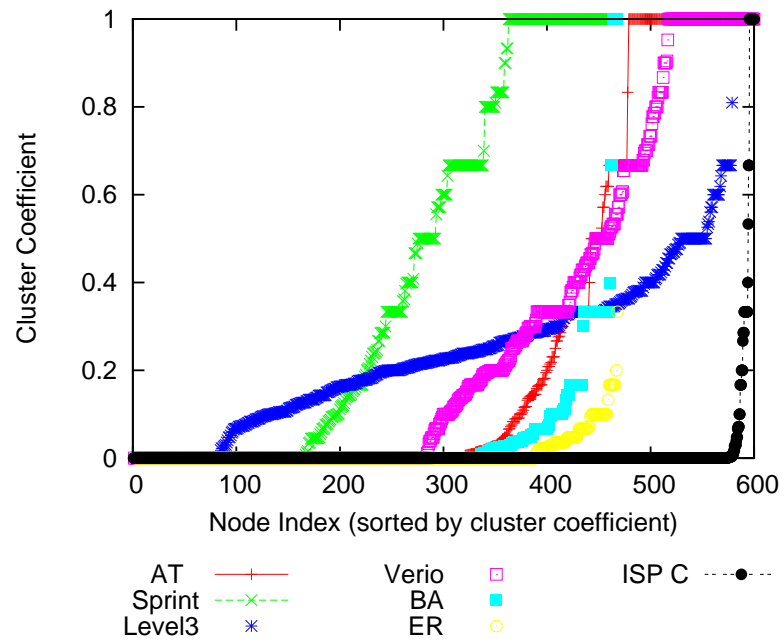


図 34: クラスタ係数: ISP C