

[奨励講演] 残存次数の相互情報量にもとづく トポロジー構造の多様性が設備増設量に与える影響の評価

諫 璐[†] 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: †{l-chen,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし インターネットの社会インフラ化が進み利用形態が多様化するにつれ、トラフィック需要の変動に対する適応性や拡張性の高いネットワーク設計が重要になりつつある。しかし、需要の変動は予測困難であるため、事前に変動規模を想定してネットワークを構築するのではなく、トポロジーの構造に多様性を持たせることで環境変化に対する適応性や拡張性を高めることが望ましい。本稿では、トポロジーが有する構造の多様性を測る指標として残存次数の相互情報量に着目する。評価の結果、ルーターレベルトポロジーの残存次数の相互情報量は約 1.0 となり、トポロジー構造の多様性が低いことが分かった。またトラフィック需要の変動に対する耐性を調査するために、トラフィック需要の変動が生じた時に必要となる回線設備量の増設量を評価した。相互情報量の低いトポロジーと相互情報量を高めたトポロジーでの増設量の違いを示す。

キーワード べき則、ルーターレベルトポロジー、トポロジー構造、相互情報量、構造の多様性、次数分布

Sustainability Analysis of Topologies with Different Network Heterogeneity Described by Mutual Information of Remaining Degree

Lu CHEN[†], 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: †{l-chen,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract As the Internet becomes the social infrastructure, a network design method that has the sustainability against changes of traffic demand is becoming important. Since we do not know when the environmental changes occur and how large the changes are in advance, it is preferable to have heterogeneity in topological structures so that the network can evolve more easily. In this paper, we investigate the heterogeneity of topological structures by using mutual information of remaining degree. Our results show that the mutual information is high at the most of router-level topologies, which indicate that the route-level topologies are highly designed by, e.g., the network operators. We then evaluate the sustainability against changes of traffic demand of topologies with different mutual information.

Key words power-law network, router-level topology, topological structure, mutual information, network heterogeneity, degree distribution

1. はじめに

インターネットの社会インフラ化が進み利用形態が多様化するにつれ、多種多様なプロトコルに基づくネットワーク制御が複雑に干渉するため、ネットワーク設計が複雑・困難になりつつある。例えばオーバレイルーティングにより、アプリケーション層で経路制御を行い性能向上を測る技術が検討されているが、ネットワーク層の管理者によるトラフィックエンジニアリングと干渉し、性能が著しく劣化することが指摘されている。そのため、トラフィック需要の変動といったネットワーク環境の変化に対する適応性や拡張性を保ちつつネットワークにリンク・ノードの追加や処理能力の増強などを行う、新たなネットワークの設計手法が重要である。

インターネットトポロジーを計測した結果、次数分布がべき則に従うことが明らかとなっている [1]。次数分布がべき則に従うトポロジーでは、ノードの次数 x の出現確率 P_x が $P_x \propto x^{-\gamma}$ で近似される (γ は定数)。次数分布がべき則に従うトポロジー生成手法はこれまでも広く検討されており、その 1 つに BA モデルがある [2]。BA モデルは (1) ノードを段階的に追加していく Incremental Growth、(2) 追加の際に既存のトポロジーのノードの次数分布に応じて確率的に接続する Preferential Attachment の規則に基づいてノードおよびリンクを追加するトポロジー生成手法である。BA モデルで生成したトポロジーでは、多数のノードの次数は小さい一方で、次数の大きいノードが少数存在する。BA モデルを用いて生成した次数分布がべき則に従うトポロジーを対象とし、ネットワーク性能の様々な評価がなされている [3], [4]

しかし、次数分布のみがトポロジーの性質を決定することはない。文献 [5] では、次数分布が同一で構造の異なる複数のトポロジーを列挙し、それぞれのトポロジーがノード処理能力の制限下で収容できるトラフィック量を評価している。その結果、ノードの次数分布が同一であったとしてもトポロジーが有する構造に依存して収容可能なトラフィック量が異なることが示されている。すなわち、次数分布よりも高次の性質が収容可能なトラフィック量を決定付けることが示されている。ISP のルーターレベルトポロジーでは、回線の物理距離やルーターに接続可能なポート数などの技術的・物理的な制約に起因してトポロジーの構造が定まり、それは、BA モデルなどの確率的なトポロジー生成モデルでは説明することはできない。

我々の研究グループでは、通信ネットワークを対象としたトポロジーのモデル化手法の検討を行っている [6]~[8]。文献 [6] では、ISP のルーターレベルトポロジーは、地域ごとのモジュール内のルーター同士が局所的に密に連結されるモジュール性の高い構造を有していることを示している。また、文献 [7] では、ISP のルーターレベルトポロジーの持つ高いモジュール性は、回線の物理距離の最小化と回線容量制約下における収容可能なトラフィック量が減少しないよう設計した結果として出現することを明らかにしている。文献 [8] では、国内 ISP ネットワークの回線容量分布が Zipf 則に従うことを指摘している。回線容量分布が Zipf 則に従うとは、 k 番目に大きな回線容量が、全回

線の回線容量に占める割合が $1/k$ に比例することである。文献 [6] では、回線容量分布がべき則に従うことで収容可能なトラフィック量が増大することを明らかにしている。しかし、ネットワーク環境の変化に対する適応性や拡張性を保持するネットワーク設計を行うためには、トポロジーのモデル化手法の検討のみでは不十分である。特にトラフィック需要の変動は予測困難な事象であり、事前に変動規模を想定してネットワークを設計するのではなく、トポロジーの構造やリンクの回線容量を含めて適応性や拡張性の高いネットワークを設計する必要がある。

本稿では、適応性や拡張性の高いネットワーク設計への適用を想定し、トポロジーが有する構造の多様性を測る指標を評価に用いる。ここで言う構造の多様性とは、トポロジーの一部のノード集合 (以降、subgraph と呼ぶ) を取り出した際に、その集合の接続形態が多様であることである。これまでも subgraph の接続形態をパターンとして定義し、そのパターンの出現頻度によりトポロジーの構造的特徴を分析するネットワークモチーフの概念が提案されている [9]。文献 [10] では、4 ノード subgraph の出現頻度から ISP のルーターレベルトポロジーの構造的特徴の分析を行っている。そこでは、ISP のルーターレベルトポロジーは、4 ノードが完全連結された subgraph から 1 リンクを除去した "sector" の構造を多く有することを示している。しかし、ネットワークモチーフは、パターンの出現頻度を抽出するものであり、構造の多様性を測るものではない。ただし subgraph のノード数を増やし (最大で N 、ただしトポロジーのノード数を N とする)、すべてのパターンの出現頻度を抽出することで、構造の多様性を議論することは可能となるが、そのためには膨大な計算が必要となる。

そこで、本稿では、トポロジーが有する構造の多様性を測る指標として、相互情報量に着目する。相互情報量は、情報理論における解釈では、確率変数 X 、 Y があった時、 Y を知ることでより得られる X の情報量となる。相互情報量を、トポロジーの構造の一部 (Y に相当) を知ることで得られる残りのトポロジーの構造 (X に相当) の情報量と見立てることで、トポロジーが有する構造の多様性を測る。文献 [11] では、残存次数の相互情報量を用いたトポロジー分析がなされている。ソフトウェアプログラムや電子回路等の人工システムと生物システムのトポロジーにおける残存次数の相互情報量を算出し、ランダムに接続されたトポロジーと比較して相互情報量が大きくなる結果が示されている。そこで、本稿では残存次数の相互情報量に着目し、ルータートポロジーが有する構造の多様性を評価する。また相互情報量を用いて多様性の異なるトポロジーを生成し、トラフィック需要の変動に対する耐性を評価する。

本稿の構成は以下の通りである。まず、2. 章で、相互情報量の定義について述べる。次に、3. 章で、相互情報量を用いてルーターレベルトポロジーを評価し、構造の多様性について述べる。4. 章では、多様性の異なるトポロジーを生成し、トラフィック需要の変動が生じた時に必要となる回線設備量の増設量を評価することで、トラフィック需要の変動に対する耐性について述べる。

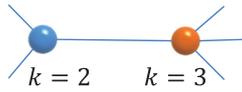


図1 残存次数

2. 残存次数の相互情報量

本章では文献[11]で述べられている残存次数の相互情報量を説明する。

残存次数 k とはリンクを一本取り除いた時に、その片方に接続されていたノードの残り次数である。残存次数分布 $q(k)$ は次数分布 $P(P_1, \dots, P_x, \dots, P_K)$ を用いて以下の式で表される。ただし K はトポロジーの最大次数である。

$$q(k) = \frac{(k+1)P_{k+1}}{\sum_k kP_k} \quad (1)$$

残存次数の相互情報量 $I(q)$ は残存次数分布 $q=(q(1), \dots, q(i), \dots, q(N))$ を用いて式(2)で表される。

$$I(q) = H(q) - H_c(q|q') \quad (2)$$

式(2)における第一項 $H(q)$ は残存次数のエントロピーを表しており、残存次数分布 $q(k)$ を用いて式(3)で定義される。

$$H(q) = -\sum_{k=1}^N q(k) \log(q(k)) \quad (3)$$

これはリンクの接続先のノード次数の多様性を測っており、トポロジーの次数の不均質性を表す指標であることが文献[11]で述べられている。残存次数のエントロピー $H(q)$ が小さいトポロジーには、例えばハブノード以外のノードの次数が1であるスタートポロジ（図3）がある。また、ノード次数が多様になればなるほど $H(q)$ は大きくなる。例えば、文献[5]で示されている Abilene トポロジー（図2）では、ノード次数が不均質となっているため $H(q)$ が大きい。

式(2)における第二項 $H_c(q|q')$ は残存次数の条件付きエントロピーを表している。残存次数 k' を持つノードと接続されているノードの残存次数が k である条件付き確率 $\pi(k|k')$ と残存次数分布 $q(k)$ を用いて以下の式で定義される。

$$H_c(q|q') = -\sum_{k=1}^N \sum_{k'=1}^N q(k') \pi(k|k') \log \pi(k|k') \quad (4)$$

スタートポロジでは $H_c(q|q')$ が0となる。ハブノードと接続されているノードの次数が必ず1であり、かつ次数1のノードと接続されているノードの次数もまた同じためである。これに対して Abilene トポロジーでは、あるノードと接続されているノードの残存次数に偏りがあるため、 $H_c(q|q')$ が大きくなる。

本稿で着目する残存次数の相互情報量 $I(q)$ は $0 \leq I(q) \leq H(q)$ の範囲に存在し、リンクの片方に接続されたノードの次数を知ることで得られる、もう片方に接続されていたノードの次数の情報を表している。スタートポロジと Abilene トポ

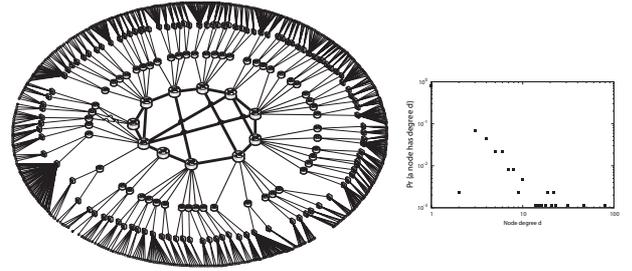


図2 Abilene トポロジー ($H = 3.27, H_c = 2.25, I = 1.02$)

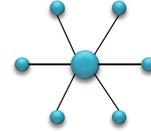


図3 スタートポロジ ($H = 1, H_c = 0, I = 1$)

ロジは $I(q)$ がほぼ同じである。しかしスタートポロジの場合はその次数分布で得られる最大の情報が得られていることを意味しているが、Abilene トポロジーではそうでない。多様性の限度が次数分布の不均質性の高低によって異なるため、本稿では $I(q)$ のみでなく、 $H(q)$ と $H_c(q|q')$ も考慮して多様性について議論する。

3. ルーターレベルトポロジーにおける残存次数の相互情報量とその多様性

文献[12]の手法を用いて抽出されたルーターレベルトポロジー Level3、Verio、AT&T、Sprint、Telstra の相互情報量を求めたところ、表1の通りとなった。また、比較のため、AT&T トポロジーと同一のリンク数、ノード数の BA モデル[2]で生成したトポロジーと ER モデル[13]で生成したトポロジーの相互情報量を求めている。以降では、それぞれ BA トポロジー、ER トポロジーと呼ぶ。

エントロピーに着目すると、多くのルーターレベルトポロジーのエントロピーは BA トポロジーのエントロピーと同程度であり、ER トポロジーのエントロピーがそれらに比べて低いことが分かる。これは、指数分布に従う ER トポロジーの次数分布がべき則に従う BA トポロジーなどの次数分布に比べて次数の不均質性が低いためである。

エントロピーが4.5前後のトポロジーで相互情報量に着目すると、Verio社を除くルーターレベルトポロジーは残存次数の相互情報量が大きく、確率的に生成された BA トポロジーでは相互情報量が小さいことが分かる。また ER トポロジーの相互情報量も小さい。これはルーターレベルトポロジーが確率的に生成されたトポロジーに比べて多様性が低いことを意味しており、ISP トポロジーにおいて故障耐性向上のための接続パターンが繰り返し出現しているためであり、ルーターレベルトポロジーが意図的に設計されていることに起因していると考えられる。一方で、Verio社のトポロジーの相互情報量は他のISPと比較して小さい。これは、Verio社のネットワーク拡張の経緯によるものと考えられる。Verio社は小規模な地域ISPの買収

表1 ルーターレベルトポロジーの相互情報量

トポロジー	ノード数	リンク数	$H(G)$	$H_c(G)$	$I(G)$
Level3	623	5298	6.04	5.42	0.61
Verio	839	1885	4.65	4.32	0.33
ATT	523	1304	4.46	3.58	0.88
Sprint	467	1280	4.74	3.84	0.90
Telstra	329	615	4.24	3.11	1.13
BA	523	1304	4.24	3.98	0.26
ER	523	1304	3.22	3.15	0.07

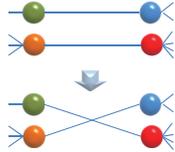


図4 次数分布を維持するリンク張り替え

を繰り返して規模を拡大したため[14]、さまざまなISPの設計指針を内包し、結果として構造が多様になっている。

4. トラフィック需要の変動に対する耐性の評価

本章では、残存次数の相互情報量で表される多様性の異なるトポロジーを用いたトラフィック需要の変動に対する耐性の評価について説明する。評価では、多様性の異なるトポロジーを生成し、トラフィック需要の変動が生じた時に必要となる回線設備量の増設量を示している。

4.1 評価トポロジー

評価で用いた多様性の異なるトポロジーについて説明する。2章で述べたとおり、多様性の限度が次数分布の不均質性の高低によって異なるため、ここでは同じ次数分布を持ちながら多様性の異なるトポロジーを評価に用いる。多様性の低いトポロジーとして3章で示したAT&Tのトポロジーを用いる。以降、AT&T_{original}とする。また多様性の高いトポロジーとして、AT&T_{original}に対して次数分布を維持したままランダムにリンクを張り替えて生成した、相互情報量が約0.3のAT&T_{0.3}を用いる。リンクの張替えは、文献[15]で述べられている手法を用いた。具体的には、図4のように、ランダムに選択した2本のリンクの接続先ノードを交換している。AT&T_{original}とAT&T_{0.3}のエントロピー、条件付きエントロピー、相互情報量、平均ホップ長は表2の通りである。

4.2 評価方法

評価では、トラフィック需要の変動が生じた時に必要となるそれぞれの回線設備量の増設量を示す。初期トラフィック需要を収容するように回線設備量を設計したネットワークに対して、新たなトラフィック需要をも収容するために必要となる回線設備量の増設量を評価する。初期需要と新たな需要の相関関係により増設量が異なると考えられるため、増設量を変動前後の需要の相関の順に並べて評価した。初期回線設備量の設計方法、増設量の算出方法、新たなトラフィック需要の生成方法と相関係数の算出方法を順に説明する。

表2 各トポロジーの相互情報量と平均ホップ長

トポロジー	$H(G)$	$H_c(G)$	$I(G)$	平均ホップ長
AT&T _{original}	4.46	3.58	0.88	5.07
AT&T _{0.3}	4.46	4.18	0.28	3.58
AT&T _{hopmin}	4.46	4.09	0.36	3.56

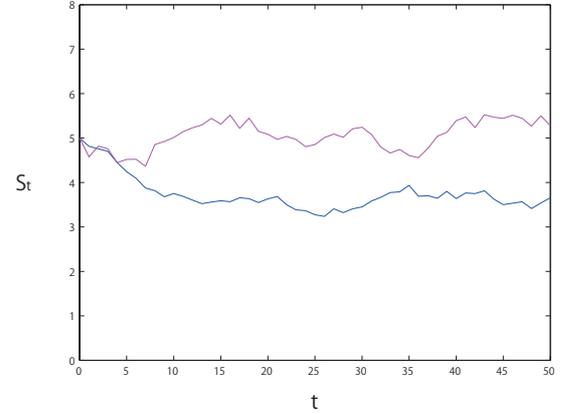


図5 幾何ブラウン運動に従う値 S_t

初期の回線設備量は次のように設計している。初期トラフィック需要 $T^{initial}$ は、 $LN(5, 10)$ の対数正規分布に従う乱数を要素に持つトラフィックマトリックスを用いている。各対地間のトラフィックをそれぞれの最短経路上に流し、最短経路が複数存在する場合は、トラフィックを均等に分けてそれぞれの最短経路に流している。この時にそれぞれのリンクで流れるトラフィック量 $L_{ij}(T^{initial})$ を収容するために必要な回線設備量を初期の回線設備量 $C_{ij}(T^{initial})$ とする。

回線設備量の増設量は、新たなトラフィック需要をも収容するために初期回線設備量に加えて必要となる設備量のことを指す。同様に、新たなトラフィック需要 T^{new} に基づいて最短経路上にトラフィックを流し、それぞれのリンクに流れるトラフィック量 $L_{ij}(T^{new})$ を求める。そして式(5)で新たな回線設備量 $C_{ij}(T^{new})$ を算出する。式(6)で表される回線設備量の総和の差が増設量 $ADD(T^{initial}, T^{new})$ である。

$$\begin{cases} C_{ij}(T^{new}) = L_{ij}(T^{initial}) & (L_{ij}(T^{new}) < L_{ij}(T^{initial}) \text{ のとき}) \\ C_{ij}(T^{new}) = L_{ij}(T^{new}) & (L_{ij}(T^{new}) > L_{ij}(T^{initial}) \text{ のとき}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} ADD(T^{initial}, T^{new}) \\ = \sum_{i,j(j>i)} C_{ij}(T^{new}) - \sum_{i,j(j>i)} C_{ij}(T^{initial}) \end{cases} \quad (6)$$

新たなトラフィック需要は、株価指数変動モデルで用いられている幾何ブラウン運動を用いて生成している。幾何ブラウン運動する値 S の、 t 時点での S_t は式(7)で表される。 W_t はウィーナー過程で、 $0 \leq t_1 < t_2 < t_3 < t_4 < \infty$ に対して $W_{t_2} - W_{t_1}$ は平均0、分散 $t_2 - t_1$ の正規分布に従っており、 $W_{t_4} - W_{t_3}$ と $W_{t_2} - W_{t_1}$ は互いに独立であるとされているため、シミュレー

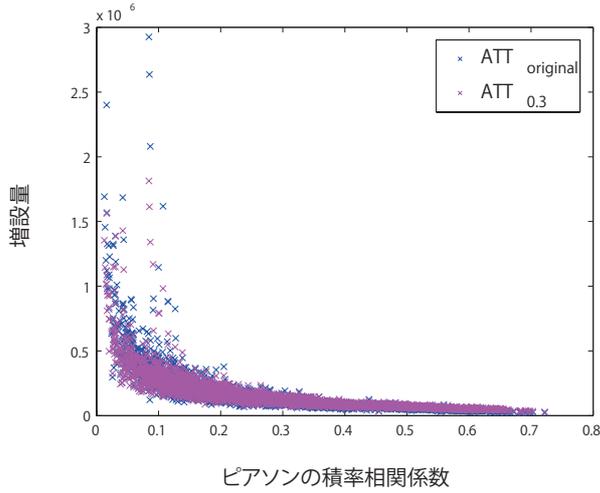


図6 増設量の評価

ションでは dW_t に標準正規分布に従う乱数を与えている。また μ は増加の程度を表すパラメータで、 σ は変動の程度を表すパラメータである。

$$S_{t+dt} = S_t \cdot e^{(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2)dt + \sigma \cdot dW_t} \quad (7)$$

図5は、 $S_0 = 5$ 、 $\mu = 0.001$ 、 $\sigma = 0.03$ とした時に、二つの異なる乱数種で生成した S_t を示している。 T_{ij}^{new} は、 $S_0 = T_{ij}^{original}$ とした時の S_1 を用いている。 T^{new} を生成する時の乱数種はすべての対地間で異なるものを用いており、 $\mu = 0.001$ としている。 σ は $LN(\sigma_{mean}, \sigma_{sigma})$ に従う対数正規分布によって与えている。 σ_{mean} と σ_{sigma} は評価によって異なるため後述する。

$T^{initial}$ と T^{new} の相関関係はピアソンの積率相関係数を用いて表す。変数 X と変数 Y のピアソンの積率相関係数 $r(X, Y)$ は式(8)で表される。

$$r(X, Y) = \frac{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (8)$$

$r(X, Y)$ は $-1 \leq r(X, Y) \leq 1$ の値をとり、 $r(X, Y) = 0$ のとき X と Y に相関はなく、 $r(X, Y) = 1.0$ のとき正の相関にある。 $T^{initial}$ と T^{new} の相関関係は、 $T^{initial}$ のすべての対地間トラフィック需要を X 、 T^{new} のすべての対地間トラフィック需要を Y として計算した $r(T^{initial}, T^{new})$ を用いている。

評価では複数回にわたって、同じ $T^{initial}$ に対して、異なる乱数種 x で $T^{new(x)}$ を生成し、 $r(T^{initial}, T^{new(x)})$ と $ADD(T^{initial}, T^{new(x)})$ を計算した。得られた結果を $r(T^{initial}, T^{new(x)})$ の順に並べ、それぞれのトポロジーでの増設量の大小について評価する。

4.3 評価結果

4.1節で述べた $AT\&T_{0.3}$ と $AT\&T_{original}$ に対して、4.2節で述べた評価方法で増設量を評価した。対地間トラフィック需要の変動の程度を表す σ の平均と分散を $(\sigma_{mean}, \sigma_{sigma}) = (0.7, 1.2), (1.2, 1.2), (1.8, 1.2)$ とし、それ

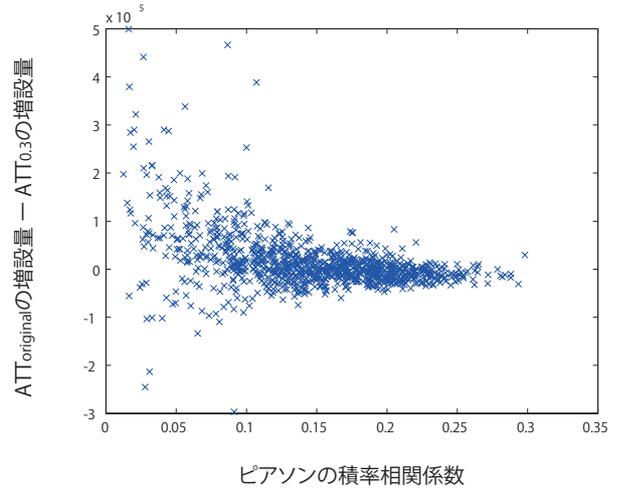


図7 総トラフィック需要を揃えたときの増設量の差

ぞれの $(\sigma_{mean}, \sigma_{sigma})$ において、 $0 \leq x \leq 999$ での $r(T^{initial}, T^{new(x)})$ と $ADD(T^{initial}, T^{new(x)})$ を求め、まとめた結果を図6に示す。図6から相関係数が小さい場合は $AT\&T_{original}$ に比べて $AT\&T_{0.3}$ の増設量が少ないことが分かる。これは、 $AT\&T_{original}$ が $AT\&T_{0.3}$ に比べて大きな変動には弱いことを意味している。

4.4 ホップ長による影響に関する考察

表2を見ると、 $AT\&T_{original}$ は $AT\&T_{0.3}$ に比べてホップ長が大きい。総トラフィック需要が異なれば、ホップ長の影響で増設量に差が生じることが考えられる。そこで、式(9)を用いて変化前後の総トラフィック需要を定数 $const$ に揃え、相関係数が小さい場合についてさらに評価を行った。

$$T_{ij} = T_{ij} * const / \sum_{i,j(j>i)} T_{ij} \quad (9)$$

$(\sigma_{mean}, \sigma_{sigma}) = (1.8, 1.2)$ として、 $0 \leq x \leq 999$ での $r(T^{initial}, T^{new(x)})$ と $ADD(T^{initial}, T^{new(x)})$ を求めて、 $AT\&T_{original}$ と $AT\&T_{0.3}$ の増設量の差を図7に示す。図7から総トラフィック需要を揃えても相関係数が小さい場合は $AT\&T_{original}$ に比べて $AT\&T_{0.3}$ の増設量が少ないことが分かる。

総トラフィック需要を揃えてもなお、ホップ長による影響がなくなったとは言えない。そこで、 $AT\&T_{original}$ の次数分布を維持したままランダムにリンクを張り替え、 $AT\&T_{0.3}$ よりホップ長の小さなトポロジー $AT\&T_{hopmin}$ を生成した。 $AT\&T_{hopmin}$ のエントロピー、条件付きエントロピー、相互情報量、ホップ長は表2の通りである。 $AT\&T_{hopmin}$ は $AT\&T_{0.3}$ よりもホップ長は小さいが、相互情報量が大きいトポロジーである。 $(\sigma_{mean}, \sigma_{sigma}) = (1.8, 1.2)$ とし、総トラフィック需要を揃えたうえで、 $0 \leq x \leq 999$ での $r(T^{initial}, T^{new(x)})$ と $ADD(T^{initial}, T^{new(x)})$ を求めた結果が図8である。図8より $AT\&T_{hopmin}$ に比べて $AT\&T_{0.3}$ の増設量が少ないことが分かる。これより $AT\&T_{0.3}$ の増設量が $AT\&T_{original}$ に比べて少ない原因は、ホップ長のみによるものではなく、多様性の違いも一因であると考えられる。

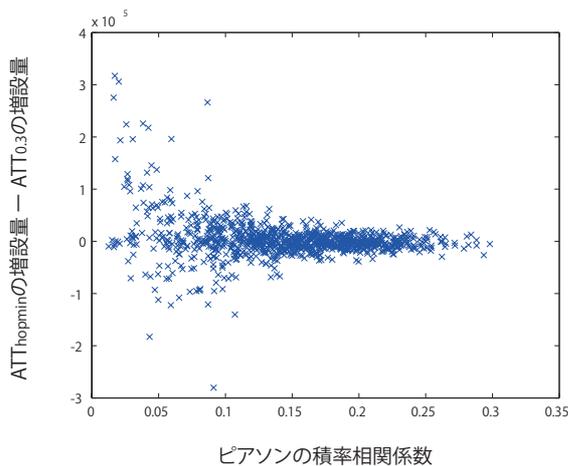


図8 ホップ長の小さなトポロジーと比べたときの増設量の差

5. まとめと今後の課題

本稿では、トポロジーが有する構造の多様性を測る指標として相互情報量に着目した。相互情報量を用いてルーターレベルトポロジーを評価しており、確率的に生成されたトポロジーの相互情報量が小さく、多くのルーターレベルトポロジーの相互情報量が大きいたことが分かった。また多様性が低いルーターレベルトポロジーと、多様性を高めたトポロジーを用いて、トラフィック需要の変動が生じたときに必要となる回線設備量の増設量を評価した。結果から、多様性を高めたトポロジーの増設量が多様性の低いトポロジーの増設量に比べて少ないことを示した。そして、これはホップ長の違いのみによるものではなく、多様性の違いが一因にあると考えられることを述べた。

今後の課題として、長期のトラフィック需要の変動を与え、積み重なっていく設備量の評価を行うなどして、トラフィック需要の変動に対する耐性をさらに評価することが挙げられる。また構造の多様性を表す相互情報量を適応性や拡張性の高いネットワーク設計に適用することも挙げられる。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費基盤研究(A)24240010によっている。ここに記して謝意を表す。また、本研究の遂行にあたり、有意義な議論をしていただいた KDDI 研究所の阿野茂浩氏、荻野長生氏、小頭秀行氏に感謝いたします。

文 献

- [1] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "On power-law relationships of the Internet topology," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 29, pp. 251–262, Oct. 1999.
- [2] A.-L. Barabási and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Oct. 1999.
- [3] R. Albert, H. Jeong, and A. Barabasi, "Error and attack tolerance of complex networks," *Nature*, vol. 406, pp. 378–382, July 2000.
- [4] K. L. Goh, B. Kahng, and D. Kim, "Universal behavior of load distribution in scale-free networks," *Physical Review Letters*, vol. 87, Dec. 2001.
- [5] 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.
- [6] 荒川伸一, 滝根哲哉, 村田正幸, "通信ネットワークのトポロジー構成のモデル化と性能評価への応用," *電子情報通信学会技術研究報告 (NS2011-110)*, vol. 111, pp. 37–42, Nov. 2011.
- [7] 松井佑記, "ISP トポロジーにおける局所連結性が回線容量制約下のフロー量分布に与える影響," *大阪大学基礎工学部情報科学科特別研究報告*, pp. 1–33, Feb. 2012.
- [8] T. Hirayama, S. Arakawa, S. Hosoki, and M. Murata, "Models of link capacity distribution in ISP's router-level topology," *International Journal*, vol. 3, pp. 205–216, Sept. 2011.
- [9] R. Milo, S. Shen-Orr, S. Itzkovitz, N. Kashtan, D. Chklovskii, and U. Alon, "Network motifs: Simple building blocks of complex networks," *Science*, vol. 298, pp. 824–827, Oct. 2002.
- [10] S. Arakawa, T. Takine, and M. Murata, "Analyzing and modeling router-level Internet topology and application to routing control," *Computer Communications*, vol. 35, pp. 980–992, May 2012.
- [11] R. Solé and S. Valverde, "Information theory of complex networks: On evolution and architectural constraints," *Complex networks*, vol. 650, pp. 189–207, Aug. 2004.
- [12] 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.
- [13] P. Erdős and A. Rényi, "On random graphs," *Publicationes Mathematicae Debrecen*, vol. 6, pp. 290–297, 1959.
- [14] M. Pentz, "Verio grows big with small clients," *Business Journals*, Feb. 1999.
- [15] P. Mahadevan, D. Krioukov, K. Fall, and A. Vahdat, "Systematic topology analysis and generation using degree correlations," in *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 36, pp. 135–146, Oct. 2006.