

回線コストに基づくインターネットトポロジー生成モデルの提案と評価

日高 直人[†] 荒川 伸一[†] 村田 正幸[†]

[†] 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: †{n-hidaka,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 近年、インターネットのトポロジーの出線数分布がべき則に従うことが観測されており、ノードの出線数分布がべき則に従うトポロジーを生成する様々なモデルが提案されている。しかし、インターネットトポロジーの特性はノードの出線数分布によってのみ決定されるのではなく、出線数分布以外の構造上の特徴が重要となる。そこで本稿では、ISPにおけるネットワーク設計に着目した新たなインターネットトポロジー生成モデルを提案する。提案モデルでは、物理距離およびトラフィック収容に必要な回線容量を考慮した回線コストを導入し、回線コストを最小化することによってトポロジーを生成する。提案モデルにより生成されるトポロジーをISPネットワークのトポロジーおよび従来の生成モデルと比較評価した結果、提案モデルによるトポロジーは、従来のトポロジー生成モデルによるトポロジーに比べ、クラスタ係数、平均パス長、リンク負荷に関して、現実のISPネットワークのトポロジーに近い特性を示すことを明らかにする。

キーワード べき則、ルータレベルトポロジー、トポロジー生成、回線コスト、gravity モデル

A modeling method for ISP-level Internet topologies based on network-cost optimization

Naoto HIDAKA[†], Shin'ichi ARAKAWA[†], and Masayuki MURATA[†]

[†] Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

1-5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

E-mail: †{n-hidaka,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract Measurement studies on the Internet topology show that connectivities of nodes exhibit power-law attribute. Many modeling methods that re-produce the degree distribution have been proposed. However, it is apparent that only the degree distribution does not determine the structure of the Internet topology. In this paper, we propose a new modeling method for generating realistic ISP-level Internet topologies that obey the power-law degree distribution. Our method adds nodes one by one, and each node is connected to the optimal node in terms of minimizing the overall network costs. For the network cost, we incorporate not only geographical information into our method, but also incorporate the amount of link capacities that accommodates traffic. We show that our modeling method can generate ISP-level topologies having more similar topological characteristics, in terms of clustering coefficients, average shortest path length, and betweenness centrality, when comparing with existing modeling methods.

Key words power-law network, ISP-level topology, topology generator, network-cost optimization, gravity model

1. はじめに

インターネットのAS (Autonomous System) 間・ルータ間の接続状況を観測した結果、ノードの出線数分布がべき則に従うことが示されている [1-3]。べき則に従うトポロジーでは、接続するノード数が k であるノードの出現確率 $P(k)$ が $k^{-\gamma}$ (γ : 定数) に比例する。そのため、べき則に従うトポロジーでは、一部のノードが多数のノードと接続される一方で、多くのノ

ードは少数のノードと接続される。

べき則に従うトポロジーを生成するモデルの一つに、BA (Barabási-Albert) モデル [4] がある。BA モデルは、ノードを段階的に追加し (段階的接続)、追加したノードから既存のトポロジーの各ノードの出線数の大きさに応じて確率的に接続することでトポロジーを生成するモデルであり、スケール・フリーやスモール・ワールドなどの特性が数学的に示されている [4, 5]。しかし、文献 [6] では、同じ出線数分布を有する複数のトポ

ジーを列挙し、トポロジーの構造上の違いにより、スループット性能が大きく異なることが示されている。そのため、単に出線数分布がべき則に従うだけではインターネットトポロジーの特徴を捉えるには不十分であり、トポロジー特性を利用したネットワーク設計、設備量予測、トラフィック制御手法の評価に応用するためにも、インターネットトポロジーの構造上の特徴を捉えた適切な生成モデルが必要である。

インターネットトポロジーを対象とした生成モデルとして、FKP (Fabrikant Koutsoupias Papadimitriou) モデル [7] および HOT (Heuristically Optimal Topology) モデル [6] が提案されている。FKP モデルは、ノード間の物理距離およびホップ間距離の重み付き和を最小化することでトポロジーを生成するトポロジー生成モデルである。一方、HOT モデルは、ルータのバケット処理能力の制約に着目し、回線容量が少ないリンクは出線数の大きいノードと連結し、回線容量が大きいリンクは出線数が比較的小さいノードを連結する生成モデルである。しかし、FKP モデルにより生成したトポロジーには出線数 1 のノードが数多く存在するとの指摘もなされており [8]、さらに、HOT モデルにより生成したトポロジーは、ISP (Internet Service Provider) ネットワークのトポロジーと比較して代替経路が極めて少なく、トポロジーの構造が大きく異なることが示されている [9]。そこで、文献 [9] では FKP モデルを拡張し、ネットワーク設備の増強を考慮した ISP ネットワークのトポロジー生成モデルを検討している。しかし、ノード間のトラフィック量は均一であり、かつ、ISP ネットワークの設計で重要となるネットワークコストについては考えられてない。

そこで本稿では、ネットワーク設計に基づく新たなインターネットトポロジー生成モデルを提案する。提案モデルでは、ネットワークを保守、管理するための費用に相当する回線コストを定義し、回線コストの最小化に基づいたネットワーク設計によってトポロジーを生成する。提案モデルにより生成されるトポロジーを評価した結果、従来のトポロジー生成モデルによるトポロジーに比べ、クラスタ係数、平均パス長、リンク負荷に関して ISP ネットワークのトポロジーに近い特性を示すことを明らかにする。さらに、提案モデルにおける回線コスト、トラフィックの偏り、ノード配置の設定が、現実のインターネットトポロジーのモデル化に対する有効性を明らかにする。

本稿の構成は以下の通りである。まず 2 章において、従来のトポロジー生成モデルおよびそれらの問題点を述べる。次に 3 章において、ISP ネットワークの設計方針としてのコスト最適化に基づいた新たなインターネットトポロジー生成モデルを提案する。そして 4 章において、提案モデルにより生成したトポロジーを、ISP ネットワークのトポロジーおよび従来のトポロジー生成モデルにより生成したトポロジーと比較する。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. 従来のトポロジー生成モデル

本章では、出線数分布がべき則となることに着目したトポロジー生成モデルである BA モデルおよび FKP モデルを説明する。これらのモデルにより生成されるトポロジーの特徴を述べ、

インターネットトポロジーとして用いた際の問題点を述べる。

2.1 BA モデル

べき則に従うトポロジー生成モデルとして、BA モデルがある [4]。BA モデルでは、初期トポロジーに対してノードを段階的に追加し (Incremental Growth)、追加したノードから既存のトポロジーに対して確率的にリンクを接続する。リンクの接続先は、既存トポロジーの各ノードの出線数 k_i に比例した接続確率 $\Pi(k_i)$ に基づいて決定する (Preferential Attachment)。BA モデルのトポロジー生成アルゴリズムを以下に示す。

Step 0 m_0 個の初期ノードを配置する。

Step 1 トポロジーのノードが N 個未満である場合、Step 2 へ。 N 個である場合、Step 4 へ。

Step 2 ノードを新たに 1 個追加する (Incremental Growth)。

Step 3 式 (1) の確率に従い、相異なる $m (\leq m_0)$ 個のノードを選択する。そして、追加したノードと選択したノードを接続する (Preferential Attachment)。接続した後、Step 1 へ。

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

Step 4 トポロジーの生成を終了する。

以上のようにして、Incremental Growth と Preferential Attachment の 2 つの成長メカニズムにより、出線数分布がべき則に従うトポロジーが生成される。

2.2 FKP モデル

FKP モデルは、リンクの接続先を確率的に選択する BA モデルと異なり、ノードの物理的な配置を考慮してリンクの接続先を決定するトポロジー生成モデルである [7]。FKP モデルにおいても初期トポロジーに対してノードを段階的に追加していくものの、新たに追加したノード (ノード i) の接続先ノード j をノード i からの物理距離 d_{ij} 、および、ノード j から他ノードへの論理距離 h_j の重み付け和を最小にするノードを選択し、リンクを接続する。すなわち、以下の式を満たすノード j にリンクを接続する。

$$\min_j \alpha \cdot d_{ij} + h_j \quad (2)$$

文献 [7] では、論理距離 h_j として、(a) ノード j とその他のノード間の平均ホップ数、(b) ノード j とその他のノード間の最大ホップ数、(c) ノード j と初期ノード間のホップ数、のいずれの場合においても、出線数分布がべき則に従うトポロジーが生成できることが示されている。また、物理距離の重み α が大きい場合、追加ノードから物理的に近いノードに接続しやすくなり、出線数分布がポアソン分布に従うトポロジーが生成され、物理距離の重み α が小さい場合には、スター型のトポロジーが生成されることが示されている。出線数分布がべき則に従うトポロジーは、 α を中程度の値に設定することで生成されることが示されている。

2.3 従来の生成モデルにおける問題点

上記の BA モデルおよび FKP モデルを用いることで、べき則に従うトポロジーを生成することができる。しかし、これらのモデルで生成されたトポロジーとインターネットトポロジーにおいて、以下の相違が指摘されている。

- BA モデルにより生成したトポロジーは、AS レベルのトポロジーに比べ、クラスタ係数と平均パス長が大きく異なる [10]。
- FKP モデルにより生成したトポロジーでは、ほぼすべてのノードが出線数 1 であり、現実のインターネットトポロジーと大きく異なる [8]。

さらに、文献 [6] では、同一の出線数分布を有するが、構造が異なるトポロジーをいくつか列挙し、トポロジーの構造上の違いによってスルーアウト性能が大きく異なることも示されている。このように、単に出線数分布がべき則に従うトポロジーでは、現実のインターネットトポロジーが有する構造上の特性を捉えることができず、その結果、これらの生成モデルにより生成したトポロジーを経路制御手法などのネットワーク制御手法の評価に適用した場合、ネットワーク制御手法の性能を正しく評価することができない。特に、ISP ネットワークのトポロジーではクラスタ係数に大きな特徴があるものの、既存の生成モデルで生成したトポロジーは ISP ネットワークのクラスタ係数と大きく異なることが示されている [11]。

以上のように、従来のトポロジー生成モデルでは、出線数、物理距離、論理距離などが考慮されているものの、これらの指標だけでは、現実のインターネットトポロジーとクラスタ係数が近いトポロジーを生成するには不十分である。そのため、適切なトポロジー生成モデルが必要である。

3. インターネットトポロジー生成モデルの提案

一般に ISP ネットワークのトポロジーは、その管理者によって設計される。そのため、管理者が定める ISP ネットワークの設計方針が ISP ネットワークの構造に大きな影響を与えるものと考えられる。2.2、2.3 節で述べたように、FKP モデルにおいては、物理距離と論理距離の重み付き和の最小化をネットワークの設計方針と捉えることもできるが、FKP モデルで生成されるトポロジーは ISP ネットワークと構造が大きく異なる。そこで、本章では、ISP ネットワークの設計方針としてコスト最小化に着目し、ネットワークコスト最小化に基づいた ISP ネットワークの生成モデルを提案する。

3.1 ネットワーク設計のモデル化

提案モデルでは、トラフィック収容のために必要となる回線容量およびその回線の物理距離で定めるネットワークコストを考え、その最小化を目指したネットワーク設計によりトポロジーを生成する。ただし、ネットワークを設計する際には、

- 回線容量制約
- トラフィックの偏り
- ノードの配置

を決める必要があり、以下にその詳細を説明する。

3.1.1 回線容量制約

回線容量は離散的で、技術的な制約により上限値がある。本稿では、回線容量の上限値を 10 Gbps とし、回線容量の取得値を 1, 10, 100 bps, 1, 10, 100 Kbps, 1, 10, 100 Mbps, 1, 2.4, 4.8, 10 Gbps とする。回線の収容するトラフィックが回線容量の上限値を超える場合、そのトラフィックの一部を他の経路へ迂回させる必要がある。

3.1.2 トラフィックの偏りのモデル化

トラフィックの地理的な偏りは、gravity モデル [12] で与える。gravity モデルは、ノード i - j 間のトラフィック量 x_{ij} が、ノード i, j が扱うトラフィック量 x_i, x_j の積に比例するというモデルである [13]。ノードが扱うトラフィック量は、人口分布 p に比例するものとし、 x_{ij} を以下の式で与える。

$$x_{ij} = \chi \times p_i \times p_j$$

ここで、 χ はトラフィックのスケールパラメータである。

3.1.3 ネットワークコストのモデル化

本稿では、ネットワーク $G(V, E)$ のネットワークコスト $C(V, E)$ は、回線コストの総和で与える。

回線 l に対する回線コストは、回線の長さ d_l の単調増加関数 $f_D(d_l)$ と回線容量 b_l の単調増加関数 $f_B(b_l)$ の積で与える。回線容量は、ネットワーク $G(V, E)$ において、与えられたトラフィックを収容するために必要最低限の容量を与える。

$$C(V, E) = \sum_{l \in E} f_D(d_l) \times f_B(b_l)$$

$$s.t. \quad b_l = \min_{t_l \leq b \in B} b,$$

$$\vec{T} = R\vec{X} \quad (3)$$

ここで、 R は $|E| \times |V|^2$ の経路行列であり、ノード i とノード j 間のトラフィックが回線 l を経由する場合、 R の $(l, (i, j))$ を 1 とし、経由しない場合は 0 を与える。なお、本稿では、ノード i とノード j 間の経路は最小ホップ経路を用いる。また、 \vec{X} はノード i とノード j 間のトラフィック量 x_{ij} を要素とする $|V|^2 \times 1$ のトラフィック行列であり、式 (3) により回線 l が収容するトラフィック量 t_l が求まる。 B は 3.1.1 節で示した回線容量が取得値の集合である。

3.2 トポロジー生成アルゴリズム

以上のネットワーク設計方針に基づいたトポロジー生成アルゴリズムを示す。本稿で提案するトポロジー生成モデルでは、従来のモデルと同様に初期トポロジーを与え、そのトポロジーに対してノードを新たに追加する。新しくノードを追加することによってトラフィック量が増加し回線容量の上限値に達すると、トラフィックを迂回させるため新たに回線を追加する。

N ノードのトポロジーを生成するアルゴリズムを以下に示す。

Step 0 初期トポロジー $G_0(V, E)$ ($V = \{v_0, v_1\}, E = (v_0, v_1)$) を配置する。

Step 1 トポロジーのノードが N 個未満である場合、Step 2 へ。 N 個である場合、Step 6 へ。

Step 2 ノード i を新たに追加し、Step 3 へ。

Step 3 追加ノード i と接続した場合に、接続後のトポロジーが回線容量の制約を満たし、ネットワークコストを最小にする既存ノード j を求め、追加ノード i と接続する。Step 4 へ。

$$\min_{h \in V} C(V, E \cup \{(i, h)\})$$

ただし、どの既存ノードを追加ノード i と接続しても、接続後のトポロジーが回線容量の制約に反する場合は、接続後のトポロジーのネットワークコストを最小にする既存ノード j を求め、追加ノード i と接続する。

Step 4 Step 3 と同様に、ノード $k (\neq j)$ を求め、追加ノード i と接続する。Step 5 へ。

Step 5 トポロジーが回線容量の制約を満たす場合、Step 1 へ。トポロジーが回線容量の制約に反する場合、Step 6 へ。

Step 6 回線容量が最も大きい回線 (s, t) に対して、その回線の一方のノード $u \in \{s, t\}$ と他方のノードの隣接ノード v を接続した場合に、接続後のトポロジーのネットワークコストを最小にするノード間を接続する。ただし、接続候補のノード間がすべて接続されている場合は、対象にしている回線の次に回線容量が大きい回線を対象にする。接続した後、Step 5 へ。

$$\min_{(u,v) \in \{s,t\} \times (V_s \cup V_t)} C(V, E \cup \{(u, v)\})$$
$$s.t. \quad b_{st} = \max_{l \in E} b_l$$

ここで V_i は、ノード i の隣接ノード集合とする。

Step 7 トポロジーの生成を終了する。冗長な回線が必要な場合は、Step 6 により回線を追加する。

4. 提案モデルで生成したトポロジーの構造特性

本章では、3章で提案したトポロジー生成モデルによりトポロジーを生成し、その構造特性を比較評価する。

まず、提案モデルと ISP ネットワークのトポロジーおよび従来のトポロジー生成モデルの比較を行う。比較対象とする ISP ネットワークのトポロジーは、Rocketfuel [3] ツールにより計測された米国の通信大手 Sprint 社のトポロジーデータ (467 ノード、1280 リンク、以下、Sprint トポロジー) を用いる。また、提案モデルおよび従来の生成モデルにおいて、以下のデータおよびパラメータを用いてトポロジーを生成している。

- 提案モデルおよび FKP モデルで用いるノード配置は、緯度、経度をもとに、Sprint トポロジーを $[0, 1]^2$ 空間に正規化したデータを用いる。

- 提案モデルで用いる人口データは、2000 年代の国勢調査 [14, 15] により得られた都市人口のデータを用いる。
- 提案モデルで用いるトラフィック量は、Sprint トポロジーにおいてトラフィックの偏りを gravity モデルと人口分布で考えた場合に収容可能な最大トラフィック量と等しくなるように与える。

なお、以降の評価では、提案モデルおよび従来の生成モデルで生成するトポロジーは、ノード数およびリンク数が、Sprint トポロジーと同一となるように生成する。そして、1) クラスタ係数の分布、2) 平均パス長の分布、およびネットワーク制御手法の評価で重要になる負荷に関する指標である、3) Betweenness Centrality [16] の分布に関して、Sprint トポロジーと比較評価する。

4.1 提案モデルと従来の生成モデルの比較

提案モデルによる生成トポロジーと Sprint トポロジーおよび BA モデル、FKP モデルによる生成トポロジーの特性を図 1 に示す。提案モデルによるトポロジーは、回線コストの関数を次節で示す 1)~7) のうち、生成トポロジーのクラスタ係数の分布が最も Sprint トポロジーに近い $d_i^4 \log b_i$ を用いて生成している。BA モデルによるトポロジーは、 $m = 2$ でトポロジーを生成し、その後リンク数が Sprint トポロジーと同一になるまで式 (1) の接続確率に従い 2 つのノードを選択し、そのノード間にリンクを追加している。10000 個のトポロジーを BA モデルに基づいて生成し、その平均値を図 1 に示している。FKP モデルによるトポロジーは、文献 [7] に基づいて α を 20 とし、BA モデルによるトポロジーと同様に、追加ノードと既存の 2 つのノードと接続してトポロジーを生成する。その後リンク数が Sprint トポロジーと同一になるまで、式 (2) が最小となる 2 ノード間にリンクを追加している。

図 1 より、提案モデルは従来のトポロジー生成モデルに比べ、クラスタ係数の分布と平均パス長の分布が Sprint トポロジーに近いトポロジーが生成されることが分かる。また、負荷の分布も、従来のトポロジー生成モデルに比べ、Sprint トポロジーに類似していることが見て取れる。特に、FKP モデルや BA モデルでは Betweenness centrality の最大値が Sprint トポロジーから大きく離れている一方で、提案モデルでは極めて近い数値になっていることもわかる。以上より、提案モデルにより生成したトポロジーは現実のインターネットトポロジーをモデル化できていると言える。

以降では、提案モデルにおいて用いている回線コストの関数、トラフィックの偏り、ノード配置を変更し、これらの条件がインターネットトポロジーのモデル化に与える影響を明らかにする。

4.2 回線コストによる生成トポロジーへの影響

回線コスト $f_D(d_i) \times f_B(b_i)$ を 1) $d_i^{1/4} \log b_i$ 、2) $d_i^{1/2} \log b_i$ 、3) $d_i \log b_i$ 、4) $d_i^2 \log b_i$ 、5) $d_i^4 \log b_i$ 、6) $d_i^8 \log b_i$ 、7) $d_i b_i$ とした際に得られる生成トポロジーと Sprint トポロジーを比較評価した。これらの回線コスト関数のうち、3)、5)、6)、7) で生成したトポロジーの結果を図 2 に示す。1)、2)、4) については、図の見易さのため割愛するが、3)、5)、6)、7) と同じ傾向が得

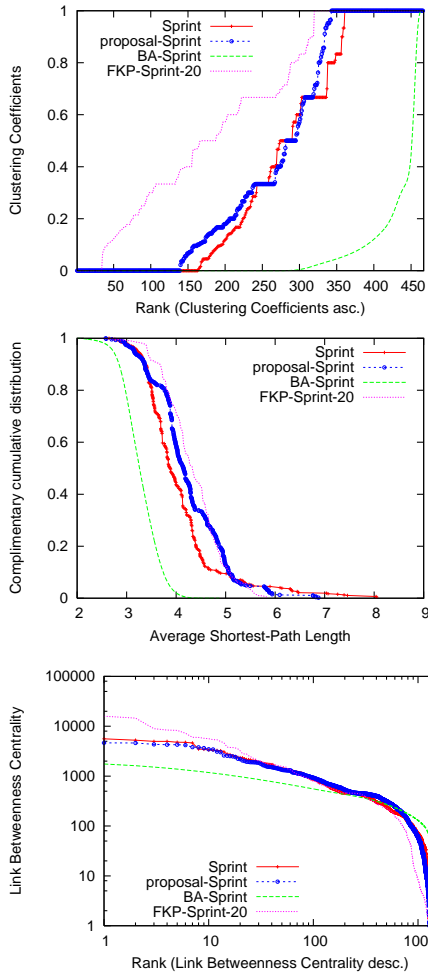


図1 従来のトポロジー生成モデルとの構造比較

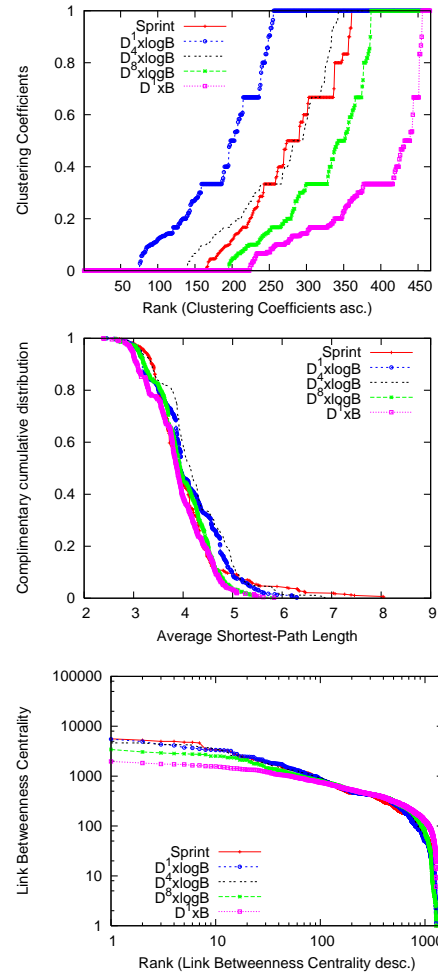


図2 回線コストが生成トポロジーに与える影響

られている。

図2より、回線コストの関数の違いによりクラスタ係数の分布が大きく変化することがわかる。特に、回線の長さ d_i を複数回乗じて回線長の重みを大きくするとともに、クラスタ係数は小さくなる。また、回線容量の関数 $f_B(b_i)$ を対数関数から線形関数にした場合も同様の傾向が見て取れる。従って、回線コストはクラスタ係数の分布に大きく影響を与えることがわかった。

4.3 トラヒックの偏りによる生成トポロジーへの影響

すべてのノード間に一樣なトラヒック量を与え、トポロジーを生成した結果を図3に示す。比較のため、トラヒックに偏りがある場合の結果 (gravity モデル) も図中に示している。

図3より、トラヒックの偏りが生成トポロジーのクラスタ係数の分布と負荷の分布に影響を与えていることがわかる。トラヒックの偏りを考慮しない場合、クラスタ係数およびリンク負荷のばらつきが小さくなるが見て取れる。

4.4 ノード配置による生成トポロジーへの影響

最後に、ノードの配置をランダムにした際のトポロジーの特性を示す。図4に、ノードを $[0, 1]^2$ 空間にランダムに配置し、500回の試行を行った平均を示す。この図を見ると、ノード配置がランダムな場合には、平均パス長はSprintトポロジーよりも長くなり、クラスタ係数も大きく異なることがわかる。しかし、ノードの配置が負荷の分布に与える影響は、回線コストや

トラヒックの偏りを変化させた場合と比べて少なくなる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、ネットワーク設計論に基づく新たなインターネットトポロジー生成モデルとして、回線に対するコストを最適にするトポロジー生成モデルを提案した。そして、提案モデルにより生成したトポロジーの構造特性をISPネットワークのトポロジーおよび従来のトポロジー生成モデルにより生成したトポロジーと比較評価した。評価の結果、提案モデルによるトポロジーは、従来のトポロジー生成モデルによるトポロジーに比べ、クラスタ係数、平均パス長、リンク負荷に関して、現実のISPネットワークのトポロジーに類似することを明らかにした。

本稿では、米国の通信大手Sprint社のトポロジーを対象として評価を行った。しかし、ISPによって、そのISPネットワークの設計方針は異なる。そのため今後、他のISPネットワークのトポロジーを対象とし評価する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究(A)18200004によって行っている。ここに記して謝意を表す。

文献

- [1] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "On power-law rela-

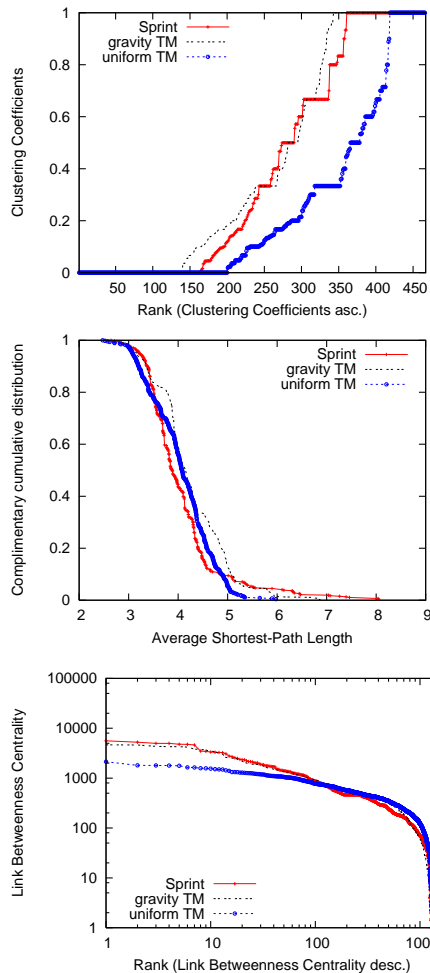


図3 トラヒックの偏りが生成トポロジーに与える影響

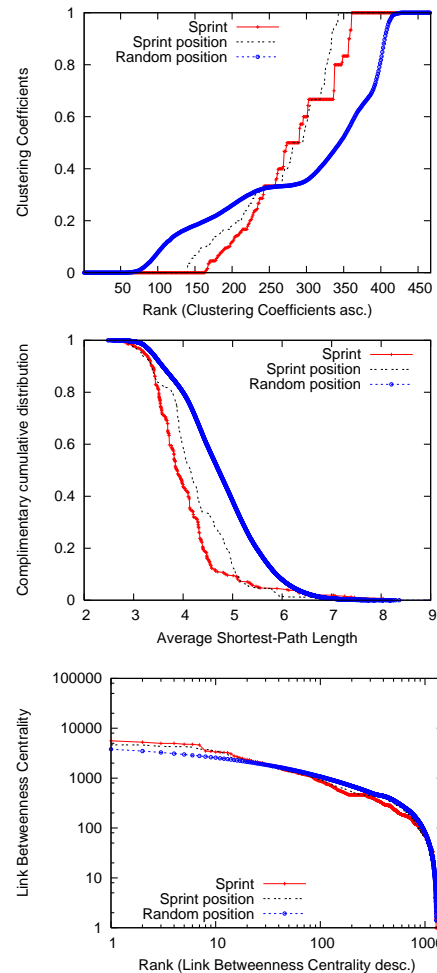


図4 ノード配置が生成トポロジーに与える影響

tionships of the Internet topology,” in *Proceedings of the conference on applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication (SIGCOMM '99)*, vol. 29, pp. 251–262, 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. Spring, 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] A. Barabási and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [5] R. Albert and A.-L. B. si, “Statistical mechanics of complex networks,” *Reviews of Modern Physics*, vol. 74, pp. 47–97, Jan. 2002.
- [6] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, J. Doyle, R. Tanaka, and S. Low, “A first-principles approach to understanding the Internet’s router-level topology,” in *Proceedings of the 2004 conference on applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications (SIGCOMM '04)*, vol. 34, pp. 3–14, NY, USA, Oct. 2004.
- [7] 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 International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP'2002)*, pp. 110–122, July 2002.
- [8] N. Berger, B. Bollobas, C. Borgs, J. Chayes, and O. Riordan, “Degree distribution of the FKP network model,” in *Proceedings of International Colloquium on Automata, Languages and Programming (ICALP)*, pp. 725–738, July 2003.
- [9] 荒川 伸一, 福元 良太, 村田 正幸, 滝根 哲哉, “ルータレベルトポロ

ジの構造特性とそのモデル化手法の提案,” 電子情報通信学会技術研究報告 (IN2005-95), pp. 43–48, Oct. 2005.

- [10] T. Bu and D. Towsley, “On distinguishing between Internet power law topology generators,” in *Proceedings of Twenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002)*, vol. 2, pp. 1587–1596, June 2002.
- [11] Ryota Fukumoto, Shin’ichi Arakawa, Tetsuya Takine, and Masayuki Murata, “Analyzing and modeling router-level Internet topology,” in *Proceedings of the 21st edition of the International Conference on Information Networking (ICOIN 2007)*, Jan. 2007.
- [12] M. Roughan, A. Greenberg, C. Kalmanek, M. Rumsewicz, J. Yates, and Y. Zhang, “Experience in measuring backbone traffic variability: Models, metrics, measurements and meaning,” in *Proceedings of the 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet Measurement (IMW '02)*, pp. 91–92, Nov. 2002.
- [13] A. Feldmann, A. Greenberg, C. Lund, N. Reingold, J. Rexford, and F. True, “Deriving traffic demands for operational IP networks: Methodology and experience,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 9, pp. 265–280, June 2001.
- [14] U.S. Census Bureau, “Census 2000 Gateway.” Available at <http://www.census.gov/main/www/cen2000.html>.
- [15] United Nations Statistics Division, “Demographic and Social Statistics.” Available at <http://unstats.un.org/unsd/demographic/>.
- [16] L. C. Freeman, “Centrality in social networks: Conceptual clarification,” *Social Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 215–239, 1979.