社団法人　電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE.

Core-Peripheryモデルを用いたASレベルトポロジーの経年変化の分析

佐竹　幸大†　荒川　伸一†　村田　正幸†

† 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: †{k-satake,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

あらまし　トラヒックが増大し続ける中で、情報流通を容易にするために今なお、インターネットの規模は増大し続けている。インターネットでは、AS と呼ばれる自律システムが各々、独自のポリシーに基づいて他の AS と利己的にリンクを構築する。その結果、インターネットは複雑な挙動を示す。経路長やクラスタ係数などグラフ指標の変化を調べる研究が数多くある。グラフ指標はネットワークの性能を特徴づけるため、その変化を理解することは重要である。一方、インターネットにおける情報流通の複雑な挙動を理解するためには不十分である。本研究では、“Core-periphery” モデルを用いて、情報流通において中心的な役割を果たしている AS 集合であるインターネットのコアを抽出する。このモデルでは、システムを、低変動性と効率性を持つ Core、および環境変化を吸収する高変動性を持つ Periphery の二部分に分割する。インターネットの進化や、Periphery の挙動に対しても rigid なコアを明らかにする。インターネットでは、少数の AS が接続の中心となって階層構造を構成し、他の AS が階層の最下部に位置する。既存の公理を適用し、Core と Periphery を定義しコアの経年変化を調べる。分析の結果、接続の中心部の中でも少数の AS が進化の間に rigid なコアを形成しており、他の AS はトラヒックの成長に応じて増大する。さらに、インターネットの情報流通においてコアの Tier-1 の AS が果たす役割の大きさは近年減少している一方で、それでも HyperGiant の AS の果たす役割よりもはるかに大きく、Tier-1 は重要な役割を果たしていることがわかる。

キーワード　複雑ネットワーク、インターネットの進化、自律システム、AS レベルトポロジー、Core-periphery 構造

Analyses of core-periphery structure in Internet's AS-level topologies

Kodai SATAKE†, Shin'ichi ARAKAWA†, and Masayuki MURATA†

† Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University
1–5 Yamadaoka, Suita, Osaka 565–0871, Japan
E-mail: †{k-satake,arakawa,murata}@ist.osaka-u.ac.jp

Abstract　The Internet is becoming ever larger to facilitate an information exchange against the increase of traffic. Each of Autonomous Systems (ASes) in the Internet selfishly selects a set of ASes to connect based on its own policies. Such the system exhibits a complex behavior on the connectivity of the Internet. Many studies investigate changes of several graph metrics such as path length or clustering coefficient. Understanding the changes are important because they characterize a networking performance. On the other hand, it will not contribute to understand the complex behavior of way of the information exchange over the Internet. In this work, we extract the core of the Internet, which is defined as ASes that play a central role for information exchange, through “Core-Periphery” model. The model distinguishes a system into a core part, which has lower variability and is efficient, and a periphery part, which has higher variability to absorb environmental changes. Our analysis shows that 159 ASes out of 642 ASes forms a core part, i.e., they are rigid during the evolution. The other 483 ASes are varied greatly. More specifically, they are increased in response to the growth of Internet traffic. The detailed analysis reveals that Tier-1 ASes in the core part play a central role for information exchange. Their contribution has been decreasing in recent years, but is still more significant than the contribution of Hyper-Giant ASes.

Key words　Complex network, Evolution of the Internet, Autonomous System, AS-level topology, core-periphery structure

1. まえがき

インターネットの社会インフラ化により、その利用形態も日々変化しつづけている。インターネットは、多数の AS (Autonomous System: 自律システム) が相互に接続することにより構成された大規模なネットワークである。インターネットには全体を管理する組織が存在せず、各 AS が自身のポリシーやコスト制約に基づいて他の AS と利己的にリンクを構築することで、通信需要の増大や接続端末数の増大に対応してきた。例えば、各 AS に割当てられる AS 番号の数を見ると、1997 年には約 10000 であったが、2015 年 12 月時点では約 80000 へと増大している [1]。また、利用形態の変化に対しては、AS 間の接続関係の見直しが必須となる。実際に、2006 年頃にはコンテンツ配信を主体とするコンテンツプロバイダー自身が HyperGiant と呼ばれる AS を運用し、AS 間の接続関係に大きな変化をもたらしている。HyperGiant の代表例は Microsoft、Akamai、Google、Facebook である [2]。多くの AS は、顧客に対して提供するソーシャルメディアサービスやコンテンツ配信サービスの品質コストの改善を目的として HyperGiant と直接リンクを構築する。その結果、インターネットの平均パス長が減少し、インターネットの “フラット化” をもたらしていることが指摘されている [3]。

このように、AS レベルトポロジーの接続構造を分析することは、インターネットの進化の方向性を議論する上で重要である。そのため、これまで AS レベルトポロジーの構造的特徴についての研究が数多く為されてきた。文献 [4] では、BGP ルーターの経路情報を用いて AS レベルトポロジーを生成し、次数に関する性質を分析している。その結果、ノードの出次数とそのランクや、ノードの出次数と出現頻度にべき則の関係が現れることが明らかとなっている。ただし、これらの分析では、AS レベルトポロジーが変遷する過程の一点を取り出し、そのトポロジーの構造的特徴を分析している。つまり、AS レベルトポロジーの構造の経年変化を分析するものではない。

文献 [3] では、AS レベルトポロジーのノード数やリンク数、平均ホップ長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いる。特に 2006 年以降は、多くの AS が、顧客に対して提供するソーシャルメディアサービスやコンテンツ配信サービスの品質コストの改善などを目的として、HyperGiant と呼ばれる AS に対して直接リンクを構築していることを明らかにしている。HyperGiant とは、Tier-1 経由の接続に頼らずに、Tier-2/Regional プロバイダと直接ピアリング接続する大手コンテンツプロバイダや CDN グループのことを総称している。そしてその結果、これまでのインターネットの階層性が崩れ、平均パス長が減少し、インターネットが “フラット化” していることを指摘している。文献 [8] では、ISP や Hyper Giant の次数の経年変化に着目し、AS レベルトポロジーの構造的成長を分析している。その結果、コンテンツプロバイダーは、年々次数を増加させ、インターネットにおける存在感を増しつつあることを指摘している。文献 [9] では、k-dense 分解法というグラフ分解手法が、既存の分解手法や、トポロジーに対する指標では捉えられない、AS レベルトポロジーの性質や特徴を捉えている可能性があることを主張している。文献 [10] では、トラヒック量にもとづいて AS レベルトポロジーを分割した。この手法は、リンクを流れるトラヒック量に着目したトポロジーの階層性を示している。この方法を用いて、トラヒックフローの変化を調査した結果、現在のインターネットの接続ポリシーは、将来的に重度のトラヒックの集中につながることを明らかにした。

本稿では、AS レベルトポロジーを対象とし、情報流通の観点から、“Core” および “Periphery” の抽出を行い、その年次的な変化を分析する。自己組織的に動作するシステムにおいて、外的要因の急激な変化に対して安定的に機能提供可能であることを説明するモデルの一つに、“Core-Periphery” モデルがある [11]。文献 [11] では、“Core-Periphery” モデルは急激に成長・変化する複雑システムにおいて、多様な変化・刺激に対する柔軟な対応を可能にし、外部からの影響を減衰し、急激な進化を抑制することで複雑システムに高いロバスト性をもたらし、システム全体を安定させる上で重要であると述べている。

インターネットにおける “Core” や “Periphery” の明確なコンセンサスはない。しかし、インターネットの誕生以来、主要な通信事業者が運用する Tier-1 と呼ばれる AS がインターネットの意思決定 (技術的、価格的、一部は政治的) に関わっており、“Core” の役割を果たしていると推測することができる。しかし一方で、HyperGiant と呼ばれるコンテンツプロバイダーが情報流通の形態に大きな変革をもたらしており、今のインターネットにおいて、Tier-1 の AS のみが情報流通の中心となっているとは限らない。

本稿では、AS レベルトポロジーを対象とし、情報流通の観点から、“Core” および “Periphery” の抽出を行い、その年次的な変化を分析する。まず、既存のトポロジー分析手法である k-dense 分解法を用いて、AS レベルトポロジーのコアを抽出する。次に、各年の AS レベルトポロジーに対して、コアを構成する AS の種別や AS 数の経年変化の様相を見た。さらに、Tier-1 や HyperGiant と呼ばれる AS を削除した際に、トポロジーがどのように変化するかを考察することで、インターネットの情報流通において、特に Tier-1 や HyperGiant が果たす役割の大きさ、貢献度の年次変化を分析する。

本稿では、1 章でまえがきを述べ、2 章では k-dense 分解法にもとづく AS レベルトポロジーの構造分析について述べる。3 章では、AS レベルトポロジーのコア構造の経年変化の分析について述べ、4 章で本稿のまとめを述べる。

2. k-dense 分解法にもとづく AS レベルトポロジーの構造分析

本章では、AS レベルトポロジーの構造分析の方法およびその結果について述べる。まず、分析に用いた AS レベルトポロジーのデータについて説明する。次に今回の構造分析で使用する k-dense 分解法について具体的な説明を行う。最後に、k-dense 分解法に基づいて得られた分析結果を示す。

2.1 AS レベルトポロジー

AS レベルトポロジーは、文献 [10] で使用されているトポロジーデータを用いた。具体的には、主要な ISP のゲートウェイに記録されている BGP ルーティングテーブル及び、Route Views Project、PIPE NCC より得た BGP ルーティングテーブルから抽出、収集した。その他にも、UCLA [12] 及び CAIDA [13] といった多くの組織が、インターネットトポロジーデータを作成し、これらのトポロジーデータは、多くのリンクを含んでいる [14, 15] が、これらのトポロジーデータは、長期的なトポロジー分析には適していない。トポロジーデータを生成するために使用される BGP テーブルとトレースルート結果の観測機器の数が大いに増大しているためである。すなわち、実際のトポロジーの変化によってトポロジーが進化したのか、観測機器の増大によってもたらされた変化なのかが不明確である。そこで、UCLA や CAIDA から提供されたデータの代わりに、RouteViews や PIPENCC のサーバーで採取された BGP テーブルを用いることとする。これらのサーバーは、開始直後より、ほとんど同じ ISP から BGP テーブルを集めている。そのため、UCLA 及び CAIDA よりもトポロジーデータは少ないが、経年を通じて、一貫して比較可能であり、長期に渡るトポロジー分析には適している。AS パスは、トラヒックが通った AS のリストとして記述され、BGP テーブル中の、AS パスより、インターネットトポロジーの AS とリンクが得られる。RouteViews Project サーバーである route-views.route-views.org 及び RIPE NCC サーバーである rrc00.ripe.net に蓄積された BGP ルーティングテーブルを用いる。ただし、注意すべき点としてこの方法では、ピアリングリンクの 40 %以上を取得する事が出来ていないことが知られている。[10]

2.2 AS レベルトポロジーの構造分析

2.2.1 コア構造の抽出

コア構造を抽出するため、AS レベルトポロジーに対して、既存のグラフ分解手法である k-dense 分解法 [9] を用いる。k-dense 分解法は、グラフ G を、階層入れ子構造の k-dense 部分グラフに分割する。ここで、k-dense 部分グラフのエッジはすべて、$k-2$ 個以上の三角形を構成しており、k は部分グラフ内の AS 同士の接続の密さを表しているといえる。この k-dense 分解法を AS レベルトポロジーに対して用いた。その結果得られた分解図が図 2 である。

この特徴を捉えたトポロジーの概略図を作成した。図 1 がその概略図である。

多重の入れ子構造を持つ、唯一の部分グラフが中心に位置している。この中心部において、密に相互接続する部分グラフが一極集中している事がわかる。

2.2.2 特徴的な AS の分布調査

図 2 からも分かるように、AS レベルトポロジーでは、7-dense 以上の部分グラフが接続の中心となっていた。そこで本節では、7-dense 以上の部分グラフに占める Tier-1、Tier-2 AS の分布を求めた。

まず、k-dense 部分グラフに属する Tier-1 又は Tier-2 の割合と k との相関を分析した。図 3 は 2012 年の AS レベルトポロジーにおいて、k-dense 部分グラフに属する Tier-1 または Tier-2 の割合を、各 k(7〜17) に対して求めた結果である。横軸が k の値を、縦軸が k-dense 部分グラフに属する Tier-1、Tier-2 の割合を示している。図 3 より、17-dense の AS、16-dense の AS は、Tier-1、Tier-2 が大部分を占めることがわかる。しかし一方で、11-dense から 15-dense に着目すると、Tier-1、Tier-2 の割合は 50 %程度であり、11-dense から 15-dense には、Tier-1、Tier-2 以外の AS も多く含まれることがわかる。

そこで次に、各部分グラフに属する AS の種別を分析すると、代表的な HyperGiant である google は 15-dense、akamai は 16-dense、ROGERS-CABLE は 14-dense に属することがわかった。これらの結果から、近年は、Tier-1、Tier-2 に加えて、HyperGiant に代表されるコンテンツプロバイダーも、AS レベルトポロジーの接続形態の中心となりつつあることがわかった。

そこで、接続形態の中心であるこれらの AS がインターネットの情報流通において、果たしている役割の大きさ、貢献度がどのように変化しているのかを詳細に分析する必要がある。そこで以降の章では、AS レベルトポロジーのコア構造に着目し、経年変化を分析する。

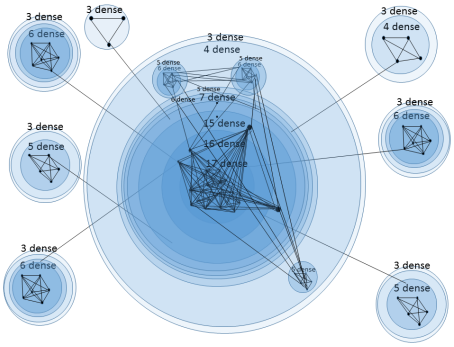

図 1: AS トポロジーの k-dense 分解図：k-dense 分解法の適用結果から特徴を抽出

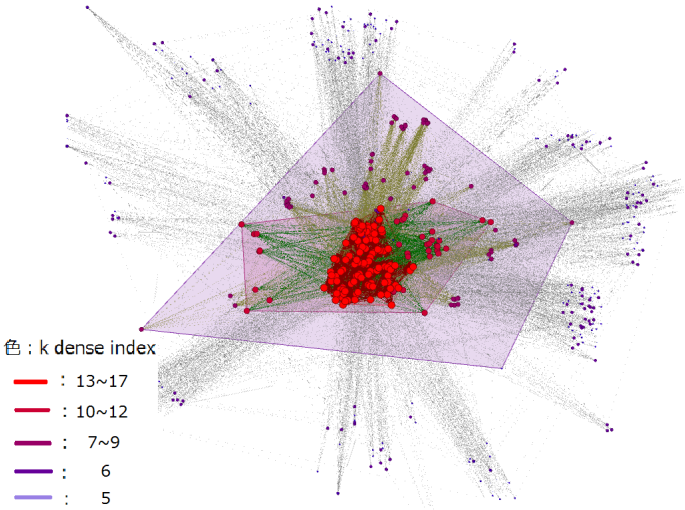

図 2: 2012 年の AS レベルトポロジーの k-dense 分解図：6-dense 部分グラフを抜粋

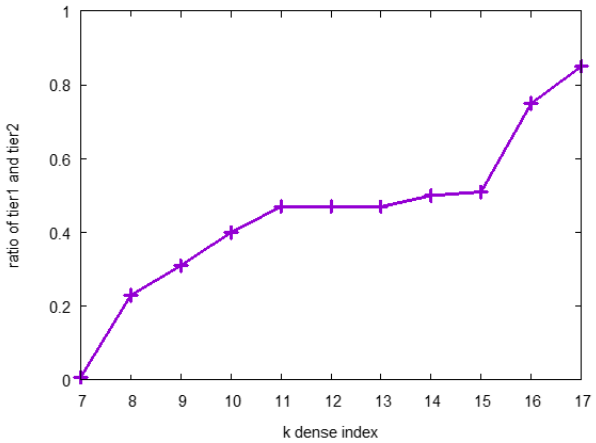

図 3: k-dense 部分グラフにおける Tier-1 、 Tier-2 の割合

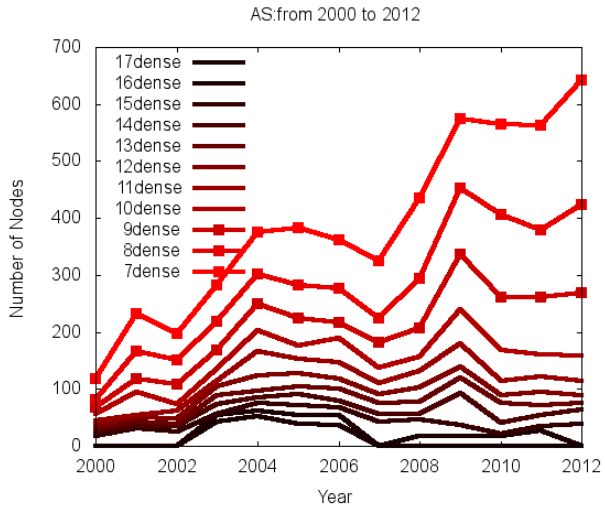

図 4: k-dense 部分グラフに含まれるノード数の推移：7-dense 以上の部分グラフを抜粋

3. AS レベルトポロジーのコア構造の経年変化の分析

本章では、AS レベルトポロジーの接続形態の中心である 7-dense 以上の部分グラフにおけるノード数、リンク数の経年変化を分析する。次に、文献 [16] のアプローチを用いて、“Core” の要件を満たす k-dense 部分グラフを決定し、その遷移を分析する。

3.1 コア構造のサイズの経年変化

7-dense 以上の部分のグラフについて、ノード数の経年変化を分析した。図 4 はその結果である。グラフの色によって、部分グラフを識別している。横軸が年度を、縦軸が部分グラフに属するノード数を表す。図 4 から、2008 年から 2012 年にかけて、7-dense から 10-dense の部分グラフにおけるノード数は、11-dense から 17-dense の部分グラフのノード数と比較して、顕著に増大していることが確認出来る。すなわち、11-dense から 17-dense の部分グラフの AS 数は比較的、経年による変化が少なく、安定していると言える。AS 数のみならず、各部分グラフ内のリンク数についても、これと同様の傾向が見られた。

ここで、11-dense 以上の部分グラフには、2.2.2 節で述べたように、Tier-1、Tier-2 に加えて HyperGiant のようなコンテンツプロバイダも多数含まれることから、Tier-1、Tier-2 に加えて HyperGiant も、インターネット全体の変化・変動の影響を大きく受けない性質を持っていると推測できる。

ここまでの分析の結果から、AS レベルトポロジーには、高度にクラスタリングされた密な接続構造を持つ 11-dense から 17-dense の部分グラフが存在していることがわかる。また、AS レベルトポロジーは、少数のノード・リンクで構成され、その構成要素数が安定している 11-dense から 17-dense の部分グラフと、多数のノード・リンクで構成され、その構成要素数が大きく増大している 7-dense から 10-dense 部分グラフが接続している。この点で、インターネットは、安定的に動作する core と変化を吸収する periphery から成る、Core-periphery 構成になっていると推測できる。

3.2 Core-periphery モデルにもとづく Core の経年変化

次に、コアに属する AS が情報流通において果たす役割の大きさ、貢献度の変化を分析する。

ここで、AS が情報流通において果たす役割の大きさ、貢献度は、AS が流通させている情報の量と考えることが出来る。そこで、インターネットにおいて多くの情報を流通させている AS 集合を明確化し、その年次変化を分析する。

明確化された、インターネットにおいて多くの情報を流通させている AS 集合を以降では Core と呼ぶ。

3.2.1 Core の抽出手法

文献 [16] のアプローチを応用し、Core の要件として、以下を用いる。

- $I(C,P)/m = I(P,P)/m$

本式及び以降で、$I(C,C)$ 、$I(P,P)$、$I(C,P)$ はそれぞれ以下のリンク数を表す。

- $I(C,C)$:Core 内のノード同士を接続するリンクの数
- $I(P,P)$:Periphery 内のノード同士を接続するリンクの数
- $I(C,P)$:Core 内のノードと Periphery 内のノードを接続するリンクの数

図 5 は、AS レベルトポロジーに対してこれらの要件をみたす Core を抽出した場合の概念図である。ここで、簡単化のためにリンク数をトラヒック量と見立てると、この状態は、Periphery で発生したトラヒックの過半数が、Core に流れることを意味している。すなわち、この要件を満たす Core の抽出を行うと、Periphery から発生するトラヒックを主に仲介する AS 集合が Core として抽出されることになる。そのため、ここで抽出された Core は、インターネットにおいて過半数の情報を流通させている AS 集合であり、役割の大きさ、貢献度の高い AS 集合を抽出することが出来る。そこで、以下ではこの要件を満たす Core に着目して分析する。

全ノードが Periphery に分類されている状態から、k-dense index の高い部分グラフより順に Core に加えていき、その都

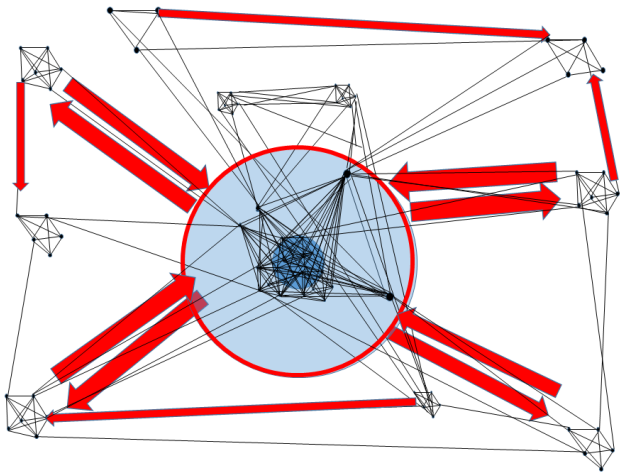

図 5: AS レベルトポロジーにおける core-periphery 構成

表 1: AS レベルトポロジーのノード数・リンク数推移

	2000	2002	2004	2006	2008	2012
ノード数	7911	13470	17791	22737	29089	41909
リンク数	16930	28786	39312	49636	63700	93446

度、逐一、 $I(C,C)$ 、 $I(P,P)$ 、 $I(C,P)$ のリンク数の比率を見る。

k-dense index の高いノード集合から順に、Core に加えていく際の、上述の $I(C,C)$ 、$I(P,P)$ 、$I(C,P)$ の 3 種類のリンク数の比率の変化を表したグラフである Elite influence shift diagrams を導入している。本稿においては、Elite influence shift diagrams は、横軸に、Core のノード数を k、全ノード数を n とした時の、n/k の値をとり、縦軸に、全リンク数に対する対象リンク数の割合をとっている。本稿における、この Elite influence shift diagrams を以後、EISD と呼ぶ。

3.2.2 Core の経年変化

3.2.1 節で説明した方法により、EISD を各年度毎に作成し、$I(C,P)/m$ と $I(P,P)/m$ の交点における横軸座標の経年変化を調べる。ここで、リンク数ではなく、対象リンク数の全体リンク数に対する割合を用いる理由は、経年によりリンク数の増大による影響を受けず、Core と Periphery との関係性のみに注目して分析を行うためである。ただし、EISD のグラフは、あくまで離散値を直線で結んだものであり、交点の座標は厳密には求まらないため、交点の経年変化は、交点の座標として考えられる上限の値を EISD における $I(C,P)/m$ と $I(P,P)/m$ の交点であると考えて、経年変化を調べる。図 6、図 7 の結果と、表 1 の、全体ノード数は増加し続けているという事実から、結論として次のことが言える。Core のノード数は、2003 年まで下降傾向にあったが、2003 年以降、上昇に転じている。また、2003 年以降の Core のノード数の上昇は、全体ノード数の上昇と同程度である。近年では、全体ノード数の上昇に伴いより多くの AS が Core を形成している、すなわち、より多くの AS がインターネットの安定的な情報流通において重要な役割を果たすようになりつつあるといえる。

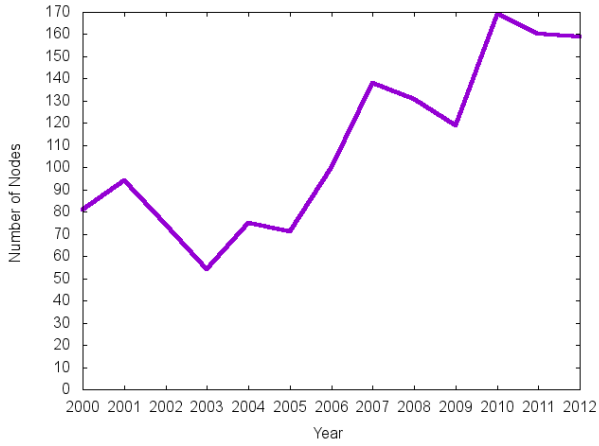

図 6: AS レベルトポロジーにおける $I(C,P)/m$ と $I(P,P)/m$ の交点の経年変化

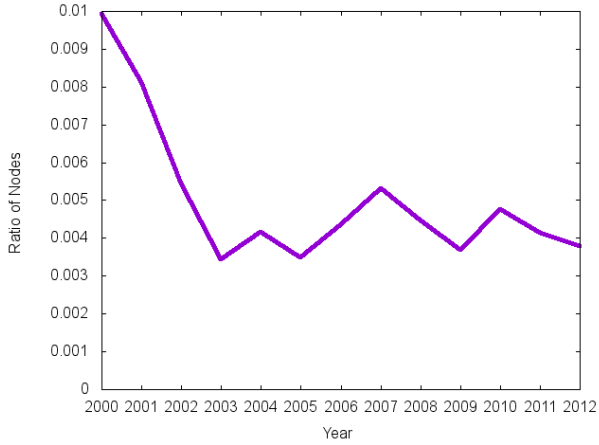

図 7: AS レベルトポロジーにおける $I(C,P)/m$ と $I(P,P)/m$ の交点の経年変化

次に、Core を形成している AS の中でも特に、Tier-1 や HyperGiant がインターネットの情報流通において果たしている役割の大きさ、貢献度をより詳細に調べるため、AS レベルトポロジーから、一部の Tier-1 や HyperGiant 並びにそれらの AS と接続するリンクをすべて取り除いた AS レベルトポロジーを作成し、そのトポロジーに対しても同様に、EISD がどのように変化するかを調べた。

図 8 は、2012 年のトポロジーにおける EISD であり、図 9 は、2012 年のトポロジーにおいて HyperGiant を削除した際の EISD である。これらを比較すると、グラフの左側 (比較的 k-dense index の高い AS で Core を形成したとき) における $I(C,P)$ の減少と、$I(P,P)$ の増加がわずかにしか見られない。図 10 は、2012 年のトポロジーにおける EISD であり、図 11 は、2012 年のトポロジーにおいて Tier-1 を削除した際の EISD である。これらを比較すると、グラフの左側 (比較的 k-dense index の高い AS で Core を形成したとき) における $I(C,P)$ の減少と、$I(P,P)$ の増加が顕著に見られる。$I(C,P)$ は、Core と Periphery を結ぶリンクの数であり、簡単には、Core、Periphery 間を流れるトラヒックの量を示しているとい

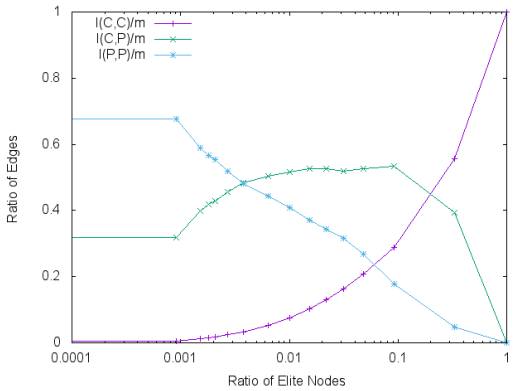

図 8: 2012 年のトポロジーにおける EISD

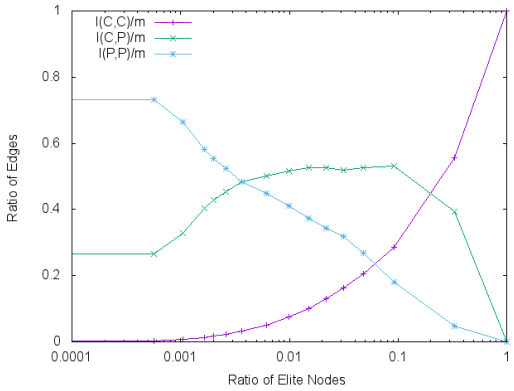

図 9: 2012 年のトポロジーにおいて HyperGiant を削除した際の EISD

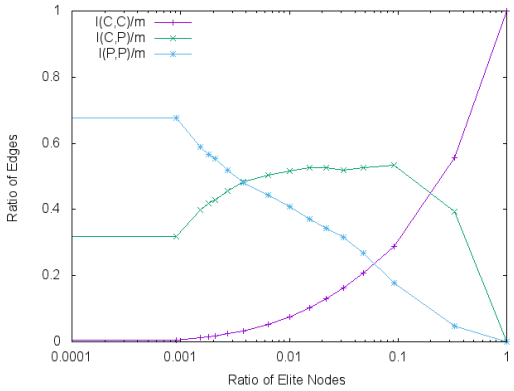

図 10: 2012 年のトポロジーにおける EISD

える。そのためこれらの比較結果から、2012 年の AS レベルトポロジーにおいても依然として、インターネットの情報流通において、Tier-1 が流通させている情報の量つまり Tier-1 の果たす貢献度は大きい。その一方で、Tier-1 と比較すると、HyperGiant が流している情報の量つまり果たす貢献度は小さいといえる。

Tier-1 を削除した際に起こる EISD の変化は、以下のようにして生じると考えられる。以降では、k-dense index が k' となる AS を $N_{k'}$ と表記する。

- 元のトポロジーにおいて $I(C,P) = I(P,P)$ を満たす Core と Periphery を表す C、P はそれぞれ、$C = \cup_{k=16}^{8} N_k$、

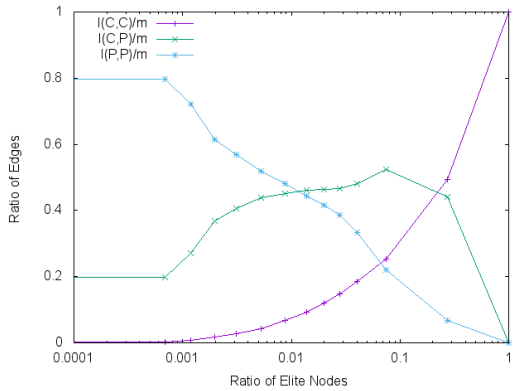

図 11: 2012 年のトポロジーにおいて Tier-1 を削除した際の EISD

$P = \cup_{k=7}^{2} N_k$ と表すことが出来る。

- ここで、削除対象である Tier-1 AS 群の $T1$ 及び $T1$ と接続しているリンクを取り除くと、$T1$ が形成していた、高度にクラスタリングされた構造が崩れ、$C' = C - T1$、$P' = P - T1$ の 2 つの AS 群と、それらの接続リンクから成るトポロジーとなる。
- Tier-1 を中心に形成されていた、高度にクラスタリングされた構造が崩れることで、C' のノードの k-dense index は C のそれと比べて低くなる。同時に k-dense index の最大値である k-max も、$T1$ の削除によって低下する。
- $T1 \subset C$ であり、$T1$ は多数の、Core・Periphery 間リンクと接続しているため、$C' = C - T1$ と接続する Core・Periphery 間リンクは、C と比較して少なくなる、つまり $I(C', P') < I(C, P) = I(P, P) = I(P', P')$ となっている。
- その結果、$I(C' + \Delta P, P' - \Delta P) = I(P' + \Delta P, P' - \Delta P))$ となるような Δ が存在し、$T1$ を取り除いたトポロジーにおける Core 、Periphery である $C*$、$P*$ はそれぞれ、$C* = C' + \Delta P$、$P* = P' - \Delta P$ となる。
- 結果として、$I(C,P)/m$ と $I(P,P)/m$ の交点で定義される Core を形成するのに必要なノード数が増大する。

また、このように Tier-1 を削除することによって $I(C,P)/m$ が変化し、EISD が変化し、それに伴い変化する $I(C,P)/m$ は、近年減少傾向にある。図 12 は、Tier-1 や HyperGiant の削除によって、Core、Periphery 間リンクの割合がどのように変化するのかを表したグラフである。横軸に年を、縦軸に、$I(C,P)/m$ - $I(C',P')/m$ をとった。この図から、Tier-1 の削除による、Core、Periphery 間リンクの割合の変化すなわち $I(C,P)/m$ - $I(C',P')/m$ は、経年により減少傾向にあることが分かる。この結果から、Tier-1 AS を削除したときの Core の $I(C,P)$ の変化は、年々小さくなっていることが分かる。つまりインターネットの情報流通において、Tier-1 が流している情報の量は、近年徐々に小さくなってきているのではないかと言える。しかしながら一方でインターネットの情報流通において、Tier-1 が流している情報の量は、HyperGiant が流している情報の量と比較して、近年でも十分大きいことが図からわかる。

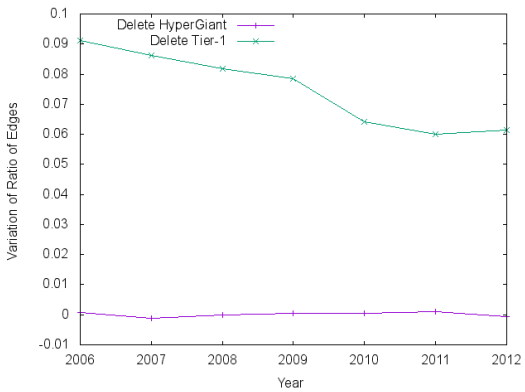

図 12: Tier-1 および HyperGiant の削除による、 I(C,P) の割合変化

4. おわりに

本稿では、インターネットの情報流通における複雑なふるまいを理解することを目的に、情報流通において、中心的役割を果たすコアの抽出およびコアの構成や経年変化の分析を行った。その結果、2012 年にはインターネット全体で 41909 個存在する AS のうち、642 個の AS が、階層入れ子構造の上位層に位置し、インターネットの接続の中心となっていることがわかった。接続の中心である 642 個の AS のうち、特に上位層の 159 個の AS は環境の変化に対しても変化が少ない一方で、残り 483 個の AS は、環境の変化の影響を大きく受けて変化する。インターネットは、Core-periphery モデルで説明できるシステムになっていることがわかった。

また、情報流通において中心的な役割を果たす AS 集合として定義されるコアの構成 AS 数は、近年のインターネットトラヒック増大により、増大し続けていることがわかった。それに伴い、Tier-1、Tier-2 だけでなく HyperGiant などの AS も、少しずつではあるが情報流通の中心になりつつある。

しかしながら、インターネットの情報流通においてコアの Tier-1 の AS が果たす役割の大きさは近年減少している一方で、それでも HyperGiant の AS の果たす役割よりもはるかに大きく、Tier-1 は中心的な役割を果たしていることがわかる。

今後の課題としては、ネットワークの優位性を維持する進化をもたらすコアサイズ、コア構造を明らかにすることが挙げられる。

5. 謝　　辞

本研究の一部は、科学研究費補助金基盤研究 (A)15H01682 によっている。ここに記して謝意を表す。

文　　献

[1] "The 32-bit AS Number Report." `http://www.potaroo.net/tools/asn32/`.

[2] "ATLAS Internet Observatory 2009 Annual Report." `https://www.nanog.org/meetings/nanog47/presentations/Monday/Labovitz_ObserveReport_N47_Mon.pdf`.

[3] A. Dhamdhere and C. Dovrolis, "Twelve years in the evolution of the Internet ecosystem," *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, vol. 19, pp. 1420–1433, Oct. 2011.

[4] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "On power-law relationships of the Internet topology," *ACM SIGCOMM computer communication review*, vol. 29, pp. 251–262, Jan. 1999.

[5] A.-L. Barabási and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Jan. 1999.

[6] T. Bu and D. Towsley, "On distinguishing between Internet power law topology generators," in *Proceedings of INFOCOM*, vol. 2, pp. 638–647, Jan. 2002.

[7] R. Albert and A.-L. Barabási, "Statistical mechanics of complex networks," *Reviews of modern physics*, vol. 74, p. 47, Jan. 2002.

[8] Y. Shavitt and U. Weinsberg, "Topological trends of Internet content providers," in *Proceedings of the Fourth Annual Workshop on Simplifying Complex Networks for Practitioners*, pp. 13–18, Feb. 2012.

[9] C. Orsini, E. Gregori, L. Lenzini, and D. Krioukov, "Evolution of the Internet k-dense structure," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 22, pp. 1769–1780, Dec. 2014.

[10] Y. Nakata, S. Arakawa, and M. Murata, "Analyzing the evolution and the future of the Internet topology focusing on flow hierarchy," *Journal of Computer Networks and Communications*, vol. 113, pp. 13–18, May 2015.

[11] P. Csermely, A. London, L.-Y. Wu, and B. Uzzi, "Structure and dynamics of core/periphery networks," *Journal of Complex Networks*, vol. 1, pp. 93–123, Oct. 2013.

[12] Y. Zhang, "Internet AS-level topology archive.,"

[13] "CAIDA,the Cooperative Association for the Internet Data Analysis,The CAIDA AS Relationships Dataset." [online] `http://www.caida.org/data/active/as-relationships/`, 2012.

[14] D. M. B. Zhang, R. Liu and L. Zhang, "Collecting the Internet AS-level topology," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 35, pp. 53–61, Jan. 2005.

[15] M. F. B. Huffaker and K. Claffy, "Internet topology data comparison," *CAIDA Thechnical Report*, May 2012.

[16] C. Avin, Z. Lotker, D. Peleg, Y. A. Pignolet, and I. Turkel, "Core-periphery in networks: An axiomatic approach," *arXiv preprint arXiv:1411.2242*, Nov. 2014.