

コンテンツドリブンの AS トポロジーの変化

石田 亨^{†1} 遠藤 一步^{†2} 勅使 優宏^{†2} 原山 美知子^{†3}

概要: インターネットの構造は従来、接続性を確保するためにトポロジーが構成されてきた。しかし、近年、ハイパージェイアントと言われる有力コンテンツホルダー (CH) の出現により、それらへの接続性の向上が重要視されてきている。それに伴って、インターネットの構造や AS 間接続が変化していると考えられる。本研究では、CAIDA による公開データを基に AS 属性と接続特性の関係を明らかにするとともに、AS パスリストの解析によりローカル AS 周辺のネットワーク構造の変化について調べた。その結果、CH は ISP に比べ多くのピア接続をもつこと、ローカル AS では、非常に多くのピア接続をもつとともに、Tier1 を通らないショートカットも多いことが確認できた。

キーワード: AS トポロジー, AS パスリスト, 自立システム, コンテンツホルダー, インターネット構造

Contents Driven Change of AS-level Topology

AKIRA ISHIDA^{†1} KAZUHO ENDO^{†2} MASAHIRO TESHI^{†2}

MICHIKO HARAYAMA^{†3}

Abstract: Internet topology, namely AS(Autonomous System)-level one, previously, has been constructed in order to secure connectivity between ASes. Recent years, however, it is becoming more important to connect to those of leading contents holders called hyper giants, rather than general connectivity. The Internet topology and links between ASes are considered to change according to this situation. In this study, relationship between AS property and link characteristics was investigated based on the disclosing data by CAIDA, and an AS pathlist acquired by a BGP router was analyzed to reveal change of the AS topology in the neighborhood of a local AS. As a result, contents holders have more peer links than ISPs, and the local AS has many private peer links and shortcuts that skip Tier1.

Keywords: AS-level Topology, AS Pathlist, Autonomous System, Contents Holder, Internet Topology

1. はじめに

創世記、インターネットは相互の接続性の確立を主要な指導原理として成長を始めた。フロア・ビル・キャンパス間で比較的容易に敷設可能な LAN の普及はインターネットを構成する単位としての自律システム概念を確立し、それらを相互に接続するバックボーンネットワークを介して実現できる相互接続と、接続性の確立と階層構造との密接な関連を早期に強く示唆するものとして認知されてきた。

その後、実験利用、学術機関利用のみでなく一般商用利用の開始普及、それに伴う、より上位バックボーン事業者の出現と一般利用におけるエンドユーザーの収容などの需要から階層構造が多階層化し、相互接続が広域化することとなっている。

当初からその通信を支えるプロトコル群の開発思想でもある冗長性に関する視点もあったが、初期段階においては実験環境や実証目的での学術ネットワークで実現されるにとどまっている。これは、高価な回線費用や場面ごとの動的

的経路制御技術の確立に時間を要したための影響と考えられる。

このような伝統的な相互接続主導による成長に対して、インターネット環境の社会インフラ化にともなう、信頼性、安定性、またサービス環境の効率化といった価値がより重要視される近代的な視点へのシフトが急速にすすんでいる。金融・公共サービスを例に出すまでもなくその信頼性実現のためのプロトコルから物理層に至る冗長性の確保のため、基盤に対する投資がなされ、それに伴うネットワーク構造の複雑さも増してきている。また、サービス環境効率化のためのサービス環境のクラウド化などによりサービスと利用者との短絡的接続の需要も大きくなり、ネットワーク運用技術の進展から比較的容易に実現されてきている。

本研究では、接続性の確保から、高効率、高信頼性を実現したコンテンツへの到達性といったインターネットの構成における指導原理の変化と、それによるインターネット構造変化の特徴を客観的指標に基づいて明らかにすることを目的とする。その第一歩として、インターネットの構造を俯瞰的に常時観測して公開している組織のデータや BGP 運用をする一 ISP から見たインターネットの形を実測データから、指導原理のシフトが進む現在のインターネットがどのように観測されているかを解析し明らかにすると

†1 岐阜大学大学院工学研究科電子情報システム工学専攻
Graduate School of Engineering, Gifu University

†2 岐阜大学工学部人間情報システム工学科
Faculty of Engineering, Gifu University

†3 岐阜大学工学部電気電子・情報工学科
Faculty of Engineering, Gifu University

ともに、各データの特徴にあわせて、どのような分析が可能かもあわせて検討する。

2. 関連研究

ネットワークの構造を捉える視点は様々なものがあり、観測結果の用途や研究目的によりスイッチやルーターの構造に着目する場合もある[1]。しかし、インターネット全体の構造を解析する場合には、自立システム (AS) を AS 番号ごとにノードとし、AS 間の直接的なトラフィックの交換をリンクとするグラフとして捉えた AS-level トポロジー (AS グラフ, AS トポロジー) が用いられることが多い。インターネットの各 AS は、他の AS とどのような接続関係を有しているかという情報をどこかに届出義務を負わないため、AS 間の隣接関係を完全に集約できる組織や機関はない。しかしながら、インターネットの接続性や通信性能、セキュリティの確保のため、インターネットの全体像を明確に把握する必要がある。そこでインターネットトポロジーの観測を伴う実験プロジェクトがいくつも存在する[2-8]。特に、Center for Applied Internet Data Analysis (CAIDA) プロジェクト[8]では、接続や流量に関するデータを常時収集しており、各時点でのインターネットの様子を解析して様々な形で公開し、年 2 回程度の頻度で更新を続けている。

AS の隣接関係は、一般に、カスタマからプロバイダへ金銭授受が発生する C2P (Customer to Provider) の接続関係と無償の相互接続 P2P (Peer to Peer) とに分けられる。2000 年頃の AS トポロジーの姿は、P2P で接続した Tier1 と呼ばれる大手 ISP の AS 群を最上位として、それ以外の AS が、C2P 接続により下にいくほど数を増やしながら階層的に接続していると考えられており、クラゲモデルと呼ばれている[10,11]。また、この頃、大規模ネットワークの複雑ネットワーク解析が活発化する中で、AS トポロジーのスケールフリー性やクラスタ性などの検討が行なわれ[12-15]、AS グラフにおける度数に着目した負荷分散方式が提案されるなどしている[16]。

AS トポロジーの変化や将来予測に関連しては、AS トポロジー成長過程が分析されている[17,18]。また、AS トポロジーと地理的な配置を関連づけ[19]、変化を可視化する試み[20]も行なわれている。また、AS トポロジーのモデリングに関する提案[21]もなされるようになった。

ところで、CAIDA を始めとするプロジェクトで用いられている観測手法には、インターネットを構成する主要なネットワーク機器で ping や traceroute を用いてその接続性やデータ流量等を得る方法、IRR 経路情報データベース[22]のように各 AS の申告で得られるポリシーデータを利用する方法、AS 間ルーティングプロトコル BGP の経路情報[23]を用いるものがある。さらに複数の観測点での観測結果を合成して AS トポロジーを構成している。その他、

AS トポロジーの推定方法についての提案がされている[24,25]。

2000 年以降のインターネットのめざましい発展により、AS 数は 4 万を超え、ヨーロッパの最大 IXP の協力による解析の結果、下位層の AS 間での P2P 接続の数が非常に増加していることが明らかとなった [26]。その原因は、単なる AS 数の増加ではなく、インターネットの拡大ハイパージャイアントと呼ばれる巨大な Content Holder (CH), Google, Comcast, Facebook, Akamai, Limelight Networks, Microsoft などの影響が考えられる。これらの CH ヘアアクセスが集中し、CH 側からのサービストラフィックがインターネットトラフィックの大きな割合を占めるようになっており、それに対応して下位層の ISP が経済的な理由で P2P 接続を増加させている可能性がある。また、グループ毎に経路を公開するような IXP のサービス形態も原因の一つである可能性がある。いずれにせよ、巨大な CH の出現は、インターネットトラフィックの流れだけでなく AS トポロジーの全体構造に影響を及ぼし変化させているといわれている [27,28]。

3. AS トポロジーの解析

3.1 解析データ

本研究で解析対象としたデータは 2 つある、一つは CAIDA の公開データである。CAIDA では、BGP 運用やポリシーデータベースから得られるデータから、AS 間の接続関係とその属性を推定している[29]。各 AS に対し、その AS を頂点のプロバイダ AS として階層的に C2P 接続している AS 群をカスタマ・コーンと呼ぶ。CAIDA のカスタマ・コーンのサイズが大きいほど上位とする AS のランク付けを行っている。本研究で解析した公開データは、AS ランク、AS 番号、管理している組織、接続先のプロバイダ数、カスタマ数、ピア数、さらに個別の接続先の AS の情報である。本研究では、これらのデータをグローバルな視点からみた AS トポロジーと捉えている。

BGP の AS パスリストを解析は、AS トポロジーを把握する手法として一般的なものであるが、いくつもの問題点も指摘されている[1]。BGP ルーティングにおいては、隣接 AS から広報される経路情報を基に任意のプレフィックス (AS と等しいと考える) への最適経路を選択する。AS を運用する任意の組織から広報される経路情報が自身の AS に到達することで AS パスの通信経路が確定するが、その間の経路がインターネットすべての AS 間の接続関係を網羅しているわけではない。そのため、単独の AS 運用組織がもつ経路情報のみからインターネット全体の AS トポロジーの全容を把握することはできない。

CAIDA の AS トポロジー情報は、複数の観測点において、BGP 運用から得られる AS パスの情報の重ね合わせと、AS

運用組織が登録する AS 経路に関するポリシーデータベースの情報を主たる情報源としている。そのため、観測点周辺や適切にデータベース登録を行っている AS 周りの情報は正確である反面、観測点から離れたところやトランジットを制限している AS 間接続などの情報は反映されていない可能性がある。

そこで、本研究ではもう一つの解析対象データとして、ローカル ISP ミライコミュニケーションネットワーク[27]の境界ルーターの BGP のフルルートの各プレフィックス属性から抽出した AS パスリストを取り上げた。なお、本報告では、AS 間接続は無向とし、AS パスリスト上でどちらかの向きの隣接関係が確認できれば、リンクがあるものとする。

3.2 Tier1 の定義

Tier1 は、実際のインターネットにおいては、地球規模でバックボーン回線を運用し、顧客の接続性を提供する最大手 ISP の集団で、階層構造的描像における最上位 AS 群として位置づけられるが、明確な定義はなされていない。本研究では、まず初めに、Tier1 を定義し、その定義に基づいて CAIDA のデータから該当する AS を抽出し Tier 1 AS 群を求める。

Tier1 の定義：

- ・カスタマ・コーンを用いたランキングで上位に位置する AS である
- ・AS 間接続に於いて上位 ISP を持たない（接続する AS は対等なピアもしくはカスタマ）

CAIDA のランキング上位 50 を対象として接続関係をしらべたところ、上位 ISP を持たないものはそのうち 17 個で、すべてが相互に P2P 接続していた。これらはランキングでほぼ上位 30 位内にあり、多くの AS 間の通信に影響を持つ AS であるとともに、すべてが相互に peer 接続していた。本論文ではこれらの AS を Tier1 とみなす。

表 1 定義から得られた Tier1 AS

Table 1 Tier1 ASes determined from our definitions

ASN	RANK	AS name	Type	Organization Name
3356	1	LEVEL3	Tr/Ac	Level3 Communications, Inc.
174	2	CONGENT-174	Tr/Ac	Cogent Communications
3257	3	TINET-BACKBONE	Tr/Ac	Tinet Spa
1299	4	TELIA.NET	Tr/Ac	TeliaSpnera AB
2914	5	NTT-CMMUNICATIONS	Tr/Ac	NTT America, Inc.
6453	6	AS6453	Tr/Ac	TATA Communications(America), Inc.
6762	7	SEABONE-NET	Tr/Ac	TELECOM ITALIA SPARKLE S.p.A
2828	9	XO-AS15	Tr/Ac	XO Communications
6461	13	ABOVENET	Tr/Ac	Abovenet Communications, INC.
3320	14	DTAG	Tr/Ac	Deutsche Telekom AG
7018	17	ATT-INTERNET4	Tr/Ac	AT&T Services, Inc.
701	18	UUNET	Tr/Ac	MCI Communications Services, Inc.
209	19	CENTURYLINK-US-LEGACY-QWEST	Tr/Ac	Qwest Communications Company, LLC
1239	20	SPRINTLINK	Tr/Ac	Sprint
12956	30	Telefonica	Tr/Ac	Telefonica International Wholesale Services, SL
286	32	KPN	Tr/Ac	KPN B.V.
5511	35	Opentransit	Tr/Ac	Orange S.A.

3.3 ローカル ISP からみた Tier1 の相互接続

まず、Tier1 の 17AS の相互接続が、ローカル ISP からどのように見えているかを明らかにするため、AS パスリストから、Tier1 AS 間のリンクを抽出した。その結果、38 リンクが観測された。Tier1AS 群はフルメッシュで接続しているため その 27.5%しかみえない、といえる一方、クラゲモデルであれば、たかだか 3 個の Tier1 に接続しているはずであるから、 $3 \times 16 - 3 = 45$ を分母とすれば 84% 程度のリンクが見えているといえる。

3.4 ローカル ISP の近隣接続

本研究で対象としたローカル ISP の接続数を CAIDA の公開データで確認したところ、プロバイダ接続、すなわち上位プロバイダとの接続 3 個、ピア接続 5 個、カスタマ接続は 5 個であった。しかし、AS パスリストの解析では、プロバイダ数およびカスタマ数は一致しているが、ピア接続は 133 個と非常に多くの接続が確認できた。

4. ローカル ISP 周辺の AS リンク

4.1 ISP データの分析

ここでは、一つの BGP ルーターが受けるフルルートの AS パス属性のデータから AS 間の接続性を分析する。予備的な分析の簡便さのためと CAIDA データとの比較のため、IPv4 プレフィックスに付属する AS パス属性のみを利用した。BGP 運用における経路制御に関するポリシー実装上の情報は無視し、AS 間の接続性にのみ注目した（同一 AS 番号の重複の無視）。また、AS が構成するネットワークのトポロジーに注目するため、構造上、トポロジーに本質的な影響を与えない Stab AS 及びトランジットを行わないマルチホームされた AS を無視してデータから事前に排除し、扱うデータ量の軽量化を図った。

CAIDA のデータと ISP データの大きな違いの一つは、トランジットを制限した接続の情報がどのように反映されているかである。トランジットを制限した接続とは、二つの AS 間の通信のみを実現するプライベートピアリングによる接続や、下位 AS 相互の通信までのトランジットを行い、上位 AS へ流すトラフィックの削減を目指すショートカット型の接続が代表である。そこで、本研究では Tier1 を通る Destination に着目し、AS パスを分析することによりショートカットの発生を調べた。

4.2 AS パスのパス長分布

まず、ISP データに現れるそれぞれの AS パスリスト個々の AS 数の分布（パス長分布）を図 1 に示す。このパス長は、観測点である AS を Source として Destination AS へのホップ数と等しい。パス長の最頻値が 5、最大値が 10 であった。これから、インターネットの平均は 5.1 となった。

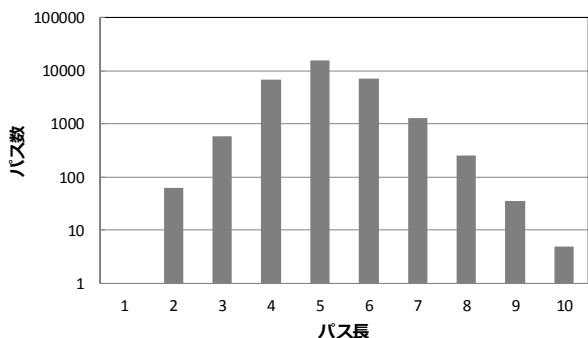


図 1 ISP データの AS パスリスト長分布

Figure 1 Distribution of AS pathlist length of ISP data

4.3 AS パス長からショートカットの抽出

ISP データ内で、AS パス内に Tier1AS を含むもの、含まないもので分類すると、Tier1 を含むパスのみのもの（グループ A）261、Tier1 を含まないパスのみのもの（グループ C）3424、双方を持つもの（グループ B）1955 であった。

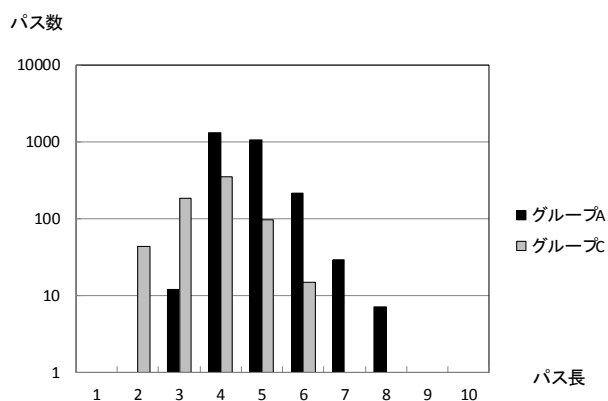


図 2 最短 AS パスリストの分布

Figure 2 Distributions of shortest AS pathlist for A and C.

グループ A とグループ C のそれぞれの最小値 L_{min} を比較する。それぞれの L_{min} の分布は図 2 である。グループ A は 3 から 8 に分布しており、グループ C は 2 から 6 に分布していることが見て取れる。

グループ B において Tier1 を通る場合の最小値 $L_{min}(T)$ と Tier2 をとらない場合の最小値 $L_{min}(\sim T)$ を比較する。その差

$$\text{パス長差} = L_{min}(T) - L_{min}(\sim T)$$

および AS 数の結果を表 2 にまとめる。この結果を見ると、AS が同じ宛先 AS に対する経路情報にも関わらず、Tier1 を通るパスよりも Tier1 を通らないパスの方がパス長は短いことがわかる。つまり Tier1 を通るパスよりも Tier1 を通ら

ないパスが通信経路として優先される。ここで、Tier1AS はグループ B に所属する AS のプロバイダであるので 543 の AS はショートカットを作成した AS であるといえ、ショートカットが確認できた。

表 2 Tier1 経由の場合とショートカットの場合のパス長差

Table 2 Difference of AS path-lengths between on Tier1 and off Tier1.

パス長差	-2	-1	0	1	2	3	4	5
AS数	14	400	998	416	106	17	3	1
合計AS数	414		998	543				

5. AS 組織と接続属性

コンテンツホルダー、SNS、maker、ISP といったインターネットを構成する主要な組織の AS 接続について、CAIDA が公開しているデータからその統計的特徴を分析した。

ISP として、IIJ、docomo、KDDI、LEVEL3、BIGLOBE、NTT について調べた結果が図 3 である。接続する各 AS は、カスタマが多く、プロバイダが少ないという結果を得た。主たる業務がカスタマへの接続性の提供であるため直感的にも自然な結果である。

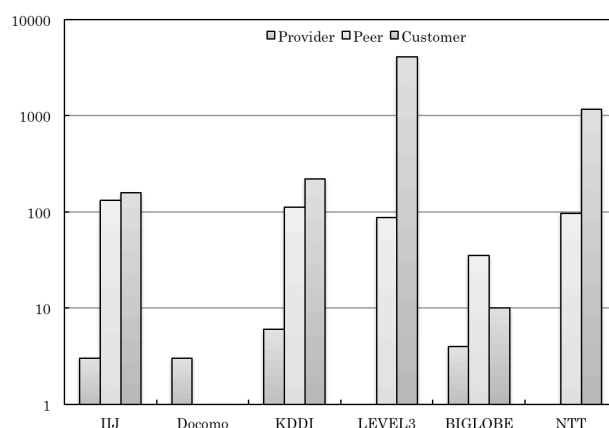


図 3 ISP の接続 AS の属性

Figure 3 Peer AS specification of ISPs.

コンテンツホルダーの代表として、Google、amazon、Yahoo についてそれらの AS と接続する AS の属性分布の特徴が図 4 である。これらの AS 組織は peer 接続する AS が多いのが特徴である。

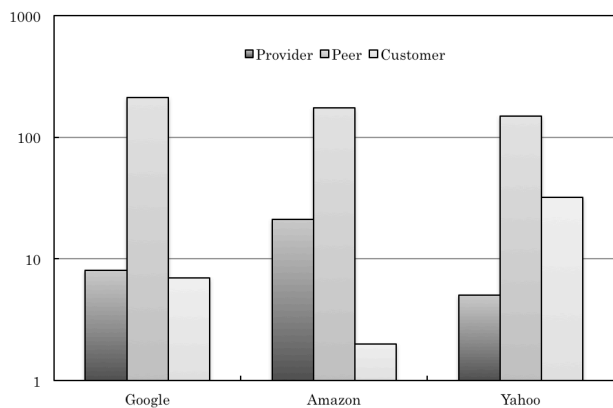


図 4 コンテンツホルダーの接続 AS 属性
 Figure 4 Peer AS specification of Content holders.

近年話題となっている SNS の代表格である Facebook と Twitter について、同様に比較すると、図 5 に示すようにコンテンツホルダーと同様の傾向が見られた。

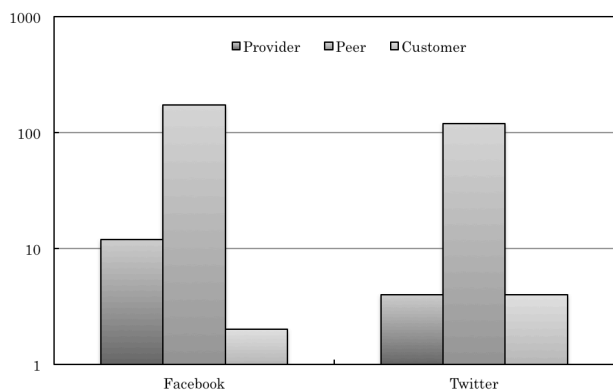


図 5 SNS 事業者の接続 AS 属性
 Figure 5 Peer AS specification of SNS providers.

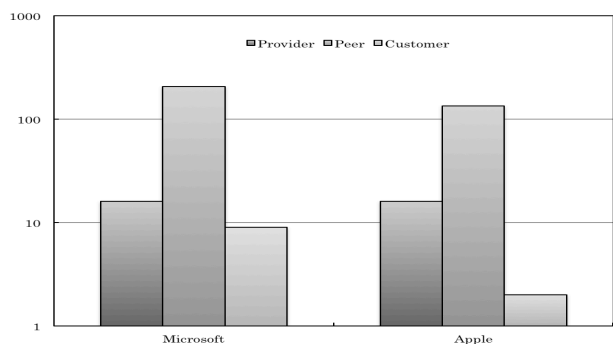


図 6 OS メーカーの接続 AS 属性
 Figure 6 Peer AS specification of OS makers

図 6 に示すように、主要な OS メーカーであるマイクロソフトとアップルについても同様な比較をした。この二者の傾向は、コンテンツホルダーと類似となった。通常の応用ソフト制作者であれば、一インターネット利用者と考えられるが、基本ソフトの場合、近年話題となるネットワークを介するセキュリティ対策のため、多くの利用者の最新のアップデートデータを求めてのアクセスが集中するため、インターネットにおいては一種のコンテンツホルダー的な位置付けとなっていると考えられる。

6. 考察

CAIDA のデータは、主要な計測点で観測されるデータを基にしているため、多くの中小 ISP が設定するトランジットを制限した接続の情報は反映されにくい。ISP のデータの場合は、AS 運用上自ら設置しトランジットに関する制限を行っている接続や、自 AS がサービスを受けている AS に起因するものに関しては、自らが利用する通信経路と直接的な関係があるため、それらを反映した情報を保持している。

近年、比較的小規模な ISP や CATV 等でも、通信回線の低価格化や運用技術の高度化により、商用 IX 等を介して ISP ではなくコンテンツプロバイダーと直接プライベートピアリングを行う例が増加している。コンテンツプロバイダーが扱うコンテンツは、インターネットゲーム、超高画質映像など実時間性や安定性がサービス品質を左右するものが多いためもあり、大手 ISP だけでなく個別にエンドユーザーを持つ CATV などの小規模 AS 組織なども積極的にプライベートピアリングを行ってきていること、コンテンツプロバイダーが多岐にわたってきていることも合わせると地域 ISP でも 100 を超えるコンテンツプロバイダーとピアリングしている例も珍しくない。このような形でのプライベートピアリングは、従来から構成してきたインターネットの形を本質的に変化させるものであるとともに、上位 ISP との接続の重要性や意味も変化させていくものであると考えられる。

ところで、AS パスリストから AS トポロジーを推定することに関してはいくつかの問題が指摘されている[1]。たとえば、各 AS は、接続性を確保するために代替路をもっているがこの代替路は定常時には AS パスリストとして伝達されることはない。代替路を取得するためには定期的にサンプリングした結果を多数集めて抽出する必要がある。

また、AS 番号ごとに AS をノードとしてみなすことについては、AS と組織が一对一に対応していない場合がある。もともと複数の AS を取得している組織もあり、組織の合併によって AS 番号が複数になった場合もある。この場合、接続関係はシブリング(Sibling)と呼ばれ、これらの AS は完全に自立運用されているとは言えないため、集計の目的に

従って扱う必要がある。さらに、巨大な AS は境界ルーターを複数もっているため、二つの AS 間の接続ポイントは実際には多重リンクになっている可能性があるが BGP 経路情報からはわからないため、トラフィックの流れを議論することは難しい。

7. まとめ

本研究では、コンテンツホルダーによる近年の AS トポロジーの変化をみるため、最近の CAIDA データとローカル ISP の BGP ルーターが取得する AS パスリストを調べた。その結果、ローカル ISP のもつピア数は CAIDA の公開データに比べて非常に多いだけでなく、ローカル ISP の AS パスリストには、Tier1 を含まない AS パスが多数みられ、パス長が短縮されていることが確認できた。

また、CAIDA のデータから主な AS の接続特性を調べた結果では、コンテンツホルダーは多くのピア接続をもっていることがみられた。これらの結果から、コンテンツホルダーの存在により下位層の AS におけるピア接続が増大していると推定できる。

今後、ローカル ISP データからコンテンツホルダーへのパスを精査しコンテンツホルダーの影響をより明確にするとともに AS トポロジーの新しいモデルを検討したい。

参考文献

- [1] Walter Willinger, Matthew Roughan, "Internet Topology Research Redux," Recent Advances in Networking, Vol. 1, ACM SIGCOMM eBook, 2013, chap.1.
- [2] "CAIDA Skitter," <https://www.caida.org/tools/measurement/skitter/>, (参照 2016-04-18)
- [3] "iPlane(An Information Plane for Distributed Services)," <http://iplane.cs.washington.edu/>, (参照 2016-04-18)
- [4] "The DIMES Project," <http://www.netdimes.org/>, (参照 2016-04-18)
- [5] "Merit RADb," <http://www.radb.net/>, (参照 2016-04-18)
- [6] "University of Oregon Route Views Project," <http://www.routeviews.org/>, (参照 2016-04-18)
- [7] "Routing Information Service in RIPE-NCC," <https://www.ripe.net/analyse/internet-measurements/routing-information-service-ris>, (参照 2016-04-18)
- [8] "Cyclops/UCLA," <http://cyclops.cs.ucla.edu/>, (参照 2016-04-18)
- [9] "CAIDA(Center for Applied Internet Data Analysis)," <https://www.caida.org/>, (参照 2016-04-18)
- [10] Siganos, Georgos, Sudhir Leslie Tauro, and Michalis Faloutsos, "Jellyfish: A conceptual model for the as internet topology," Communications and Networks, Journal of 8.3, 2006, p.339-350.
- [11] Donnet, Benoit, and Timur, Friedman, "Internet topology discovery: a survey." Communications Surveys & Tutorials, 2007, IEEE 9.4, p.56-69.
- [12] Faloutsos, P. Faloutsos, C. Faloutsos, "On power-law relationships of the internet topology," Comput. Commun. Rev., 29, 1999, p.251-262.
- [13] A. Vázquez, R. Pastor-Satorras, A. Vespignani, "Large-scale topological and dynamical properties of the Internet," Phys. Rev. E

- 65, 2002, 66130.
- [14] Erzsébet Ravasz and Albert-László Barabási, "Hierarchical organization in complex networks," Phys. Rev., E 67, 2003, 26112.
- [15] 一井 信吾, "「インターネットはスケールフリー」論再考," 信学技報, 2007, 1A-107(74), p.35-40.
- [16] 福田 健介, 佐藤 進也, 明石 修, 廣津 登志夫, 栗原 聡, 菅原 俊治, "ネットワークトポロジーの次数情報に着目したサーバ・クライアント負荷分散方式の提案と評価," コンピュータソフトウェア 2007, 24(4), p.78-87.
- [17] 中田 侑, 荒川 伸一, 村田 正幸, "包含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," 信学技報, 2013, NS-112(463), p.489-494.
- [18] 中田 侑, 荒川 伸一, 村田 正幸, "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," 信学技報, 2013, PN-113(175), p.13-18.
- [19] 空閑 洋平, 長 健二郎, 中村 修, "地域レベルの AS トポロジー構造を比較する," WIT2008 論文集, 2008, p.9-16.
- [20] 空閑 洋平, 長 健二郎, 中村 修, 村井 純, "アジアにおける地域 AS トポロジーの発展の可視化," コンピュータソフトウェア, 2013, Vol. 30, No. 2, p.147-158.
- [21] Sami M. Sharif and Hisham A. Adam, "Internet Autonomous Systems (ASes) Level Topology Modeling," UofKEJ, 2014, Vol.4 Issue 2 p.20-24.
- [22] IRR: Routing Policy Specification Language, RFC2622.
- [23] BGP: Border Gateway Protocol, RFC 4271.
- [24] David Szabo, Attila Korosi, Jozsef Biro and Andr as Gulyas, "Deductive Way of Reasoning about the Internet AS Level Topology," Chin. Phys. 2015, B . 24(11), 118901.
- [25] Giotsas, V., Luckie, M., & Huffaker, B., "Inferring complex as relationships," In Proceedings of the 2014 Conference on Internet Measurement Conference, 2014, ACM, p. 23-30.
- [26] Ager, Bernhard, et al. "Anatomy of a large European IXP," Proceedings of the ACM SIGCOMM 2012 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication, 2012, ACM, p.163-174.
- [27] Labovitz, Craig, et al. "Internet inter-domain traffic," ACM SIGCOMM Computer Communication Review 41.4, 2011, p.75-86.
- [28] Frank, Benjamin, et al. "Collaboration opportunities for content delivery and network infrastructures," Recent Advances in Networking, 2013, p.305-377.
- [29] "株式会社ミライコミュニケーションネットワーク," <http://isp.mirai.ad.jp/>, (参照 2016-04-18)