

インターネットにおけるべき乗則

田村 瞳, 内田 真人, 巳波 弘佳

本稿では, 様々な機能を追加しながら大規模に発展したインターネットと, 昨今, 様々な分野で注目されている複雑ネットワークとの関係性について紹介する. 特に, 複雑ネットワークの特徴の一つであるべき乗則という観点から通信の世界を見た場合に得られる, ネットワークトポロジ生成モデルや実際のネットワークトポロジ, 通信トラヒックの特徴に関する新たな知見について紹介する.

キーワード: インターネット, べき乗則, ネットワークトポロジ生成モデル, インターネットトポロジ, フロー分析

1. はじめに

インターネットはその誕生から約 40 年が経過している. この間, インターネットは様々な機能を追加しながら社会基盤となるまでに大規模に発展し, 現在では 5 億 4 千台以上¹もの膨大な数のノードが接続されている[1]. インターネット上の各ノードは, 管理が可能な比較的小規模の AS (Autonomous System) に属して AS 内部でネットワークを形成し, さらに AS 同士が相互接続することでインターネットを形成している. このことから「インターネットはネットワークのネットワークである」と表現され, その構造は非常に複雑なものとなっている.

本稿では, このように大規模かつ複雑に成長したインターネットという通信の世界と複雑ネットワークの関わりについて述べる. 特に, 複雑ネットワークの特徴の一つであるべき乗則という観点から, 通信の世界を見た場合の新たな知見について紹介する. まず第 2 節では, ネットワークトポロジをモデル化するための数理モデルについて述べる. 次に第 3 節では, 実測データに基づいて得られたネットワークの推定トポロジに見られる特徴を紹介し, 先に述べた数理モデルとの関連性について述べる. 最後に第 4 節では, ネットワーク上を流通するトラヒックに関して観測された特性についても紹介する.

2. ネットワークトポロジ生成モデル

インターネットをはじめ通信ネットワークの形状を再現するモデルは, ネットワークの設計・制御・性能評価の様々な用途に必要な不可欠であるため, 古くから検討されてきた. 通信企業一社で一国のネットワーク全体を設計していた電話網の時代は, 実際のネットワークの設計ポリシーを反映したモデルが用いられていたが, インターネットのように全体の構造を統制する主体が無いネットワークにおいては, 新たなモデルが必要となる.

Waxman モデル[2]は, ユークリッド空間内にランダムに点を配置し, 2 点間の距離が大きくなるにつれてそれらが辺でつながる確率が小さくなるとしたものである. 具体的には, 点 v と w が辺でつながる確率は $p(v, w) = \beta \exp(-d(v, w)/\alpha L)$ ($d(v, w)$ は v と w と間のユークリッド距離, L はその最大値, $(0 \leq \alpha, \beta \leq 1)$ とする. これは, ルータ間にリンクを設定する際, 地理的に近いもの同士がつながりやすい傾向があると見なしていることになる. なお, Waxman モデルの次数分布はべき分布にはならない. 後述するように, このことは現実のインターネットトポロジとは異なる特徴である. そのため Waxman モデルは, 今ではインターネットトポロジのモデルとしてはかなり粗いものと考えられている.

Transit-Stub モデル[3]は階層構造を考慮したものである. まず Transit 領域に属する点集合から連結グ

たむら ひとみ, うちだ まさと
九州工業大学 ネットワークデザイン研究センター
〒 802-0001 北九州市小倉北区浅野 3-8-1
みわ ひろよし
関西学院大学 理工学部
〒 669-1337 三田市学園 2-1

¹ 2008 年 1 月の時点で, DNS (Domain Name System) において IP アドレスとホスト名が対応付けられたノードの総数.

ラフを作り、次に複数の Stub 領域の各々において同様に連結グラフを構成し、Transit 領域と Stub 領域、また Stub 領域同士の間ランダムに辺を張ることによって生成される。これに類似した Tiers モデル[5]では、Stub 領域に LAN (Local Area Network) を反映する複数の連結グラフをさらに接続する。これらのモデルにおいては、次数分布はべき分布になるとは限らず、また次数相関も現実のインターネットトポロジとは乖離があることが指摘されている。

有名な Barabási と Albert によるモデル (BA モデル)[4]は、インターネットトポロジのモデルとしても良く使われる。このモデルは、「成長」と「優先的選択」の原理に基づき生成される。ここで、成長とは、時間経過にしたがって点が徐々にグラフに追加されていくということであり、優先的選択とは、新たに一つの点に加わる際、元からある点のうち次数の高い点とより高い確率で結びつきやすいということである。BA モデルで生成されるグラフの次数分布はべき分布に従うことが分かっている。成長と優先的選択という概念に基づいたバリエーションは多々ある。辺の張替えや消滅を取り入れたり、適応度という各点に固有の値を付与することによって、次数と適応度の両方の作用によって優先的選択の確率を制御するものなどがある。

HOT (Highly Optimized Tolerance) モデル[6]も、ユークリッド空間内に点をランダムに追加していく成長するモデルであるが、つなげる相手先の点の選択の際に「最適化」が行われることが特徴である。新たに加わった点 v がつながる先の点 w として、 $f(v, w) = \alpha d(v, w) + \beta(w)$ を最小化する w を選択する。ここで、 α は定数、 $d(v, w)$ は v と w のユークリッド距離、 $\beta(w)$ としては w から他の点へのグラフにおける距離の平均値や最大値などが用いられる。第一項はネットワークにつなげるためのコストに対応し、第二項はネットワークにつなげた後の効率性に対応する。 α が小さい場合はスター状のグラフとなり、十分大きい場合は新規参加点は最も近い点とつながるようになる。 α がある範囲においては、次数分布がべき分布となることが知られている。

以上のように様々なモデルが提案されているが、現実のネットワークトポロジとの適合性を考える際には、さらにクラスタ係数や次数相関など他の特性量に関しても考慮する必要がある。しかし、すべての特性が現実のネットワークトポロジと一致する決定的なモデル

は無い。これは、ネットワークの規模や階層レベルなどによって設計・運用ポリシーが異なるため、言わば複数のモデルが混在している状況であることが要因の一つと思われる。また、これまでの特に成長するモデルにおいては、新規参加点はネットワーク全体に関する情報 (既存のネットワークの次数分布など) を知っていることが前提となっているが、現実的とはいえない。これらの問題点を考慮した、より現実的なネットワークトポロジ生成モデルについては、まだ検討の余地が残っている。

3. インターネットトポロジに現れるべき乗則

前節で述べたように、インターネットの階層構造や時間経過による成長を考慮した様々なネットワークトポロジ生成モデルが存在し、ネットワークの性能評価においてはこれらのモデルに基づいたネットワークトポロジ生成ツール[7]が広く利用されている。しかし、現実のネットワーク構造は、管理ポリシーや物理的/経済的な制約など、様々な要素が影響しており、数理モデルに基づく生成トポロジが現実のネットワークトポロジと一致するとはいえない。本節では、近年の研究成果より明らかとなった、様々なレベルにおけるネットワークトポロジ分析の結果に基づき、自律分散のかつ階層的に管理されているインターネットに関するスケールフリー性について紹介し、数理モデルとの比較について述べる。

3.1 AS レベル・トポロジ

インターネットには単一の管理主体が存在せず、約 3 万ほど存在する AS はそれぞれ自律分散的に運用されている。また、AS 間の接続関係には、各 AS のポリシーが大きく影響するため、全体のネットワークトポロジを直接的に把握することは難しい。そのため、各 AS をノード、AS 間の接続関係をエッジとした AS レベル・トポロジを把握するためには、トラヒックの流通経路やネットワーク制御に関する情報を利用した分析を行う必要がある。これらの情報の取得元は、(1)実際にデータが流通するデータプレーン、(2)ルーティング・プロトコルによる経路情報が流通する制御プレーン、(3)AS の管理者による管理情報である管理プレーン、の 3 つに大別できる。

上記の三つの情報を用いた具体的な AS レベル・トポロジの推定方法としては、それぞれ(1)通信経路上のルータリストを特定するツールである traceroute に

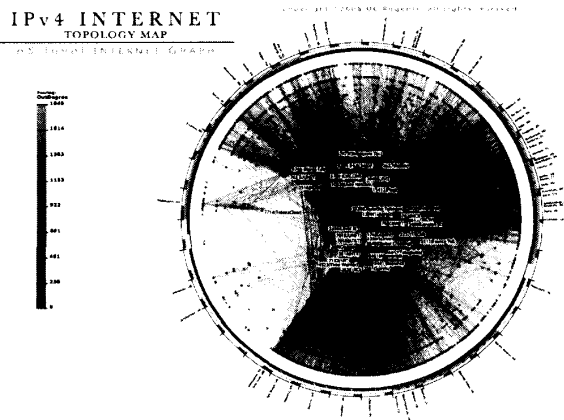


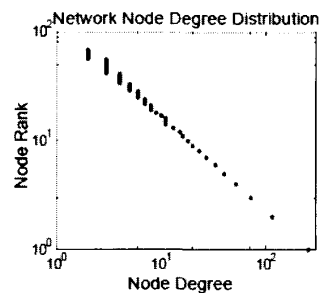
図1 ASレベル・トポロジ[8]

よる計測結果の分析, (2)AS間経路制御プロトコルであるBGP (Border Gateway Protocol) の経路交換情報 (RouteViews, Looking Glasses等) の分析, (3)ドメイン名やAS番号, および, それらの対応関係が登録されているWHOISデータベースの分析, に基づいたものが提案されている. その中でも主流なものは(1)のtracerouteによる計測を利用した推定である. CAIDA (Cooperative Association for Internet Data Analysis) によるskitterやArchipelago (Ark) プロジェクトでは, 主に(1)のtracerouteによるデータを利用し, さらに(2)や(3)のデータも併用しながらASレベルの接続関係を総合的に分析し, その結果 (図1) や原データを公開している[8].

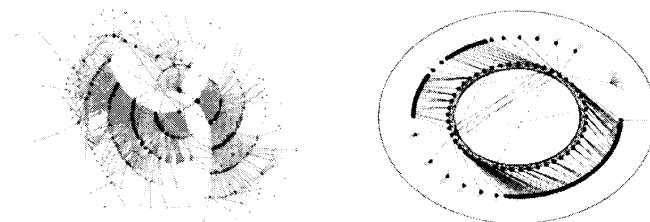
文献[9]では, (1)~(3)それぞれから推定されたASレベル・トポロジが比較されている. その内容を以下に紹介する.

まず, これらの推定トポロジにおけるノード数は大きく異なり, (1)では9,204ノード, (2)では17,446ノード, (3)では7,485ノードとなっている. 現在の登録AS数が3万程度であることと比較すると, どの推定手法においてもインターネット内の全ASを網羅できていないことがわかる. また, 全登録ASが必ずドメイン名を有しているとは限らないため, (3)のWHOISデータベースに基づく推定トポロジは, 信頼度が高いとはいえない.

次に, それぞれの次数分布について比較すると, (1)のskitterによる分析結果と(2)のBGP経路交換情報の分析結果からは, 次数分布が共にべき乗則に従う推定トポロジが得られることがわかっている. また, そのべき指数は(1)では2.5, (2)では2.16となっている. このことから, データプレーン, および, 管理プレーンにおけるASレベル・トポロジの次数分布はスケ-



(a) 次数分布



(b) BA トポロジ

(c) HOT トポロジ

図2 同じ次数分布を有するネットワークトポロジの例 [11]

ルフリー性を有することが確認できる. また, これらのどのネットワークトポロジにおいても, 高次数ノード同士が接続されたコアネットワークに相当する *rich-club* と呼ばれる部分が存在することが明らかとなっている. しかし, ASレベル・トポロジの生成モデルとしてネットワーク分野の研究において良く用いられるBAモデルには *rich-club* のようなコアが存在しない. そのため今後は, 実際のASレベル・トポロジを意識したネットワークトポロジ生成モデルについて検討する必要があると考えられる.

3.2 ルータレベル・トポロジ

前節では, インターネットにおける最大の管理単位であるAS同士の接続関係について紹介した. ここでは, ASの内部でネットワークを形成するルータ同士によるネットワークトポロジについて紹介する.

各ASは, 具体的には, ISP (Internet Service Provider) や企業が個々のポリシーの下で運用するネットワークであるため, プライバシーやセキュリティの観点から, その構造は内部機密であることが多い. そのため, ルータレベル・トポロジについても, 計測に基づいた推定が行われる. 主流な推定手法となっているのは, ASレベル・トポロジと同様にtracerouteによる計測を利用したものであり, この手法を用いた推定結果より, 各ルータをノード, ルータペア間の接続リンクをエッジとした場合のルータレベル・トポロ

ジの次数分布がべき乗則に従うことが確認されている [10].

ここで、ネットワークの通信性能について考慮すると、次数分布のみでは必ずしも表現することができないようなノード間の接続関係が非常に重要となる。文献 [11] では、同じ次数分布を示すネットワークトポロジであっても、ノード間の接続関係が異なるネットワークトポロジが存在することが紹介されている (図 2)。特に、AS 内部のネットワーク設計については、AS レベル・トポロジの場合とは異なり、各ルータの処理性能やポート数などの物理的な制約、および、回線維持コストや管理コストなどの経済的な制約が考えられる。ネットワーク内では、このような制約の下で可能な限り効率的にトラヒックを収容しなければならないため、これらの制約がネットワークトポロジに大きな影響を与えることが考えられる。

このように、物理的や管理上の制約を考慮し、さらに、効率的なトラヒックの収容を考慮した場合、前節で紹介した HOT モデル (図 2(c)) でルータレベル・トポロジをモデル化できる。この HOT モデルによるネットワークトポロジは、米国の高速学術ネットワークである Abilene のネットワークトポロジに類似しており、現実のルータレベル・トポロジをうまく表現できているといえる。しかし、ISP のような商用ネットワークでは、サービス提供という面を考慮すると、例えば、前述の経済的な制約など、学術情報ネットワークとは制約の重みが異なることが考えられる。このような場合においてもなお、ルータレベル・トポロジとして HOT モデルが有効であるかを検証する必要があると考えられる。

4. インターネットトラヒックに現れるべき乗則

前節までは、多種多様な構成要素から成り立つ大規模で複雑なシステムに成長した今日のインターネットの特徴を、そのトポロジに共通に認められるパターンであるべき乗則 (スケールフリー性) に着目して説明した。本節では、インターネットの特徴を、その上を流通するトラヒックが示す挙動という観点から説明する。特に、フローと呼ばれる packets 群をトラヒックの単位とした分析結果を通じて、今日のインターネットにおいて最も主要なアプリケーションである WWW (World Wide Web) と P2P (Peer-to-Peer) のトラヒックが示す挙動の共通点や相違点、

あるいはそのべき乗則との関係について紹介する。また、べき乗則と深く関連している極値理論と呼ばれる統計理論についても紹介する。

4.1 フロー分析

フローとは、同一の送信 IP アドレス、受信 IP アドレス、送信ポート番号、受信ポート番号、プロトコルフィールド値の五つのユニークな組み合わせ (フローキー) をもつ packets 群として定義される。より正確を期すために、上記に加えて SYN packets、FIN packets を少なくとも一つずつ含む packets 群をフローと定義することもある。以下では、WWW および P2P フローの到着間隔、サイズ、持続時間、レートに関する分析結果 [12] を紹介する。

4.1.1 フロー到着間隔

同一のアプリケーションに属し、かつ隣接する開始時刻をもつフローの開始時刻の差をフロー到着間隔と定義すると、WWW と P2P のフロー到着間隔が従う分布は共に指数分布で良く近似できる。また、フロー到着間隔のパワースペクトル密度は、WWW の場合は周波数に関するべき乗則に従い、P2P の場合は周波数に関してほぼ一定となる。このことは、WWW のフロー到着間隔は長期時間相関を持ち、P2P は時間相関をほとんど持たない (無記憶性を示す) ということの意味している。このような時間相関特性の違いは、通信プロトコルやユーザの利用形態などがアプリケーションごとに異なることを反映したものであると考えられるため非常に興味深い。

4.1.2 フローサイズ

同一のフローに属する packets 群の総バイト数 (あるいは総 packets 数) をフローサイズと定義すると、WWW と P2P のフローサイズが従う分布は共にパレート分布で良く近似できる。すなわち、フローサイズを表す確率変数を X とすると、 $\Pr\{X > x\} \sim x^{-\alpha}$ というべき乗則が成り立つ。ただし、 $\alpha > 0$ である。

ところで、ある分布について、 $x \rightarrow \infty$ のときに $\Pr\{X > x\}$ が 0 に収束する速度が遅い場合、この分布は裾野が重い分布であると表現される。この表現を用いると、パレート分布の場合は、 α が小さいほど裾野が重い分布であるということになる。特に、 $1 < \alpha \leq 2$ のときには分散が発散し、 $0 < \alpha \leq 1$ のときには平均と分散がともに発散する。WWW のフローサイズについては $\alpha = 1.116 > 1$ 、P2P のフローサイズについては $\alpha = 0.379 < 1$ となることから、WWW と P2P のフローサイズは共にべき乗則 (パレート分布) を用い

て良く近似できるものの、その特性は全く異質なものであるといえる。

4.1.3 フロー持続時間、フローレート

同一のフローに属する最初と最後のパケットに押印されたタイムスタンプの差をフロー持続時間と定義し、フローサイズをフロー持続時間で割ったものをフローレートと定義する。このとき、WWWとP2Pのフロー持続時間とフローレートが従う分布はすべて対数正規分布でよく近似できる。対数正規分布は裾野が重い分布として良く例に挙げられるが、平均も分散も発散しないという点がパレート分布とは異なる。

ところで、対数正規分布に従う独立な確率変数の積も対数正規分布に従う。しかし、フロー持続時間とフローレートが従う分布が対数正規分布で良く近似できるにも関わらず、それらの積で与えられるフローサイズの従う分布は前節で示したようにパレート分布で良く近似される。さらに、そのパラメータ α はWWWとP2Pでは異なっている。このことは、フローサイズ、フロー持続時間、フローレートが互いに相関を持ち、その相関の特性はWWWとP2Pでは異なっていることを意味している。実際、(1)WWWとP2Pでは共に、大多数のフローは持続時間が短くサイズが小さい、(2)WWWとP2Pでは共に、持続時間が短いフローはサイズが小さい傾向にある、(3)WWWでは、持続時間が短くサイズが小さいフローが、全フローサイズの合計の多くを占めている、(4)P2Pでは、比較的少数の持続時間が長くサイズが大きいフローが、全フローサイズの合計の多くを占めている、といった相関特性が見られる。

4.2 裾野分布に関する統計理論

上述のように、インターネットトラヒックの挙動はその裾野分布の特性と深く関連している。そこで本節では、裾野分布の特性を記述する上で有用な統計理論として知られる極値理論を紹介する。極値理論は元々、水位や風速等に関する極端な事象を分析するために水文学や気候学などを中心に発達したものであり、昨今では金融・保険のリスク管理にも応用されている。

極値理論では、分析対象におけるある大きな閾値を上回る値の挙動に関する次の結果が知られている[13]。まず、 X を分布関数 F に従う確率変数とする。すなわち

$$F(x) = \Pr\{X \leq x\}$$

とする。また、分布関数 F の右端 $x_F \leq \infty$ を

$$x_F = \sup\{x \in \mathbb{R}; F(x) < 1\}$$

表1 ξ の符号と F の関係

$\xi > 0$	$\xi = 0$	$\xi < 0$
コーシー分布	正規分布	一様分布
パレート分布	対数正規分布	ベータ分布
	指数分布	

と定義する。このとき、ある閾値 u について

$$F_u(y) = \Pr\{X - u \leq y | X > u\}$$

とおくと、 u が十分大きいとき、 $F_u(y)$ は広いクラスの分布関数について

$$G_{\xi, \beta(u)}(y) = \begin{cases} 1 - (1 + \xi y / \beta(u))^{-1/\xi}, & \xi \neq 0 \\ 1 - \exp(-y / \beta(u)), & \xi = 0 \end{cases}$$

へ漸近する。ただし、 $0 \leq y \leq x_F - u$ であり、 $G_{\xi, \beta(u)}$ は一般パレート分布と呼ばれる。このことから

$$F(x) = (1 - F(u))F_u(x - u) + F(u)$$

$$\approx (1 - F(u))G_{\xi, \beta(u)}(x - u) + F(u), \quad x > u$$

が $u \rightarrow x_F$ において漸近的に成り立つことがわかる。すなわち、 $u \rightarrow x_F$ であれば $F(x)$ の裾野部分($x > u$, $u \rightarrow x_F$)は、 $F(x)$ の全体の形状に関わらず一般パレート分布で近似できることがわかる。表1に、 ξ の符号と F の関係の一例を示す。この表より、対数正規分布はパレート分布とは異なるクラスに属し、指数分布とは同じクラスに属しているということが分かる。

以上より、広いクラスの分布に対して、一般にその裾野分布はべき的もしくは指数的な形状を示すことが分かる。この性質は、インターネットトラヒックを分析した際に、その裾野分布が指数分布やパレート分布で良く近似できることの理論的な背景の一端を与えていると考えられる。

5. まとめ

本稿では、インターネットという通信の世界において観察される特徴を、複雑ネットワークの視点から紹介した。まず、通信ネットワークのトポロジを再現するために考案された様々な数理モデルを紹介し、それらの生成原理を概説した。次に、現実のネットワークトポロジについて、ASレベルとルータ・レベル双方における実測データから推定されたネットワークトポロジに現れる特徴を紹介し、それらと数理モデルとの比較を行った。最後に、ネットワーク上を流通するトラヒックに見られるフロー単位での特徴分析結果を紹介した。特に、WWWとP2Pのフロー到着間隔、フローサイズ、フロー持続時間、フローレートを比較し、それらの共通点や相違点、および、べき乗則との

関係を紹介した。

今後の研究の方向性として、現実のネットワークポロジにおける次数分布以外の特徴量を取得・分析することでその特徴を詳細に把握し、より現実的なネットワークポロジ生成モデルを設計する必要があると考えられる。また、極値理論に基づくものなど、トラヒックの様々な性質を統一的な観点から把握できるモデルの設計も必要である。

本稿で述べたように、インターネットを「べき乗則」という観点から眺めることは、新たな特性に基づくインターネットの解析やモデル化に関する研究が始まる契機となった。このように従来とは異なる視点から得られた性質を考慮するという事は、ネットワーク制御技術の研究に関する新たな展開を生み出し、さらに、こうした試み全体が研究領域の拡大にもつながるものと期待される。

謝辞 本稿の一部は、日本学術振興会における科学研究費補助金基盤(S) (課題番号 18100001) の支援を受けている。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] “ISC Domain Survey : Number of Internet Hosts,” <http://www.isc.org/index.pl?/ops/ds/host-count-history.php>, Jan. 2008.
- [2] B. Waxman, “Routing of multipoint connections,” *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, Vol. 6, Issue 9, pp. 1617-1622, Dec. 1988.
- [3] K. Calvert, M. Doar and E. W. Zegura, “Modeling Internet Topology,” *IEEE Communications Magazine*, Vol. 35, Issue 6, pp. 160-163, Jun. 1997.
- [4] A.-L. Barabási and R. Albert, “Emergence of Scaling in Random Networks,” *Science*, Vol. 286, No. 5439, pp. 509-512, Oct. 1999.
- [5] M. Doar, “A better model for generating test networks,” *Proc. IEEE Globecom*, pp. 86-93, Nov. 1996.
- [6] A. Fabricant, E. Koutsoupias and C. H. Papadimitriou, “Heuristically optimized trade-offs: A new paradigm for power laws in the Internet,” *Proc. 29th ICALP (LNCS 2380)*, pp. 110-122, Jul. 2002.
- [7] A. Medina, A. Lakhina, I. Matta and J. Byers, “BRITE: An Approach to Universal Topology Generation,” *IEEE MASCOTS’01*, p. 346, Aug. 2001, <http://www.cs.bu.edu/BRITE/>.
- [8] CAIDA, “Macroscopic Topology Measurements,” <http://www.caida.org/projects/macroscopic/>.
- [9] P. Mahadevan, D. Krioukov, M. Fomenkov, B. Huffaker, X. Dimitropoulos, kc claffy and A. Vahdat, “The Internet AS-Level Topology: Three Data Sources and One Definitive Metric,” *ACM SIGCOMM CCR*, Vol. 36, Issue 1, pp. 17-26, Jan. 2006.
- [10] M. Faloutsos, P. Faloutsos and C. Faloutsos, “On Power-law Relationships of the Internet Topology,” *ACM SIGCOMM CCR*, Vol. 29, Issue 4, pp. 251-262, Oct. 1999.
- [11] L. Li, D. Alderson, W. Willinger and J. Doyle, “A First-principles approach to understanding the Internet’s router-level topology,” *ACM SIGCOMM CCR*, Vol. 34, Issue 4, pp. 3-14, Oct. 2004.
- [12] 森, 内田, 後藤, “インターネットトラヒックのフロー分析: WWW と P2P の特性比較,” *電子情報通信学会論文誌 D-I*, VOL. J 87-D-I, No. 5, pp. 561-571, May 2004.
- [13] P. Embrechts, C. Klüppelberg and T. Mikosch, “Modeling Extremal Events,” Springer, 2001.