

# フロー階層に着目したインターネットトポロジーの成長過程の分析

中田 侑<sup>†</sup> 荒川 伸一<sup>†</sup> 村田 正幸<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 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: †{y-nakata,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし 通信需要の増加に伴い、インターネットのトポロジーは大規模化し続けている。インターネットを構成する AS レベルトポロジーの構造がどのように成長しているかを明らかにすることは、ネットワークの拡張を行う際や、プロトコルやアプリケーションのパフォーマンス分析などを行う上で有用である。そこで本稿では、AS レベルトポロジーの構造的成長を明らかにした。特に、トラフィックが集約されて負荷が集中しやすい AS がトポロジーのどこに位置するのかを明らかにするため、AS レベルトポロジーを、リンクで密に繋がれた AS の集合への分割を繰り返すことで導かれるフロー階層と呼ばれる階層構造を抽出し、その構造の変化を示す。また、AS の度数に基づくグラビティモデルによりトポロジーに通信需要を与えた場合に、トラフィックが集中する箇所を示す。これにより、フロー階層の構造は、トポロジーが大規模化するにつれ、幅の広がるように成長しており、一部の AS にトラフィックが集中する傾向にあることがわかった。また、近年ではフロー階層の 2 階層におけるリンクに、トラフィックがより集中する傾向にあることがわかった。

キーワード AS レベルトポロジー、フロー階層、AS(Autonomous System)、Tier-1

## Analyzing the evolution of the Internet topology from a hierarchical flow perspective

Yu NAKATA<sup>†</sup>, Shin'ichi ARAKAWA<sup>†</sup>, and Masayuki MURATA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

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

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

**Abstract** The scale of topology in the Internet is becoming larger corresponding to increase of traffic demand. Understanding how the AS level topology has been evolving is important for network design and analyzing performance of applications and protocols. In this paper, we investigate the evolution of the Internet topology. In particular, we focus on the flow hierarchy in the Internet topology, which describes where ASes accommodating heavy traffic are in the topology. The flow hierarchy is the hierarchical structure derived from recursively splitting the topology into some subset of ASes that are densely connected with many links. Our finding is that the width of the containment hierarchy is becoming larger, but the depth of the containment hierarchy is almost constant. This fact suggests that a part of ASes aggregates more amount of traffic and suffers from overload. Furthermore, we show that more traffic tends to be aggregated at the links in second level of flow hierarchy.

**Key words** AS-level topology, Flow hierarchy, AS(Autonomous System), Tier-1

### 1. はじめに

インターネットは社会インフラとしての役割を担っており、通信需要や接続する情報端末の数は増加の一途をたどっている。それに伴い、ネットワーク機器や回線の追加や増強が行われ、現在もなおインターネットは成長し、インターネットを構成するトポロジーは大規模化し続けている。あるネットワーク

の設計者が他のネットワークとリンクを構築する際、独自のポリシーによりリンクを繋ぐ先のネットワークを選択しているため、必ずしもネットワーク全体の性能向上は意識されていない。インターネットには、インターネット全体を制御する管理者が存在しないため、現在のインターネットトポロジーの構造的特徴は明白ではない。しかしながら、トポロジーが持つ構造的特徴の違いにより、ネットワーク機器に流れるトラフィック負荷や

通信品質の向上、規模拡張の容易さなどのネットワークの性能も大きく異なることが指摘されている [1]。そのため、通信事業者が新たに回線やネットワーク機器を構築する際には、インターネットトポロジーの構造的特徴を踏まえた設計が必要である。また、新たなアプリケーションやプロトコルを開発する際には、インターネットトポロジーの構造的特徴を反映した環境下でアプリケーションやプロトコルの性能分析を行う必要がある。そのため、現在のインターネットトポロジーの構造や、インターネットトポロジーの成長を分析し、将来の構造的特徴を理解する必要がある。そこで本稿では、現在のトポロジーが持つ構造的特徴を明らかにし、さらにインターネットの成長過程を分析する。

インターネットは、AS(Autonomous System) と AS 同士を繋ぐリンクによって構成されている。このトポロジーは AS レベルトポロジーと呼ばれ、非常に多数の AS の相互接続による大規模かつ複雑なグラフを形成している。AS とは、通信事業者や研究組織、コンテンツプロバイダーが保有・運用する自律したネットワークである。AS レベルトポロジーに含まれるリンクには、そのリンクの両端の AS で交わされる契約により、ピアリングリンクとトランジットリンクの 2 種類が存在する。ピアリングリンクは、リンクに隣接する AS 間で、任意の AS 宛でのトラフィックを無償で転送するリンクであり、同等のネットワーク規模を持つ AS の間に構築される場合が多い。またトランジットリンクは、ある AS がインターネット内の任意の AS にトラフィックを中継することを、相手側の AS に有償で委託する際に用いられるリンクである。トラフィックの中継を委託する AS が相手側の AS に支払う料金はトランジット料と呼ばれ、一般にトラフィック量に応じて金額が決定する。各 AS は少ないコストで良好な通信を確保するために、同程度のトラフィックを処理している AS とはピアリングリンクを繋ぎ、その他の AS とはトランジットリンクを繋ぐことによりネットワークの接続性を確保している。

AS レベルトポロジーでは、Tier-1 と呼ばれる少数の AS が他の Tier-1 の AS とピアリングリンクを繋いでおり、多くのトラフィックを処理している。また、Tier-2 と呼ばれる AS が Tier-1 の AS とトランジットリンクを繋いでおり、さらに Tier-2 の AS が他の AS とトランジットリンクをつなぐことで、AS レベルトポロジーは階層構造を有することが知られている。また近年、Hyper Giants と呼ばれる多量のトラフィックを送出するコンテンツプロバイダーが台頭しており、Hyper Giants によって流されるトラフィック量がインターネット全体に流れるトラフィック量の約 30% を占めていることが報告されている [2]。さらに、Hyper Giants と他の ISP との間でピアリングリンクがメッシュ状に構築されていることが指摘されている [3]。

ISP が他の ISP とリンクを構築する際や、アプリケーションやプロトコルの性能分析を行う際には、上記のトポロジーの構造的特徴を明らかにする必要がある。現在に至るまで、トポロジーの構造を明らかにするために、AS レベルトポロジーを視覚化する研究が行われているが、AS レベルトポロジーは 2012 年 12 月現在で AS の数が 42,009、リンク数が 93,470 本存在し、大規模かつ複雑であるため、視覚化されたトポロジーマップを用いてもトポロジーの構造的特徴を直観的に捉えることは出来ない [4]。そのためこれまで様々なグラフメトリックを用い

て、AS レベルトポロジーの構造的特徴について研究されてきた。Faloutsos らにより、AS レベルトポロジーは次数分布がべき則に従うことが明らかにされている [5]。また、AS に流れるトラフィックの媒介中心性の分布もべき則に従うことが知られている [6]。ただしこれらの分析では、成長過程の一点を取り出してそのトポロジーの構造的特徴を分析しているにすぎず、トポロジーの大規模化に伴う構造の変化については明らかにされていない。これに対し、Dhamdhere らは AS やリンクの数、また AS 間の平均ホップ数などの経年変化を示すことで、AS レベルトポロジーの構造的成長を分析しており [4]、また Shavitt らは ISP や Hyper Giants の次数の変化に着目し、AS レベルトポロジーの成長を分析している。しかしながら、AS の次数などのグラフメトリックによる分析のみではネットワーク性能を示すことができない。例えば、同じ次数分布を有する二つのネットワークが存在した場合でも、他の構造的特徴の違いによって、ネットワークに流れるトラフィックを収容するために必要なネットワーク機器の設備量が異なる。

ネットワークの性能は AS の次数だけではなくトラフィックの集約にも依存しており、ある AS で生成されたトラフィックが目的の AS に到達するまでに集約される回数や、トポロジー上で集約が行われる箇所などによって特徴づけられる。そこで本稿では、多くのリンクにより密に連結した AS の集合に着目し、AS レベルトポロジーの構造を分析する。ここでは、この AS の集合をモジュールと呼ぶ。AS レベルトポロジーはモジュールの連結により構成され、複数のモジュールの間は、少数のリンクによって連結されている。そのためモジュール間のリンクでトラフィックが集約される。各々のモジュールは、小さなモジュールの連結によって構成されており、さらにそれらの小さなモジュールもより小さいモジュールの連結により構成される。このようにして得られるモジュールの階層構造を、本稿ではフロー階層と呼ぶ。取得可能であった過去 12 年間の AS レベルトポロジーのデータから、AS レベルトポロジーのフロー階層の構造やその経年変化を分析することによって、トポロジーの大規模化に伴う構造の変化について明らかにする。さらに、AS レベルトポロジーにおいてトラフィックが集中する箇所の特定を行うため、各 AS に対して、AS の次数に基づくグラビティモデルにより通信需要を与え、その際の AS レベルトポロジーの各リンクに流れるトラフィック量を示す。

本稿の構成は、以下の通りである。2 章では本研究の分析に用いたデータの取得方法について述べ、3 章ではフロー階層の抽出方法、及びフロー階層の構造やその経年変化について述べる。4 章では各 AS に対し、AS の次数に基づくグラビティモデルにより AS の通信需要を与え、その際にトラフィックが集中するリンクについて述べる。最後に 5 章で本稿のまとめと今後の課題を述べる。

## 2. データセット

### 2.1 AS の隣接関係

AS レベルトポロジーの成長を分析するためには、定期的に記録されたトポロジー情報が必要である。しかしながら、AS の隣接関係などを記した情報は記録されていないため、AS レベルトポロジーを観測して全体像を推定する手法が研究されてきた。AS レベルトポロジーの接続関係を推定する手法には大

表 1 ノード数、リンク数、AS パス数の経年変化

	2000/6/15	2004/6/15	2008/6/15	2012/6/15
AS 数	8,162	18,015	29,320	42,009
リンク数	17,533	40,205	64,305	93,470
AS パス数	299,434	1,108,704	1,901,745	2,605,770

分して 2 種類存在する。

- 任意の場所から送られる多数の traceroute パケットから推定する手法 [7, 8]

- BGP テーブルに記載された AS パスから AS 間の隣接関係を推定する手法 [9, 10]

一つ目の手法では、世界中の多数の端末から特定の端末へ traceroute パケットを送信し、traceroute パケットの通った経路を記録し、それらを収集する。その後、IP アドレスから AS 番号を変換することで AS レベルトポロジを生成する。この手法を用いることで、AS レベルトポロジのリンクを多く計測することが可能であるが、traceroute の送信は、善意によりこの推定に協力した参加者により行われ、分析期間中に traceroute パケットを送信する端末の位置が異なる可能性がある。同じネットワークであっても、計測時刻によって得られるトポロジが異なるため、AS レベルトポロジの成長に関する分析には適していない。

二つ目の手法では、ある ISP が保有するゲートウェイルーターの BGP テーブルを収集し、BGP の AS パス情報から AS レベルトポロジを推定する手法である。この方法では、大部分の AS を観測することは可能だが、予備のトランジットリンクとピアリングリンクのうち、40%以上が観測できないという欠点がある [4, 11]。ただし、ゲートウェイルーターの BGP テーブルを提供している ISP は、収集を始めた時点から現在にかけて基本的に変わっていない。そのため、AS レベルトポロジの成長の分析には適している。また、トラフィック集約は、下位層にある複数の AS のトラフィックがトランジットリンクを経由して上位層の AS が受け取る際に行われる。BGP テーブルの AS パス情報を用いる手法は、ピアリングリンクを全て観測することは不可能であるが、トランジットリンクの大部分は取得することが可能であるため、トラフィックの集約に着目した本稿の分析に用いることができる。そこで本稿では、この手法により得られたトポロジの情報を利用する。

BGP パス情報は、RouteViews Project の route-views.routeviews.org サーバーと RIPE NCC の rrc00.ripe.net サーバーで収集されたものを用いている。これらのサーバーは複数の ISP のゲートウェイルーターが保持している BGP テーブルのデータを収集しており、稼働が開始された年は、それぞれ 1997 年と 1999 年である。表 1 に、取得された BGP テーブルに含まれていた AS パス数と、生成した AS レベルトポロジの AS 数、リンク数をまとめている。

## 2.2 トランジットリンクとピアリングリンクの推定情報

AS 間のリンクの種類がトランジットリンクかピアリングリンクかは公表されていない。そこで AS レベルトポロジの分析のために、リンクの種類を推定する手法が提案されている [12–14]。リンクの種類を推定する手法の多くは、考案したアルゴリズムで推定したリンクの種類と、あらかじめ通信事業

者から得られたリンクの種類がどの程度一致するかを調べることで、有効性を示している。[14] による手法では 99.1%の精度でリンクの種類を推定することが可能であり、本稿ではこの手法の推定結果を利用している。

## 2.3 AS の分類

Tier-1 や Hyper Giants といった階層ごとに、トポロジの構造的特徴を捉えるため、AS を Tier-1, sub Tier-1, Tier-2, Tier-3, Hyper Giants, Academic, non Layer の 7 種類に分類する。sub Tier-1 は、Tier-1 か Tier-2 かの判断が分かっている AS や過去は Tier-1 と認識されていたが現在は Tier-2 の AS、またその逆の AS が含まれる。

ピアリングリンクは組織の規模や保有するコンテンツ量、送信するトラフィック量などが同等な AS の間に繋がれるリンクであるため、ピアリングリンクで構成された連結成分は一つの階層と見なすことができる。そこで、ピアリングで構成された連結成分を抽出し、各連結成分に含まれる AS の企業名を確認することで、それぞれの連結成分の階層を決定する。ピアリングリンクを持たない AS は、non Layer とする。non Layer に含まれる AS の多くは、小規模のネットワークを持つ ISP やアプリケーションサービスプロバイダーである。

## 3. フロー階層

### 3.1 フロー階層の抽出方法

フロー階層の分析を行い、トラフィック集約の階層性を明らかにするために、AS レベルトポロジからフロー階層を抽出する。まず AS レベルトポロジを複数のモジュールに分割する。分割されたモジュールを、さらに複数のモジュールに分割する。これを繰り返すことで、フロー階層を得る。

モジュールへの分割は、文献 [15] の手法に基づき行っている。トポロジの分割  $P$  が与えられたとき、モジュール内の AS を繋ぐリンクが密であり、異なるモジュール間を繋ぐリンクが疎であるほど、高い値を示す指標であるモジュラリティ  $M(P)$  を用いて、モジュラリティを最大化するようにトポロジをモジュールに分割する。これ以降では、モジュール内の AS を繋ぐリンクをモジュール内リンク、異なるモジュール間を繋ぐリンクをモジュール間リンクと呼ぶ。モジュラリティは式 (1) で定義され、式中の変数の説明を表 2 に記載している [16]。

$$M(P) = \frac{1}{2m} \sum_{ij} [A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m}] \delta_{S_i S_j} \quad (1)$$

モジュラリティ  $M(P)$  の値は、モジュール内リンクが密で、モジュール間リンクが疎なグラフであるほど 1 に近づき、完全グラフやスター型グラフのようにリンクが一様に張られ、モジュールが存在しないグラフでは 0 である。

ここでは、AS レベルトポロジを 1 回モジュール分割することで得られるモジュールの集合を、Containment Level 1 (今後、CL1 と略す) のモジュール群と呼び、CL1 のモジュールをさらにモジュール分割して得られるモジュール群を CL2 のモジュール群と呼ぶ。各 CL がフロー階層の各階層に相当する。

フロー階層の抽出は、以下の方法によって行われる。

(1) AS レベルトポロジをモジュールに分割し、CL1 のモジュール群を生成する。

(2) CL1 のモジュール群のうち、モジュラリティが 0 より

表 2 モジュラリティ( $\frac{1}{2m} \sum_{ij} [A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m}] \delta_{S_i S_j}$ ) の定義式内に現れる変数の説明

変数	説明
$m$	総リンク数
$i, j$	ノード
$A_{ij}$	隣接行列の要素。ノード $ij$ 間にリンクがある場合は 1、ない場合は 0 をとる。
$k_i$	ノード $i$ の次数
$S_i$	ノード $i$ が属するモジュール
$\delta_{S_i S_j}$	$S_i$ と $S_j$ が等しい場合 1、異なる場合に 0 をとる変数

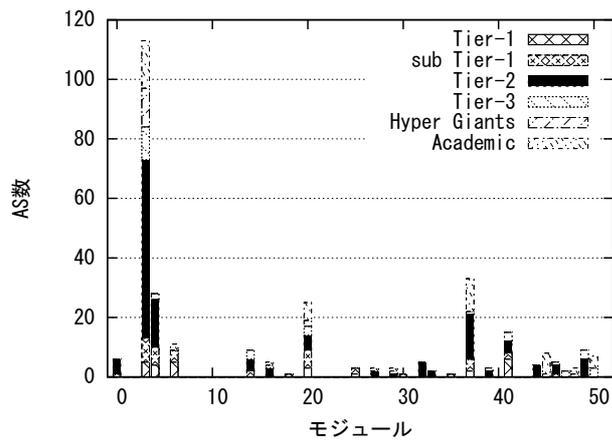


図 1 CL1 の各モジュールに含まれる AS の種類と数

大きいモジュールはさらにモジュール分割し、CL2 のモジュール群を生成する。

(3) CL2 以上の階層で (2) の手順を繰り返す。

### 3.2 フロー階層の構造

フロー階層を用いてトラフィック集約の分析を行うために、まず AS レベルトポロジにおけるフロー階層の構造を明らかにする必要がある。そこで、AS レベルトポロジをモジュールに分割した際、各モジュールがどのような種類の AS で構成されているかを確認した。図 1 に、2012 年の AS レベルトポロジの CL1 モジュールに含まれる AS の種類とその数を示している。

図 1 より、それぞれのモジュールには複数の種類の AS が含まれており、AS が種類ごとにまとまってはいないことが分かる。なお、この傾向は CL2 以降の階層のモジュールにおいても存在することを確認している。

次に、モジュール間リンクを持つ AS の種類を確認した。表 3 に、各 AS が持つ他のモジュールとのリンク数を、階層ごとにまとめて示している。 $e_x$  は、一つの AS に隣接する CL $x$  のモジュール間リンクの数の平均を表している。表 3 において、 $e_x$  の値が上位の階層ほど値が高くなっていることから、Tier-3 のような下位層の AS に比べ、Tier-1 のような上位層の AS の方がモジュール間リンクを多く持つ傾向にあることが分かる。

一つのモジュールに複数の種類の AS が存在し、さらに上位の AS がモジュール間リンクを多く持つことから、AS レベルトポロジをモジュール分割すると、図 2 のようなモジュールに切り分けられる。図 2 では、2012 年の AS レベルトポロジ

表 3 各 AS に隣接するモジュール間リンクの数

	$e_1$	$e_2$	$e_3$	$e_4$	$e_5$	$e_6$
Tier-1	989.54	158	624.31	0.54	22.77	0
sub Tier-1	191.03	75.23	160.82	2.31	14.31	0
Tier-2	52.76	29.39	52.63	0.93	7.74	0.03
Tier-3	16	11.33	33.08	0.58	2.42	0.17

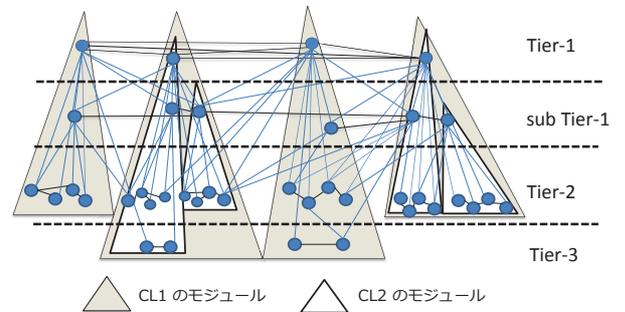


図 2 モジュールに分割した AS レベルトポロジの概略図

表 4 一つのモジュールに含まれる AS の数

Year	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6
2000	224.97	24.78	8.41	4.01	3.22	2
2002	424.32	35.73	9.81	4.32	3.35	2.75
2004	414.07	37.84	10.41	4.67	3.59	3.5
2006	528.33	43.54	11.25	5.43	3.59	2
2008	695.98	57.18	12.20	6.20	3.71	2
2010	841.98	69.16	12.26	5.71	3.81	2.166667
2012	915.93	73.31	12.93	6.36	3.74	2.892857

の概略図を示しており、異なる階層の AS を繋ぐリンクや同一の階層の AS を繋ぐリンク、各階層に含まれるノードの 1/5 を抽出し、AS を階層ごとに配置している。図 2 より AS レベルトポロジでは、Tier-1 などの上位層の AS は、自身が属するモジュールのトラフィックを集約して、他のモジュールに伝送する構造になっている。

### 3.3 フロー階層の経年変化

トポロジの大規模化に伴う、フロー階層における構造の変化を調査したところ、図 2 のような階層構造において深さよりも幅が広がるように成長していることが分かった。2000 年から 2012 年にかけて AS の数は約 5 倍、BGP パスの総数は約 9 倍に増えているが、AS レベルトポロジをモジュール分割できる回数は 2002 年から 2012 年にかけて 6 回であり変化がない。よって、フロー階層は幅が広がるように成長していると言える。フロー階層の幅が広がると、一つのモジュール内の AS 数が増え、モジュール間リンクにより多くのパスが経路することになる。表 4 に、各 CL における一つのモジュールに含まれる AS の数の平均を示している。2000 年から 2012 年にかけて、一つのモジュールに含まれる AS の数は、CL1 のモジュールでは 4.07 倍、CL2 のモジュールでは、2.96 倍に増えている。そのため、モジュール間リンクでは、より多くのトラフィックが集約され、モジュール間リンクに隣接する AS では、トラフィックの負荷が高まると考えられる。

トラフィックの集中が高まっているモジュール間リンクが、ど

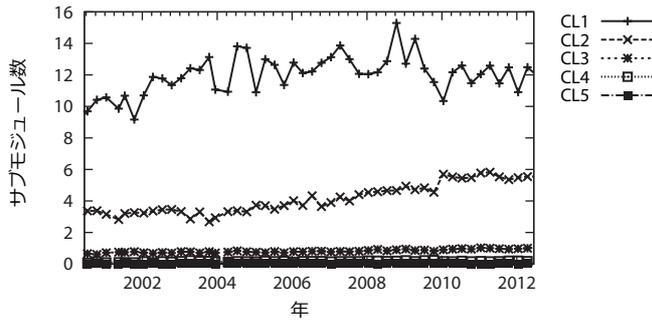


図3 一つのモジュールに含まれるサブモジュールの数

のCLに多く存在するかを確認した。図3に、一つのモジュールの中に含まれるサブモジュールの数の推移を示している。2008年頃までは、CL1のモジュール内に含まれるサブモジュール(CL2のモジュール)の数は増加傾向にあった。しかしながら2008年頃以降は減少傾向にある。これに対し、CL2のモジュールではサブモジュールであるCL3のモジュールの数が2000年から2012年にかけて、継続して増加している。そのためトラフィックの集中は、CL1のモジュール間リンクよりもCL2のモジュール間リンクで高まる傾向にあることが分かる。

#### 4. フロー階層の経年変化

##### 4.1 リンクに流れるトラフィック量の決定

AS レベルトポロジが大規模化しトポロジに流れるトラフィック量が増えた際に、トラフィック負荷が上昇する箇所を明らかにする。3.2節の結果より、AS レベルトポロジは、トポロジの成長に伴いモジュール間リンクにトラフィックが集中する構造であることが判明したため、ここではモジュール間リンクに流れるトラフィック量を示す。しかしながら、AS レベルトポロジの各リンクに流れるトラフィック量などを記した情報は記録されていないため、本稿では文献[17]に示された、グラビティモデルによる推定手法を用いて、AS レベルトポロジの各ASに通信需要を与える。

文献[17]におけるグラビティモデルは以下の式によって表現される。

$$X_{ij} = T_{in}(I_i) \frac{T_{out}(I_j)}{\sum_k T_{out}(I_k)} \quad (2)$$

$X_{ij}$  は AS  $ij$  間の対地間トラフィック量、 $T_{in}(I_i)$  は AS  $i$  に流入するトラフィック量、 $T_{out}(I_j)$  は AS  $j$  が送出するトラフィック量を表しており、 $\sum_k T_{out}(I_k)$  はネットワーク全体に流れるトラフィック量を意味している。ここでは、各々のASが送出するトラフィック量と流入するトラフィック量は、ASの次数に比例すると仮定して計算を行う。その後、AS間のルーティング行列から、各リンクに流れるトラフィック量を求める。

ASがHyper Giantsの場合は、送出するトラフィック量を他のASよりも多く設定する。文献[17]の手法では、トポロジ内のASを分類していないため、同じ次数のISPとコンテンツプロバイダーは、同じトラフィックを送出することになる。しかしながら、Cisco社が試算[18, 19]した全世界に流れる総トラフィック量や、データセンターとユーザー間でのトラフィック量のデータより、Hyper Giantsなどのコンテンツプロバイダー

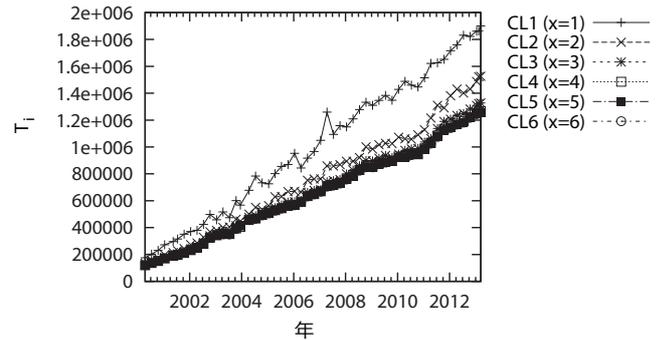


図4 各モジュール間リンクに流れるトラフィック量の平均

が送出するトラフィック量は、ISPが送出するトラフィック量の約895倍であることが分かる。よって、コンテンツプロバイダーの場合は、次数に対して895倍した値を送出するトラフィック量とする。本稿ではGoogleとAkamaiをHyper Giantsとみなしている。

##### 4.2 リンクに流れるフロー量の分布

通信需要を4.1節のように与え、モジュール間リンクに流れるトラフィック量の経年変化を示す。図4では、各モジュール間リンクに流れるトラフィック量の平均を、CLごとに示している。CL  $x$  に属する二つのモジュールを繋ぐモジュール間リンクの集合を  $L_x$  とし、リンク集合  $L_x$  に含まれるリンク  $l_x$  に流れるトラフィック量を  $T(l_x)$  とすると、CL  $x$  のモジュール間リンクに流れるトラフィック量の平均  $T_x$  は式(3)のように表される。図4は、 $T_x$  を3ヶ月ごとにプロットしている。

$$T_x = \frac{\sum_{l_x \in L_x} T(l_x)}{|L_x|} \quad (3)$$

図4から、上位層のモジュール間リンクほど流れるトラフィックの量が多いことが分かる。また、2011年頃よりCL2のモジュール同士をつなぐリンクで、より多くのトラフィックが流れる傾向にあることが分かる。これは、より下の階層でトラフィック集約が行われる傾向にあることを示している。2011年頃からCL2のモジュール間のリンクでトラフィック量が増大した要因として、CL2に比べCL3とCL4のモジュール数の増加が考えられる。図5に、各CLのモジュールの数の経年変化を示しており、CL2のモジュール数がほぼ一定の値をとっているのに対し、CL3とCL4のモジュールの数は増大していることが分かる。また特に、CL4のモジュールの数は2011年ごろより大きく増大している。増加したCL3とCL4のモジュールのトラフィックを、CL2のモジュール間リンクが集約するため、CL2のモジュール間リンクに流れるトラフィック量が2011年頃より増大したと考えられる。

## 5. おわりに

ネットワークを拡張する際やプロトコルの性能を測るために、現在のネットワークの構造がどのように変化してきたのかを理解する必要がある。特に、ネットワークの性能はトラフィックがトポロジのどこで集約されるかに依存するため、トラフィック集約の階層性を明らかにしなければならない。そこで本稿では、

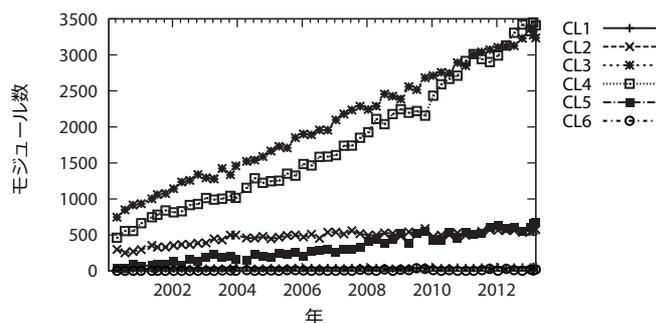


図 5 各 CL に存在するモジュールの数

モジュール分割を繰り返すことで得られるフロー階層に基づき、トポロジーにおいてトラヒックが集約される箇所を分析した。

分析により、AS レベルトポロジーが大規模化するにつれ、フロー階層の各モジュールに含まれる AS の数が増大することが明らかとなり、フロー階層の構造は幅が広がるようになっていることが分かった。また、一つのモジュールの中に含まれるサブモジュールの数が、CL1 のモジュールでは、2004 年ごろからほぼ一定であるのに対し、CL2 のモジュールでは継続して増加していることが明らかとなった。これにより、トラヒックは CL2 のモジュール間リンクでより集中されるように、構造が変化していることを表している。さらに、AS の度数に基づくグラビティモデルにより各 AS 対地間通信需要を与えた場合、2011 年頃より CL2 のモジュール間リンクに流れるトラヒック量の増加量が増えてことが明らかとなった。これは、トポロジーが大規模化するにつれ CL3 と CL4 のモジュール数が増大しており、特に CL4 のモジュールが 2011 年ごろより大きく増大しているためであると考えられる。

今後は、一部のネットワークへのトラヒックの集中を避けるために最適な、インターネットトポロジーの成長を前提にしたトポロジーの設計指針を明らかにする。

## 謝 辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (A)24240010 によっている。ここに記して謝意を表す。

## 文 献

- [1] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, "A first-principles approach to understanding the Internet's router-level topology," in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, vol. 34, pp. 3–14, Oct. 2004.
- [2] C. Labovitz, S. Iekel-Johnson, D. McPherson, J. Oberheide, and F. Jahanian, "Internet inter-domain traffic," in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, vol. 41, pp. 75–86, Aug. 2010.
- [3] A. Dhamdhere and C. Dovrolis, "The Internet is flat: Modeling the transition from a transit hierarchy to a peering mesh," in *Proceedings of ACM Co-NEXT*, vol. 6, pp. 1–12, Dec. 2010.
- [4] A. Dhamdhere and C. Dovrolis, "Twelve years in the evolution of the Internet ecosystem," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 19, pp. 1420–1433, Sept. 2011.
- [5] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "On power-law relationships of the Internet topology," in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, vol. 29, pp. 251–262, Oct. 1999.
- [6] R. Pastor-Satorras, A. Vázquez, and A. Vespignani, "Topology, hierarchy, and correlations in Internet graphs," *Complex Networks*, vol. 650, pp. 425–440, 2004.

- [7] Y. Shavitt and E. Shir, "DIMES: Let the Internet measure itself," in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, vol. 35, pp. 71–74, Oct. 2005.
- [8] H. V. Madhyastha, T. Isdal, M. Piatek, C. Dixon, T. Anderson, A. Krishnamurthy, and A. Venkataramani, "iPlane: An information plane for distributed services," in *Proceedings of USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation*, vol. 7, pp. 367–380, Nov. 2006.
- [9] Q. Chen, H. Chang, R. Govindan, S. Jamin, S. J. Shenker, and W. Willinger, "The origin of power laws in Internet topologies revisited," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 2, pp. 608–617, June 2002.
- [10] B. Zhang, R. Liu, D. Massey, and L. Zhang, "Collecting the Internet as-level topology," in *Proceedings of ACM SIGCOMM*, vol. 35, pp. 53–61, "Jan" 2005.
- [11] R. Cohen, "The Internet dark matter: on the missing links in the as connectivity map," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 25, pp. 1–12, Apr. 2006.
- [12] L. Subramanian, S. Agarwal, J. Rexford, and R. H. Katz, "Characterizing the Internet hierarchy from multiple vantage points," in *Proceedings of IEEE INFOCOM*, vol. 2, pp. 618–627, Nov. 2002.
- [13] X. Dimitropoulos, D. Krioukov, B. Huffaker, kc claffy, and G. Riley, "Inferring as relationships: Dead end or lively beginning?," in *Proceedings of Workshop on Experimental and Efficient Algorithms*, vol. 4, pp. 113–125, May 2005.
- [14] "The Cooperative Association for Internet Data Analysis." <http://www.caida.org/home/>.
- [15] V. D. Blondel, J.-L. Guillaume, R. Lambiotte, and E. Lefebvre, "Fast unfolding of communities in large networks," *Journal of Statistical Mechanics*, vol. 2008, pp. 10008–10019, Oct. 2008.
- [16] M. E. J. Newman, "Fast algorithm for detecting community structure in networks," *Phys. Rev. E*, vol. 69, p. 066133, June 2004.
- [17] Y. Zhang, M. Roughan, N. Duffield, and A. Greenberg, "Fast accurate computation of large-scale IP traffic matrices from link loads," in *Proceedings of ACM SIGMETRICS*, vol. 31, pp. 206–217, June 2003.
- [18] Cisco, "The zettabyte era." Available: [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI\\_Hyperconnectivity\\_WP.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI_Hyperconnectivity_WP.html).
- [19] Cisco, "Cisco global cloud index: Forecast and methodology, 2011-2016." Available: [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns1175/Cloud\\_Index\\_White\\_Paper.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns1175/Cloud_Index_White_Paper.html).