

特別研究報告

題目

回線容量制約を考慮した
インターネットトポロジー生成モデルの提案と評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

日高 直人

平成 19 年 2 月 20 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

回線容量制約を考慮した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

内容梗概

インターネットのノードの接続状況を観測した結果、出線数分布がべき則に従うトポロジーであることが示されている。べき則に従うトポロジーに関する多くの研究では、BA モデルによって生成されるトポロジーを対象としてきた。しかし、BA モデルにより生成されたトポロジーは、インターネットトポロジーをモデル化できていないとの指摘もなされている。また近年では、ネットワーク設計論に基いたモデルである FKP モデルや HOT モデルも考えられているが、両モデルにより生成されるトポロジーは、ルータレベルのトポロジーとは構造が大きく異なる。そのため、両モデルにより生成されるトポロジーを用いたトラフィック制御手法の評価において、その結果に大きな違いが生じることが示されている。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適切な生成モデルが必要である。

そこで本報告では、ネットワーク設計の新たな指標として、回線に対する指標の最適化に基づくインターネットトポロジーの生成モデルを提案する。提案モデルでは回線容量の制約に加え、今までのネットワークトポロジーのモデル化に関する研究において、考えてこられなかったトラフィックの地理的な偏りを考慮する。そして、回線の敷設費や保守費をネットワークコストとして考え、その値を最小化する。提案モデルは、出線数分布がべき則に従うトポロジーが生成でき、また、従来のモデルと比べ、クラスタ係数の分布が ISP ネットワークのトポロジーにより近いトポロジーを生成できることを示した。さらに、様々な条件下で提案モデルにより生成されるトポロジーを調査し、ISP ネットワークのトポロジー形成に大きく影響を与える要因を明らかにした。

主な用語

べき則、ルータレベルトポロジー、トポロジー生成、トポロジーモデル化、gravity モデル、回線コスト

目次

1	はじめに	5
2	従来のトポロジー生成モデル	7
2.1	インターネットのトポロジー	7
2.1.1	AS (Autonomous System) レベル	7
2.1.2	ルータレベル	7
2.2	従来のトポロジー生成モデル	8
2.2.1	BA (Barabási-Albert) モデル	8
2.2.2	FKP (Fabrikant Koutsoupias Papadimitriou) モデル	9
2.2.3	HOT (Heuristically Optimal Topology) モデル	10
2.3	従来のトポロジー生成モデルにおける問題点	12
3	インターネットトポロジー生成モデルの提案	13
3.1	ISP ネットワークの設計	13
3.1.1	トラヒックの偏り	13
3.1.2	ネットワークコスト	13
3.2	ネットワークコスト最小化に基づいたトポロジー生成モデルの提案	14
3.2.1	トラヒックの偏りのモデル化	14
3.2.2	ネットワークコストのモデル化	14
3.2.3	回線容量制約	14
3.2.4	トポロジー生成アルゴリズム	15
4	提案モデルの評価	17
4.1	トポロジー生成の条件・パラメータ	17
4.2	生成されたトポロジーの構造特性	18
4.2.1	評価指標	18
4.2.2	提案モデルにおけるべき則出現の十分条件	18
4.2.3	ISP トポロジーとの比較	19
4.2.4	ISP トポロジーの形成要因	20
5	まとめ	26
	謝辞	27

図目次

1	BA モデルによるトポロジーの出線数分布： $N = 10000$	9
2	FKP モデルによるトポロジーの出線数分布（スター型、べき則、指数則）： $N = 10000$	10
3	FKP モデルによるべき則に従うトポロジー： $N = 100$ 、 $\alpha = 4$	11
4	HOT モデルによるトポロジー	11
5	都市人口のデータにより割り当てた人口の分布	17
6	提案モデルにおけるべき則出現の十分条件：平均ノード間トラヒックと出線 数分布のべき指数の関係	19
7	AT&T 社のトポロジーにおける出線数とランクの関係	20
8	提案モデル：ノード配置 AT&T、トラヒックの偏り、回線コスト $d_{ij}^{0.5} \times b_{ij}$ 、 平均ノード間トラヒック 7 Mbps	22
9	提案モデル：ノード配置 AT&T、トラヒックの偏り、回線コスト $d_{ij} \times b_{ij}$ 、 平均ノード間トラヒック 5 Mbps	22
10	提案モデル：ノード配置 AT&T、トラヒックの偏り、回線コスト $d_{ij} \times \log b_{ij}$ 、 平均ノード間トラヒック 6 Mbps	22
11	提案モデルによるトポロジーのクラスタ係数の分布：ノード配置 AT&T、ト ラヒックの偏り	23
12	提案モデルによるトポロジーのクラスタ係数の分布：ノード配置 AT&T、ト ラヒックの偏りなし、回線コスト $d_{ij}^2 \times b_{ij}$ 、平均ノード間トラヒック 6 Mbps	23
13	提案モデル：ノード配置 ランダム、トラヒックの偏り、回線コスト $d_{ij} \times b_{ij}$ 、 平均ノード間トラヒック 5 Mbps	24
14	提案モデル：ノード配置 Sprint、トラヒックの偏り、回線コスト $d_{ij} \times b_{ij}$	24
15	提案モデル：ノード配置 ランダム、トラヒックの偏り、回線コスト $d_{ij} \times b_{ij}$ 、 平均ノード間トラヒック 13 Mbps	24
16	提案モデルによるトポロジーのクラスタ係数の分布：ノード配置 ランダム、 トラヒックの偏り、回線コスト $d_{ij} \times b_{ij}$	25

1 はじめに

近年、いくつかの研究において AS (Autonomous System) 間・ルータ間の接続状況が観測されている。その結果、ノードの出線数分布がべき則に従うトポロジであることが明らかにされている [1–3]。べき則に従うトポロジでは、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。そして、出線数が大きいハブノードと出線数が小さい非ハブノード間のホップ数が小さくなる。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スモール・ワールド性を持つ。

べき則に従うトポロジに関する多くの研究では、BA (Barabási-Albert) モデル [4] によって生成されるトポロジを対象としてきた。BA モデルとは、1) Incremental Growth および 2) Preferential Attachment の 2 つのルールに基づいてノードとリンクを追加するモデルである。BA モデルにより生成されるトポロジでは、べき指数 γ が -3 のべき則に従い、様々な特性が出現することが知られている。しかし、BA モデルで生成されるトポロジは実際のインターネットトポロジとはノードの出線数分布以外の特性が異なるため、BA モデルをインターネットトポロジのモデルとして適用すると、様々な不具合があることが示されている [5, 6]。トポロジ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の適切な生成モデルとして、インターネットトポロジの生成モデル (Fabrikant Koutsoupias Papadimitriou) モデル [7] や HOT (Heuristically Optimal Topology) モデル [5] が考えられた。

FKP モデルは、ノード間の物理距離を考慮したモデルである。FKP モデルでは、BA モデルと同様に Incremental Growth によりノードが追加されていく。そして、追加ノードとの物理距離と論理距離の重み付け和が最小になる既存ノードと追加ノードの間にリンクを追加する。物理距離の重みを変化させることによって、べき則に従うトポロジが生成できることが示されている [7]。HOT モデルは、ルータのバックプレーン処理能力、インターフェース速度による技術的制約を考慮したモデルである。ネットワークのスループットを最大化することを目指した結果、出線数が大きいハブノードがエッジノードの小容量回線を収容し、出線数が小さいノードが大容量のコアネットワークを構成することが示されている [5]。

FKP モデルおよび HOT モデルは、ある指標を最適にすることでトポロジを生成しており、ネットワーク設計論に沿ったモデルと考えられる。しかし、FKP モデル、HOT モデルにより生成されるトポロジは、ルータレベル、特に ISP (Internet Service Provider) ネットワークのトポロジとは構造が大きく異なる。そのため、両モデルにより生成される

トポロジーを用いたトラフィック制御手法の評価において、その結果に大きな違いが生じることが示されている [8]。

そこで本報告では、ネットワーク設計の新たな指標として、回線に対する指標の最適化に基づくインターネットトポロジーの生成モデルを提案する。提案モデルでは回線容量の制約に加え、今までのネットワークトポロジーのモデル化に関する研究において、考えてこられなかったトラフィックの地理的な偏りを考慮する。そして、回線の敷設費や保守費をネットワークコストとして考え、その値を最小化する。提案モデルは、出線数分布がべき則に従うトポロジーが生成できる。また、従来モデルと比べ、クラスタ係数の分布がISP ネットワークのトポロジーにより近いトポロジーを生成できる。さらに、様々な条件下で提案モデルにより生成されるトポロジーを調査し、ISP ネットワークのトポロジー形成に大きく影響を与える要因を明らかにする。

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トポロジーの特性について説明する。そして、既存のインターネットトポロジーの生成モデルを紹介し、それらの問題点を述べる。次に3章において、トラフィックの地理的偏りを考慮したネットワークコスト最小化に基づくトポロジー生成モデルを提案し、4章において、提案モデルによるトポロジーを評価する。最後に5章において、本報告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、従来のトポロジー生成モデルについて述べる。

まず 2.1 節で、現在のインターネットが従うと言われているべき則について述べる。そして、べき則に従うネットワークの出線数分布から推測可能なトポロジー構造を述べ、同一の出線数分布を持つ一方で、異なるトポロジー特性を有するインターネットトポロジーについて述べる。具体的には、AS (Autonomous System) レベルのトポロジーとルータレベルのトポロジーについて説明する。

次に 2.2 節で、べき則に従うネットワークのトポロジーを生成する従来のモデルを紹介する。そして最後に 2.3 節で、2.2 節で紹介した従来の生成モデルによるトポロジーの問題点を述べる。

2.1 インターネットのトポロジー

近年、いくつかの研究において、インターネットがべき則に従うトポロジーであることが明らかにされている [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というトポロジー構造をしている。しかし、同一の出線数分布を持つトポロジーであっても、出線数が大きいハブノードと出線数が小さい非ハブノードの接続関係によって、そのトポロジー特性・性能が異なることが示されている [5]。

2.1.1 AS (Autonomous System) レベル

AS 間の接続状況を計測した結果、AS レベルのトポロジーがべき則に従うことが示されている [1]。AS レベルとは、1つの AS をノード、AS 間を接続する相互リンクをリンクとみなした場合のことである。AS 間の接続状況は、AS 間で使用されるルーティングプロトコル、BGP (Border Gateway Protocol) の経路表により確認できる。AS 間の接続状況を計測した結果、比較的多くの出力リンクを持つ AS (ハブノード) 同士が接続され、ハブノードがトポロジーの中心に位置する傾向が観測された。

2.1.2 ルータレベル

2.1.1 節の AS レベルのトポロジーと同様に、ルータレベルのトポロジーもべき則に従うことが明らかにされている。ルータ間の接続状況は、traceroute コマンドにより確認でき

る。ルータレベルのトポロジーがべき則に従う理由には、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 (Internet Service Provider) から利用者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結果 [7]、2) ネットワークの信頼性を高めようとする結果 [9]、3) ルータ機器などの製品の能力 [5] などが挙げられている。

2.2 従来のトポロジー生成モデル

近年、出線数分布がべき則に従うトポロジーを生成する手法が考えられてきた。本節では、べき則に従うトポロジーを生成する様々な手法の中で、BA モデル、FKP モデルおよび HOT モデルの 3 つの主な生成モデルを紹介する。

2.2.1 BA (Barabási-Albert) モデル

BA モデルは、ネットワークの成長過程を表現し、ネットワークにノードを新たに追加していく (Incremental Growth)。BA モデル以前のネットワークのモデル、例えば、ER (Erdős-Rényi) モデルや WS (Watts-Strogatz) モデルでは、成長過程が表現されていなかった。そして、出線数 k_i が大きいノード i ほど新たに追加されたノードと接続しやすいように、接続確率 $\Pi(k_i)$ を与える (Preferential Attachment)。 N ノードのトポロジーを生成する場合のアルゴリズムを以下に示す。

Step 0: 初期ノードとして、 m_0 個のノードを配置する。

Step 1: トポロジーのノードが N 個未満である場合、Step 2 へ。ノードが 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 ($\leq m_0$) 個のノードを選ぶ。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 つのルールにより、出線数分布がべき則に従うトポロジーが生成される。図 1 に BA モデルにより生成した 10000 ノードのトポロジーの出線数分布を示す。

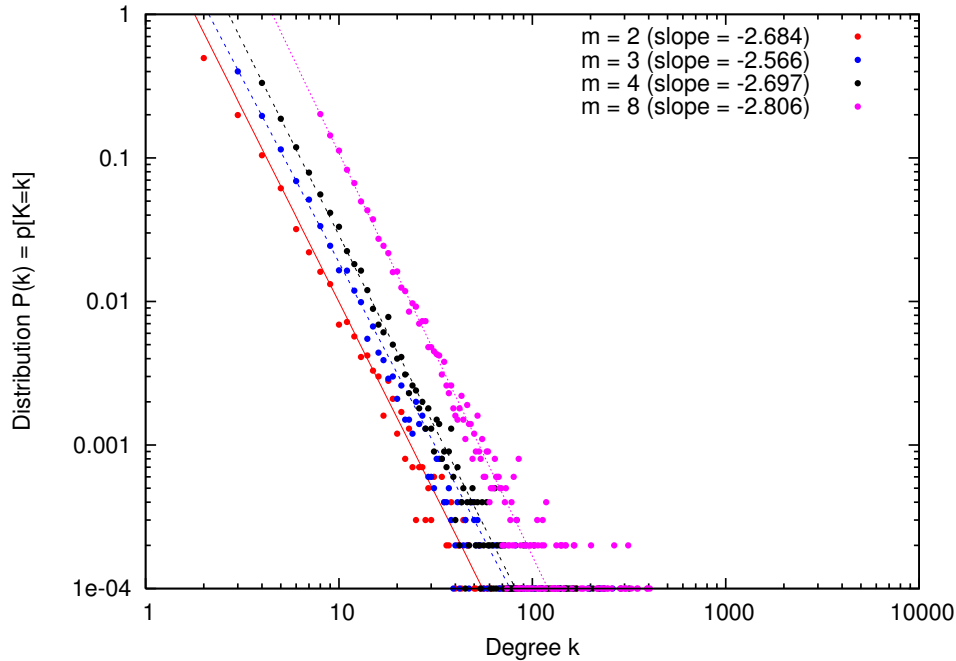


図 1: BA モデルによるトポロジーの出線数分布 : $N = 10000$

2.2.2 FKP (Fabrikant Koutsoupias Papadimitriou) モデル

FKP モデルは、2.2.1 節で紹介した BA モデルと同様に、Incremental Growth と Preferential Attachment の 2 つのルールにより、トポロジーを生成する。しかし、ノードの物理的な配置を考慮し、Preferential Attachment において、式 (2) のように表される、新たに追加されたノード i と既存ノード j 間の物理距離 d_{ij} とノード j の論理距離 h_j の重み付け和 (重み : α) が最小となる、ノードを一意に選択する。FKP モデルは、ノードの物理的な配置を考慮した点と追加したノードと接続するノードを一意に決定する点で、確率論に基づく BA モデルとは異なる。

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

ノード j の論理距離 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が考えられ、どの論理距離に対し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 [7]。

物理距離の重み α が大きい場合、追加ノードと物理的に近いノードが選択される。一方、物理距離の重み α が小さい場合、トポロジーの中心に位置するノードが選ばれ、出線数が多

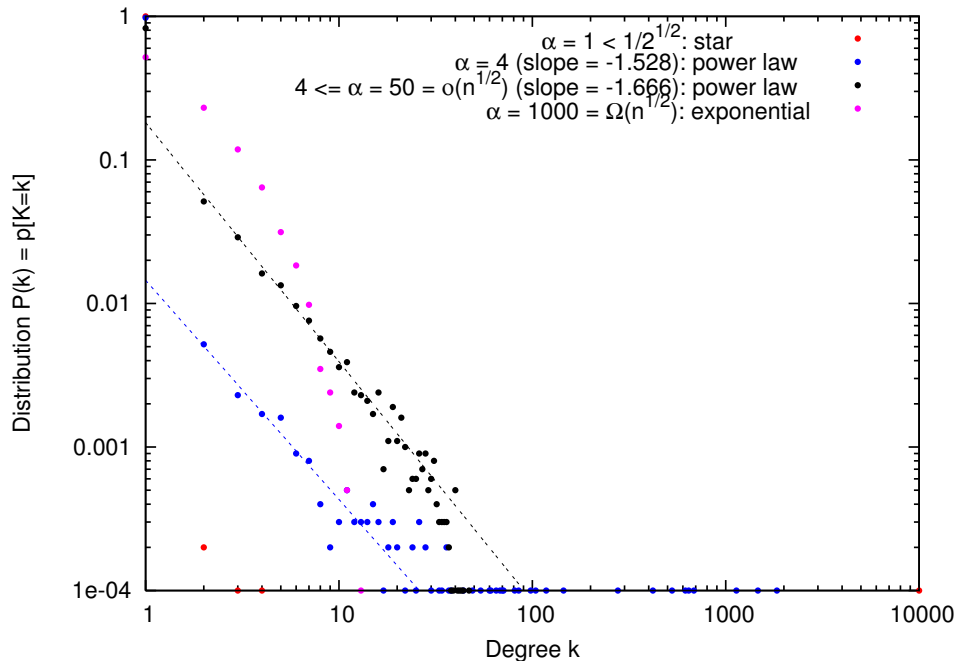


図 2: FKP モデルによるトポロジーの出線数分布 (スター型、べき則、指数則): $N = 10000$

いノードほど選択されやすくなる。物理距離の重み α を変えることにより、1) スター型のトポロジー、2) 出線数分布がべき則に従うトポロジー、3) 出線数分布が指数則に従うトポロジーが生成されることが数学的に解析されている。

図 2 に FKP モデルにより生成した 10000 ノードのトポロジーの出線数分布を示す。また、図 3 に FKP モデルにより生成した 100 ノードのべき則に従うトポロジーを示す。

また FKP モデルは、AS レベルのトポロジーに適合するように拡張もされている [10]。

2.2.3 HOT (Heuristically Optimal Topology) モデル

HOT モデルは、ルータ機器の能力による制限が原因で、出線数が多いノードは回線容量の小さいアクセス回線を収容するのに用いられ、出線数が小さいノードは回線容量の大きい回線を収容するのに用いられるという傾向に着目している。この傾向を考慮した上で、べき則に従う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ーを求めた結果、図 4 に示すような 3 階層の構造になることが示されている [5]。この構造では、出線数が多いハブノードがアクセスノードのトラヒックを収容するために用いられている。これは、2.1.1 節で述べた AS レベルのトポロジーにおけるハブノードとは位置が異なる。

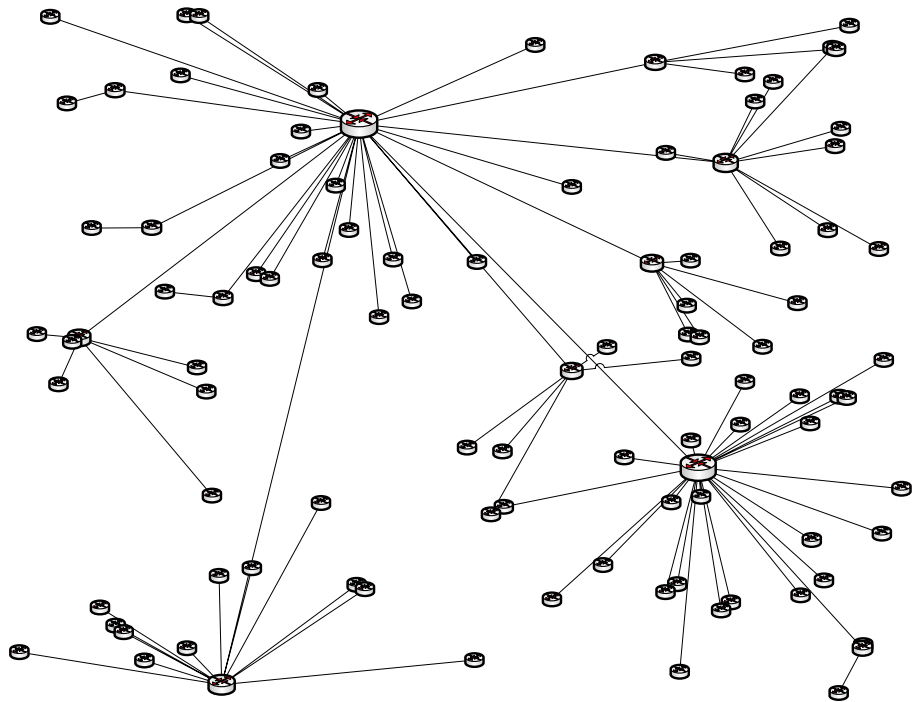


図 3: FKP モデルによるべき則に従うトポロジー : $N = 100$, $\alpha = 4$

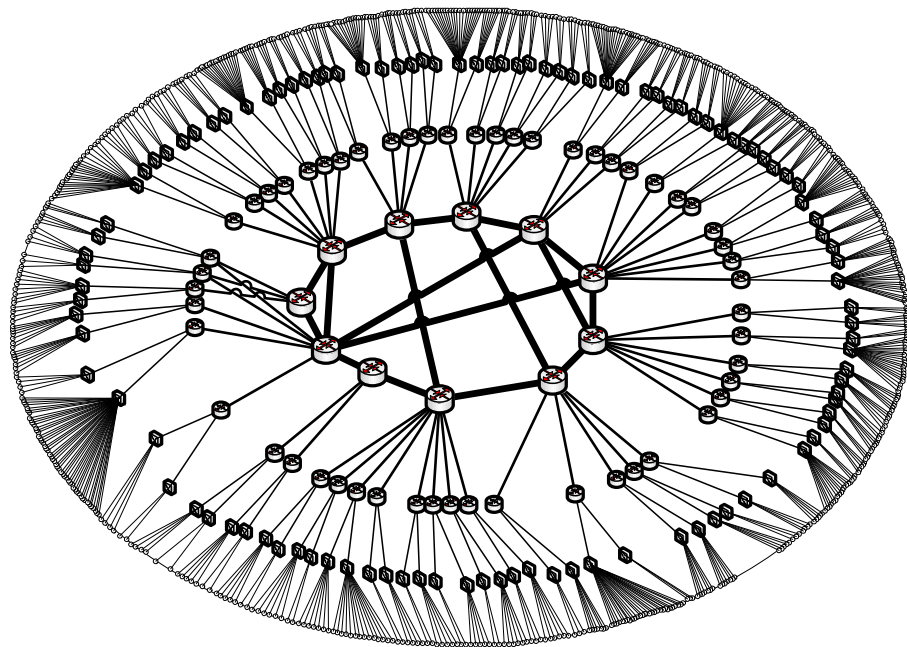


図 4: HOF モデルによるトポロジー

2.3 従来のトポロジー生成モデルにおける問題点

2.2 節で今までのネットワークに関する研究で用いられてきたトポロジー生成モデルを紹介した。しかし、これらのモデルをインターネットトポロジーの生成モデルとして適用すると、出線数分布が一致するだけでは実用上不十分であり、様々な不具合があることが知られている。例えば、BA モデルによるトポロジーは、AS レベルのトポロジーと比べ、平均パス長とクラスタ係数が異なることが示されている [6]。平均パス長とクラスタ係数は、スモール・ワールド性を示す指標である。また、FKP モデルによるトポロジーには、インターネットトポロジーと比べ、出線数 1 のノードが多く存在する (図 2)。HOT モデルは、学術ネットワーク Abilene をよくモデル化している。しかし、図 4 のように HOT モデルによるトポロジーには、インターネットトポロジーと比べ代替経路が少ない。そのため、HOT モデルによるトポロジーとインターネットトポロジーの構造は異なっている。

このように、従来の生成モデルによるトポロジーは、ルータレベル、特に ISP ネットワークのトポロジーとは構造が大きく異なる。その結果、従来の生成モデルによるトポロジーに経路制御手法などのネットワーク制御手法を適用した場合には、性能を正しく評価することができないことが示されている [11]。従来の生成モデルでは、出線数、物理距離、論理距離などが考慮されている。しかし、これらの指標のみでは、現実のインターネットトポロジーと特性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、ネットワーク性能を正しく評価するためにも、他の指標を考慮したトポロジー生成手法を考え、ISP ネットワークのトポロジーを形成する要因を明らかにする必要がある。

3 インターネットトポロジー生成モデルの提案

本章では、ルータレベルのインターネットトポロジー生成モデルを提案する。まず、3.1節でルータレベルのインターネットトポロジーの特徴を述べる。そして、3.2節でその特徴を考慮したインターネットトポロジー生成モデルを提案する。

3.1 ISP ネットワークの設計

ルータレベルのインターネットトポロジーは、1つのISPによって設計される。そのため、ルータレベルのインターネットトポロジーは、それぞれのISPの設計方針に強く影響される。そして、ISPは、ユーザに低価格で安定した通信サービスを提供する必要がある。そのためには、ISPはユーザのトラフィック要求を効率よく満たすインターネットトポロジーを設計する必要がある。ここで、効率とは経済的な効率であり、ユーザへのサービス提供価格に影響してくる。

ユーザに安定した通信サービスを提供する、つまりユーザのトラフィック要求を満たすだけならば、全ユーザ間を接続すればよい。しかし、全ユーザ間を接続するのは経済的に効率が悪く、ユーザに低価格な通信サービスを提供することができなくなる。そのため、ユーザのトラフィック要求と経済的な効率の間でのトレードオフを考える必要がある。

3.1.1 トラフィックの偏り

一般に地域によって、ユーザ数の偏りがある。また近年、ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) や FTTH (Fiber To The Home) による 10 Mbps を超える高速通信環境が手軽に利用できるようになった。それに伴い、動画配信やオンラインゲームなどの大容量コンテンツのサービスが提供されるようになってきた。従来の電子メールや Web ページの閲覧などが中心のユーザがいる一方で、大容量コンテンツのサービスを望むユーザも増えてきている。そのため、ユーザによってトラフィック要求が大きく異なり、地域間のトラフィックに大きな偏りが生じている。

3.1.2 ネットワークコスト

経済的な効率を示すための指標として、ネットワークの回線に対するコストが考えられる。回線に対するコストとは、回線の敷設費や保守費が考えられる。これらのコストは一般的に、回線が長いほど高い。そして、回線の容量が大きいほど高い。また、従来の生成モデルのようにノードに対するコストも考えられる。この場合、ノードつまりルータの性能が高いほど、そのノードのコストは高い。

3.2 ネットワークコスト最小化に基づいたトポロジー生成モデルの提案

3.1節で述べたルータレベルのインターネットトポロジーの特徴を基にトポロジー生成モデルを提案する。

3.2.1 トラヒックの偏りのモデル化

今までのネットワークトポロジーのモデル化に関する研究ではトラヒックの偏りは考えられてこなかった。そこで、本報告ではトラヒックの地理的な偏りを考慮する。トラヒックの偏りは、gravity モデル [12] で考える。gravity モデルは、あるノード i, j 間のトラヒック量 x_{ij} が、該当するノードが扱うトラヒック量 x_i, x_j の積に正比例するというモデルである。gravity モデルは、いくつかの ISP トポロジーでうまく適合することが示れている [13]。gravity モデルの重みには、人口分布 \vec{p} を与える。

$$x_{ij} \propto x_i \times x_j = p_i \times p_j \quad (3)$$

3.2.2 ネットワークコストのモデル化

本報告では、3.1.2節で挙げたネットワークコストのうち、回線に対するコストのみを考える。つまり、ネットワーク $G(V, E)$ のネットワークコスト $C(V, E)$ は、回線コストの総和のみで与える。従来の生成モデルでは、ノードに対する指標は考えられていた。しかし、回線に対する指標は考えられてこなかった。回線 (i, j) に対する回線コストは、回線距離 d_{ij} の単調増加関数 $f_D(d_{ij})$ と回線容量 b_{ij} の単調増加関数 $f_B(b_{ij})$ の積で考える。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ヒック要求を収容するのに必要な回線容量を与える。

$$C(V, E) = \sum_{(i,j) \in E} f_D(d_{ij}) \times f_B(b_{ij}) \quad s.t. \quad \vec{B} = R\vec{X} \quad (4)$$

ここで、 R は $\{0, 1\}^{|E| \times |V|^2}$ の経路行列である。つまり、経路制御を行なった結果、 i, j 間のトラヒックが回線 l に収容される場合は R の $(l, (i, j))$ 成分 $r_{l(i,j)}$ に 1 を与え、収容されない場合は 0 を与える。 \vec{X} は $\mathcal{R}^{|V|^2}$ のトラヒック要求ベクトルであり、 i, j 間のトラヒック量 x_{ij} を第 (i, j) 成分 $\vec{X}_{(i,j)}$ に与える。 \vec{B} は $\mathcal{R}^{|E|}$ の回線容量ベクトルである。

3.2.3 回線容量制約

本提案モデルでは、3.2.2節で示したように、回線に対する指標、回線コストを用い、回線コストは回線容量の関数として与える。回線容量には上限があるため、本提案モデルにお

いても、回線容量に上限値 b_{max} を定める。

$$\vec{B} \leq [b_{max} \cdots b_{max}]^T \quad (5)$$

回線容量の上限値 b_{max} を超えるトラヒックの収容を要求された回線が存在する場合、その回線が収容するトラヒックを減らすため、迂回用の回線を追加する必要がある。迂回用の回線は、収容するトラヒック量が最も多い回線の一方のノードと他方のノードの隣接ノード間の回線から決定する。

3.2.4 トポロジー生成アルゴリズム

提案モデルでは、Incremental Growth によりノードを追加し、1) ノードが追加された場合、2) 回線容量制約に反した場合にネットワークコストの最小化に基づき回線を追加する。最後にネットワークコスト最小化に基づいたトポロジー生成モデルの 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: 初期ノード V_0 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。ノードが N 個である場合、Step 6 へ。

Step 2: ノード i を新たに追加する。

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 を求める。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を満たさない場合は、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 を求める。そして、追加ノードと求めたノードを接続する。

$$\min_{k \in V} C(V, E \cup \{(i, k)\}) \quad (6)$$

Step 4: 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を満たさない場合、Step 5 へ。

Step 5: 回線容量が最も大きい回線 (s, t) に対して、その回線の一方向のノード $u \in \{s, t\}$ 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、対象にしている回線の一方向のノードと

他方のノードの隣接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 4 へ。

$$\min_{(u,v) \in \{s,t\} \times (V_s \cup V_t)} C(V, E \cup \{(u,v)\}) \quad s.t. \quad \max_{(s,t)} b_{st} \quad (7)$$

ここで V_i は、ノード i の隣接ノード集合とする。

Step 6: トポロジーの生成を終了する。

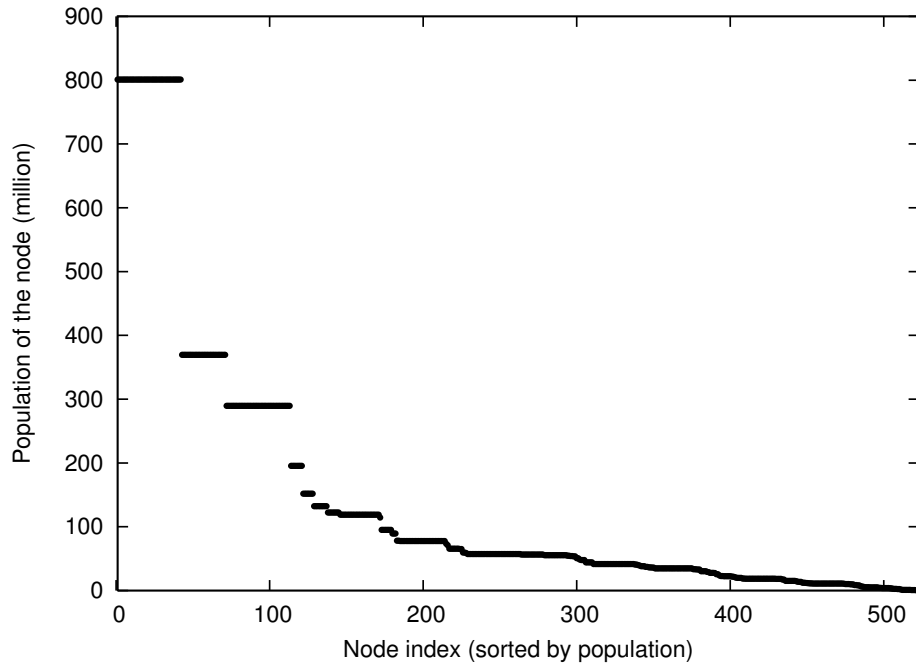


図 5: 都市人口のデータにより割り当てた人口の分布

4 提案モデルの評価

本章では、3章で提案したトポロジー生成モデルの評価を行なう。まず、4.1節で生成に用いた条件およびパラメータを示す。そして、4.2節で生成したトポロジーの構造的特性を評価する。

4.1 トポロジー生成の条件・パラメータ

提案モデルに以下の条件・パラメータを与え、トポロジーを生成した。

- 回線コスト $D(d_{ij}) \times B(b_{ij}) : d_{ij}^w \times b_{ij}$ ($w = 0.5, 1, 1.5, 2, 4, 64, 128$)、 $d_{ij} \times \log b_{ij}$
- 回線容量の上限 $b_{max} : 10$ Gbps
- 平均ノード間トラヒック : 0.01 ~ 100 Mbps

ノード配置および gravity モデルの重みには、現実のデータを用いた。ノード配置のデータは、Rocketfuel [3] ツールにより計測された米国の通信大手 AT&T 社のトポロジーデータ (523 ノード) を用いる。gravity モデルの重みには、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。

4.2 生成されたトポロジーの構造特性

提案モデルにより生成したトポロジーの構造的な評価を行う。具体的には、出線数分布にべき則が出現することを示し、クラスタ係数の分布が ISP ネットワークのトポロジーに近いトポロジーを生成できることを示す。そして、異なる生成条件により生成したトポロジーの構造から ISP ネットワークのトポロジーを形成する要因を示す。

4.2.1 評価指標

本報告では、Degree centrality の分布により、出線数分布を示す。また、クラスタ係数の分布により、ISP ネットワークのトポロジーとの構造的な比較を行なう。

- Degree centrality $C_D(i)$: ノード i の出線数 k_i
- クラスタ係数 $C_C(i)$:

クラスタ係数とは、3 ノードの接続関係を示す指標である [16]。ノード i に対するクラスタ係数 $C_C(i)$ は、ノード i を中心とする連結 3 ノードが閉路を構成する割合、つまりノード i の隣接 2 ノードが隣接している確率で示される。

$$C_C(i) = \frac{N_{\Delta}(i)}{N_a(i)} = \frac{\sum_{j < k} a_{ij} a_{ik} a_{jk}}{\sum_{j < k} a_{ij} a_{ik}} = \frac{\sum_{j < k} a_{ij} a_{ik} a_{jk}}{k_i C_2} = \frac{2 \sum_{j < k} a_{ij} a_{ik} a_{jk}}{k_i (k_i - 1)} \quad (8)$$

ここで、 a_{st} は隣接行列の (s, t) 成分であり、ノード s と t が隣接しているならば 1 であり、隣接していなければ 0 である。

4.2.2 提案モデルにおけるべき則出現の十分条件

提案モデルによるトポロジーにおいて、生成条件によって出線数分布がべき則に従うトポロジーが得られた。本節において、出線数分布がべき則に従うトポロジーは、そのトポロジーが出線数とランクの関係においてべき則に従うことにより判定した。ランクとは、出線数降順に並び替えた時の順位である。出線数とランクの関係がべき則に従うトポロジーにおいて、その出線数分布がべき則に従うことが知られている。つまり、出線数とランクの関係がべき則に従うことは、出線数分布がべき則に従うための十分条件である。提案モデルによる 523 ノードのトポロジーにおいて、出線数分布にべき則が出現する十分条件およびそのときのべき指数 γ を図 6 に示す。回線コストの物理距離の重みが 64、128 と大きい場合、出線数分布にべき則が現れなかった。また、特にノード間トラフィックが平均 0.5 ~ 3.5 Mbps である場合に、出線数分布にべき則が現れやすいことがわかった。

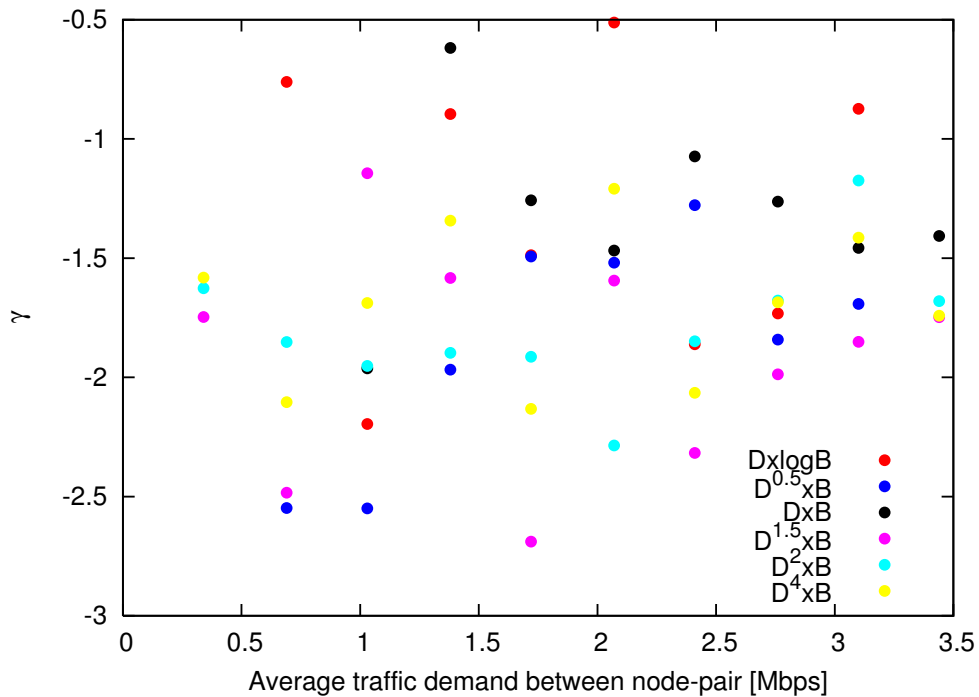


図 6: 提案モデルにおけるべき則出現の十分条件：平均ノード間トラフィックと出線数分布のべき指数の関係

4.2.3 ISP トポロジーとの比較

4.2.2 節で示した通り、従来のトポロジー生成モデルと同様に、提案モデルによりべき則に従うトポロジーが生成できることがわかった。しかし、従来の生成モデルによるトポロジーと同様に、4.2.2 節で示した出線数とランクの関係がべき則に従うトポロジーは、ISP ネットワークのトポロジーとはクラスタ係数の分布が異なる。しかし、ISP ネットワークのトポロジーは出線数分布はべき則に従っているが、出線数とランクの関係はべき則に従っていない図 7 に AT&T 社のトポロジーにおける出線数とランクの関係を示す。

そこで、生成したトポロジーのうち、出線数とランクの関係にべき則が現れないが、出線数分布にべき則が現れるトポロジーに対し、ISP ネットワークのトポロジーとクラスタ係数の分布を比較した。その結果、提案モデルにより ISP ネットワークのトポロジーとクラスタ係数の分布が近いトポロジーを生成できることが分かった。ISP ネットワークのトポロジーとクラスタ係数の分布が近いトポロジーのクラスタ係数の分布および出線数分布を図 8 ~ 11 に示す。

図 8 に示したように、提案モデルでは従来の生成モデルにおいて問題となっていたクラスタ性に関して、従来の生成モデルと比べ、ISP ネットワークにより近いトポロジーが生成

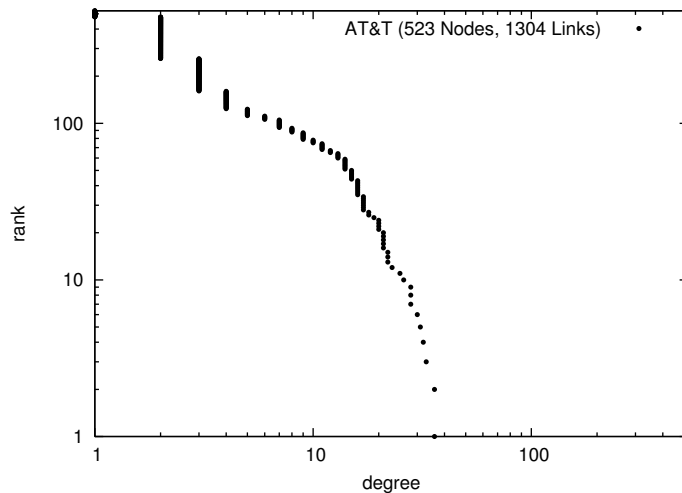


図 7: AT&T 社のトポロジーにおける出線数とランクの関係

できることがわかる。従来の生成モデルでは、成長過程においてクラスタが形成されにくい
ため、ISP ネットワークのトポロジーとはクラスタ性が異なっている。また、成長過程のあ
と、式 (1)、(2) で示される各指標により選んだ 2 ノード間に回線を追加した場合、クラス
タ性は高くなっていく。しかし、BA モデルではクラスタ性の変化が遅く、FKP モデルで
は速い。そのため、ISP ネットワークのトポロジーと同数の回線の時には、クラスタ性が異
なってくる。一方、提案モデルでは、成長過程において、3.2.4 節の Step 3 による回線追加
時にはクラスタ性は低くなるが、Step 5 による迂回用の回線追加時にはクラスタ性が高く
なる傾向がある。そのため、生成条件によって、クラスタ係数の分布が ISP ネットワーク
のトポロジーに近いトポロジーが生成できると考えられる。

4.2.4 ISP トポロジーの形成要因

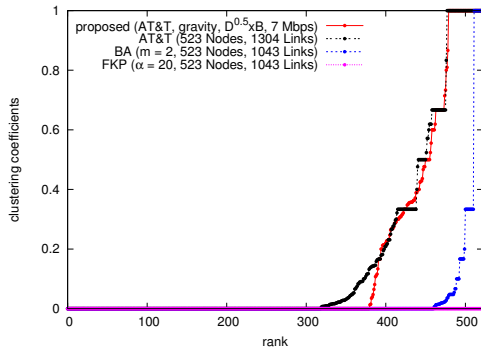
4.2.3 節までで、物理距離の重みが小さい場合、平均ノード間トラヒックの値を変化させ
ることによって、クラスタ係数の分布が ISP ネットワークのトポロジーと近いトポロジー
が生成できることが分かった。ここで、ノード配置およびトラヒックの偏りが及ぼす影響を
明らかにするため、

- ノード配置をランダムに行なった場合
- トラヒックに偏りを考えない場合

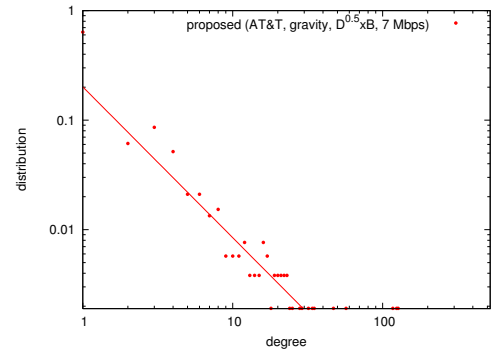
において、提案モデルによりトポロジーを生成した。その結果、ノード配置に AT&T 社の
トポロジーデータを与え、トラヒックの偏りを考えない場合およびノード配置をランダムに

与え、トラヒックの偏りを考慮した場合にクラスタ係数の分布が ISP ネットワークのトポロジに近いトポロジが生成されやすかった (図 12、13)。つまり、ノード配置または人口分布に現実のデータを与えた場合、クラスタ係数の分布が ISP ネットワークのトポロジに近いトポロジが生成されやすかった。

また異なる ISP ネットワーク、アメリカの通信大手 Sprint 社のトポロジデータに対して、同様に生成モデルの評価を行なった。その結果、図 14 のように Sprint 社のトポロジのクラスタ係数の分布に近いトポロジが生成できた。そして、Sprint 社のトポロジデータに対して、ノード配置およびトラヒックの偏りの影響を調べた結果、図 15、16 のようにトラヒックの偏りを考慮した場合にクラスタ係数の分布が ISP ネットワークのトポロジに近いトポロジが得られやすく、トラヒックの偏りを考えない場合はほとんど得られなかった。このため、AT&T 社のトポロジに対する結果も含め、ISP ネットワークのトポロジ形成にはトラヒックの偏りが影響を与えていると考えられる。

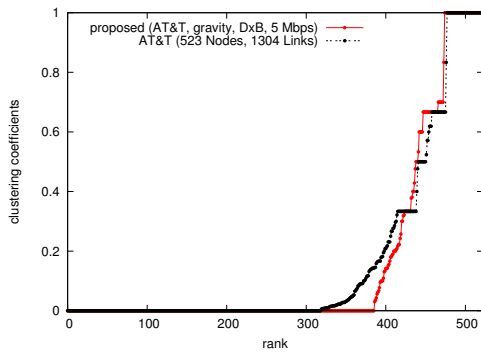


(a) クラスタ係数の分布

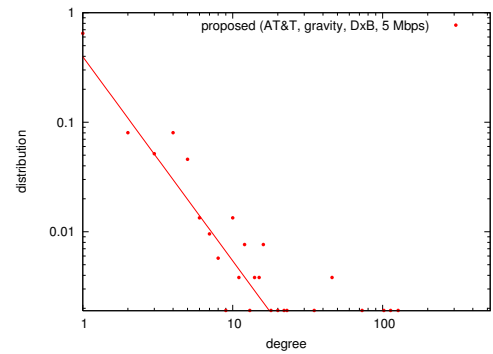


(b) 出線数分布

図 8: 提案モデル: ノード配置 AT&T、トラヒックの偏り、回線コスト $d_{ij}^{0.5} \times b_{ij}$ 、平均ノード間トラヒック 7 Mbps

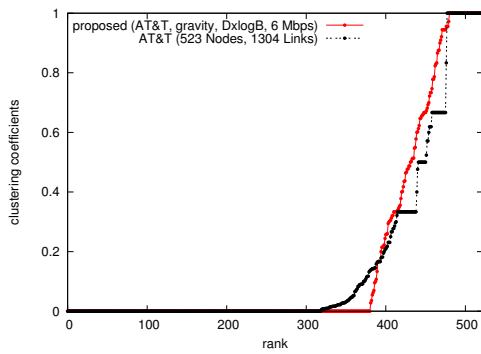


(a) クラスタ係数の分布

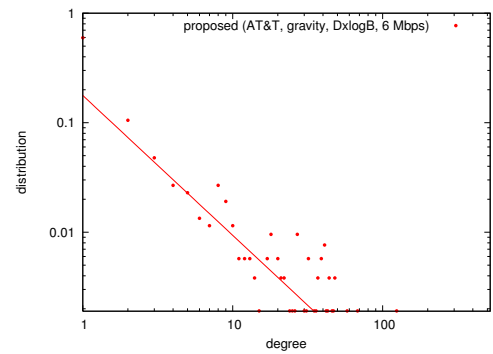


(b) 出線数分布

図 9: 提案モデル: ノード配置 AT&T、トラヒックの偏り、回線コスト $d_{ij} \times b_{ij}$ 、平均ノード間トラヒック 5 Mbps

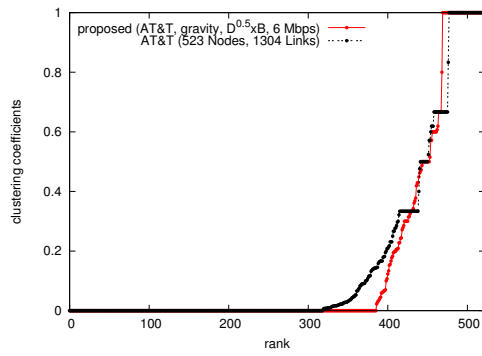


(a) クラスタ係数の分布

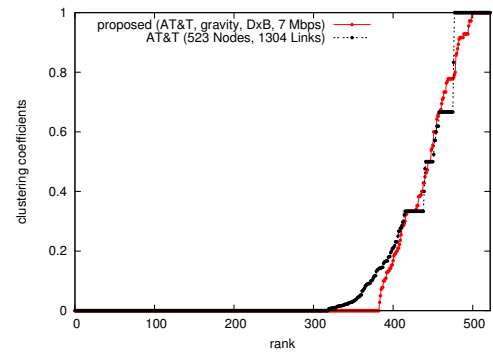


(b) 出線数分布

図 10: 提案モデル: ノード配置 AT&T、トラヒックの偏り、回線コスト $d_{ij} \times \log b_{ij}$ 、平均ノード間トラヒック 6 Mbps



(a) 回線コスト $d_{ij}^{0.5} \times b_{ij}$ 、平均ノード間トラヒック 6 Mbps



(b) 回線コスト $d_{ij} \times b_{ij}$ 、平均ノード間トラヒック 7 Mbps

図 11: 提案モデルによるトポロジーのクラスタ係数の分布：ノード配置 AT&T、トラヒックの偏り

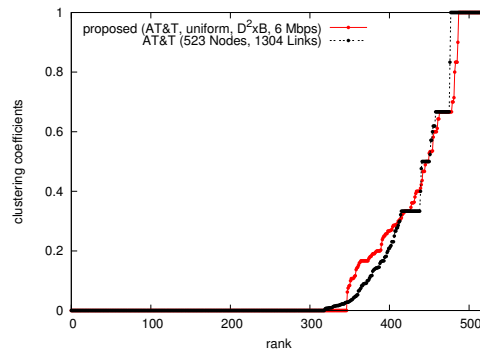
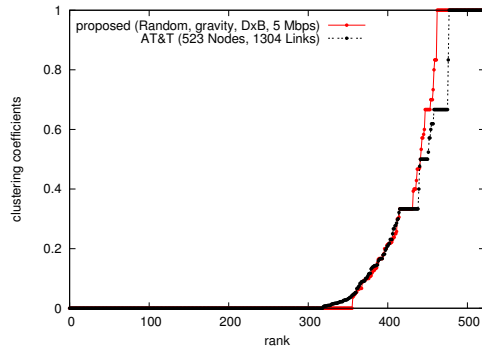
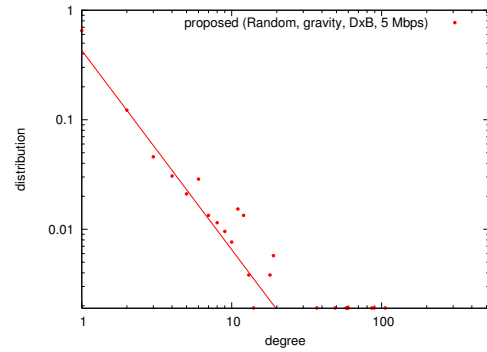


図 12: 提案モデルによるトポロジーのクラスタ係数の分布：ノード配置 AT&T、トラヒックの偏りなし、回線コスト $d_{ij}^2 \times b_{ij}$ 、平均ノード間トラヒック 6 Mbps

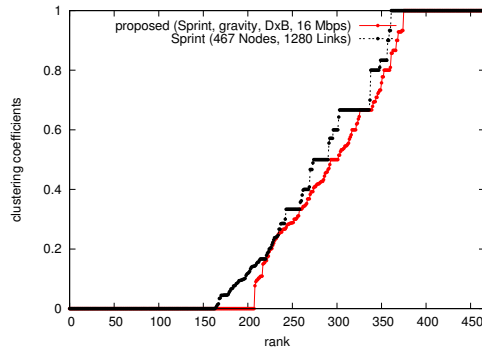


(a) クラスタ係数の分布

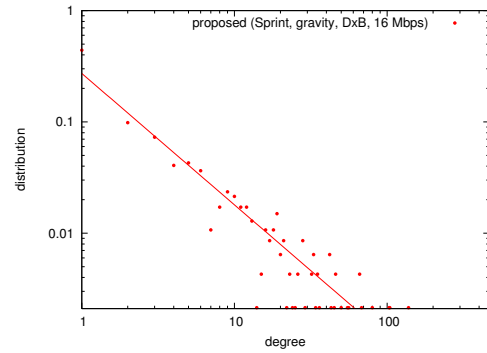


(b) 出線数分布

図 13: 提案モデル：ノード配置 ランダム、トラフィックの偏り、回線コスト $d_{ij} \times b_{ij}$ 、平均ノード間トラフィック 5 Mbps

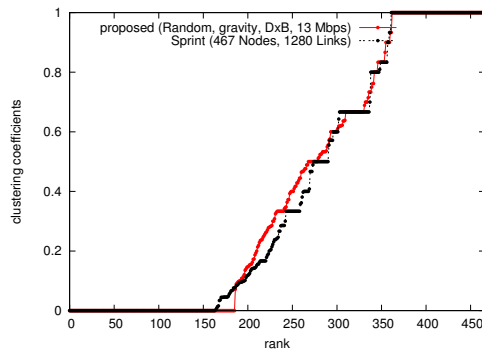


(a) クラスタ係数の分布

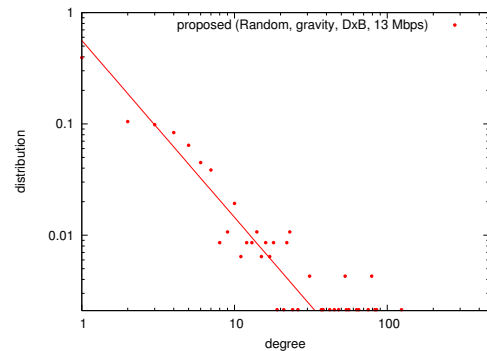


(b) 出線数分布

図 14: 提案モデル：ノード配置 Sprint、トラフィックの偏り、回線コスト $d_{ij} \times b_{ij}$

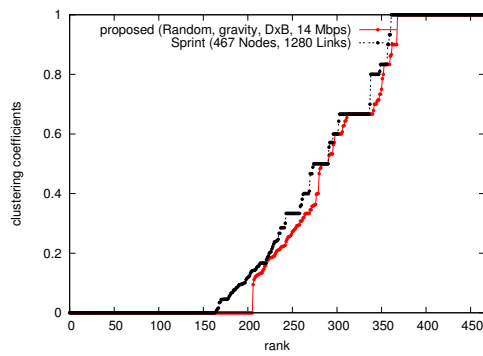


(a) クラスタ係数の分布

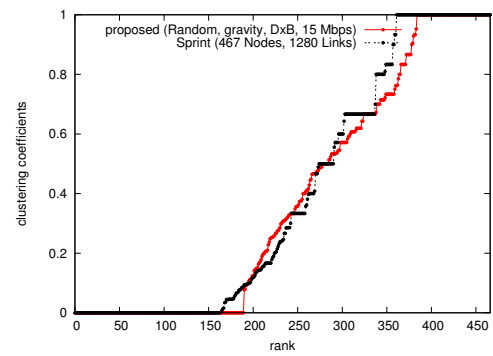


(b) 出線数分布

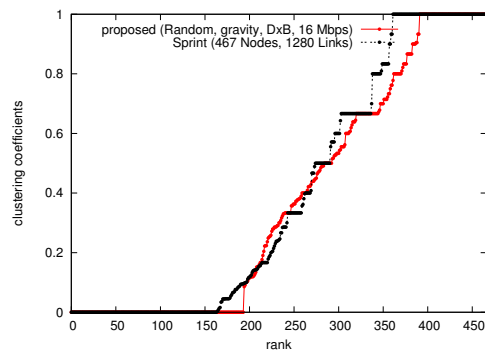
図 15: 提案モデル：ノード配置 ランダム、トラフィックの偏り、回線コスト $d_{ij} \times b_{ij}$ 、平均ノード間トラフィック 13 Mbps



(a) 平均ノード間トラヒック 14 Mbps



(b) 平均ノード間トラヒック 15 Mbps



(c) 平均ノード間トラヒック 16 Mbps

図 16: 提案モデルによるトポロジーのクラスタ係数の分布: ノード配置 ランダム、トラヒックの偏り、回線コスト $d_{ij} \times b_{ij}$

5 まとめ

本報告では、ネットワーク設計に基づいたインターネットトポロジーの生成モデルを提案し、その評価を行った。提案モデルでは回線容量の制約に加え、従来のネットワークトポロジーのモデル化に関する研究では扱われていないトラヒックの地理的な偏りを考慮してトポロジーを生成する。また、回線距離および回線容量によって定める回線コストを最小化するトポロジー生成手法である。

提案モデルにより出線数分布がべき則に従うトポロジーを生成できることを示し、従来のモデルと比べて、クラスタ係数の分布がISP ネットワークのトポロジーにより近くなることも明らかにした。さらに、様々な条件下で提案モデルにより生成したトポロジーを調べた結果、ISP ネットワークのトポロジー形成にトラヒックの地理的な偏りが大きく影響していることを示した。

今後、本提案モデルで生成されるトポロジーが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可能かを評価する必要がある。

謝辞

本報告を終えるにあたり、ご指導、ご教授を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に心より感謝申し上げます。ならびに、本報告において終始ご指導を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一助手には多くの的確な助言を頂きました。心よりお礼申し上げます。また、日頃から適切な助言をいただきました大阪大学大学院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、大阪大学大学院経済学研究科の大下裕一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答えて頂きました石田晋哉氏、小泉佑揮氏、福元良太氏、清水将大氏、大橋正稔氏、木利友一氏、梶岡慎輔氏、兵頭克也氏をはじめとする村田研究室の皆様方に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, “On power-law relationships of the Internet topology,” in *Proceedings of 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, no. 4, 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, no. 1, pp. 2–16, Feb. 2004.
- [4] A. Barabási and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, no. 5439, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [5] 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,” *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 34, no. 4, pp. 3–14, Oct. 2004.
- [6] 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.
- [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] 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.

- [9] J. M. Carlson and J. Doyle, “Highly optimized tolerance: A mechanism for power laws in designed systems,” *Physical Review E*, vol. 60, no. 2, pp. 1412–1427, Aug. 1999.
- [10] J. I. Alvarez-Hamelin and N. Schabanel, “An Internet graph model based on trade-off optimization,” *European Physical Journal B*, vol. 38, no. 2, pp. 231–237, Mar. 2004.
- [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 Measurment (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, no. 3, 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. Costa, F. Rodrigues, G. Travieso, and P. Boas, “Characterization of complex networks: A survey of measurements,” *Arxiv preprint cond-mat/0505185*, Aug. 2006.