

地域レベルの AS トポロジ構造を比較する

Comparison of Regional AS Topology Structures

空閑洋平^{†1} 長健二郎^{†2} 中村修^{†3}

インターネットの構造や成長を把握するために、インターネットのトポロジを計測することは有効な手段である。ネットワークの接続関係を示すトポロジは、本来地理的な位置とは独立であるが、実際には地理的あるいは物理的な制約が大きい。一方で、インターネットのグローバルなトポロジ構造は、アメリカ中心から、地域の接続拠点を相互接続する分散化が進んでいて、このような構造の変化を理解するためには、地理的な情報を含んだトポロジの把握が必要となってくる。

本研究は、ヨーロッパやアジアなどの地域ごとのインターネットの構造を把握することを目的に、その地域における AS レベルのトポロジを推測し、可視化による比較を行う。ここでは、多地点からの traceroute データを基に、クラスタリングにより特定地域のトポロジを抽出し、その AS レベルのトポロジ構造を AS Core Map を用いて表現する。その結果、地域ごとの AS トポロジの次数分布がべき則に従う共通点や、その地域における Tier-1 AS の役割の違いなどの特色が明らかになった。また、このような地域ごとの比較を行うためには、現状のデータの観測点が、特にアフリカやオセアニアで不足している問題や、地域の範囲をより細かくし、国ごと、都市ごとの比較をするための課題が明らかになった。

1. はじめに

インターネットのトポロジ計測は、インターネットの構造と成長の観察や、次世代のネットワークアーキテクチャの検討を目的として研究されている。インターネットのトポロジの解析には、AS (Autonomous System) 間の経路制御プロトコルである BGP (Border Gateway Protocol)¹⁾ の経路情報や多地点から計測した traceroute²⁾ のデータを用いる。

一方で、インターネットのグローバル化に伴い、国際トラフィックもアメリカ中心から、アメリカ以外の国同士のトラフィックの比重が増えている。それに従い、インターネットのトポロジは、低遅延やコスト効率のよい伝送を実現するために、アメリカ中心から地域ごとの接続拠点の役割を担う ISP (Internet Service Provider) の台頭や IX (Internet eXchange) を相互接続する分散化が進んでいる。

ネットワークの接続関係を示すトポロジは、本来地理的な位置とは独立している。そのため、インター

ネットトポロジに関する既存研究の対象は、インターネット全体を対象とした AS レベルのトポロジや単一の AS を対象としたルータレベルのトポロジといった論理的な範囲のトポロジである。しかし、実際のところ、インターネットのトポロジは、地理的あるいは物理的な制約が大きい。地域の接続拠点や国、大陸のような物理的な範囲のインターネットのトポロジ構造の変化を把握するためには、地理情報を含んだトポロジの把握が必要である。地域性を調べるためには、どの AS とどの AS が直接繋がっているかに加えて、どこで繋がっているかという地理情報が重要となる。

本研究は、インターネットのグローバルなトポロジである AS トポロジに関し、特にアジアといった地域ごとのトポロジを推測する手法の確立を目的とする。このようなトポロジデータは、特定の地域における AS トポロジの構造が解析可能になるだけでなく、地域ごとの AS トポロジデータを用いた次世代のネットワークアーキテクチャの検討に用いられる可能性がある。例えば、アメリカやイギリスといったインターネットの接続が集中する地域だけでなく、アジアなどのインターネット発展途上の地域の AS トポロジ構造を解析することで、地域ごとのインターネットの実態が把握可能になる。

本論文では、研究の第一歩として、多地点から計測された traceroute データを用いた大陸レベルの AS トポロジの計測手法を検討した。大陸は、アフリカ、ア

^{†1} 慶應義塾大学 政策・メディア研究科
Keio University, Graduate School of Media and Governance

^{†2} IIJ
IIJ

^{†3} 慶應義塾大学 環境情報学部
Keio University, Faculty of Environment and Information Studies

アジア、ヨーロッパ、オセアニア、アメリカである。さらに、アメリカは、タイムゾーンが異なる4つの地域を分割することで、合計8地域のASトポロジを解析した。アメリカを分割することで、地続きの地域を分割したASトポロジ解析手法を検討する。また、traceroute データは、CAIDA の Skitter プロジェクト³⁾ が計測したデータを用いた。本手法は、traceroute データを基に直接接続されたAS間の情報を抽出し、AS間の遅延情報や接続拠点の地理情報を用いて、直接接続されたAS間の地理情報を推測する。そして、地域ごとにAS間の接続をクラスタリングすることで、大陸レベルのASトポロジ構造を明らかにする。

本手法を用いて、アメリカ、アフリカ、ヨーロッパ、アジア、オセアニアの大陸ごとにおけるASトポロジの構造を解析して比較した。ASトポロジ構造の比較には、AS間の接続数を用いた補累積分布関数と Skitter プロジェクトの AS Core Map⁴⁾ を用いた。補累積分布関数による解析では、大陸ごとにおけるASトポロジの出次数による次数分布がべき則に従う共通点があった。また、AS Core Map では、それぞれの大陸からみたAS間の接続を確認でき、その地域におけるTier-1 ASの役割の違いなどの特色が明らかになった。

また、地域ごとのASトポロジ構造を比較するには、現状の traceroute データの観測点が不足している課題が明らかになった。Skitter の観測点のみでは、特にアフリカやオセアニアのトポロジデータが不足している。今後、地域の範囲をより細かくし、国ごと、都市ごとのASトポロジの解析には、本手法の検討とさらなる計測対象の地域におけるトポロジデータが必要である。

第2章では、本研究に関係する既存のASトポロジの計測手法を示す。第3章では、大陸ごとのASトポロジを推測する手法を提案する。第4章では、本提案手法で推測した大陸ごとのASトポロジの解析結果を示す。第5章では、第4章までの結果を基に、大陸ごとのASトポロジを比較し、推測手法について考察を述べる。第6章では、現在の研究活動と今後の課題について述べる。最後に、第7章では、本論文をまとめる。

2. 関連研究

インターネットトポロジは、インターネットの構造把握や次世代のインターネットアーキテクチャ検討の基礎データとして、多くの研究がされてきた⁵⁾⁻⁷⁾。グローバルなインターネットトポロジであるASトポロジの解析には、traceroute、BGPの経路情報、WHOISを用

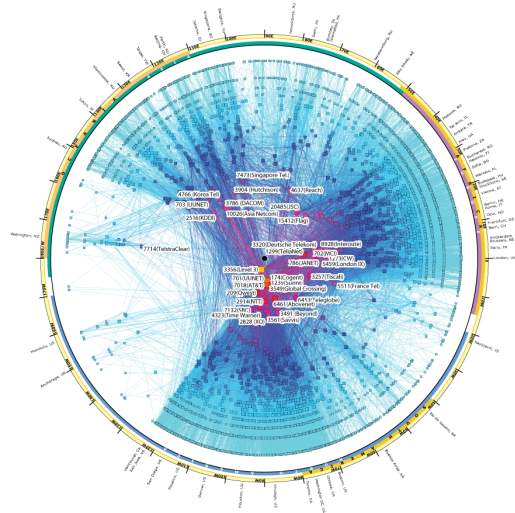


図1 CAIDA: IPv4 AS Core January 2008

いた手法がある⁸⁾。Skitter プロジェクトでは、traceroute を基にした Scamper ツール⁹⁾ を用いて、インターネット全体のトポロジデータを収集、ASトポロジを解析し、可視化を行っている。traceroute と BGP の経路情報を組み合わせることで、ホップごとの IP アドレスが所属する AS を明らかになり、AS間の接続がわかる。多地点から複数のノードに対して Scamper を実行することで、インターネット全体を対象に、そのASトポロジを推測している。

AS Core Map は、CAIDA の Skitter プロジェクトによるASトポロジの可視化手法である。図1は、CAIDA の公開している2008年度のAS Core Mapである。Skitter プロジェクトで計測したパス情報を基に、それぞれのASを拠点の地理情報と出次数を用いて可視化している。出次数とは、AS間の接続における出て行くリンクの数である。グラフでは、それぞれのノードがASを表し、グラフの中心を基点にし、ASの拠点の経度を角度、出次数を半径の位置情報で表される。経度は、WHOISに登録されているASの拠点の住所から求める。AS Core Mapでは、それぞれのASが描かれる角度に変換される。また、中心からの距離は、式(1)で算出する。尤も出次数が多いASを中心近くに配置し、そのASの出次数を基準にそれぞれのASの配置を決定する。出次数が多いASを円の中心に配置することで、インターネットのコアになっているASが把握可能になる。

$$radius = 1 - \log \left(\frac{outdegree(AS) + 1}{max.outdegree + 1} \right) \quad (1)$$

Skitter は、AS トポロジの対象がインターネット全体であるため、物理的な範囲内の AS トポロジの把握が困難である。本研究は、Skitter で計測された traceroute データを用いて、物理的な範囲ごとの AS トポロジを対象とした計測手法を検討する。

3. 大陸ごとの AS トポロジの推測手法

本章では、大陸ごとの AS トポロジを推測する手法を検討する。本手法は、多地点から計測した traceroute データを解析することで、AS 間の接続を抽出し、地域ごとの AS 間の接続をクラスタリングする。クラスタの地理情報を推測することで、地域ごとの AS トポロジを推測する。大陸ごとの AS トポロジのクラスタリング手法を述べる。

- (1) AS 間の接続である IP アドレスのペアを抽出し、片方の IP アドレスが共通する AS 間の接続なら同じ場所にあると推測し、クラスタリングする。
- (2) (1) だけでは、広域に渡るレイヤ 2 ネットワークや MPLS での接続により、本来異なる場所にあるクラスタが結合される問題がある。そこで、RTT の差分による閾値を用いることで、このようなクラスタの結合を排除する。
- (3) (1) だけでは、同じ場所の AS 間の接続でも共通する IP アドレスがないために別クラスタになる可能性がある。そこで、ランドマークを用いることで、そのようなクラスタを結合する。同時にクラスタの地理情報の識別をおこなう。

以後の節では、それぞれの手法を述べる。

3.1 場所を範囲とした AS トポロジの推測

本手法は、IP アドレスを基に AS 間の接続をクラスタリングすることで、同一の場所を範囲とした AS トポロジを推測する。本節では、traceroute データに対する考察と場所を範囲とした AS トポロジの推測手法を述べる。

AS トポロジは、BGP の経路情報や WHOIS によるデータを用いることで解析できる。しかし、BGP の経路情報や WHOIS のデータのみでは、AS 間が接続されている地理情報を推測する手がかりが少ない。本手法では、第 2 章で示した既存の AS トポロジの計測と同様に、多地点から計測された traceroute データを用いて、AS 間の接続にあたる IP アドレスのペアを抽出する。traceroute データを用いることで、AS 間接続の情報だけでなく、AS 間接続に関連づけられた RTT や BGP ルータの IP アドレスが得られる。本手法では、これらのデータを手がかりに地理情報を推測

する。

traceroute データを用いた場所を範囲とした AS トポロジの推測手法を述べる。はじめに、traceroute データから AS 間の接続を解析する。解析には、すべての経路を持つ BGP ルータから BGP の経路情報を取得し、そのデータを基に作成した AS 番号とプレフィックスの対応表を用いる。作成した対応表を用いて、traceroute データのホップごとの IP アドレスが所属する AS 番号を調べる。traceroute データから AS 番号を横断するホップ間の IP アドレスのペアを抽出することで、AS 間の接続を発見する。

まず、同一の場所に存在するルータ間の AS 間の接続に着目する。共通の IP アドレスを持つ AS 間の接続をクラスタリングしていくことで、近くの AS 間の接続をクラスタリングする。図 2 は、共通する IP アドレスを用いたクラスタリング手法を表す。図中 bc, bd, be は、AS 間の接続を表す。これらの AS 間の接続は、b ルータの共通する IP アドレスを含む。同じルータの IP アドレスを持つことから、bc, bd, be は、同じ地域で接続されている AS 境界と推測し、同じ大陸内の AS トポロジデータとしてクラスタリングする。

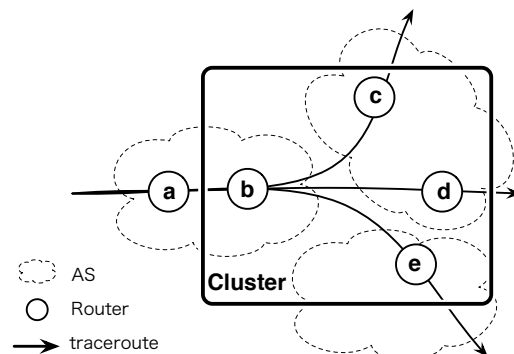


図 2 共通する IP アドレスを用いたクラスタリング手法

3.2 RTT の閾値によるクラスタ結合の排除

抽出した AS 間の接続は、接続された情報のみを示すため、必ずしも同一の場所で直接接続されていない。traceroute のパス情報のみでは、遠隔地を結ぶ ISP の L2vlan や MPLS (Multi-Protocol Label Switching) 網を中継した AS 間の接続を発見できない。これらの AS 間の接続を除外しない限り、本来異なる場所にあるクラスタ同士が結合する問題がある。

地域に閉じた AS トポロジを推測するためには、地域を横断して接続される AS 間の接続を発見し、排除する必要がある。そこで、AS 間の接続の IP アドレス

に注目し、ペア間の *RTT* (*Round Trip Time*) を用いる。*RTT* は、計測元ノードから対象のノードまでの往復遅延時間を示す。そこで、*AS* 間の接続の *IP* アドレス間の *RTT* の差分を用いて、*AS* 間接続の物理的な距離を推測する。閾値以上に距離が離れた *AS* 間の接続を排除することで、同じ地域で接続される *AS* 間の接続を推測する。

図 3 は、*RTT* の閾値を考慮したクラスタリング手法を表す。図中 *bc*, *bd*, *be* は、*AS* 間の接続を表す。それらの *AS* 間の接続は、*b* ルータの共通する *IP* アドレスを含む。しかし、*bc* 間の *RTT* の差分は、*200ms* を超えている。*RTT* の閾値を超えた *AS* 間の接続はクラスタから除外する。そこで、*bc* を除く、*bd*, *be* が、同じ地域で接続されている *AS* 境界と推測する。

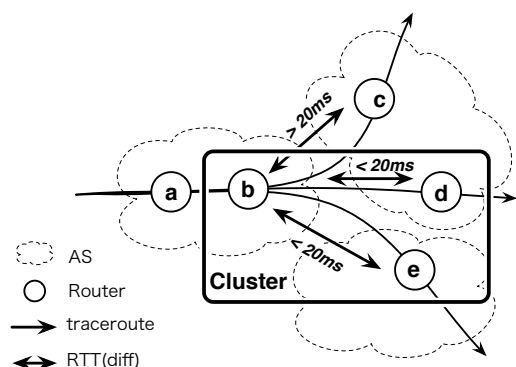


図 3 *RTT* の閾値を考慮したクラスタリング手法

3.3 ランドマークによるクラスタの地理情報の識別

前節の *RTT* の閾値を考慮したクラスタリング手法では、地域間が密集して *RTT* の差分が低いヨーロッパの各国ようなクラスタを分割できない。また、同じ地域のクラスタにも関わらず、同じ *IP* アドレスが含まれないために、結合できなかったクラスタをつなげる別のクラスタリング手法が必要である。

そこで、地理情報を推測できる *IP* アドレスをランドマークと定義し、それをを用いてクラスタリングする。ランドマークを用いることで、同じ地理情報を持つクラスタを結合する。また、異なる地理情報を持つ *AS* 間の接続を分割する。地理情報によるクラスタの分割により、ヨーロッパのような密集している地域でもクラスタリング可能になる。

同時に、クラスタの地理情報は、ランドマークの地理情報で識別する。それぞれのクラスタは、同じ大陸の *AS* 間の接続情報がクラスタリングされている。そこで、クラスタに含まれるランドマークの地理情報が、

クラスタ全体の地理情報と推測できる。

ランドマークの推測には、*IX* の持つプレフィックス情報とルータのホスト名を用いる。多くの地域には、それぞれの地域の接続拠点である *IX* が存在する。*Packet Clearing House*¹⁰⁾ や *PeeringDB*¹¹⁾ などでは、それぞれの *IX* の持つプレフィックスと *IX* の存在する地理情報を公開している。これらの公開されている情報を元に *IX* の地理情報とプレフィックスの対応表を作成する。*IX* のプレフィックスにマッチした *AS* 境界の *IP* アドレスは、その *AS* 間の接続の地理情報が推測できる。また、いくつかの *AS* では、自らの組織の持つルータにルータが存在する地理情報を推測できるようにホスト名をつけている。例えば、*NTT Communications (AS2914)* に所属する *xe-1-3-0.r21.tokyjp01.jp.bb.gin.ntt.net* のホスト名を持つルータは、ホスト名の *tokyjp01* の部分から、*Tokyo, JP* に存在するルータと推測できる。

Washington 大学の *Scriptroute* プロジェクト¹²⁾ は、ルータのホスト名から地理情報を推測する *undns* ツールを公開している¹³⁾。*undns* は、2008 年 4 月現在、271 の *AS* について所属するルータの地理情報が推測できる。本提案手法では、*undns* を用いて、*AS* 間の接続すべての *IP* アドレスの地理情報を推測し、*AS* 間の接続のクラスタリングを行う。

4. 大陸ごとの *AS* トポロジの解析

本章では、大陸ごとの *AS* トポロジの解析に用いた計測データと解析結果を示す。

4.1 利用データ

本節は、本手法の検証に用いた解析データを示す。**traceroute データ** 第 2 章で述べた通り、グローバルな *AS* トポロジの解析には、多地点で計測された *traceroute* データが必要である。本研究では、*CAIDA* の *Skitter* プロジェクトが収集しているパス情報を用いて解析した。*Skitter* では、2008 年 3 月現在、世界 11 カ国、16 の計測機器から広範囲にインターネット上のパス情報を収集している。計測機器は、アメリカに 6 拠点、イギリス、スペイン、韓国、アイルランド、フィンランド、フィリピン、日本、オーストラリア、カナダ、モロッコにそれぞれ 1 拠点ずつある。

表 1 は、*Skitter* で計測されたデータの詳細を表す。本論文の解析には、2008 年 3 月 14 日から 2008 年 3 月 19 日まで *Skitter* で計測されたパス情報を用いた。データフォーマットは、*scamper* フォーマット (*warts*) で保存されている。計測されたパス情報は、14,032,566 エントリあった。

表 1 Skitter データの詳細

データ形式	scamper フォーマット (warts)
パスエントリ数	14,032,566
計測拠点数	16
計測期間	2008/03/14 - 2008/03/19

AS 番号とプレフィックスの対応表 第 3.1 節では, *traceroute* データの各ホップに AS 番号をつけることで, AS の境界で用いられる IP アドレスのペアを発見した. AS のプレフィックスと AS 番号の対応表には, *Routeviews*¹⁴⁾ が公開している BGP の経路表を用いた. BGP の経路表から経路ごとのプレフィックスと対応するオリジンの AS 番号を抽出し, 対応表を作成する. *Routeviews* が公開している BGP の経路表には, AS のプレフィックス数が 275,636 エントリあった.

IX のプレフィックスと地理情報の対応表 第 3.3 節では, 共通する IP アドレスを持たない AS 間の接続をクラスタリングするために, ランドマークを用いた. ランドマークは, IX の持つプレフィックスとその地理情報の対応表, ルータの IP アドレスと推測した地理情報との対応表を用いた. IX の情報には, *Packet Clearing House* が公開している *exchange-points* のデータを用いた.

表 2 は, 解析したランドマーク数を示す. IX の情報は, 228 拠点分のプレフィックスと地理情報を抽出した. *Undns* で推測できたルータの IP アドレス数は, 78,192 エントリあった. これらの抽出した IP アドレスは, それぞれ物理的に存在する大陸名と対応づけた.

表 2 ランドマークデータの詳細

ランドマーク数 (IX 拠点数)	228
ランドマーク数 (<i>Undns</i>)	86,612

4.2 解析結果

図 4 は, 本解析で用いた *traceroute* データに含まれるすべての AS 間接続の RTT の差分を示している. -20ms から 300ms までの RTT の値を 10ms ごとに区切り, それぞれの区間に含まれる RTT の差分数を表す. 本データより, インターネットにおける AS 間接続の 6 割が 10ms 以下で接続されていることが推測できる. また, RTT の差分が 200ms を超える AS 間の接続も確認できることから, RTT による閾値を用いることで, 大陸を横断する AS 間の接続を排除する必要があることが考えられる.

RTT の閾値は, 大陸内の国間の AS 間接続を排除

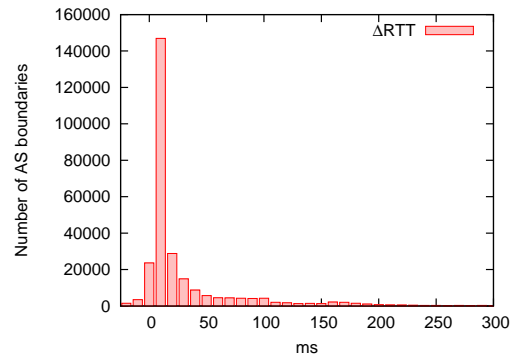


図 4 10ms ごとに含まれる AS 間接続の RTT の差分数

しないように設定する必要がある. 解析対象の光ファイバの敷設を考え, RTT の最大値を考慮しなければならない. 本論文では, RTT による閾値を 200ms に設定した. 閾値は, アジアの光ファイバは, 大陸の海岸沿いを南回りに敷設されていることを考慮し, 日本からヨーロッパまでの RTT が 200ms を超えることに注目した. 具体的な閾値については, 今後も検討していく必要がある.

表 3 は, 本手法で解析した大陸ごとのクラスタを表す. アメリカのみ大陸ではなくタイムゾーンごとの EST, MST, CST, PST の地域に分割して解析した. 大陸内で接続されている AS 間の接続の判別は, AS 間の接続で用いられる IP アドレス間の RTT の差分を用いて推測する. 本論文では, *traceroute* データから AS 間の接続を抽出する際, RTT の差分が 200ms を超えるエントリを排除している. 閾値を超える AS 境界は, 地域を横断して接続されていると推測する.

表 3 AS 間接続のクラスタ

Area	AS Boundaries	Uniq ASN
Europe	6,112	3,182
US-EST	2,208	1,287
US-PST	1,816	892
US-CST	1,286	777
Asia	923	583
Oceania	395	248
US-MST	270	214
Africa	40	38

5. 大陸ごとの AS トポロジの比較

本論文では, 既存の手法では推測が困難だった大陸ごとの AS トポロジを推測する手法について提案し, 解析をおこなった. 本章では, 解析した大陸ごとの AS トポロジを検証し, 考察を述べる. 本手法で推測した AS トポロジのデータを用いて, 大陸ごとに AS トポ

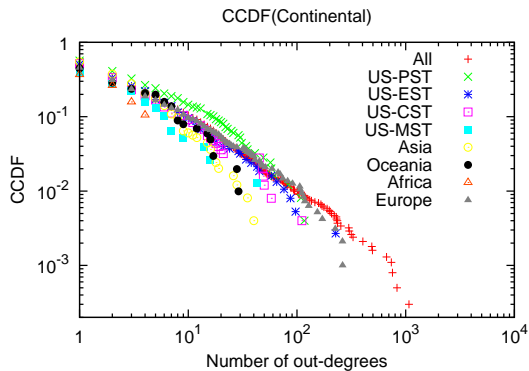


図 5 出次数による補累積分布関数を用いた大陸ごとの AS トポロジを比較

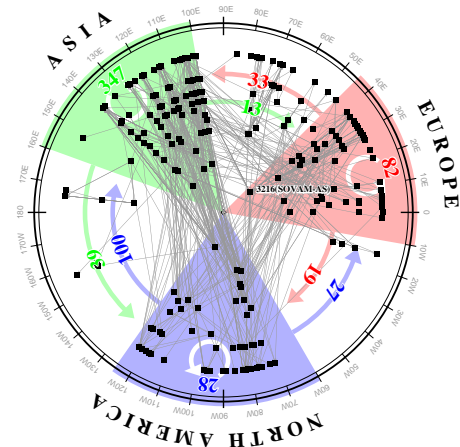


図 7 AS Core Map(アジア)

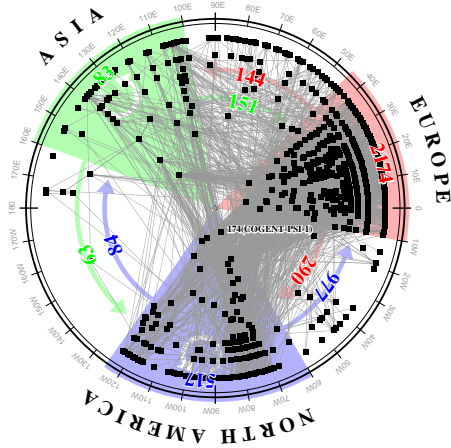


図 6 AS Core Map(ヨーロッパ)

ロジを比較する。

5.1 補累積分布関数による AS トポロジの比較

図 5 は、大陸ごとの AS トポロジに関して、AS 間の接続の出次数を用いた補累積分布 (CCDF) を表す。図中の All は、全大陸を含めた AS トポロジの出次数を表す。大陸ごとの AS トポロジが、それぞれべき則に従う共通点が見られる。

5.2 AS Core Map による AS トポロジの比較

大陸ごとの AS トポロジデータを AS Core Map を用いて可視化し、比較する。図中の矢印は、アメリカ、アジア、ヨーロッパの経度における接続数を表している。それぞれの地域の AS の組織がその他の地域に対して進出している数を表示している。

図 6 と図 7 は、本手法を用いて推測したヨーロッパとアジアの AS トポロジを表す。アジアの AS トポロ

ジは、ヨーロッパの AS トポロジと比較して、アメリカの Tier-1 AS などの大手 AS が少ない。

アジアまでネットワークを延ばすような、アメリカの AS のアジアへの進出は、ほとんど観測できなかった。また、経度 40 度のロシア (モスクワ) の AS や経度 175 度に位置するニュージーランドの AS が多く、クラスタリングがうまくできていない懸念はあるが、ロシアの AS がアジアに力をいれている可能性がある。

ヨーロッパでは、イギリスやフランスに住所を持つ AS だけでなく、東ヨーロッパの AS の接続数も多いことがわかる。経度約 105 度のシンガポールや経度 117 度の中国 (北京) の AS の進出が観測された。

図 8 と図 9 は、それぞれアメリカの東海岸周辺と西海岸周辺の AS トポロジを表す。EST 地域では、アジアの AS の進出があまり観測できないが、PST エリアでは、多くのアジアの AS が存在する。また、EST 地域では、ヨーロッパの AS が多く進出しており、PST 地域では少ないことがわかる。

5.3 まとめ

大陸ごとの AS トポロジによる比較では、地域に着目することで異なった特色がみえた。それぞれの地域から AS トポロジをみることで、その地域内で接続が集中する拠点がわかる。アメリカの東と西でも AS トポロジが大きく異なっていた。しかし、アフリカの AS トポロジでは、AS 間の接続数が、40 しか観測できなかった。解析の基になる traceroute データのみでは、アフリカやその他の地域でデータ数が足りない可能性がある。

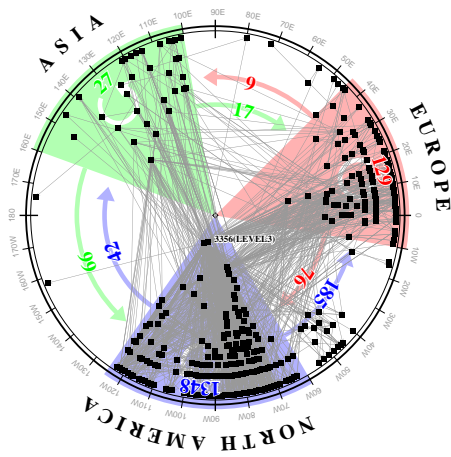


図 8 AS Core Map(アメリカ EST)

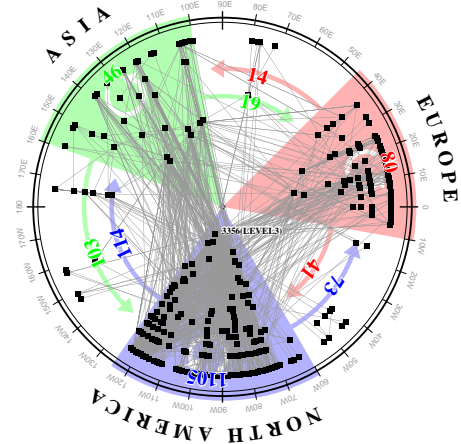


図 9 AS Core Map(アメリカ PST)

6. 今後の課題

本章では、今後の研究課題について示す。

6.1 traceroute データの確保

大陸ごとの AS トポロジを比較したことで、特にアフリカなどの地域での AS 間の接続のデータ数が足りていないことがわかった。本手法は、traceroute データから地域ごとの AS トポロジが解析可能である。異なるプロジェクトで計測した traceroute データを加えることで足りていないデータ数を補える可能性がある。今後の課題として、別のプロジェクトで計測された traceroute データの利用も検討していく。

6.2 AS トポロジの推測手法の検討

本論文では、大陸ごとの AS トポロジを対象に手法を検討している。今後は、RTT の差分による閾値の改善や、ランドマークの導入により、国レベル、都市レベルの AS トポロジを推測する手法を検討していく。

また、本手法では、ホップ間の RTT の値による閾値は、200ms 固定して用いていた。しかし、島国の日本では、閾値を高くし、ヨーロッパでは、閾値を低くするなどの地域依存のアルゴリズムの検討が考えられる。

6.3 地域間の AS トポロジの検証

本論文では、地域に閉じた AS トポロジについて比較と検証をおこなった。現在の手法では、RTT の差分による閾値の導入により、地域を横断する AS 境界のデータを排除している。今後の課題は、現在排除している地域間の AS 境界も用いることで、地域間の AS 構造の地域性も明らかにすることである。

7. 結 論

本論文では、今までインターネット全体のみを対象に解析されてきた AS トポロジに関して、地域レベルの AS トポロジの推測する手法を提案し、実際の traceroute データを用いて大陸ごとの AS トポロジの推測をおこなった。解析結果では、ある程度の AS トポロジ構造の地域性を確認できた。しかし、提案手法には、改善の余地が多くあり、手法の正当性が確認できていない。また、現在の手法は、大陸ごとの AS トポロジを対象としているが、将来的には、国、都市ごとの AS トポロジを解析できるように研究を続けていく。本研究により、それぞれの地域から AS トポロジを把握し、地域間における AS トポロジの比較が可能になる。

参 考 文 献

- 1) Y.Rekhter and T.Li. A border gateway protocol 4 (BGP-4). RFC 1771, IETF, March 1995.
- 2) traceroute. <http://www.traceroute.org/#source%20code>.
- 3) K. Claffy, Tracie E. Monk, and Daniel McRobb. Internet tomography. Nature, January 1999.
- 4) CAIDA. Cvisualizing internet topology at a macroscopic scale. http://www.caida.org/analysis/topology/as_core_network/.
- 5) Michalis Faloutsos, Petros Faloutsos, and Christos Faloutsos. On power-law relationships of the internet topology. In SIGCOMM '99: Proceedings of the conference on Applications,

- technologies, architectures, and protocols for computer communication, pages 251–262, New York, NY, USA, 1999. ACM.
- 6) Sharad Jaiswal, Arnold L. Rosenberg, and Don Towsley. *Comparing the structure of power-law graphs and the internet as graph*. In ICNP '04: Proceedings of the Network Protocols, 12th IEEE International Conference, pages 294–303, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
 - 7) Shi Zhou and Raul J. Mondragon. *Accurately modeling the internet topology, 2004*.
 - 8) Priya Mahadevan, Dmitri Krioukov, Marina Fomenkov, Xenofontas Dimitropoulos, kc claffy, and Amin Vahdat. *The internet as-level topology: three data sources and one definitive metric*. SIGCOMM Comput. Commun. Rev., 36(1):17–26, 2006.
 - 9) Scamper. <http://www.wand.net.nz/scamper/>.
 - 10) Pch internet exchange directory. <http://www.pch.net/ixpdir/Main.pl>.
 - 11) Peeringdb. <https://www.peeringdb.com/>.
 - 12) N. Spring, D. Wetherall, and T. Anderson. *Scriptroute: A public internet measurement facility*. 4th USENIX Symposium on Internet Technologies and Systems, 2002.
 - 13) Undns. <http://www.scriptroute.org/source/>.
 - 14) University of oregon routeviews project. <http://www.routeviews.org/>.
-