卒業論文　　2006 年度 (平成 18 年度)

地理情報を含む
地域レベルの AS トポロジに関する研究

慶應義塾大学 環境情報学部

空閑 洋平

指導教員

慶應義塾大学 環境情報学部

村井　純

徳田　英幸

中村　修

楠本　博之

高汐　一紀

湧川　隆次

卒業論文　　2006 年度（平成 18 年度）

地理情報を含む地域レベルの AS トポロジに関する研究

論文要旨

インターネットは, 各国の重要な情報交流のためのインフラストラクチャである. そのため, 国や地域単位でネットワークの現状を把握することが必要となっている. しかし, 既存のトポロジ計測手法では, 2 つの理由から地理的な位置情報を考慮したグローバルなインターネットトポロジ計測が困難である. 1 点目は, インターネットが組織毎に自律分散的に管理されているため, ネットワーク全体のトポロジ情報の取得が困難な点である. 2 点目は, インターネットのトポロジと物理的な位置が対応付けられていない点である.

本論文では, 現在のインターネットにおける AS トポロジの性質を考慮し, 地理的に近い IP アドレスをクラスタリングすることで地理情報を考慮したインターネットのトポロジ推測手法を提案する. さらに, traceroute によって計測した経路情報と RTT, インターネットエクスチェンジの IP アドレスを用いることで, 地理情報と対応付けた AS トポロジの推測が可能なことを示す. 地理情報を考慮したトポロジデータを解析することで, 各 AS 毎の地理的な位置を明らかにする. また, AS ごとに公開しているトポロジ情報と本手法によって得られたトポロジ情報を比較することで, 提案手法の正当性を評価する.

本研究により, 地域単位によるインターネットトポロジが推測可能となり, 地域レベルでインターネットの現状を把握できるようになる.

キーワード

1. AS トポロジ, 2. トポロジ計測, 3. IP ジオロケーション

慶應義塾大学 環境情報学部

空閑 洋平

Abstract of Bachelor's Thesis

Academic Year 2006

A Research on Measuring Geographic Location Information Embedded Regional AS Topology

Summary:

Internet is a important infrastructure for countries to exchange their information. It is necessary to understand the current status of the network in national or regional level. However, it is difficult to measure the global internet topology with consideration to the geographic location information using existing topology measurement methods, for following two reasons. First, it is difficult to retrieve topology information of the entire network since each organization autonomously administrates their network. Second, the matching information between the internet topology and the physical location is not given.

In this paper, based on the properties of the AS topology in the current Internet, the method to estimate the internet topology is proposed. The method considers geographic information through clustering of IP addresses that are geographically close. This paper shows that it is possible to estimate AS topology that corresponds to the geographic information by utilizing the path and RTT information gained by traceroute, and the range of IP address in the Internet Exchanges (IXs). By analyzing the topology data that considers geographic information, the geographic location of each AS is revealed. The validity of this method is evaluated by comparing the topology information published by each AS and gained through our method.

This research enables the estimation of internet topology and understanding of the current Internet, in the regional level.

Keywords:

1. AS topology, 2. Topology measurement, 3. IP Geolocation

Keio University, Faculty of Environmental Information

Yohei Kuga

目次

第 1 章　序論 1

1.1　本研究の背景 1

1.2　本研究の目的 3

1.3　本論文の構成 3

第 2 章　関連研究 5

2.1　インターネットのトポロジ計測技術 5

2.1.1　traceroute を用いたルータレベルのトポロジ計測 5

2.1.2　BGP 情報を用いた AS レベルのトポロジ計測 7

2.2　地理情報の推測技術 8

2.2.1　逆引き DNS を用いた地理情報の推測 9

2.2.2　遅延情報を用いた地理情報の推測 10

2.2.3　ランドマークを用いた地理情報の推測 10

2.3　まとめ 11

第 3 章　提案手法 12

3.1　想定する環境 12

3.1.1　地域の接続拠点における AS トポロジ 12

3.1.2　地理情報の推測 13

3.2　地理情報を考慮した AS レベルのインターネットのトポロジ計測手法の提案 13

3.3　提案手法を利用した解析結果 15

3.4　まとめ 16

第 4 章　実験 20

4.1　解析データ 21

4.2　AS-Boundary のクラスタリングを用いた AS トポロジの推測手法 22

4.2.1　実験の目的 22

4.2.2 提案手法 22
4.2.3 結果 24
4.2.4 考察 25
4.3 遅延情報を用いた AS トポロジの推測手法 26
4.3.1 実験の目的 26
4.3.2 提案手法 26
4.3.3 結果 27
4.3.4 考察 27
4.4 IX 情報を考慮した AS トポロジの推測手法の検討 28
4.4.1 実験の目的 29
4.4.2 提案手法 29
4.4.3 結果 30
4.4.4 考察 30

第 5 章 評価 33
5.1 クラスタリング手法の検証 33
5.2 AS-Boundary クラスタにおける精度の評価 34

第 6 章 結論 38
6.1 まとめ 38
6.2 今後の課題 38

図目次

1.1 CAIDA: IPv4 Internet Topology Map 2

2.1 ホスト cpu から www.caida.org に対する traceroute 6
2.2 BGPlay の出力結果 8
2.3 Undns: WIDE(AS 2500) のルールセット 10

3.1 地域の接続拠点を中心とした AS トポロジ 13
3.2 本提案手法の概要図 15
3.3 AS-Boundary クラスタリングモジュール 16
3.4 CAIDA: AS-Rank データ (2006/07/31) 17

4.1 IP アドレスのクラスタリング手法 24
4.2 AS Boundary のクラスタと Undns による出力結果 25
4.3 RTT を考慮した地域ハブにおける IP アドレスのクラスタリング手法 27
4.4 RTT 情報を追加した AS Boundary のクラスタの出力結果 28
4.5 RTT25ms の閾値によるクラスタ内に含まれる都市 30
4.6 主要 IX の Prefix リスト 31
4.7 主要 IX 情報を考慮した AS Boundary のクラスタ 32

5.1 クラスタ ID 7508 の詳細 35
5.2 クラスタ検出の精度グラフ 36

表目次

3.1 AS-Rank Top 1-50 AS-Location 図 (2006/07) 18
3.2 AS-Rank Top 51-100 AS-Location 図 (2006/07) 19

4.1 skitter データ形式 21
4.2 skitter データ詳細 22
4.3 skitter 観測拠点 23
4.4 RTT の閾値を考慮した AS Boundary のクラスタサイズ 29

5.1 サイズが大きい AS-Boundary のクラスタ 34
5.2 ランダムに 10 個抽出した AS-Location 図 (2006/07) 37

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景

インターネットは, 世界各国を接続し, 情報交流のためのインフラストラクチャとなった. 映像伝送やインターネット電話といった様々なコミュニケーション技術が発展することで, 既存のテレビ回線網や電話回線網の代わりにインターネットが利用されている. 海底ケーブルの整備に従い, インターネットのインフラストラクチャは, 低遅延でコスト効率のよい伝送網に発展した. また, さらなる伝送品質の向上のため, インターネットのトポロジは, アメリカを中心とした構造から, 接続が集中する都市を相互接続する構造へと分散化が進んでいる.

インターネットは, 相互に接続する AS(Autonomous System) によって形成される. AS は, 商用の ISP(Internet Services Provider) や大学, 企業, 研究機関といった単一の経路制御ポリシを共有するネットワークである. 図 1.1 は, CAIDA[1] が公開している 2005 年のインターネットのトポロジ図である. より多く他の AS と接続している AS は, 図中のより中心に描かれる. また, 円周は, 各都市の経度を表す. 2005 年現在のインターネットは, アメリカだけでなく, アジアやヨーロッパ地域でも多くのピアリングされる. アジア地域では, 日本 (Tokyo, JP) やシンガポール (Singapore, SG) にピアリングポイントが多く存在する. ヨーロッパ地域では, ドイツ (Berlin, DE) やイギリス (London, UK), フランス (Paris, FR) といった, 地域内における AS が相互に接続されている. それにより, 地域内でインターネット接続が集中する拠点が発生し, 地域のトポロジが密に形成されていることがわかる. インターネットにおける低遅延でコスト効率のよい伝送の実現には, 接続の集中する地域拠点の構築が極めて重要となる.

しかし, 地域内のトラフィックや接続の集中する地域拠点の現状は, 十分に把握されていない. 例えば, アジア各国に展開する企業にとってはアジアの主要拠点を網羅するような ISP が必要であるが, 地域毎に ISP を選ぶための十分な情報は提供されていない. また, 日

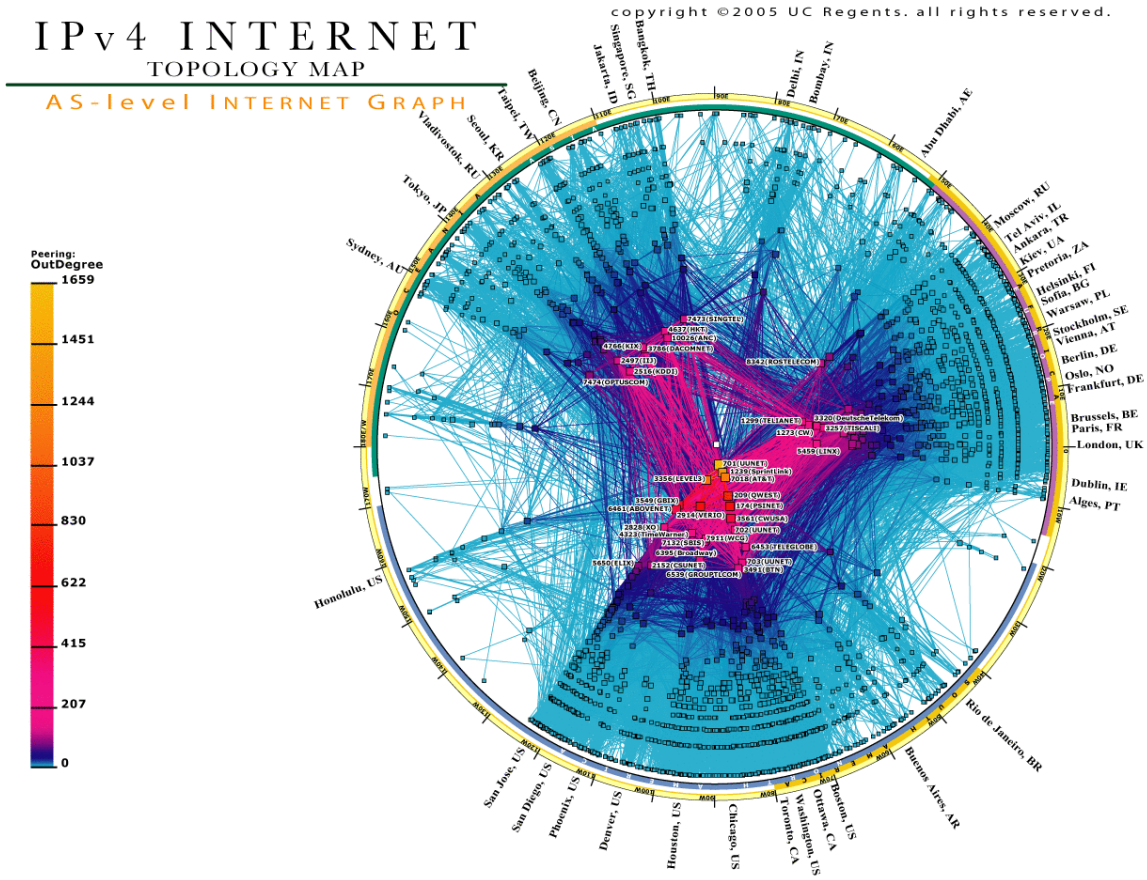

図 1.1: CAIDA: IPv4 Internet Topology Map

本では, インターネットが重要な情報インフラストラクチャになったことで, 地域内の情報流通量の拡大を目指す政策が推進されている [2]. 国際的な協調組織や ISP は, 地域性を考慮してインターネットのトポロジを把握する必要がある. しかし, 現在のインターネットでは, 地域毎におけるインターネットのトポロジの把握が非常に困難である.

地理情報を考慮したインターネットのトポロジを把握できない主な理由は 2 点ある. 1 点目は, インターネットの物理的な機器とその位置が対応付けられていない点である. インターネットは, IP アドレスや AS 番号といったネットワーク上の識別子を用いて通信する. 物理的な機器の位置情報は, IP アドレスや AS 毎の識別子である AS 番号から判別できない. 2 点目は, AS がそれぞれ異なる経路制御ポリシを持って, 自律的に分散して管理, 運用されている点である. 現在の AS 間における経路制御では, BGP(Border Gateway Protocol)[3] が用いられる. AS 内部の経路情報や別 AS の経路情報は, AS の境界にある BGP ルータ間で交換される. AS は, 原則としてインターネットのフルルートを持つ別 AS からトランジットを購入することで, インターネット全体と通信可能となる. 従って, グ

ローバルなインターネットは, AS 間のピアリングやトランジット, 相互に行なわれるトランジットで構成される. BGP は, 自らの AS 内の経路制御ポリシを公開せずに別 AS と経路情報の交換する. そのため, 特定の AS は, 別 AS 間におけるプライベートピアリングを知ることが困難である.

本節では, 地理情報を考慮したインターネットのトポロジ計測が困難なことを示した. 第 1 の理由は, インターネットの機器と地理情報の対応付けがされていない点である. そこで, インターネットと地理情報の対応付けは, 機器の情報から地理位置を推測する手法が必要となる. 第 2 の理由は, すべての AS のネットワークの情報を得ることが困難な点である. インターネットのトポロジ全体の把握は, 別ネットワークから特定のネットワークの情報を計測することでトポロジを推測する手法が必要となる.

1.2　本研究の目的

本研究は, インターネットのマクロなトポロジである AS トポロジに関し, 特にアジアなどの地域レベルでトポロジを推測する手法の確立を目的とする. 地理情報を考慮した AS トポロジを明らかにするためには, 別ネットワークから特定ネットワークの情報を調査することでトポロジを推測する必要がある. 本論文では, ネットワークの経路情報を調査するツールである traceroute を用い, インターネットのトポロジと地理情報の対応付けが可能なことを示す.

地理情報を考慮したインターネットのトポロジは, ユーザや企業が自分の国際トラフィックの要求に合った ISP を選択する指標を与える. また, ISP が POP(Point of Presence) の配置, ピアリング, トランジットの購入を戦略的に進めるための指標となる. 重点的に強化すべきインフラストラクチャが明らかになることで, 各国のインターネット推進政策へのインプットになる.

本研究では, 実際に計測した traceroute のデータを元に AS トポロジ計測手法を検討し, 実験と評価を行う.

1.3　本論文の構成

1.2 節で述べた通り, 本研究は, 地理情報を考慮したインターネットの AS レベルのトポロジ計測手法の検討に取り組む.

第 2 章において, 本研究に関連する既存研究を示す. インターネットのトポロジ計測手法と地理情報の推測手法をまとめる. それぞれ, 広域に渡るインターネットのトポロジ計測プロジェクトの目的と解析手法, インターネットと地理情報を対応づけるジオロケーション技術について述べる. 第 3 章では, 第 2 章で示したトポロジ計測手法とジオロケーショ

ン技術を拡張し, 地理情報を考慮した AS レベルのインターネットのトポロジ計測手法を提案する. また, 解析したデータを用いて, AS 毎に見た地域のトポロジデータを示す. 第 4 章では, 第 3 章で提案した計測手法の確立までに試行した予備実験を順に示す. AS の境界ルータの IP アドレスを用いることで, AS レベルのトポロジを計測する. 第 5 章では, 第 3 章で提案した AS トポロジの解析結果の正当性を評価する. 第 6 章では, 本研究の結論をまとめ, 最後に今後の研究課題を示す.

第 2 章

関連研究

本章では, 地理情報を考慮した AS トポロジを論じるために必要となる関連研究をまとめる. まず, 既存のインターネットのトポロジ計測技術について, ルータレベルと AS レベルのトポロジ計測に分類して示す. 次に, インターネットの性質を考慮することでネットワーク機器の地理情報を推測する技術についてまとめる.

2.1 インターネットのトポロジ計測技術

本節では, 本研究に関連する既存のインターネットのトポロジ計測手法を 2 つに分類して示す. 1 つは, traceroute データを用いたルータレベルのトポロジ計測手法である. 複数地点から計測した traceroute データを用いることで, AS を跨ぐ広域なトポロジを推測する. もう 1 つは, BGP データを用いた AS レベルのトポロジ計測手法である. BGP の経路表から AS パスを抽出し, 自らの AS から別 AS までの繋がりを解析する. また, 両手法を考慮した AS トポロジの解析手法についても論じる.

2.1.1 traceroute を用いたルータレベルのトポロジ計測

traceroute は, 自らのホストからあて先ホストまでのパケットの通過する経路を調査するツールである. traceroute は, ICMP(Internet Control Message Protocol)[4] パケットに含まれる IP ヘッダの TTL(Time To Live) を 1 から 1 ずつ増やしながら計測パケットを送信する. 送信された計測パケットにより, あて先ホストに到達する途中で経由するルータが順番に分かる. また, 送信する計測パケットに対する確認応答パケットが返信されるまでの時間である RTT(Round Trip Time) が計測できる.

図 2.1 にホスト cpu.sfc.wide.ad.jp から www.caida.org に対して計測した traceroute の出力結果を示す. 出力結果は, 順に TTL の値, ホスト名, IP アドレス, 3 つの試行した ICMP

```
cpu %> traceroute www.caida.org
traceroute to cider.caida.org (192.172.226.123), 64 hops max, 40 byte packets
 1 vlan4.rg-gate.sfc.wide.ad.jp(203.178.142.129) 0 ms 0 ms 0 ms
 2 ve-100.foundry1.fujisawa.wide.ad.jp(203.178.137.91) 0 ms 0 ms 0 ms
 3 ve-4.cisco2.notemachi.wide.ad.jp(203.178.138.243) 1 ms 1 ms 1 ms
 4 apan-jp.t-lex.net(203.178.133.141) 1 ms 1 ms 1 ms
 5 losa-tokyo-tp2.transpac2.net(192.203.116.145) 116 ms 116 ms 131 ms
 6 cenichpr-1-lo-jmb-702.lsanca.pacificwave.net(207.231.240.129) 117 ms 117 ms 118 ms
 7 riv-hpr--lax-hpr-10ge.cenic.net(137.164.25.5) 123 ms 123 ms 123 ms
 8 hpr-sdsc-sdsc2--riv-hpr-ge.cenic.net(137.164.27.54) 125 ms 125 ms 125 ms
 9 pinot.sdsc.edu(198.17.46.56) 126 ms 126 ms 125 ms
10 cider.caida.org(192.172.226.123) 126 ms 126 ms 126 ms
```

図 2.1: ホスト cpu から www.caida.org に対する traceroute

パケットの RTT を示す. また, RTT は, 小数点以下を切り捨てた値を表す. 出力の 3 行目は, ホスト cpu が, 0 ミリ秒以下の RTT の値で vlan4.rg-gate.sfc.wide.ad.jp に TTL の値 1 で ICMP パケットが到達したことを表す. traceroute を用いることで, ホスト cpu からあて先ホスト www.caida.org までの経路がわかる.

AS は, それぞれ異なる経路制御ポリシを持ち, 運用される. 通常, 自らの AS 内にあるホストから別 AS 内のトポロジを知ることができない. そこで, 既存の研究では, traceroute を複数の地点間で計測することで, 特定の AS 内のルータレベルのトポロジを計測している [5, 6, 7]. 特定の AS を横断するように traceroute データを収集し, 解析することでトポロジを推測する. そのため, 計測機器から実行した traceroute の経路上の AS しかトポロジを推測できない. より正確な広域に渡るトポロジを解析するためには, 世界各拠点の AS に多くの計測機器が必要となる.

Washington 大学の Rocketfuel[8, 9] は, 複数地点から計測した traceroute データを用い, 特定の ISP 内部のルータレベルのトポロジを推測している. 解析手法には, 3 つのパターンに分類した traceroute データを用いる. (1)traceroute をトポロジを明らかにしたい ISP を横断するホスト間で実行する. (2) 対象 ISP 内の計測ホストから traceroute を実行する. (3) 対象の ISP 内部のノードに対して traceroute を実行する. これらの分類した traceroute データを解析することで, ISP 内のネットワークを推測できることを示している. Rocketfuel の解析手法を用いることで, PoP のサブネットのサイズやエッジルータ, バックボーンルータとそのリンク数を明らかにできる.

CAIDA は, California 大学 San Diego Super Computer Center[10] を拠点としたプロジェクトである. グローバルなインターネットを対象にネットワークの特性を解析し, 解析ツールを開発している. CAIDA の skitter[11] は, 広域に渡るインターネットのトポロジ計

測システムである. システムを構成したサーバ間で, traceroute と同じ手法を用いて, 広域な traceroute データを収集する. 2006 年 7 月現在, アメリカを中心に世界 20 の拠点間で skitter のシステムを構築し, traceroute データを収集している. 収集したデータは, ネットワークの接続性の可視化やトポロジ変化の計測に利用される [12].

2.1.2　BGP 情報を用いた AS レベルのトポロジ計測

あて先 AS までの経路は, BGP ルータの経路情報を用いることでわかる. BGP の各経路エントリは, あて先 AS までに経由する AS 番号を表した AS パスの情報を含む. そこで, AS レベルのインターネットのトポロジは, フルルートを持つような多くの AS と接続性がある BGP ルータの経路情報を解析することで計測できる.

Oregon 大学 [13] の Route Views[14] では, 複数の AS と接続した経路を収集する BGP ルータを運用し, 経路情報を公開している. Route Views では, RIPE-NCC[15] が公開している BGPlay[16] を用いて, AS レベルのトポロジを視覚化している. 図 2.2 に BGPlay の出力を示す. BGPlay は, BGP の UPDATE メッセージを解析し, AS トポロジの変化を時間軸で確認できる. UPDATE メッセージは, BGP の経路を消去, または, 新規の経路を追加するために用いられる. 図中 AS 番号 3333 は, トポロジを確認したい対象 AS にあたる. 図中の左の時間軸を追うことで, AS トポロジの変化を確認できる.

しかし, 2 つの理由から BGP の経路情報を用いた AS レベルのトポロジ計測手法は, 広域に渡るインターネットのトポロジ解析に適さない. 1 つめは, ピアリングによる別 AS 間の接続を知ることが困難な点である. AS 間の接続には, 一定の回線品質の確保や接続性の冗長構成のために IX を経由したピアリングと別に, プライベートピアリングによる AS 間のピアリングが行なわれる. なので, 自らの BGP の経路情報のみでは, 他 AS 間の冗長経路やロードバランシングを知ることが困難となる. もう 1 つは, 必ずしも BGP の経路情報では, あて先ネットワークまでのトラフィックの流れがわからない点である. 複数の地域拠点で同一のあて先と AS ピアリングする場合, トラフィックをできるだけ早くあて先 AS まで運ぶ手法が用いられる. early exit や Hot-Potato と呼ばれる手法を用いることで, あて先 AS までの行きのトラフィックはピアリング先の AS を多く移動し, 帰りのトラフィックが自らの AS 内を多く移動する. それにより, トラフィックの流れが行き帰りで非対称な経路を通る. 単一の BGP ルータの経路情報のみでは, トラフィックの流れがわからない.

複数の BGP の経路情報を用いることで, AS レベルのインターネットのトポロジを推測できる. しかし, 前述したように, BGP の経路情報による AS トポロジは, 広域に渡るトポロジ計測に様々な制限がある. そこで, skitter は, traceroute データと BGP の経路情報を用いた AS レベルのインターネットのトポロジを推測している. フルルートを持つ BGP ルー

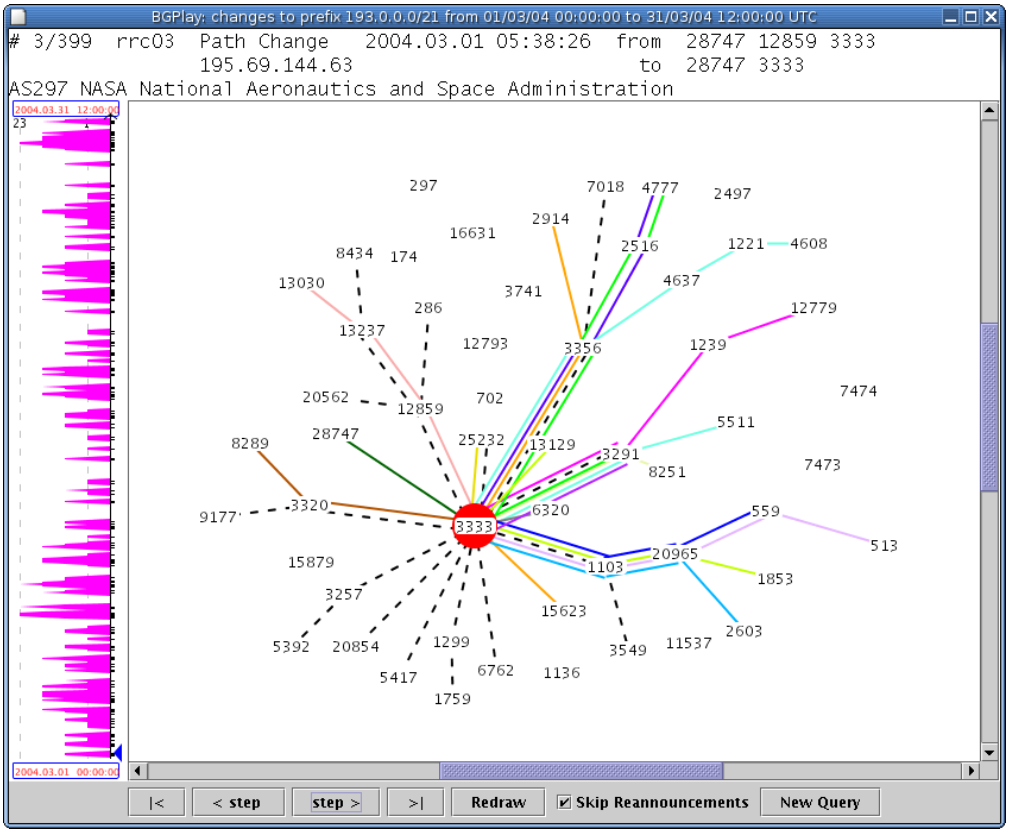

図 2.2: BGPlay の出力結果

タの経路エントリごとのプレフィックスと AS パスを解析することで, プレフィックスと AS 番号の対応表を作成する. traceroute データからホップしたルータの IP アドレスを抽出し, 対応表からマッチするプレフィックスを解析する. それにより, traceroute の各ホップの AS 番号がわかり, トラフィックの流れに沿って経由する AS を明らかにできる.

2.2　地理情報の推測技術

本節では, 既存研究における IP ジオロケーション技術を示す. インターネットは, ネットワークとインフラストラクチャの地理情報が対応付けられていない. しかし, 企業や政策では, インフラストラクチャの地理情報を考慮してインターネットを把握することで, 様々なアプリケーションが考えられる. IP ジオロケーション技術の発展により, ローカライズした WWW(World Wide Web) の広告システムや非常時における放送システムの一部に利用が考えられる. そのため, IP アドレスからホストの地理情報を推測する様々な IP ジオロケーション技術が研究されている.

2.2.1 逆引き DNS を用いた地理情報の推測

多くの場合, インターネットに接続する機器には, 機器の管理者により, ホスト名が設定される. DNS(Domain Name System)[17, 18] は, ホスト名と IP アドレスを対応づけるシステムである. DNS をサービスしているネームサーバに対して問い合わせることで, ホスト名からその機器の IP アドレスを検索する**正引き**や, 逆に IP アドレスからホスト名を検索する**逆引き**ができる. ISP では, 自らのネットワーク内のルータに対して, ログの解析や機器の把握といった目的で, ホスト名に機器の地理情報を推測可能なように設定している場合がある. (1), (2) に実際の ISP で使用されるホスト名の例を示す.

(1) foundry2.otemachi.wide.ad.jp
(2) fa-2-3-4.a10.tokyjp01.jp.ra.gin.ntt.net

(1) のホストは, AS2500 の WIDE Project[19] 内のネットワーク機器である. (2) は, AS2914 NTT Verio[20] 内のネットワーク機器である. (1) のホスト名は, **otemachi** と **jp** という文字列がホスト名に含まれる. **jp** は, 日本のカントリーコードである. また, **otemachi** は, 日本の東京都大手町と推測できる. そこで, (1) のネットワーク機器は, 日本の東京都大手町に物理的に配置されていると推測できる. 同様に, (2) の例では, **tokyjp** という文字列により, このネットワーク機器が日本の東京都に配置されていると推測可能である.

ネットワーク機器のホスト名は, それぞれの AS ごとのポリシによって, 独自の命名規則で名前付けが行なわれる. (1), (2) では, 両ホストとも日本の東京都に存在すると推測可能であるが, 異なる命名規則を持つ. AS ごとのポリシによってホスト名の命名規則が異なることから, 機械処理によってホスト名から地理情報の推測することは困難である.

Undns[21] は, 2 章で述べた Rocketfuel で利用される scriptroute のモジュールである. 各 AS ごとにルールセットを持ち, それに従って, ホスト名からその機器の地理的な場所を対応づけている. 例えば, (1) のネットワーク機器は, そのホスト名から WIDE プロジェクトで管理, 運用されている機器とわかる. Undns 内部の WIDE プロジェクトのルールセットは, 図 2.3 の通りである. (1) の例では, 文字列 **otemachi** が**.wide.ad.jp** の前にある. Undns を使用することで, (1) のホスト名を持つネットワーク機器が, **Tokyo, Japan** に存在すると推測ができる.

Undns は, 255 個の AS に対するホスト名の命名規則を記述したルールセットを持つ. Undns を用いることで, ホスト名からインターネットの機器の地理情報を推測可能となる. しかし, Undns で地理情報を推測できない場合がある. 1 つは, 小規模な ISP や特定の地域組織では, 現在でも機器にホスト名を設定していない. また, Undns は, すべての AS に対するルールセットを持っていない. さらに, ISP によっては, 自らのルータにプライベート

```
2500 \.wide\.ad\.jp$ {
    \.([a-z]*)\.wide\.ad\.jp$ loc=1 {
        dojima "Osaka, Japan"
        fujisawa "Kanagawa, Japan"
        nezu "Tokyo, Japan"
        notemachi "Tokyo, Japan" /* NTT-otemachi */
        otemachi "Tokyo, Japan" /* otemachi is a building */
        hiroshmia "Hiroshima, Japan"
        hachioji "Hachioji, Japan"
        tokyo "Tokyo, Japan"
    };
}
```

図 2.3: Undns: WIDE(AS 2500) のルールセット

IP アドレスを用いている. プライベート IP アドレスでは, 外部の AS から逆引きできない.

2.2.2　遅延情報を用いた地理情報の推測

インターネットのホストに対して, パケットの到達性確認に利用されるツールである ping や traceroute を用いることで, 自らのホストからあて先ホストまでの RTT が計測できる. RTT は, あて先ホストに対して ICMP パケットを送信し, 確認応答パケットである応答が戻ってくるまでの時間を表す. あて先ホストまでの RTT を計測することで, 機器の物理的距離を知る指標となる. 図 2.1 では, TTL4 から 5 にかけて, RTT の値が 100 ミリ秒以上増加している. TTL6 以降のホストも RTT の値が 100 ミリ秒以上かかっていることから, TTL4-5 にかけてホスト間の物理的距離が離れていると推測できる. Rocketfuel の ally[6] や Mercator[9] では, 複数地点間の遅延情報を用いて, 同じ機器が持つ複数の IP アドレスを調査する推測手法を検討している.

2.2.3　ランドマークを用いた地理情報の推測

特定の場所に計測ホストを設置することで, IP アドレスと地理情報の対応付けができる. 意図的に配置した計測ホストをランドマークとすることで, ネットワーク的に近いホストの地理情報が推測できる.

ランドマークとなるホストを経由する traceroute データを収集することで, 付近のホストの IP アドレスがわかる. traceroute データより, RTT が分かることからランドマークの

ホストから相対的に近くにあるホストの IP アドレスがわかる. また, 複数地点にランドマークを設置することで, ホップ間のルータの方向を推測できる. 既存研究 [22] では, 世界中の大学の地理情報が分かることを利用して, IP ジオロケーションのランドマークに用いている. アメリカにある多くの大学が管理するネットワークのホスト名に, **.edu** がついていることを用いてルールセットを作成している. それにより, 8321 個の大学管理の IP アドレスを収集し, IP ジオロケーションのランドマークに用いている.

2.3　まとめ

本章では, 本研究に関連するインターネットのトポロジ計測技術と IP ジオロケーション技術をまとめた. まず, AS を横断するインターネットのトポロジの計測には, BGP の経路情報を用いた手法と traceroute データを用いた手法がある. BGP の経路情報を用いた AS レベルのトポロジの推測手法は, 多くの AS にある BGP ルータとピアリングしている必要がある. BGP の経路情報のみを用いた手法では, 広域に渡るインターネットのトポロジのすべてを明らかにすることが困難である. 複数地点の traceroute データを用いることで, ルータレベルのインターネットのトポロジを計測できる. また, 各ホップの IP アドレスを管理する AS 番号を明らかにすることで, AS レベルでトポロジを計測することが可能である. しかし, traceroute は, 経由上のトポロジのみを解析できる. traceroute データを用いたインターネットのトポロジ計測は, 多くの計測機器が広範囲に必要である.

次に, インターネットの性質や管理手法を考慮することで, ネットワークと地理情報が対応づけできる 3 つの IP ジオロケーション技術をまとめた. 逆引き DNS を用いることで, ホストの地理情報を推測可能である. 本手法では, インターネットにあるすべてのホストとその地理情報を対応づけることはできない. しかし, 大手の ISP や学術ネットワークでは, 本手法を用いたホストの地理情報の推測が可能である. 遅延情報を考慮することで, IP アドレスから機器間の距離を推測できる. 遅延情報のみでは, 実際の距離を推測することができない. しかし, traceroute のホップ情報を考慮することで, ホップ間の距離を比較できる. 最後に, 特定の場所に計測ホストを設置することで, IP アドレスと地理情報を対応付けられる. さらに traceroute データのホップ情報を考慮することで, ランドマークから物理的に近くに位置する IP アドレスを集められる. ランドマークを用いた推測は, 地理情報を調べたいホストとランドマークを経由するように traceroute データを収集する必要がある. そのため, 対象のホストの地理情報の推測には, 明らかにしたいネットワークにランドマークを参加させる必要がある. 本手法は, より多くの IP アドレスとランドマークを調査することで, IP ジオロケーションの精度が向上する.

第 3 章

提案手法

本章では, 地理情報を考慮したインターネットのトポロジ計測手法を提案する. 提案手法は, IP ジオロケーション技術とルータレベルのインターネットのトポロジ計測手法を併用する. 既存のインターネットのトポロジ計測手法のみでは, 地理情報を持つトポロジの計測が困難である. AS を横断する広域なインターネットのトポロジ計測は, 複数の計測拠点による経路データの収集が必要不可欠である. また, インターネットのトポロジと地理情報を対応づけるには, ネットワークの情報のみで地理情報を推測する必要がある. 第 2.2 節では, インターネットの性質を用いて, 地理情報を推測する IP ジオロケーション技術をまとめた. 本研究は, 第 1 章の背景で述べた, 現在のインターネットのトポロジが, 地域の接続拠点を中心として密に形成されている性質に着目する. 現在のインターネットのトポロジの性質を用いて, 地理情報を考慮したインターネットのトポロジ計測を提案する.

3.1 想定する環境

本研究は, インターネットのトポロジと AS の性質を考慮した AS レベルのトポロジ計測手法を提案する. 本節は, 本研究で想定しているインターネットの環境を示す.

3.1.1 地域の接続拠点における AS トポロジ

インターネットでは, AS 間の物理的な接続のために, 都市に Internet Exchange(IX) という各地域の接続拠点が形成される. 図 3.1 に地域の接続拠点を中心とした AS のトポロジ構造を示す. 図中, 各 AS は, 地域の接続拠点である **Regional Hub** で直接接続する. AS のトポロジは, 地域の接続拠点に AS の接続が集中するため, 都市毎で密に形成されている.

しかし, 一部の ISP では, 自社内のネットワークを VLAN[23] や MPLS[24] を用いて構築している. 広域に渡る VLAN ネットワークは, 地域の接続拠点に集中する AS のトポロ

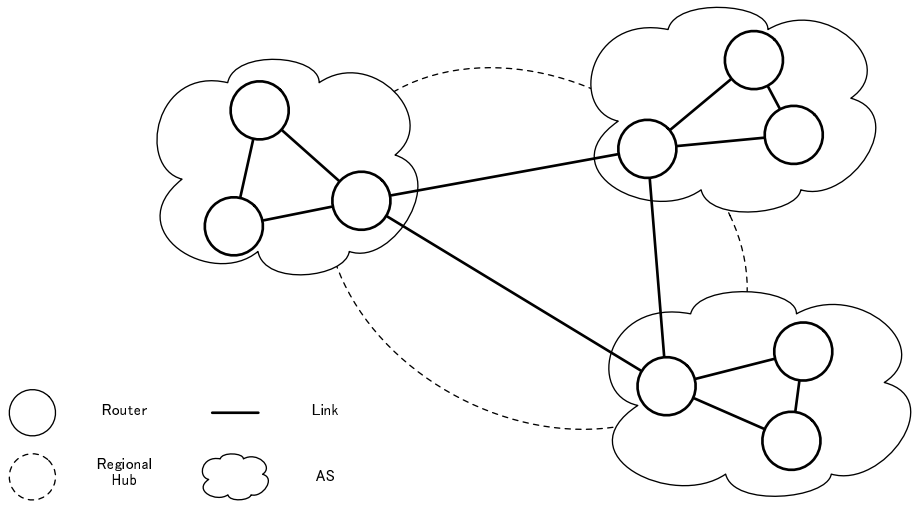

図 3.1: 地域の接続拠点を中心とした AS トポロジ

ジと異なる. VLAN ネットワークは, 地理的に離れた位置の BGP ルータ間で接続されている可能性がある.

3.1.2　地理情報の推測

第 2 章で示した通り, 多くの ISP では, 自らの管理するネットワーク機器が存在する場所を推測できるようにホスト名をつける習慣がある. Undns を使うことでホスト名から機器の存在する地理情報がわかる. 逆引き DNS を用いることでルータの物理的な位置が推測できる.

3.2　地理情報を考慮した AS レベルのインターネットのトポロジ計測手法の提案

本研究では, 第 3.1 節で述べた想定環境を考慮し, AS レベルのトポロジを解析する. 第 2 章で示した既存研究より, AS レベルのトポロジの計測には, BGP の経路情報を用いた手法と traceroute データを用いた手法がある. BGP の経路情報を用いた AS レベルのトポロジの推測手法は, 多くの AS にある BGP ルータとピアリングしている必要がある. BGP の経路情報のみを用いた手法では, 広域に渡るインターネットのトポロジのすべてを明らかにすることが困難である.

そこで, 本研究は, traceroute データを用いた AS レベルのインターネットのトポロジを計測する. 複数拠点で計測された traceroute データから, AS 間の境界にある BGP ルータ

の IP アドレスを抽出し, 地域毎の IP アドレスをクラスタリングする. AS の境界にある BGP ルータの IP アドレスをクラスタリングすることで, 地域の接続拠点や接続拠点に存在する AS を計測できる.

図 3.2 に本提案手法のシステム概要図を示す. まず, 図中 **Select AS-Boundary** 群では, AS の境界で他の AS と経路情報を交換している BGP ルータの IP アドレスのみを抽出する.

IP アドレス to AS 番号モジュールでは, 複数地点間で計測した traceroute データの各ホップ情報に IP アドレスが所属する AS 番号を対応づける. IP アドレスから AS 番号を調査するために, Routeviews が公開しているフルルートを持つ BGP ルータの経路情報を用いた. BGP の経路情報の各経路エントリの AS-PATH 属性を解析することで, 各経路のあて先 AS 番号が分かる. それにより, フルルートすべての経路エントリの Prefix と AS 番号の対応表を作成する. 次に, **AS-Boundary 抽出モジュール**では, AS 番号を対応づけた traceroute データから AS 番号が変化する IP アドレスのセットすべてを抽出する. 本論では, AS で経路交換している BGP ルータ間の IP アドレスセットを **AS-Boundary** と定義する.

図 3.3 は, **AS-Boundary クラスタリングモジュール**における処理の流れを表す. AS-Boundary クラスタリングモジュールは, AS-Boundary を解析することで, 地域毎の IP アドレスのクラスタを作成する. 地域毎の AS レベルのトポロジは, 作成したクラスタから AS を調査することで計測できる.

以下に, AS-Boundary クラスタリングモジュールの処理の流れを示す. 始めに, **IX 情報をプリロード**で, 事前に作成した IX の Prefix と地理情報の対応表を読み込む. そして, **1 エントリ読み込み**では, 抽出したすべての AS-Boundary から 1 エントリずつ読み込んで処理する. **RTT による閾値**に進み, AS-Boundary 間の RTT の値が 20 ミリ秒を超過する場合, 読み込んだ AS-Boundary を破棄し, **1 エントリ読み込み**から処理し直す. 閾値は, 特定の AS にある VLAN ネットワークや MPLS 網をクラスタから除外するためである. クラスタリングには, RTT の値が 20 ミリ秒以下の AS-Boundary を用いる. 図中の菱形では, 読み込んだ AS-Boundary のエントリに含まれる 2 つの IP アドレスによって処理が分岐する. AS-Boundary の 2 つの IP アドレスが, 他のクラスタに含まれていない場合がある. この場合, ユニークな ID を持つ新しいクラスタを作成し, 両 IP アドレスをそのクラスタに追加する. また, 片方の IP アドレスのみがすでにクラスタに存在する場合がある. この場合, 定義済みのクラスタに未定義の IP アドレスを追加する. また, 両 IP アドレスが定義済みの場合がある. 定義済みに加え, IX の Prefix に IP アドレスがマッチしない場合がある. マッチしない場合は, 2 つのクラスタをマージする. 両方の IP アドレスが, IX のプリロードで作成した Prefix にマッチした場合, AS-Boundary の 1 エントリ読み込みから実行し直す. これらの処理を繰り返し, すべての AS-Boundary のエントリに対して処理を終える.

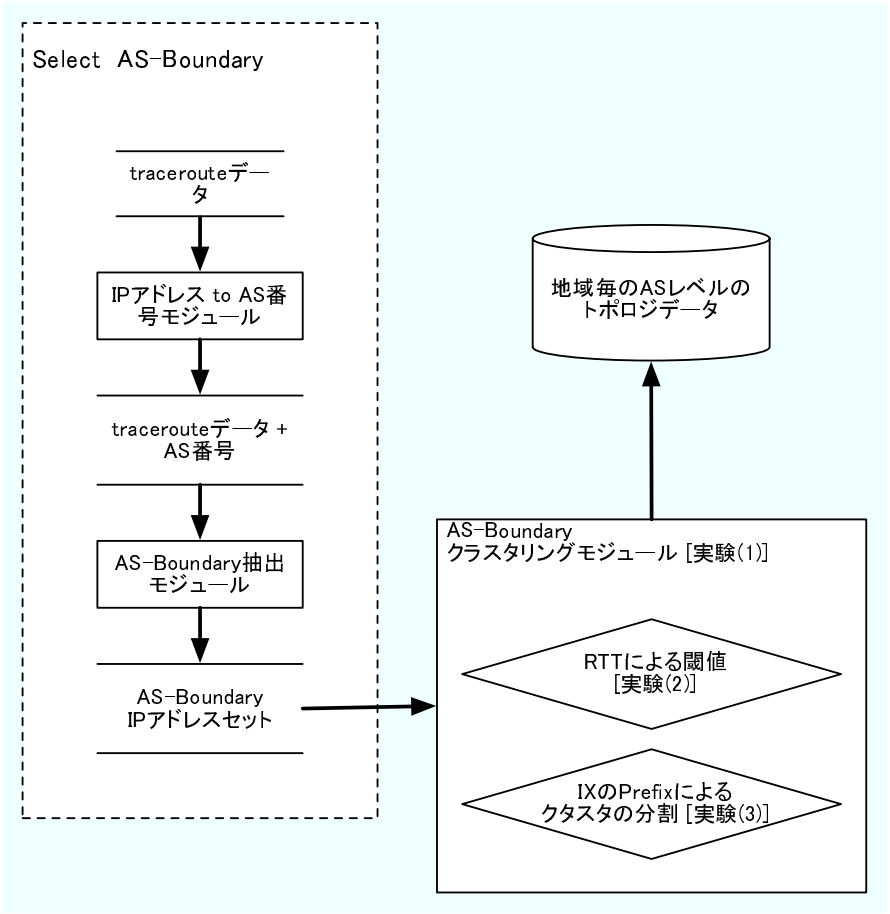

図 3.2: 本提案手法の概要図

処理が終わると, 地域毎に分割された IP アドレスのクラスタが作成される. RTT の閾値については, 第 4.3 節で論じる. また, IX によるクラスタリングの分割は, 第 4.4 節で論じる.

3.3　提案手法を利用した解析結果

表 3.1, 3.2 は, AS-Rank[25] の 1 位から 100 位までの地理情報を考慮したトポロジデータである. AS-Rank は, CAIDA が公開している AS のランキングである. 順位は, BGP の経路情報を解析して決定している. AS-Rank は, AS の Out degree 数を順位の基準にしている. AS-Rank を利用することで, ピアリングの数の指標にサイズの大きい AS Boundary のセットのみを抽出可能である. 図 3.4 に本研究で用いた AS-Rank を示す. AS-rank は, Out degree 数の多い AS の順位である. as は AS 番号を表し, org は AS の名前, country は AS の所属する国, n は Out degree 数を表す. 2006 年 7 月現在, AS 番号 3356 の Level3 Communications が Out degree 数 934 個でランキング 1 位になっている.

トポロジデータは, 提案手法を用いて解析した地域毎の AS-Boundary のクラスタを

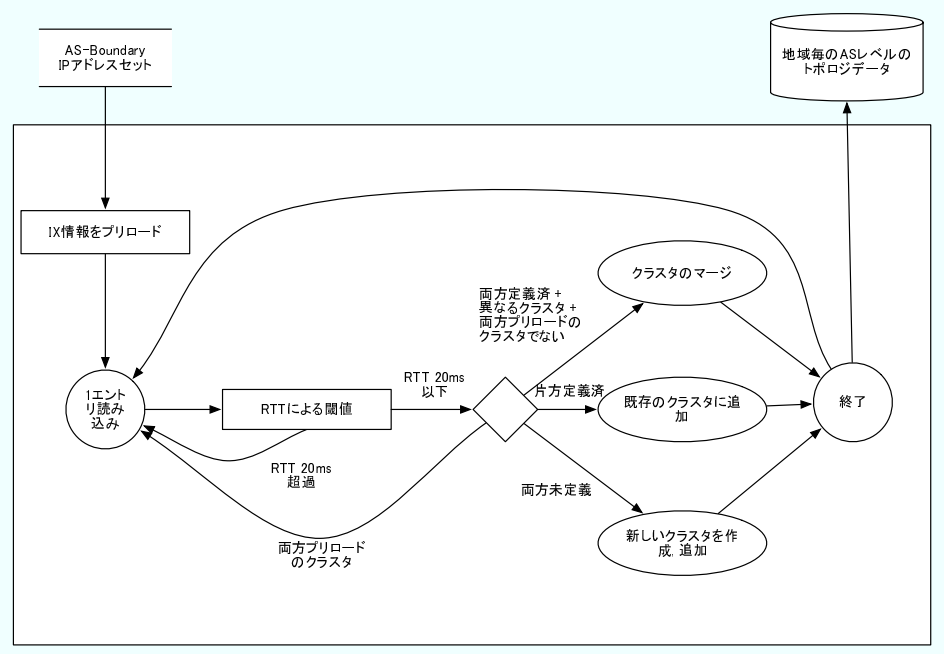

図 3.3: AS-Boundary クラスタリングモジュール

用いた. 表 3.1, 3.2 の各エントリは, 左から順に AS 名, AS 番号, AS が所属している場所, 地理情報を表す. 地理情報は 22 個の国に分割した. アメリカは地域を 4 つに分割した. 図中の PST, MST, CST, EST が, アメリカのタイムゾーンで分けた地域である. それぞれ, Pacific Stanadard Time, Mountain Stanadard Time, Central Stanadard Time, Eastern Stanadard Time の略称である.

3.4　まとめ

現在のインターネットのトポロジは, 地域毎に接続拠点が形成されている. AS 間の BGP ルータは, 接続拠点で直接接続される. traceroute データの各ホップの IP アドレスに AS 番号を対応づけることで, AS が切り替わるホップ間のみを抽出できる. AS が切り替わるホップ間の 2 つの IP アドレスを AS-Boundary とする. 現在のインターネットが接続拠点で直接接続されることから, AS-Boundary は, 同一の場所にある BGP ルータが持つ IP アドレスと推測できる. 多くの traceroute データから AS-Boundary を抽出し, AS-Boundary の IP アドレスをキーに AS-Boundary をクラスタリングする. それにより, 同一の場所にある BGP ルータの IP アドレス群のクラスタができる. RTT による閾値を考慮することで, 同一の場所で直接接続していない AS-Boundary を除外できる. Internet Exchange が持つ IP アドレスと IX の存在する場所情報を考慮することで, AS-Boundary の各クラスタが, どの地域の IP アドレスが集まったものか推測できる. 以上の手法により, 地域を考慮

```
rank    as      org     country n
1       3356    Level 3 Communications, LLC     US      934
2       701     UUNET Technologies, Inc.        US      819
3       1239    Sprint  US      756
4       7018    AT&T WorldNet Services  US      658
5       174     Cogent Communications   US      574
6       2914    Verio, Inc.     US      549
7       3549    Global Crossing         US      441
8       6461    Abovenet Communications, Inc    US      420
9       1299    TeliaNet Global Network SE      400
10      209     Qwest   US      393
(中略)
94      22822   Limelight Networks, LLC         US      37
94      15290   Allstream Corp. Corporation Allstream   CA      37
```

図 3.4: CAIDA: AS-Rank データ (2006/07/31)

したインターネットのトポロジデータを推測できた.

表 3.1: AS-Rank Top 1-50 AS-Location 図 (2006/07)

Name	AS ID	Location	TH	SG	HK	CN	TW	KR	JP	AU	NZ	PST	MST	CST	EST	MX	BR	UK	FR	IT	DE	NL	NO	RO
LEVEL3	3356	Broomfield, CO, USA								•		•		•	•			•	•	•	•	•		•
ALTERNET-AS	701	Ashburn, VA, USA		•								•			•	•		•	•			•		
SprintLink	1239	Reston, VA, USA			•							•		•	•	•		•	•	•	•	•		•
ATT-INTERNET4	7018	Parsippany, NJ, US										•		•	•			•	•		•	•		
COGENT-PSI-1	174	Washington, DC, US										•		•	•			•	•		•	•		
VERIO	2914	Englewood, CO, US		•			•		•			•		•	•			•	•		•	•		
GBLX	3549	Phoenix, Az, USA			•				•			•			•			•	•	•	•	•	•	•
ABOVENET	6461	White Plains, NY, US							•			•			•			•	•	•	•	•		
TELIANET	1299	GOTEBORG, Sweden							•			•			•			•	•	•	•	•	•	
ASN-QWEST	209	Arlington, VA, USA							•			•			•			•				•		
CWUSA	3561	Cary, NC, USA										•			•			•	•		•	•		
Deutsche-Telekom-AG	3320	Muenster, Germany		•					•			•			•			•	•	•	•	•		
ALTERNET-AS	702	Ashburn, VA, USA													•			•	•		•	•		•
LINX-AS	5459	London, UK																•				•		
TELEGLOBE-AS	6453	Montreal, QC, CA		•	•							•			•			•	•	•	•	•	•	
ECRC	1273	Muenchen, Germany													•			•	•		•	•		
TISCALI-BACKBONE	3257	Dreieich, Germany										•			•			•	•	•	•	•		
TWTC	4323	Littleton, CO, US										•		•	•									
XO-AS15	2828	Reston, VA, US										•			•			•				•		
SBIS-AS	7132	Plano, TX, US										•			•			•						
KDDI	2516	JAPNIC		•					•			•			•									
OPENTRANSIT	5511	93177 Bagnolet Cedex		•								•			•			•	•	•	•	•		
CAIS-ASN	3491	McLean, VA, US										•			•			•						
ANC	10026	Japan, JP		•	•				•	•		•												
BROADWING	6395	Austin, TX, US										•			•	•								
INTEROUTE	8928	London EC4A 1EN, UK										•			•			•	•		•	•		
COLT	8220	London, UK													•			•	•		•			
EUNET-AS	286	Den Haag, The Netherlands													•			•	•		•	•		
CIPCORE	5400	Amsterdam 1101 BA		•											•			•			•	•		
IIJ	2497	JAPNIC							•			•			•									
REACH	4637	Hong Kong, China		•	•				•			•			•			•						
ROGERS-CABLE	812	Toronto, ON, CA																						
SINGTEL-AS-AP	7473	Comcentre Two, Singapore		•	•		•		•	•		•			•									
RTCOMM-AS	8342	117485, Moscow, Russia																						
ALTERNET-AS	703	Ashburn, VA, USA							•	•														
LAMBDANET-AS	13237	Hannover, Germany																•			•	•		
DECIX-AS	6695	D-80807 Muenchen, Germany																			•			
EABONE-NET	6762	Rome, Italy		•											•			•	•	•		•		
TRANSTELECOM	20485	Moscow, Russia																						
GROUPTLCOM	6539	Toronto, ON, CA										•		•	•							•		
ABILENE	11537	Armonk, NY, USA										•		•	•									
FLAG-AS	15412	London, UK							•			•			•			•			•			
GEANT	20965	Cambridge, UK												•				•	•		•	•		
CSUNET-NW	2152	Los Alamitos, CA, USA										•			•							•		
Telefonica	12956	Madrid, Spain													•		•		•					
KIX	4766	Seoul, Korea										•						•						
ERX-DACOMNET	3786	Seoul, KR										•			•									
SOVAM-AS	3216	Moscow, Russia																						
ODN	4725	Tokyo, Japan							•															
	65517											•												

表 3.2: AS-Rank Top 51-100 AS-Location 図 (2006/07)

Name	AS ID	Location	TH	SG	HK	CN	TW	KR	JP	AU	NZ	PST	MST	CST	EST	MX	BR	UK	FR	IT	DE	NL	NO	RO
OPTUSCOM-AS01-AU	7474	North Sydney, Australia								•	•	•			•			•					•	
ERMS-EARTHLNK	4355	ATLANTA, GA, US										•												
SWIPNET-AS	1257	Kista, Sweden													•			•	•	•		•	•	
TTNet	9121	ANKARA, TURKEY																		•				
Chinanet BB	4134	100032, CN					•											•						
JPIX	7527	JAPNIC							•															
ELIX	5650	Vancouver, WA, US													•									
ABS-AS	19094	Coudersport, PA, US																•				•		
RETN-AS	25462	St. Petersburg, Russia																•						
OCN	4713	Tokyo, Japan							•									•						
ASN852	852	Burnaby, BC, CA													•									
WIDE	2500	JAPNIC							•															
AI3 WIDE Project	4717	JAPNIC							•															
UNITEDLAYER	23342	San Francisco, CA, US										•			•									
SHAW	6327	Calgary, AB, CA										•			•			•				•		
ERX-SINET-AS	2907	Bunkyo-ku, Tokyo 112, JP							•			•												
CCINET-2	22773	Atlanta, GA, USA										•		•	•			•						
EMBRATEL-BR	4230	Rio de Janeiro, Brazil															•							
CANARIE-NTN	6509	Ottawa, ON, CA										•		•										
UKRTELNET	6849	Kiev, Ukraine																						
RBNet	5568	Moscow, Russia										•		•										
FR-RENATER	2200	Paris, France																	•					
HANARO-AS	9318	Seoul, Korea										•						•						
POWEREDCOM	4716	Tokyo, Japan							•															
WVFIBER-1	19151	Nashville, TN, US										•			•									
CONNECT-NET	2764	Richmond, Victoria 3121, AU								•														
YIPESCOM	6517	San Francisco, CA, US										•			•									
vzgni-transit	19262	reston, va, us													•									
BACOM	577	Toronto, ON, CA													•									
Infonet-Europe	3300	Brussels, Belgium																•				•		
SUNRISE	6730	CH-8153 Ruemlang, Switzerland																•	•			•		
UNSPECIFIED	12714	Moscow 117420 RU																						
ACOnet Services	1120	A-1010 Vienna, Austria																						
HURRICANE	6939	Fremont, CA, US										•			•			•			•	•		
AS-SCRUZ-NET	4436	Santa Cruz, CA, US										•			•									
BBIL-AP	9498	New Delhi,INDIA-110020, IN										•						•						
VSNL-AS	4755	Fort Mumbai, India																•						
ESNET-WEST293	293	Berkeley, Ca, USA										•		•	•							•		
AOL-ATDN	1668	Reston, VA, US							•			•		•	•			•			•	•		
HUTCHISON-AS-AP	9304	HONG KONG, HK																						
BT-UK-AS	2856	Ipswich, UK																•						
MCLEOD	7228	Cedar Rapids, IA, US										•		•	•									
TDDE-ASN1	6805	33415 Verl, Germany																•	•		•	•		
Fastweb AS	12874	Milan, Italy																			•			
ASN-INFOSTRADA	1267	I-20152 Milano, Italy													•									
CABLECOM	8404	CH-8005 Zuerich, Switzerland										•			•			•						
LLNW-PHX1	22822	Tempe, AZ, US										•		•	•			•						
ALLST-15290	15290	Toronto, ON, CA										•			•							•		
KOMTEL	8881	D-24937 Flensburg, Germany																			•			
NET-ACCESS-CORP	8001	Denville, NJ, US													•									

第 4 章

実験

本研究は, 事前に 3 つの実験より, AS-Boundary を地域毎にクラスタリングする計測手法を検討した. 本章は, 3 つの実験の詳細を示す.

(1) AS-Boundary のクラスタリングを用いた AS レベルのトポロジ推測手法
(2) 遅延情報を考慮した (1) の手法の改善
(3) IX 情報を考慮した (2) の手法の改善

(1) の実験では, AS-Boundary を用いて, それぞれの IP アドレスをキーにクラスタを作成した. 同一の IP アドレスが現れる AS-Boundary を接続することで, 地域毎に存在する IP アドレスが集まったクラスタができる.

しかし, (1) の手法のみでは, 1 つの巨大なクラスタができ, 地域毎にクラスタが分割されなかった. そこで, (2) では, (1) の手法に加え, IP アドレス間の RTT の値が 20 ミリ秒以下の AS-Boundary のみをクラスタ作成に用いた. RTT の値が大きい AS-Boundary は, VLAN や MPLS といった離れた地域間で接続していると推測できる. 本手法は, 地域の接続拠点に存在する IP アドレスをクラスタリングするため, RTT の値が大きい AS-Boundary をクラスタから除外する. (1)(2) より, 広域に VLAN ネットワークを除外した AS-Boudary のクラスタリングが可能になった.

しかし, ヨーロッパでは, 地理的に密集して地域の接続拠点が多く存在している. ヨーロッパ内の地域の接続拠点は, RTT の閾値でクラスタを分割できない. そこで, (3) では, IX で用いている IP アドレスの Prefix を考慮して AS-Boundary のクラスタを分割する. 本手法は, 各 IX が管理する IP アドレスの Prefix と IX の存在する地理情報を対応づける. クラスタを作成する際, IX の Prefix にマッチする AS-Boundary からクラスタを作成する. 異なる場所にある IX の IP アドレスを含むクラスタを分割することで, 地理的に近い接続拠点を分割できる.

4.1　解析データ

CAIDA の skitter では, 複数地点から traceroute と同様の手法を用いてインターネットのトポロジデータを計測している. CAIDA では, プロジェクトに参加している組織と連携し, 複数地点間で skitter を運用している. トポロジデータは, CAIDA で蓄積されている. 本研究では, CAIDA の skitter で収集したトポロジデータを用いた. 表 4.1 は, skitter で蓄積される計測データの形式である. 第 1 フィールドは, データが traceroute データであることを示す. Source フィールドと Destination フィールドは, それぞれ traceroute の送信元 IP アドレスとあて先 IP アドレスを表す. 第 4 フィールドは, あて先ホスト毎のユニークに振られた ID である. 第 5 フィールドは, traceroute データの ID である. 第 6 フィールドの Timestamp は, 計測実行時のタイムスタンプを表す. 第 7 フィールドは, あて先ホストからの ICMP パケットの応答の有無を示す. 第 8 フィードは, あて先ホストまでの RTT の値である. 第 9 フィールドは, あて先ホストにパケットが届いた TTL の値である. 第 10 フィールドは, あて先ホストからの返信応答に含まれる TTL の値である. 第 11, 12 フィールドは通常設定されない. 第 13 フィールドは, あて先ホストまでに経由したすべてのルータからの返信応答の有無を表す. 第 14 フィールド以降で, 各ホップの情報を表す. 各ホップについて, IP アドレス, RTT, 試行回数を示す. 本研究では, AS レベルのトポロジ解析のために, 第 14 フィールドの各ホップの IP アドレスを用いる.

表 4.2 は, 本研究で用いる skitter のデータの詳細である. 本研究は, 2006 年 7 月 1 日か

1	Key	T - traceroute データ
2	Source	発信元 IP アドレス
3	Destination	あて先 IP アドレス
4	ListId	あて先ホスト識別 id
5	CycleId	識別 id
6	Timestamp	計測を実行時のタイムスタンプ
7	DestReplied	あて先ホストからの返答応答の有無 (R - Replied, N - Not-replied)
8	DestRTT	あて先ホストまでの RTT の値 (ms)
9	RequestTTL	あて先ホストへ送信する ICMP パケットに含まれる TTL
10	ReplyTTL	あて先ホストからの返信応答パケットに含まれる TTL
11	HaltReason	拡張情報
12	HaltReasonData	拡張情報
13	PathComplete	ホップから返答応答の有無 (C - Complete, I - Incomplete)
14-	HopData	ホップ情報 (フォーマット: IP, RTT(ms), トライ回数)

表 4.1: skitter データ形式

ら 31 日の期間に計測した traceroute データを用いる. traceroute データは, CAIDA で公開されている ARTS++[26] 形式で保存されている. ARTS++ 形式のデータは, バイナリ形式である. traceroute データの抽出は, CAIDA が公開している libarts++ を用いる. libarts++ は, arts++ 形式のデータを処理するための C++ 言語用の API である. また, traceroute データは, 48,251,831 個のエントリ存在する. skitter は, 2006 年 7 月現在, 世界中の 20 拠点から traceroute を計測している.

データ形式	ARTS++(binary)
総エントリ数	48,251,831
計測拠点数	20
計測期間	2006/07/01 00:00:00 - 2006/07/31 23:59:59

表 4.2: skitter データ詳細

表 4.3 は, skitter の 20 個の計測拠点についての詳細である. 各エントリは, 左から順に計測ホストの識別名, 管理組織, 計測ホストの地理情報を表す. 計測拠点は, アメリカ, イギリス, フランス, スウェーデン, ニュージーランド, 日本, 中国, カナダに存在する. traceroute を用いた AS レベルのトポロジ計測は, より多くの計測拠点が必要となる. skitter は, 世界各地の国に拠点がある. skitter の traceroute データを用いることで, 多くの地域を網羅できる.

4.2 AS-Boundary のクラスタリングを用いた AS トポロジの推測手法

4.2.1 実験の目的

本実験は, AS-Boundary のクラスタリング手法を用いる. 本手法により, 地域毎の IP アドレスが集まるか検討する.

4.2.2 提案手法

図 4.1 に本研究で提案する地理情報を考慮した AS レベルのインターネットのトポロジ計測手法を示す.

現在のインターネットでは, 地域毎の接続拠点が形成される. BGP ルータが同一の地域内で直接接続されることから, AS-Boundary に含まれる 2 つの IP アドレスは, 同一の場所にあることが推測できる. IP アドレスから AS-Boundary のクラスタを作成することで, 地

Name	Organization	Location
arin	ARIN	Bethesda, MD, US
cam	University of Cambridge	Cambridge, UK
cdg-rssac	GIP Renater	Paris, FR
champagne	University of Illinois at Urbana-Champaign	Urbana, IL, US
e-root	NASA	Moffett Field, CA, US
f-root	VIX	Palo Alto, CA, US
h-root	US Army Research Lab	Aberdeen, MD, US
i-root	Autonomica	Stockholm, SE
iad	MFN	Washington, DC, US
ihug	IHUG	Auckland, NZ
k-root	RIPE	London, UK
lhr	MFN	London, UK
m-root	WIDE	Tokyo, JP
mwest	Worldcom	San Jose, CA, US
neu	Northeastern University	Shenyang, CN
nrt	AboveNet Japan	Tokyo, JP
riesling	CAIDA	San Diego, CA, US
sjc	MFN	San Jose, CA, US
uoregon	University of Oregon	Eugene, OR, US
yto	CANET	Ottawa, CA

表 4.3: skitter 観測拠点

域毎の IP アドレスを集められる.

本手法は, skitter の traceroute データから, すべての AS-Boundary を抽出する. 各ホップの IP アドレスが所属する AS 番号を明らかにするために, RouteViews が公開している BGP の経路情報を用いた. AS 番号と Prefix の対応表は, BGP 経路情報の各経路エントリを用いて作成した. AS 番号と Prefix の対応表を用いることで, AS-Boundary を抽出できる. 本手法は, 抽出した AS-Bounday を用いる. AS-Bounday を 1 行ずつ読み込む. AS-Boundary に含まれる 2 つの IP アドレスが両方とも, 別クラスタで定義され, かつ異なるクラスタ番号を示した場合, 2 つのクラスタを 1 つに合わせる. 片方の IP アドレスのみ定義済みの場合, 定義済みの IP アドレスが含まれるクラスタに未定義の IP アドレスを加える. また, 両方未定義の IP アドレスの場合, ユニークな番号を付随したクラスタを作成し, 両 IP アドレスを加える. すべてのエントリについて図中の手法を実行することで, 地域毎の IP アドレスが集まると推測できる.

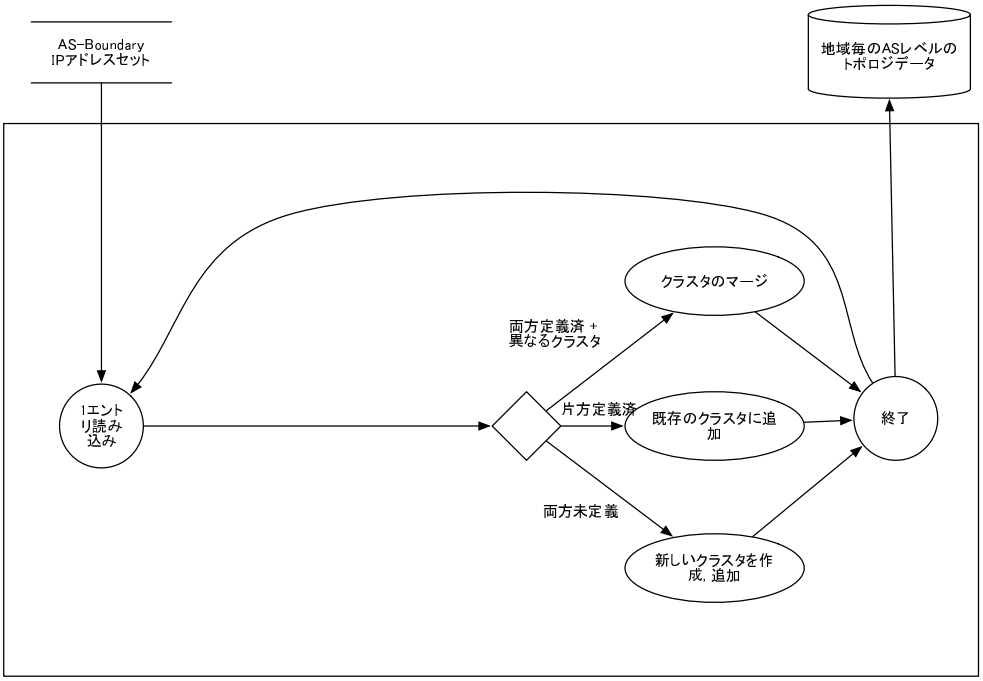

図 4.1: IP アドレスのクラスタリング手法

4.2.3　結果

すべての skitter の計測データから抽出した AS-Boundary 数は 161,163 個である. また, 各ホップの IP アドレスと各経路の Prefix のロンゲストマッチには, パトリシア木による経路検索手法を用いた. 抽出した AS-Boundary より, 地域ごとの IP アドレスのクラスタを作成した.

AS-Rank1 位から 100 位の AS を含む AS-Boundary のセットは, 130,196 個である. AS-Boundary のセットのうち, Undns によって地理情報が推測できた IP アドレスは, 37,590 個である. 図 4.2 に本手法を用いた解析結果を示す. はじめの行の IP アドレスは, クラスタのキーに使用した IP アドレスである. 次以降の行は, キーの IP アドレスとホップのルートが隣接した AS Boundary の IP アドレスである. 各エントリのフォーマットは, IP アドレス, DNS 逆引きの結果, AS 番号, ”undns の結果”である. 解析結果より, クラスタが 7,805 個作成された.

```
61.213.162.238  xe-0-0-0.a20.tokyjp01.jp.ra.gin.ntt.net 2914 "" # edges:418
   163.139.127.6   163-139-127-6.rv.vectant.ne.jp  2519  ""
   163.139.128.146 ge-1-0-0.transit1.nihonbashi.vectant.ne.jp      2519  ""
   163.139.129.78  ae1.core2.doujima.vectant.ne.jp 2519  ""
   202.213.193.137 ote-gw8Te4-1.net.so-net.ne.jp   2527  "Tokyo, Japan"
   202.213.193.188 note-gw7Vl4.net.so-net.ne.jp  2527  ""
   202.213.198.226 gu02gi0.tokyus00.ap.so-net.ne.jp   2527  "Tokyo, Japan"
   202.224.32.83   tkybi3.asahi-net.or.jp  4685  "Tokyo, Japan"
   202.224.33.130  tckaca-fe.asahi-net.or.jp 4685 "Tachikawa, Japan"
   202.224.33.147  yoknip.asahi-net.or.jp  4685  "Yokohama, Japan"
   (中略)
   202.239.113.59  g0-1-1-n-otemachi-core1.sphere.ad.jp 2514  "Tokyo, Japan"
   202.239.114.209 xg3-0-kanda-core1.sphere.ad.jp  2514  "Tokyo, Japan"
```

図 4.2: AS Boundary のクラスタと Undns による出力結果

4.2.4　考察

本手法によってクラスタが地域毎にトポロジデータが分割されているかどうか検討する. クラスタの大きさ順に並べ, それぞれのクラスタにおいて Undns の結果からクラスタの地理情報を解析する.

1 番大きなクラスタは, IP アドレスを 30,978 エントリ含んでいる. それ以降は, 222, 188, 134 と小規模な AS Boundary のクラスタが続いている. AS Boundary の総数が 130,196 エントリであるため, 1 つのクラスタで全体の 4.2% の IP アドレスが集まっていることになる. そこで, 1 番大きなクラスタの IP アドレスを DNS 逆引きし, Undns で地理情報の推測を行なった. 結果は, アメリカ全土, カナダ, イギリス, フランス, ドイツ, オーストリア, 日本を含むクラスタであった.

本手法による AS Boundary の IP アドレスセットのクラスタのみでは, 地理的に同一の地域にある IP アドレスが集まる. 1 つのクラスタで多くの地域の IP アドレスが集まったことにより, 本手法が目的を達成できていないことがわかる. 次に, 地理的に離れた AS トポロジデータが集まってしまった原因を考察する.

想定環境で述べた通り, 多くの AS では他の AS とピアリングを行なうために, 地域ハブを利用する. しかし, 一部のグローバル ISP では, 自社内のネットワークを広域に渡る VLAN(Virtual LAN) や MPLS によって構築している. 本手法では, すべての IP アドレスに対して, 数珠つなぎ的にクラスタを作成している. そのため, AS Boundary でありなが

ら, 地理的に離れたネットワークが, 複数の地域のクラスタを集めてしまっていると推測できる. よって, 本研究の目的である地理情報を考慮した AS トポロジを明らかにするには, VLAN や MPLS のネットワークを, クラスタリングから除外しなければならない.

4.3　遅延情報を用いた AS トポロジの推測手法

4.3.1　実験の目的

第 4.2 節の実験より, AS-Boundary のクラスタ化について, 広域に渡る VLAN ネットワークを介して, 地理的に離れた AS-Boundary があったため, トポロジが地域毎に分割されなかった. VLAN ネットワークは, traceroute データのホップのみを用いて識別することが困難である. そのため, VLAN ネットワークの特徴を考慮した発見手法が必要となる. 本手法では, VLAN ネットワークの両端となるルータの地理的な距離が離れていることを用いる. VLAN ネットワークは, AS-Boundary でも特に RTT の値が大きいと推測できる. 本実験では, RTT の閾値を考慮して, AS-Boundary をクラスタリングする.

4.3.2　提案手法

図 4.3 に RTT の閾値を考慮した計測手法を示す. 第 4.2 節で実験した手法に加え, RTT の閾値を導入した. skitter の計測結果より, 複数地点間におけるルートに加えてあて先ホストまでの各ホップに対する RTT の値がわかる. skitter の計測データは, ホップ情報が含まれていることから, RTT の差分を計算することで任意のホップ間の RTT の値を推測できる. 本手法では, AS Boundary 間の RTT を閾値に用いることで, VLAN ネットワークの AS-Boundary を除外する. 閾値以下の RTT を持つ IP アドレスのみを用いて, AS Boundary の IP アドレスセットをクラスタリングする.

RTT による閾値の値は, 10, 15, 20, 25ms ごとに設定して適切な閾値を検討する. RTT による閾値が 100ms を超える値では, アメリカとアジア地域といった, 大陸として離れたクラスタが 1 つになると考えられる. 逆に 5ms 以下といった値では, クラスタが小さく細分化される. 細分化されたクラスタは, それぞれデータ数が少ないため, 地理情報の推測が困難となる. 閾値は, 日本とアメリカ間やアメリカ大陸横断の RTT がおよそ 100ms 以上かかることを基準に閾値を決定した. RTT20ms では, アメリカを 4 つから 5 つに分割した程度の地域毎にクラスタが分割されるはずである.

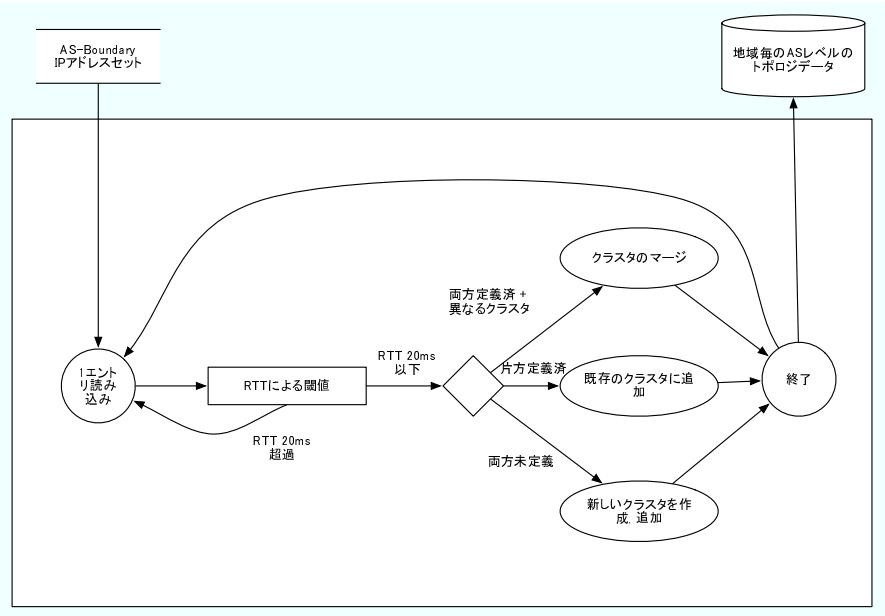

図 4.3: RTT を考慮した地域ハブにおける IP アドレスのクラスタリング手法

4.3.3　結果

図 4.4 に解析結果のクラスタの 1 つを示す. 各エントリは, 順番に AS-Boundary に含まれる IP アドレス, ホスト名, AS 番号, Undns による地理情報の推測結果である. Undns の推測結果から, 本クラスタがイギリスのロンドンで直接ピアリングしているクラスタと推測できる.

表 4.4 は, 各 RTT ごとの順に並べたクラスタの大きさである. 各行は, 閾値である RTT の値ごとのクラスタである. RTT の閾値が低いほど, IP アドレスのクラスタが細分化している.

Undns を用いて, RTT の閾値ごとの 1 番大きなクラスタを対象に地理情報を推測する. 図 4.7 に RTT25ms による閾値を考慮した最もサイズの大きなクラスタに含まれる地域を表す. ヨーロッパ全域に加え, アメリカの東海岸や西海岸地域を含まれている.

4.3.4　考察

RTT の閾値を考慮して AS トポロジの解析をすることで, 広域に渡る VLAN ネットワークを除外して, AS-Boundary をクラスタリングできることがわかった. RTT の閾値をより低くすることで, より地域を限定したクラスタを作成できる. しかし, 閾値 RTT10ms によるクラスタでも, アメリカの東海岸とヨーロッパ地域が同一のクラスタに含まれた. 低す

```
# cluster 592 (116 addrs)
# IPaddr, Hostname, ASID, "Undns"
195.2.10.125    so-1-0-0-zcr1.lnt.cw.net        1273    ""
195.66.224.97   ldn-b1-geth14-1.telia.net       5459    "London, UnitedKingdom"
195.66.226.26   linx.ber-1.r18.telh.as5388.net  5459    ""
195.66.226.48   ldn-th-i1-geth3-0.telia.net     5459    "London, UnitedKingdom"
213.248.100.138 satis-114804-ldn-b1.c.telia.net 1299    "London, UnitedKingdom"
213.248.100.166 globix-106876-ldn-b3.c.telia.net 1299   "London, UnitedKingdom"
209.10.12.217   ge-4-2-0-core1.lhr2.globix.net  4513    "London, UnitedKingdom"
209.10.12.225   ge-4-2-0-core2.lhr2.globix.net  4513    "London, UnitedKingdom"
213.248.100.218 ldn-tch-i1-geth1-1.telia.net    1299    "London, UnitedKingdom"
80.91.250.15    ldn-bb2-link.telia.net  1299    "London, UnitedKingdom"
80.91.250.91    ldn-bb1-link.telia.net  1299    "London, UnitedKingdom"
(中略)
195.92.55.69    ge0-2.rr-1.the.as5388.net       5388    ""
195.66.224.26   linx.ber-1.r18.telc.as5388.net  5459    ""
193.251.251.218 energisuk.GW.opentransit.net    5511    ""
```

図 4.4: RTT 情報を追加した AS Boundary のクラスタの出力結果

ぎる閾値は, 多くの計測データを捨てることになるため, RTT による閾値を考慮した手法は, あくまで VLAN ネットワークの除外のみにしか効果的に利用できない.

現在のインターネットは, ユーザの需要から, 光ファイバといった低遅延な物理リンクで地域間を接続している. ヨーロッパ地域の各都市は, AS が密に接続されている. 本実験の手法では, 地理的に近い接続拠点を分割できない. ヨーロッパ内の国や都市は, 陸続きで密集していることが多い. 距離的に近い接続拠点を分割する手法が導入することで, さらに細かい地域単位でトポロジ計測が可能である.

4.4　IX 情報を考慮した AS トポロジの推測手法の検討

第 4.3 節では, RTT による閾値を導入することで地理情報を考慮した AS レベルのトポロジ計測手法について検討した. 本章では, RTT の値が短い地域を分割するために, IX の Prefix 情報を用いる. 各 IX の IP アドレスと IX の存在する地理情報を対応づけることで, 予め地理情報がわかる IP アドレスとなる. 地理情報が予め分かっているホストをランドマークと定義する. 本実験では, ランドマークを考慮することで, 地理的に近い地域のクラスタを分割する.

	10ms	15ms	20ms	25ms
1	4774	8693	11247	12823
2	1269	1525	1674	1766
3	1104	775	379	405
4	644	365	371	398
5	606	320	296	318
6	278	264	269	313
7	242	233	249	271
8	216	215	235	251
9	191	214	224	242
10	190	214	217	217

表 4.4: RTT の閾値を考慮した AS Boundary のクラスタサイズ

4.4.1　実験の目的

地域毎の代表となるランドマークを用いることで, 地理的に隣接する接続拠点を分割できる. 地域毎の接続拠点には, IX が形成されることから IX をランドマークに用いる. 本実験では, IX 情報を考慮することで, 地域毎の AS レベルのトポロジデータを計測可能か検討する.

4.4.2　提案手法

図 3.3 では, IX をランドマークとして用いた AS トポロジの推測手法を既に示した. 本手法の処理の流れは, 第 3 章で示した物とどういつで, ここでは省略する. 第 2 章でまとめた通り, インターネットの地域拠点となる都市には, 低遅延などの高品質なネットワークの形成や回線コストの目的から, IX が形成されている. 一般的に, IX の情報は, 管理組織ごとの公式サイトにて自らの IX の詳細が公開される. IX の展開されている都市名や, 用いられるネットワークの情報が公開されている. 地理情報と IP アドレスの Prefix 情報により, IX の存在している地理的な位置と IX の IP アドレスを対応付けることが可能である. あらかじめ IP アドレスと地理情報の対応付けができることで, ランドマークを利用した地理情報の推測ができる.

本手法にあたり, 世界の主要 IX 200 個の地理情報とその Prefix のリストを作成した. IX の Prefix 情報は, Packet Clearing House[27] が公開している INTERNET EXCHANGE

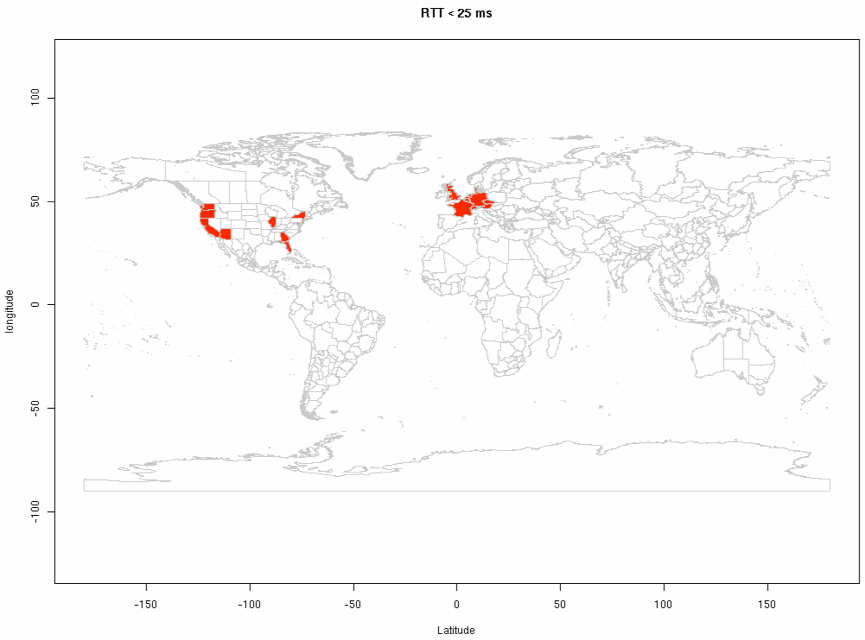

図 4.5: RTT25ms の閾値によるクラスタ内に含まれる都市

DIRECTORY[28] を基に作成した. 図 4.6 に実際に作成した IX の Prefix 情報の一部を示す. フォーマットは, IX の存在するカントリーコード, 都市名, IX 名, Prefix となっている. IX の Prefix 情報により, AS-Boundary の情報から IX にあるルータの地理情報がわかる.

4.4.3　結果

図 4.7 に実際に作成したクラスタを示す. 本クラスタは, JP にある IX の IP アドレスをキーにしてクラスタリングした. また, RTT20ms を閾値に利用することで, VLAN ネットワークを除外した. データのフォーマットは, 左から順番に IP アドレス, DNS の逆引き結果, AS 番号, Undns の推測結果, IX のカントリーコード, IX が登録されている都市名, IX 名を表す. 本手法により, 地理的に近い地域を分割して AS-Boundary をクラスタリングできた.

4.4.4　考察

本実験は, IX の管理する Prefix をランドマークとして用いた. ランドマークは, 地理的に隣接する地域を分割して, AS-Boundary のクラスタリングが可能なことを示した. IX 情報によるランドマークは, 広域に渡る地域を網羅できる. しかし, IX は, すべての地域毎に

```
# Country_code, City, IX_name, Prefix
"AR"    "Buenos Aires"  "NAP CABASE"    200.0.17.0/24
"AT"    "Vienna"        "VIX"   193.203.0.0/24
"AU"    "Adelaide"      "PIPE-Adelaide" 218.100.3.0/24
"AU"    "Adelaide"      "SAIX SE"       198.32.240.0/24
"AU"    "Adelaide"      "SAIX SE"       203.34.35.0/24
"AU"    "Brisbane"      "PIPE-Brisbane" 218.100.0.0/24
"AU"    "Canberra"      "PIPE-Canberra" 218.100.19.0/24
"AU"    "Hobart"        "PIPE-Hobart"   218.100.12.0/24
"AU"    "Melbourne"     "PIPE-Melbourne"        218.100.13.0/24
"AU"    "Melbourne"     "VIX"   198.32.194.0/24
(中略)
"ZA"    "Grahamstown"   "GINX"  192.42.99.128/25
"ZA"    "Johannesburg"  "JINX"  198.32.142.0/24
```

図 4.6: 主要 IX の Prefix リスト

存在しない. IX が存在しておらず地理的に近い地域は, 本手法でクラスタを分割できない. 別のランドマークを考慮することで, より地域を分割したクラスタリングが可能である. IX 情報を考慮した AS-Boundary のクラスタリング手法を用いることで, 地理的に近い地域を分割してクラスタリングできるかどうかは, 第 5 章の評価で論じる.

```
# cluster 3067 (2233 addrs) JP
202.249.2.101                              "JP"    "Tokyo" "DIX-IE"
165.76.0.212            2915    ""         ""      ""      ""
202.249.2.101                              "JP"    "Tokyo" "DIX-IE"
165.76.0.213            2915    ""         ""      ""      ""
(中略)
210.171.224.167                            "JP"    "Tokyo" "JPIX"
133.205.1.66            2518    ""         ""      ""      ""
210.171.224.221 AS17529.ix.jpix.ad.jp   7527 ""   "JP"    "Tokyo" "JPIX"
133.205.1.66            2518    ""         ""      ""      ""
210.171.224.47  AS7678.ix.jpix.ad.jp    7527 ""   "JP"    "Tokyo" "JPIX"
(中略)
210.153.248.146 nas911.kanazawa.nttpc.ne.jp  2514 ""   ""   ""   ""
210.153.248.150 nas911.fukui.nttpc.ne.jp  2514 "Fukui, Japan"  "" "" ""
210.153.251.214 nas923.p-kyoto.nttpc.ne.jp 2514 "Kyoto, Japan"  "" "" ""
```

図 4.7: 主要 IX 情報を考慮した AS Boundary のクラスタ

第 5 章

評価

本章では, 第 3 章で提案した手法が第 1.2 節で示した目的を達成したか, 2 つの方法で評価する. まず, 提案手法による解析結果が正しく地域毎のクラスタに分かれているか検証する. 次に, 実際の AS 毎にネットワークのトポロジを調査し, 解析結果と比較することで, クラスタリングの精度を検証する.

5.1 クラスタリング手法の検証

本節では, 各クラスタが地域毎に分割されているか検証する. 検証には, 地理情報と対応付けができたクラスタを用いる. 表 5.1 は, 検証に用いるクラスタを示す. 表中の各エントリは, 左から順に, クラスタサイズの順位, クラスタの識別子, IP アドレス数 (クラスタサイズ), 推測された国情報 (カントリーコード) を表す. アメリカは, タイムゾーンごとに EST, CST, MST, PST で地域を分けて解析した. 表中では, それぞれ US-E, US-C, US-M, US-P と表記している. 国情報が **Unknown** のクラスタは, IX の Prefix の IP アドレスが含まれていないため, 地理情報が不明なことを表す.

国情報が不明なクラスタは, 地理情報と対応づけられていないが, 特定の地域における IP アドレスが集まっているはずである. 正しく地域毎にクラスタされているか検証するために, ID 7508 のクラスタを用いて地理情報を推測する. 図 5.1 にクラスタ ID 7508 の詳細を示す.

地理情報の推測手法は, Undns と ccTLD を用いる. Undns の結果より, AS174 と 1299 に所属する IP アドレスがドイツ (Hamburg, Germany) にあることがわかる. また, ccTLD により, AS680 の IP アドレスは, ccTLD が**.de** であることからドイツに存在すると推測できる. AS8501, 8890, 12346 は ccTLD が**.pl** である. それにより, ID 7508 のクラスタは, ポーランドとドイツの IP アドレスが集まっていると推測できる. ポーランドとドイツは, 大陸続きで隣接した国である. また, 本クラスタは IX 情報によるクラスタの分割ができな

順位	クラスタ ID	IP アドレス数	国		クラスタ ID	IP アドレス数	国
1	6853	5920	UK	16	1792	220	Unknown
2	3084	4498	US-E	17	5980	217	Unknown
3	3067	2233	JP	18	2951	173	Unknown
4	254	1782	US-P	19	8771	169	Unknown
5	1161	1712	FR	20	8819	168	Unknown
6	2583	1429	NL	21	5780	158	NO
7	7738	1105	DE	22	8491	151	Unknown
8	116	380	AT	23	8358	145	US-C
9	7508	379	Unknown	24	1008	142	CZ
10	2508	371	Unknown	25	4670	141	Unknown
11	5634	324	AU	26	7632	127	BE
12	8842	269	Unknown	27	2669	122	Unknown
13	167	265	HK	28	3242	121	DK
14	1962	249	Unknown	29	4145	117	Unknown
15	7134	235	Unknown	30	7422	111	Unknown

表 5.1: サイズが大きい AS-Boundary のクラスタ

かった. よって, TTL の値によるクラスタの分割のみでクラスタリングされている.

本手法では, ランドマークの IP アドレスを含まず, TTL の値が短い隣接した地域のクラスタを分割できない. しかし将来, 多地点にランドマークを増やすことで, さらに多くの地理情報とクラスタを対応づけられると期待できる.

5.2　AS-Boundary クラスタにおける精度の評価

本節は, 各 ISP が公開している自らのネットワークトポロジ情報と第 3 章で示した AS-Rank Top 100 の AS-Location 表の解析結果を比較する. 評価は, トポロジデータを比較することで, 提案手法で解析した AS レベルのインターネットのトポロジの精度を検証する. 検証は, 図 3.1, 3.2 に示した AS-Rank Top100 の AS から, ランダムに抽出した 10 の AS に対して評価する.

図 5.2 は, ランダムに抽出した 10 個の AS である. 各エントリは, 左から順に, AS-Rank の順位, AS 名, AS 番号, 場所情報, 解析結果を表す. ● マークは, 本研究の提案手法で推測した AS 毎の地理情報である. ⋆ マークは, AS が自らの WEB サイトで公開しているトポロジデータである.

```
# IP address, hostname, AS 番号, Undns 結果
134.222.111.254 fast0-0.core1.hannover2.mops.net 286 ""
212.12.120.17 eth0.ar01.hannover2.mops.net 12595 ""
213.248.68.170 mws-112351-hbg-b2.c.telia.net 1299 "Hamburg, Germany"
80.91.249.198 hbg-b2-link.telia.net 1299 "Hamburg, Germany"
212.12.50.158 Pointer-H.irz42.net 13135 ""
130.117.0.129 p15-2.core01.ham01.atlas.cogentco.com 174 "Hamburg, Germany"
212.72.186.129  8893 ""
213.248.76.130 lambdanet-5001-hbg-b2.c.telia.net 1299 "Hamburg, Germany"
217.71.105.33 HAN-7-pos720-2.de.lambdanet.net 13237 ""
217.71.107.238 ADDIX-KIE.de.lambdanet.net 13237 ""
217.71.111.82 KielNet-KIE.de.lambdanet.net 13237 ""
188.1.32.86 kr-fhi-berlin.x-win.dfn.de 680 ""
212.191.224.18 z-poznan-gw1.pozman.10Gb.rtr.pionier.gov.pl 8501 ""
213.248.77.22 pan-113967-hbg-b2.c.telia.net 1299 "Hamburg, Germany"
212.182.89.57 vlan895.raven.lubman.net.pl 12346 ""
213.248.77.214 dante-101746-hbg-b2.c.telia.net 1299 "Hamburg, Germany"
212.182.56.150 vlan799.nemes.lubman.net.pl 12324 ""
213.135.52.27 kp-r3-213-135-52-27.rtr.net.icm.edu.pl 8890 ""
213.135.52.28 nkf-s1-213-135-52-28.rtr.net.icm.edu.pl 8890 ""
(中略)
62.40.112.46 so-7-0-0.rt1.poz.pl.geant2.net 20965 ""
62.40.124.182 pionier-gw.rt1.poz.pl.geant2.net 20965 ""
212.191.1.239 cbmm-gw.man.lodz.pl 8256 ""
193.111.37.126  24724 ""
```

図 5.1: クラスタ ID 7508 の詳細

図 5.2 は, ランダムに抽出した 10 個の AS トポロジデータ 5.2 を解析したグラフである. 本手法により地域トポロジが検出され, 実際の AS ではネットワークが存在していない地域数を **misdetected**, 本手法により検出できなかった地域数を **undetected**, 正しく検出できた数を **match** で表す. 全体数 100% に対して, 2 つを誤検出した. 全体の 2.43% にあたる. 検出できなかった地域は 37 あり, 全体の 45.12% だった. そして, 正しく検出できた地域が 43 あり, 全体の 52.43% である.

解析結果から, 本手法による地域毎のトポロジの誤検出の割合が, 非常に低くなっている. AS-Rank の高い AS については, かなり正確にトポロジデータが把握できたが, AS-Rank が低い AS については, トポロジを検出できなかった地域が多く存在している. 本提案手法は, skitter の traceroute データを用いている. そのため, traceroute データに多

く現れる AS-Rank の高い AS については高い精度でトポロジを明らかにできる. しかし, skitter の計測拠点の少ないアジア地域や, AS-Rank の順位が低く, かつ traceroute データの少ない AS は, 検出率が低くなっている. また, 誤検出した地域は, すべてアメリカの PST 地域である. PST 地域は, MX や MST と陸続きであることから, 他の地域のクラスタと分割できなかったと推測できる

精度の評価より, 本手法では, 地理情報を考慮したインターネットのトポロジが検出可能なことを示した. しかし, 低い確率ではあるが誤検出が確認された. 陸続きの地域を分割するために, IX 以外のランドマークを考慮することで, さらなる精度向上を期待できる.

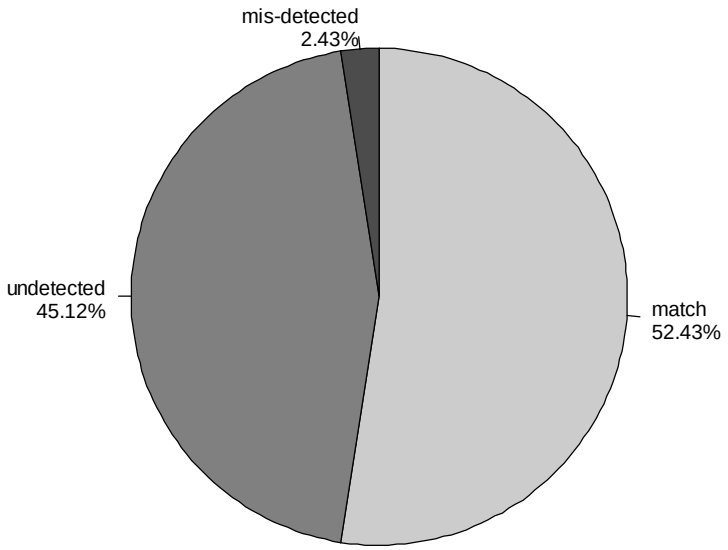

図 5.2: クラスタ検出の精度グラフ

表 5.2: ランダムに 10 個抽出した AS-Location 図 (2006/07)

Rank	Name	AS 番号	Location	TH	SG	HK	CN	TW	KR	JP	AU	NZ	PST	MST	CST	EST	MX	BR	UK	FR	IT	DE	NL	NO	RO
6	VERIO	2914	Englewood, CO, US	⋆	●⋆	⋆	⋆	●⋆	⋆	●⋆	●⋆	⋆	●⋆		●⋆	●⋆			●⋆	●⋆		●⋆	●⋆		
9	TELIANET	1299	GOTEBORG, Sweden										●			●⋆			●⋆	●⋆	●⋆	●⋆	●⋆	●⋆	⋆
16	ECRC	1273	Muenchen, Germany							⋆	⋆		⋆			●⋆			●⋆	●⋆	⋆	●⋆	●⋆	⋆	⋆
33	SINGTEL-AS-AP	7473	Comcentre Two, Singapore	⋆	●⋆	●⋆	⋆	●⋆	⋆	●⋆	●⋆	⋆	●⋆			⋆									
41	ABILENE	11537	Armonk, NY, USA										●⋆	⋆	●⋆	●⋆									
45	Telefonica	12956	Madrid, Spain										⋆	⋆	⋆	●⋆	⋆	●⋆	●⋆	●⋆	⋆	⋆	⋆	●⋆		
68	EMBRATEL-BR	4230	Rio de Janeiro, Brazil												⋆	⋆		●⋆							
69	CANARIE-NTN	6509	Ottawa, ON, CA										●⋆		●⋆	⋆									
75	WVFIBER-1	19151	Nashville, TN, US										●	⋆	⋆	●⋆			⋆					⋆	
80	Infonet-Europe	3300	Brussels, Belgium															⋆	●⋆	⋆	⋆	⋆	⋆	●⋆	⋆	⋆

第 6 章

結論

6.1 まとめ

本論文は, traceroute データを用い地理情報を考慮した AS レベルのインターネットのトポロジ推測手法について検討した. 現在のインターネットは, ネットワークのトポロジと物理位置情報が対応付けられていない. 地理情報を持つインターネットのトポロジを把握することは, 非常に困難である. 本研究により, 多少の誤差があるが, AS レベルのインターネットのトポロジと地理情報を対応付けられることを示した. 単一の IP ジオロケーション技術のみでは, 広範囲に渡るインターネットの地理情報を推測できない. しかし, グローバルなインターネットの性質を用い, 複数の IP ジオロケーション技術を組み合わせることで, インターネットのトポロジと地理情報を対応づけられることを示した.

本研究により, 国単位のグローバルなインターネットのトポロジ計測が可能になった. 地理情報を考慮したトポロジデータより, ユーザや企業は, ISP 毎のネットワークが網羅する地域を比較し, 選択することが可能となる. また, ISP は, 他の ISP と自らのネットワークを比較できる. POP の配置やピアリング, トランジットの購入の指標に利用できる. 地域毎に AS 数の比較が可能になった. 各国のインターネット推進政策は, 重点的に強化すべき地域を把握できるようになった.

6.2 今後の課題

本研究では, さらなる精度向上のために手法の検討を続ける. 現在の手法では, RTT による閾値の最適解がわかっていない. 最適な RTT の値を用いることで, さらなる精度の向上が期待できる. また, 本提案手法は, ランドマークに IX 情報を用いた. IX は, 世界中の国毎には, 存在していない. IX が存在しておらず地理的に隣接する地域の分割には, 他のランドマークを導入することで分割可能であると期待できる

次に, 本手法は, traceroute の情報を用いた. 本研究は, skitter によって蓄積された traceroute データのみを用いている. さらに細かい粒度で地域のトポロジを明らかにするためには, より多くの計測データが必要である. 他のインターネットのトポロジ解析を研究するプロジェクトと協調することで, 計測拠点を増やしていく活動を行なう必要がある.

最後に, 本手法を用いることで地域毎のインターネットの現状が明らかになる. 計測手法のさらなる検証に加え, 地域毎のインターネットの現状を明らかにする必要がある.

謝辞

本論文作成にあたり, ご指導いただきました慶應義塾大学環境情報学部教授 村井純博士, 並びに同学部教授 徳田英幸博士, 並びに同学部教授 中村修博士, 同学部助教授 楠本博之博士, 同学部助教授高汐一紀博士, 同学部専任講師 湧川隆次博士に感謝します.

そして, 学部在籍中に最も御世話になった IIJ 技術研究所主幹研究員長健二朗博士に深く感謝致します. 博士は, インターネットのネットワークトラフィックの計測分野に精通されており, 今年 1 年間非常に多くのご指導を頂きました. 博士なくしては, 本論文は為しえませんでした. 改めて感謝申し上げます. 次に, 政策メディア研究科 南政樹氏, 並びに同研究科 小原泰弘氏に感謝致します. 氏らには, 研究室に入った当初より 4 年間様々なご指導を頂きました. 本論執筆中も, お忙しいところ絶えずご指導いただき, 感謝の念に尽きません.

また, 慶應義塾大学環境情報学部 村井研究室のメンバーである, 海崎良氏, 岡田耕司氏, 白畑真氏, 堀場勝広氏, 小椋康平氏, 金井瑛氏, 奥村佑介氏, 本多倫夫氏, 尾崎隆亮氏, 佐藤龍氏そして波多野敏明氏に感謝いたします.

最後に, 大学 4 年間に渡る生活で, 私を支え続けてくれた父と母, 愛犬のソラに感謝します.

2007 年 1 月 24 日

空閑 洋平

参考文献

[1] CAIDA. http://www.caida.org/.

[2] アジアブロードバンド計画. http://www.asia-bb.net/jp/index.html.

[3] Y. Rekhter, T.J. Watson Research Center, IBM Corp., T. Li, cisco Systems, Editors. A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4), March 1995.

[4] J. Postel. INTERNET CONTROL MESSAGE PROTOCOL, September 1981.

[5] Hal Burch and Bill Cheswick. Mapping the internet. *Computer*, Vol. 32, No. 4, April 1999.

[6] Ramesh Govindan and Hongsuda Tangmunarunkit. Heuristics for internet map discovery. pp. 1371–1380, March 2000.

[7] Priya Mahadevan, Dmitri Krioukov, Marina Fomenkov, Xenofontas Dimitropoulos, , and Amin Vahdat. The internet as-level topology: three data sources and one definitive metric. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, Vol. 36, No. 1, pp. 17–26, January 2006.

[8] Rocketfuel. http://www.cs.washington.edu/research/networking/rocketfuel/.

[9] N. Spring, R. Mahajan, D. Wetherall, and T. Anderson. Measuring isp topologies with rocketfuel. *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, Vol. 12, No. 1, pp. 2–16, 2004.

[10] San Diego Super computer Center. http://www.sdsc.edu/.

[11] CAIDA Skitter. http://www.caida.org/tools/measurement/skitter/.

[12] B. Huffaker, D. Plummer, D. Moore, and K. Claffy. Topology discovery by active probing. *Applications and the Internet (SAINT) Workshops, 2002. Article. 2002 Symposium on*, pp. 90–96, 2002.

[13] University of Oregon. http://www.uoregon.edu/.

[14] Route View Project Page. http://www.routeviews.org/.

[15] RIPE Network Coordination Centre. http://www.ripe.net/.

[16] BGPlay: graphical visualisation of BGP updates. http://www.ris.ripe.net/bgplay/.

[17] P. Mockapetris. DOMAIN NAMES - CONCEPTS AND FACILITIES, November 1987.

[18] P. Mockapetris. DOMAIN NAMES - IMPLEMENTATION AND SPECIFICATION, November 1987.

[19] WIDE Project. `http://www.wide.ad.jp/`.

[20] NTT コミュニケーションズ — NTT Communications. `http://www.ntt.net/`.

[21] Rocketfuel Undns. `http://www.scriptroute.org/source/`.

[22] Ethan Katz-Bassett, John P. John, Arvind Krishnamurthy, David Wetherall, Thomas Anderson, and Yatin Chawathe. Towards ip geolocation using delay and topology measurements. In *IMC '06: Proceedings of the 6th ACM SIGCOMM on Internet measurement*, pp. 71–84, New York, NY, USA, 2006. ACM Press.

[23] LMSC, LAN/MAN Standards Committee (Project 802). `http://www.ieee802.org/`.

[24] Y. Rekhter, Juniper Networks, E. Rosen, Cisco Systems, Inc. Carrying Label Information in BGP-4, May 2001.

[25] CAIDA tools : AS ranking. `http://as-rank.caida.org/`.

[26] CAIDA tools : arts. `http://www.caida.org/tools/utilities/arts/`.

[27] Packet Cleaning House. `http://www.pch.net/`.

[28] Packet Clearing House - Internet Exchange Directory. `http://www.pch.net/ixpdir/`.