

特別研究報告

題目

AS レベルトポロジーにおけるコア構造の経年変化の分析

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

佐竹幸大

2016 年 2 月 16 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

AS レベルトポロジーにおけるコア構造の経年変化の分析

佐竹幸大

内容梗概

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情報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などにもとづいて自己組織的にリンクを構築もしくは再構築することで、通信需要の増大や接続端末数の増大など、インターネットを取り巻く環境の変化に対応している。例えば近年、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、多くの AS が HyperGiant と直接リンクを構築した結果、インターネットの平均パス長が減少していることが指摘されている。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。“Core-Periphery” モデルでは、システム全体を、安定的かつ効率的に動作する “Core” と外的要因の変化に応じて動作形態を変える “Periphery” の二つの要素で捉える。本報告では、インターネットにおける情報流通の中心となるコアを抽出し、その特徴を分析することで、インターネットの情報流通の構造を理解することを目的とする。まず、AS レベルトポロジーを対象に、既存のグラフ分解手法を用いてインターネットのコアを抽出する。その結果、AS レベルトポロジーは、密に接続し合う部分グラフを一つ有しており、その部分グラフに属する AS は、Tier-1、Tier-2 が多数である一方、HyperGiant などの AS も多く含まれていることがわかった。また、コアを構成するノード数、リンク数の経年変化を分析した。結果、インターネットにおいて安定的に振る舞う AS 集合が存在することがわかった。次に、“Core” と “periphery” に属するリンク数にもとづいて、AS レベルトポロジーにおける情報流通の中核となるコア構造を抽出し、その変遷を分析した。その結果、2006 年時点は全体の 8 % 程度である 2000 個の AS がコアを形成していたが、HyperGiant の登場以降はコアを形成する AS 数が年々増加することがわかった。

主な用語

インターネット、AS レベルトポロジー、接続構造、コア、Core-Periphery

目次

1	はじめに	5
2	関連研究	7
3	k-dense 分解法にもとづく AS レベルトポロジーの構造分析	9
3.1	AS レベルトポロジー	9
3.2	k -dense 分解法	10
3.3	AS レベルトポロジーの構造分析	11
4	AS レベルトポロジーのコア構造の経年変化の分析	23
4.1	コア構造のサイズの経年変化	23
4.2	Core-periphery モデルにもとづく Core の経年変化	25
5	おわりに	32
	謝辞	33
	参考文献	34

図目次

1	k -dense 分解	11
2	k -dense 分解図の例	11
3	2012 年の AS レベルトポロジにおける k -dense 部分グラフの個数と k の相関	12
4	AS トポロジの k -dense 分解図 : k -dense 分解法の適用結果から特徴を抽出	13
5	2000 年の AS レベルトポロジにおける 11-dense 以上を抜粋した図	14
6	2000 年の AS レベルトポロジの k -dense 分解図 : 6-dense 部分グラフを抜粋	14
7	2000 年の AS レベルトポロジの k -dense 分解図 : 6-dense 部分グラフを抜 粋 (特に 11-dense 部分グラフを拡大した図)	15
8	2012 年の AS レベルトポロジの k -dense 分解図 : 13-dense 部分グラフを抜粋	16
9	2012 年の AS レベルトポロジの k -dense 分解図 : 6-dense 部分グラフを抜粋	16
10	2012 年の AS レベルトポロジの k -dense 分解図 : 6-dense 部分グラフを抜 粋 (特に 13-dense 部分グラフを拡大した図)	17
11	k -dense 部分グラフにおける tier-1、tier-2 の割合	19
12	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	23
13	k -dense 部分グラフに含まれるリンク数の推移 : 7-dense 以上の部分グラフを 抜粋	24
14	AS レベルトポロジにおける core-periphery 構成	26
15	Elite influence shift diagrams の例	28
16	AS レベルトポロジにおける $I(C, P)/m$ と $I(P, P)/m$ の交点の経年変化 .	29
17	AS レベルトポロジにおける $I(C, P)/m$ と $I(P, P)/m$ の交点の経年変化 .	30
18	AS レベルトポロジにおける $I(C, C)/m$ と $I(C, P)/m$ の交点の経年変化 .	31
19	AS レベルトポロジにおける $I(C, C)/m$ と $I(C, P)/m$ の交点の経年変化 .	31

表 目 次

1	2012 年の AS レベルトポロジにおける k -dense index が 17 の AS	19
2	2012 年の AS レベルトポロジにおける k -dense index が 16 の AS	20
3	2012 年の AS レベルトポロジにおける k -dense index が 15 の AS	21
4	2012 年の AS レベルトポロジにおける k -dense index が 14 の AS	22
5	AS レベルトポロジのノード数・リンク数推移	29

1 はじめに

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。例えば、スマートフォンやタブレット端末などの普及に伴い通信需要や接続端末数は増加し続けており、これらを利用したアプリケーションサービスとしての LINE、Twitter、Facebook の新たなサービスが次々に登場している。特に、動画共有サイトや SNS (Social Networking Service) などのソーシャルメディアサービスは、人と人とのコミュニケーションツールとして定着しつつあり、インターネットを介した様々な人、モノ、サービスのコラボレーションが、インターネットの利用形態の更なる変化をもたらしている。

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]。通信需要や接続端末数の増加に対しては、AS 数を増やし、インターネット全体の設備量を増やすことで一定の対応を図ることができる。一方で、利用形態の変化に対しては、AS 数を増やすだけでは不十分であり、AS 間の接続関係の見直しが必要となる。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]。

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 [4]。インターネットをネットワーク化されたシステムとして捉えると、システムコンポーネントである AS が自身の利益にもとづいて動作するという点で、自己組織的に動作するシステムであると考えることができる。“Core-Periphery”モデルは、システムの構成を、安定的かつ効率的に動作する“Core”と外的要因の変化に応じて動作形態を変える“Periphery”として捉える。文献 [4] では、“Core-Periphery”モデルが、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という意味で、複雑システムに高いロバスト性をもたらしており、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、价格的、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、上で述べたように、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。

本報告では、AS レベルトポロジを対象とし、情報流通の観点からの、“Core” および “Periphery” の抽出を試みる。まず、既存のトポロジ分析手法である k -dense 分解法を用いて、AS レベルトポロジがコアを有するか否かを明らかにする。その結果、AS レベルトポロジは、特に密に接続し合う部分グラフを一つだけ持ち、その部分グラフに属する AS は、Tier-1、Tier-2 が多数含まれる一方で、Tier-1、Tier-2 でない AS も一定数含まれていることがわかった。次に、各年の AS レベルトポロジに対して k -dense 分解法を適用し、経年変化の様相を見た結果、インターネットにおいて安定的かつ効率的に動作する AS と外的要因の変化に応じて動作形態を変える AS が存在することがわかった。さらに、AS レベルトポロジにおけるリンク数をトラフィック量と見立てたとき、Periphery から発生するトラフィックを主に仲介する AS 集合としての “Core” を抽出する。ここで抽出された “Core” は、インターネットの安定的な情報流通に寄与していると推測される。ここで、この “Core” の AS 数の経年変化を調べる。その結果、“Core” は、近年増大傾向にあることが分かった。

本報告では、第一章で研究背景を述べ、第二章で関連研究を述べる。第三章では、 k -dense 分解法にもとづく AS レベルトポロジの構造分析について述べ、第四章では、AS レベルトポロジのコア構造の経年変化を分析した手法及びその結果を述べる。第五章で本報告のまとめを述べ、本報告を終える。

2 関連研究

インターネットは AS(Autonomous System: 自律システム) が相互に接続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は存在せず、利用形態の変化に応じて各 AS が利己的かつ自発的に構成を変更している。そのため、AS 間の接続関係を示す AS レベルトポロジーがどのような特徴を持っており、どのような原理にもとづきトポロジーが構成されているかは明らかになっていない。そこで、それらを明らかにするために、AS が運用する BGP ルーターが保持する経路情報を用いて AS レベルトポロジーを構築し、トポロジー特性を分析する研究がなされている。

文献 [5] 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、度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にべき則の関係が現れることを示している。また、ノードの出次数と出現頻度についてもべき則の関係が現れることを示している。

その後、AS レベルトポロジーのモデル構築を目的として、度数分布がべき則に従うトポロジー生成モデルが考案されている [6]。例えば BA モデルでは、度数が高いノードに対して優先的にリンクを構築することにより、度数分布がべき則に従うトポロジーを生成する。具体的には、トポロジーに順にノードを追加していき、そのノードから新たに m 本のリンクを構築する際に、以下の式にもとづきリンク構築対象のノード i を選択する。

$$P(i) = k_i / \sum_j k_j \quad (1)$$

ここで、 k_i はノード i の次数である。

しかし、文献 [7] では、これらのモデルで生成されるトポロジーは、AS レベルトポロジーの度数分布のべき則性は再現できている一方で、クラスター係数は再現できていないことを主張している。ノード i のクラスター係数は、 i の隣接ノードの数 N_i 及び i の隣接ノード間で実際に張られているリンクの数 E_i を用いて、 $C_i = 2E_i / N_i(N_i - 1)$ で定義される [8]。トポロジーのクラスター係数は、各ノードのクラスター係数の平均値として定義される。実際にクラスター係数を算出すると、2002 年の AS レベルトポロジーのクラスター係数は約 0.45 で、BA モデルで生成されるトポロジーのクラスター係数は約 0.01 である。文献 [7] では、クラスター係数とトポロジーの最大次数には正の相関があることを発見している。そこで、筆者らは、GLP (Generalized Linear Preference) にもとづく新しいトポロジー生成するモデルを考案した。GLP にもとづく生成モデルでは、BA モデルで使用されている確率式を以下のように変更している。

$$P(i) = (d_i - \beta) / \sum_j (d_j - \beta) \quad (2)$$

ここで、 d_i はノード i の次数、 β は定数である。 β の値を 0 から 1 とすることで、次数が高いノードが選択される確率が上がるため、次数が非常に大きなスーパーハブを有するトポロジーが生成され、結果として高いクラスター係数を実現できる。実際に、この生成モデルのパラメータとして 2002 年の AS レベルトポロジーにもとづいた値を設定したところ、クラスター係数、次数分布のべき指数、平均ホップ長の 3 つの観点で、実際の AS レベルトポロジーにより近い特徴量を有するトポロジーを生成できることを示している。

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 プロパイダと直接ピアリング接続する大手コンテンツプロパイダや 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 [9] 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、コンテンツプロパイダーは、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、インターネットを支配するようになりつつあることを指摘している。

文献 [10] 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。 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いる。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、トポロジーの特徴を表す主要な既存の指標と、 k -dense index との相関が十分にないことから、 k -dense 分解法は、トポロジーの特徴を表す主要な既存の指標では、示せない性質を表していることを主張している。

文献 [11] では、トラフィ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フィ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、トラフィ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、将来的に深刻なトラフィックの集中につながることを明らかにした。

3 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及び分析結果をまとめたトポロジー図を示す。

3.1 AS レベルトポロジー

AS レベルトポロジーは、文献 [11] 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[42] 及び CAIDA[39] 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 [43,44] 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最適でない。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された変化なのかが分からないのである。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、長期スパンに渡るトポロジー分析には最適である。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。これらのサーバーを用いる理由は、まだ機能している最古のものであるからである。ただし、残念なことに、この方法では、トランジットフィーなしで、トラヒック交換されている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。ピアリングの喪失により、各リンクを流れる推定トラヒック量は正確さを欠いているが、BGP ルーティングテーブルを使うことは問題ではない。なぜなら、この研究の目的は、正確なトラヒック量を示すことではなく、AS レベルトポロジーの構造を Core-periphery の観点から分析することだからである。

3.2 k -dense 分解法

k -dense 分解法 [10] は、エッジ多様性にもとづく再帰的なグラフ分解 [12] である。その分解例を図 2 に示す。以後、このような分解結果の部分グラフの組を k -dense 分解図と呼ぶことにする。また、 k -dense 分解図におけるそれぞれの部分グラフのことを、 k -dense 部分グラフ、もしくは単に部分グラフと呼び、部分グラフ内のエッジ多様性の大きさを、 k -dense で表す。エッジ (i, j) のエッジ多様性は $m_G(i, j)$ と表記され、グラフ G でエッジ (i, j) を含む三角形の個数すなわち、ノード i, j の両方と接続しているノードの個数で定義される。図 1 は、 $m_G(i, j) = k - 2$ であるリンク (i, j) の例を表している。

グラフ G における k -dense 部分グラフ H_k は、部分グラフ H_k の中で、 $k - 2$ 以上の多様性を持つような全てのリンクによって構成されるような部分グラフと定義される。すなわち、

$$m_{H_k}(i, j) \geq k - 2 \quad (3)$$

が成り立つ。

k -dense 部分グラフ H_k について、

$$m_{H_k}(i, j) \geq k - 2 \Rightarrow m_G(i, j) \geq k - 2 \quad (4)$$

が常に成り立ち、グラフ G を k -dense 分解法により分解した結果は、入れ子構造をした部分グラフの組となる。すなわち、

$$H_{k_{MAX}} \subset \dots \subset H_{k+1} \subset H_k \subset \dots \subset G \quad (5)$$

と表すことが出来る。

このうち、 $H_{k_{MAX}}$ は、ノード数、リンク数が最小で、ノード数に対するリンク数の比率が最大となるような空でない部分グラフである。

k -dense 分解法では、各ノード及び各リンクに対して、 k -dense index という値が以下のように定義される。

- リンクの k -dense index: そのリンクが属する、 k -dense 部分グラフの中で最大の k
- ノードの k -dense index: そのノードと接続しているリンクの k -dense index の最大値

k -dense 分解法の特徴を述べる。 k -dense 分解法では、リンクが部分グラフを形成するためには、そのリンクの端点が共通して接続しているノードが必要であるために、 k -dense 分解図における同一部分グラフ内のノードは密に接続していることを表す。また、 k -core 分解法と比べて、どのようにネットワークが組織されているか、についてのより明確な見通しを持つ

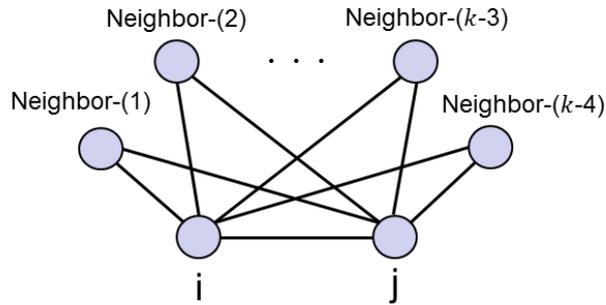


図 1: k -dense 分解

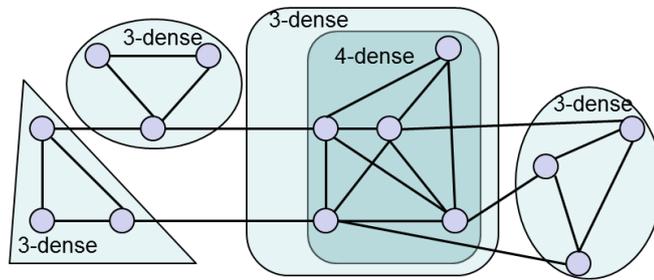


図 2: k -dense 分解図の例

つ。例えば k -core 分解法では、 k -core 部分グラフに属するノードが $k-1$ 個のリンク、ノードを持つことしかわからないが、 k -dense 部分グラフに属するノードは、 $k-1$ 個の接続ノードを持つということだけでなく、これらの隣接ノードそれぞれに対しても、少なくとも $k-2$ の共通接続ノードがあることがわかる。さらに、三角形が強く重なり合った、高度なクラスタリング (分類対象の集合を、内的結合と外的分離が達成されるような部分集合に分離すること) された構造を持つ。クラスタリングは、AS の間での、強い類似性を示す。[13]

3.3 AS レベルトポロジーの構造分析

3.3.1 コア構造の抽出

コア構造を抽出するため、2012 年の AS レベルトポロジーに対して、 k -dense 分解法を用いる。その結果得られた分解図に対して、 k -dense の部分グラフの個数と k との相関を調べる。図 3 は、その結果である。横軸が k の値、縦軸が k -dense 部分グラフの個数を示してい

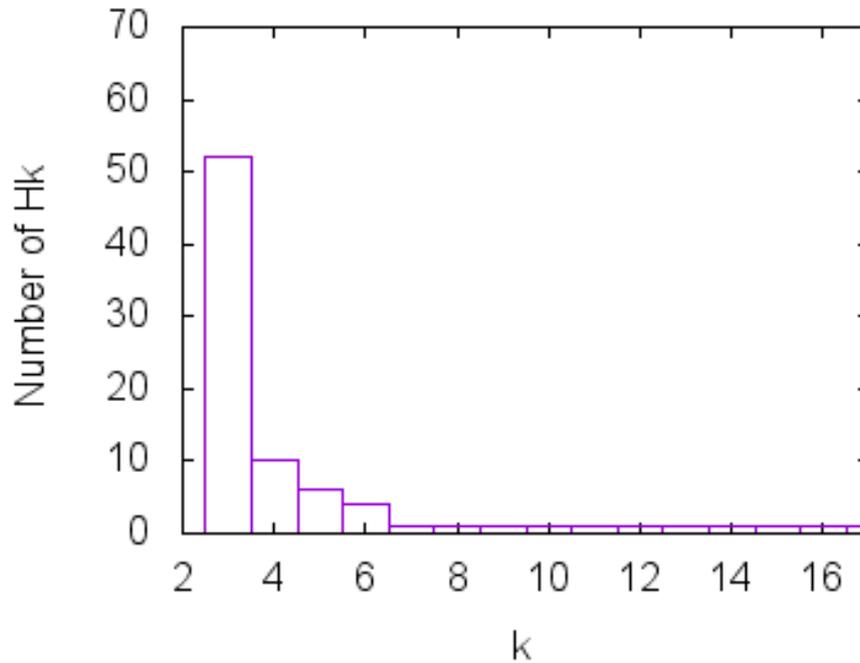


図 3: 2012 年の AS レベルトポロジーにおける k -dense 部分グラフの個数と k の相関

る。図 3 から、7-dense 以上の部分グラフはすべて、1 つしか存在していない一方で、6-dense 以下の部分グラフは多数存在していることがわかる。ここで、7-dense 以上の部分グラフに着目する。 k -dense 分解図は、その定義上、入れ子構造の部分グラフの組であるため、 k -dense の部分グラフに属するノード、リンクは、 k -dense 以下の部分グラフにも属することになる。そのため、7-dense 以上の部分グラフについて、式 (6) の関係が成り立っている。

$$H_{17(MAX)} \subset H_{16} \subset H_{15} \subset \dots \subset H_7 \quad (6)$$

すなわち、7-dense 部分グラフは、7-dense 以上の部分グラフをすべて包含し、多重の入れ子構造を持つ唯一の部分グラフである。結果として、 k -dense 分解図に見られる、密な接続構造を持つ部分グラフは、一極に集中しており、特に、この 7-dense 部分グラフ中に、密な接続構造を持つ部分グラフが一極集中しているということがこの分析を通じてわかった。

また、本節で述べた一連の分析を 2000 年から 2012 年のトポロジーデータに対して行った。その結果、いずれのデータにおいても、2012 年の AS レベルトポロジーと同様に、密な接続構造を持つ部分グラフが一極集中しているという特徴が見られた。

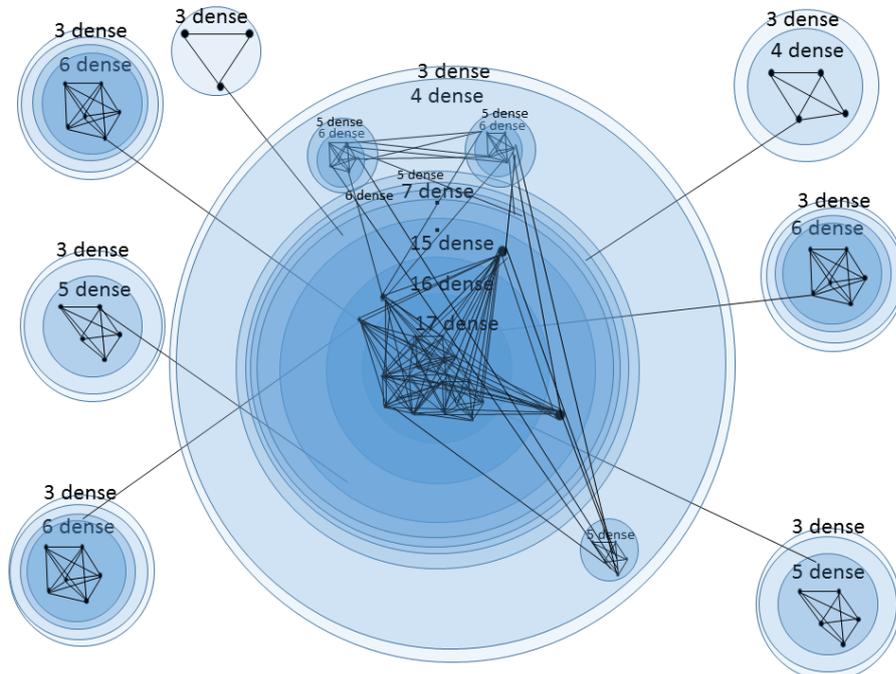


図 4: AS トポロジーの k -dense 分解図 : k -dense 分解法の適用結果から特徴を抽出

3.3.2 AS レベルトポロジーの図示

3.3.1 節での分析結果より、AS レベルトポロジーは、7-dense 部分グラフを中心とする接続形態と考えることが出来る。そこで、この特徴を捉えたトポロジーの概略図を作成した。図 4 がその概略図である。さらに、この概略図の特徴を、実際の AS レベルトポロジーが捉えていることを確認するため、AS レベルトポロジーに k -dense 分解法を用いた結果、得られる k -dense 分解図を図示する。

ただし、実データのトポロジーは、ノード数、リンク数ともに莫大なため、全てのノード、リンクをまとめて可視化し、トポロジーの特徴を捉えるのは困難である。そのため、トポロジーの特徴を捉えやすい図にするために、 k -dense index の値に閾値を設けて、特定の範囲のノード、リンクのみを図示した。

図 9 は、2012 年の AS レベルトポロジーの k -dense 分解図で、6-dense 以上の範囲の一部を抜粋したものである。この図の中で、中心に位置する 13-dense 以上の範囲を抜粋して示した図が図 8 である。結果として、2012 年の AS レベルトポロジーにおける 6-dense 以上の範囲は、図 10 のような構成になっている。

2000 年のトポロジーについても、2012 年のトポロジーと同様に、 k -dense 分解図を図示した。図 6 は、6-dense 以上の範囲を抜粋したものである。この図の中で、中心に位置する

11-dense 以上の範囲を抜粋して示した図が図 5 である。結果として、2000 年のトポロジーにおける 6-dense 以上の範囲は、図 7 のような構造になっている。

これらの k -dense 分解図からも確認できるように、2000 年、2012 年いずれの AS レベルトポロジーにおいても、 k -dense 分解図に見られる、密な接続構造を持つ部分グラフは、一極に集中している性質が変化していないことが確認できる。

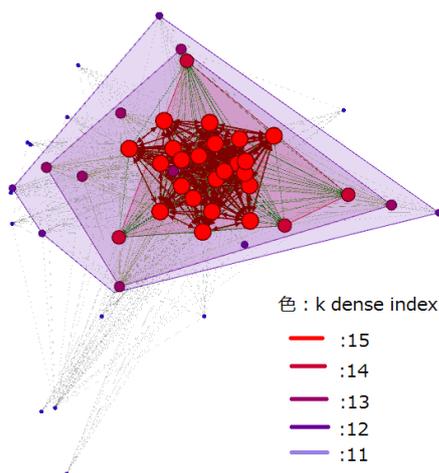


図 5: 2000 年の AS レベルトポロジーにおける 11-dense 以上を抜粋した図

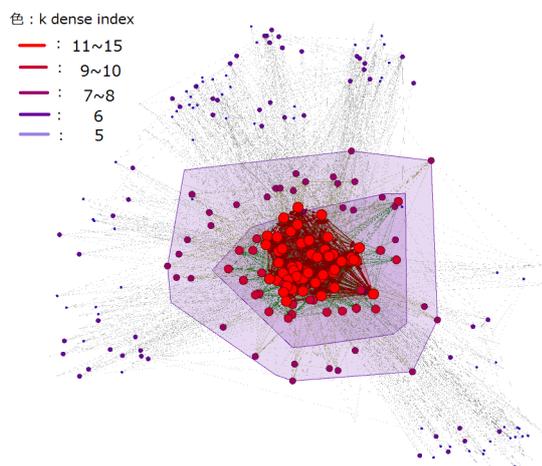


図 6: 2000 年の AS レベルトポロジーの k -dense 分解図 : 6-dense 部分グラフを抜粋

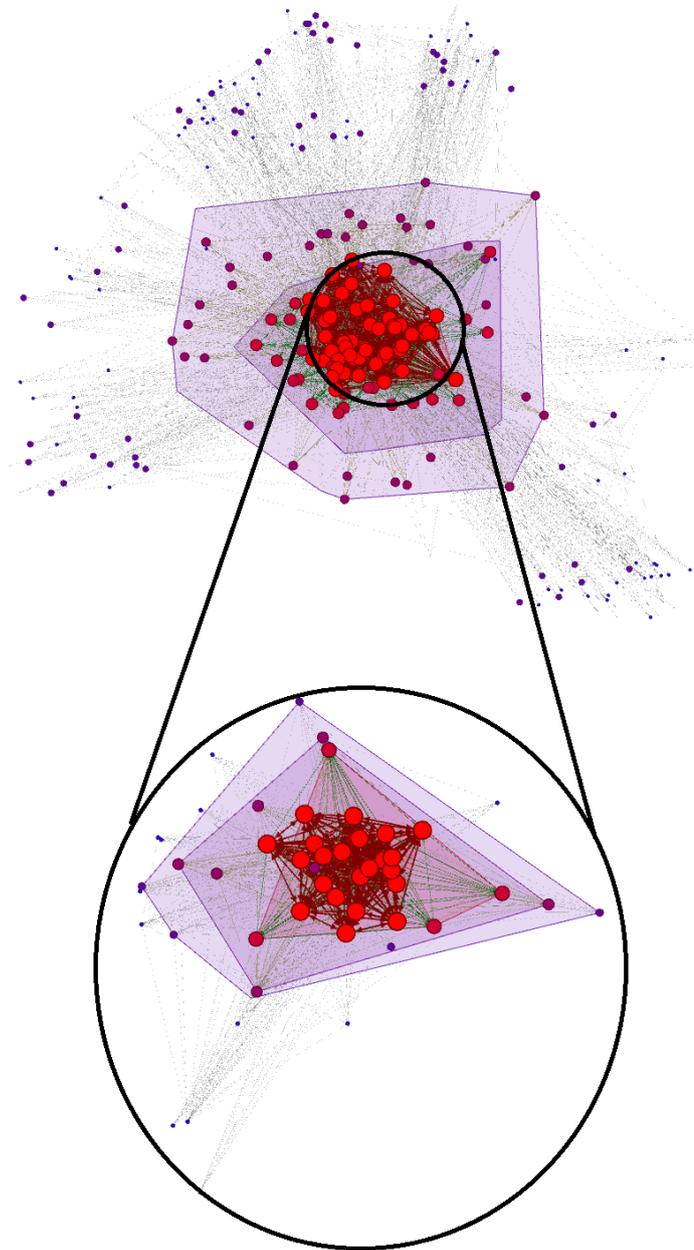


図 7: 2000 年の AS レベルトポロジの k -dense 分解図 : 6-dense 部分グラフを抜粋 (特に 11-dense 部分グラフを拡大した図)

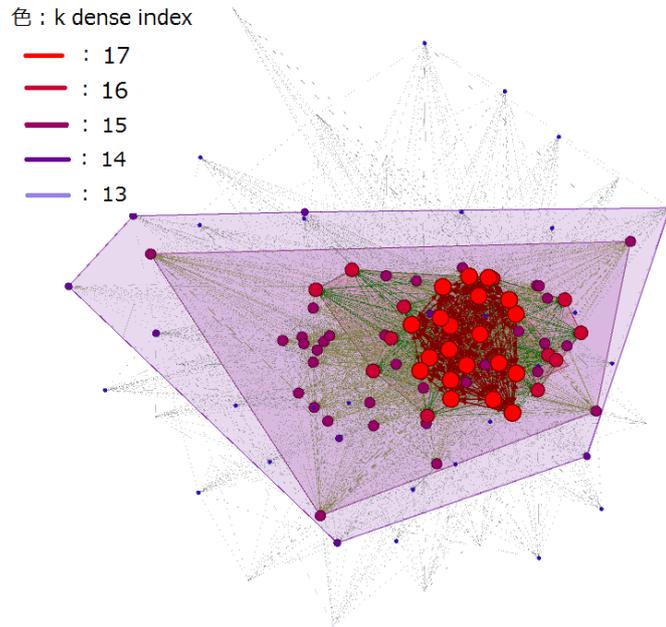


図 8: 2012 年の AS レベルトポロジの k -dense 分解図 : 13-dense 部分グラフを抜粋

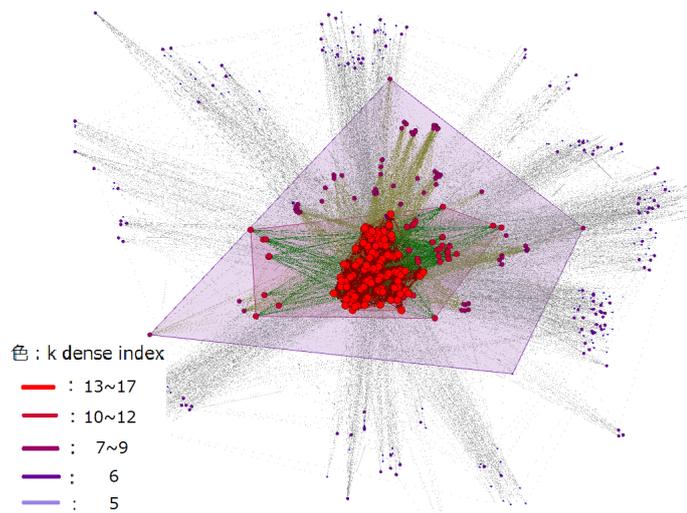


図 9: 2012 年の AS レベルトポロジの k -dense 分解図 : 6-dense 部分グラフを抜粋

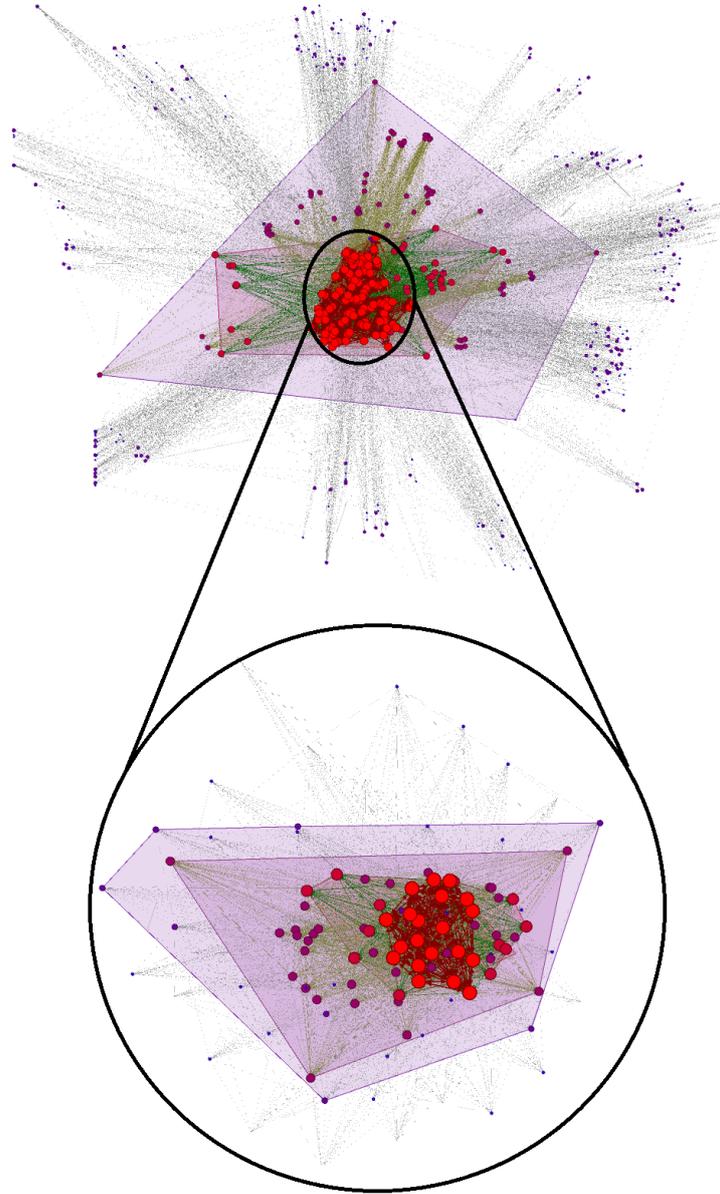


図 10: 2012 年の AS レベルトポロジーの k -dense 分解図 : 6-dense 部分グラフを抜粋 (特に 13-dense 部分グラフを拡大した図)

3.3.3 特徴的な AS の分布調査

2012年の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11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11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。17-denseに属するASと、16-denseに属するASの一覧を、それぞれ表1、表2に示す。これらの表から、欧米の主要な通信事業者が極めて密な接続構成をとっていることが読み取れる。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、主要なHyperGiantが属する k -dense部分グラフを考える。表3、表4は、 k -dense部分グラフに属するASの一覧のうち、15-dense、14-denseを抜粋したものである。ここから、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がインターネット全体に対してどのような役割を果たしているのかを分析する必要がある。そこで以降の章では、まず k -dense部分グラフ毎に経年の変化を調べることで、安定性の側面から、高い k -denseの部分グラフの特徴を調べる。

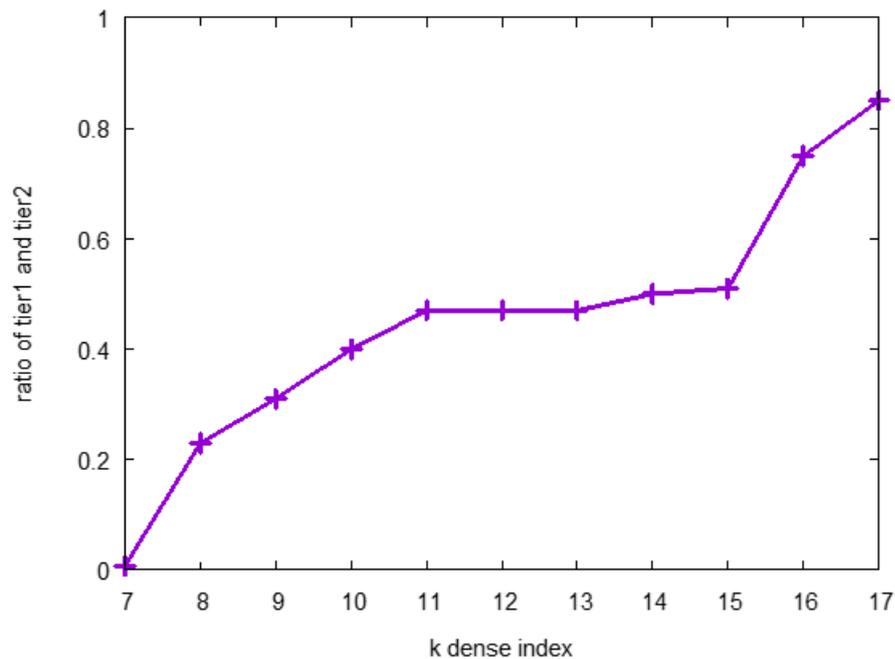


図 11: k -dense 部分グラフにおける tier-1 、 tier-2 の割合

表 1: 2012 年の AS レベルトポロジーにおける k -dense index が 17 の AS

AS 番号	AS 名	AS の特徴
174	COGENT Cogent/PSI	Tier-1
209	ASN-QWEST-US NOVARTIS-DMZ-US	Tier-1
1299	TELIANET TeliaNet Global Network	Tier-1
2914	NTT-COMMUNICATIONS-2914 - NTT America Inc.	Tier-1
3257	TINET-BACKBONE Tinet SpA	Tier-1
3320	DTAG Deutsche Telekom AG	Tier-1
3356	LEVEL3 Level 3 Communications	Tier-1
3549	GBLX Global Crossing Ltd.	Tier-1
6453	GLOBEINTERNET TATA Communications	Tier-1
6461	MFNX MFN - Metromedia Fiber Network	Tier-1
6762	SEABONE-NET TELECOM ITALIA SPARKLE S.p.A.	Tier-1
7018	ATT-INTERNET4 - AT & T Services Inc.	Tier-1
12956	TELEFONICA Telefonica Backbone Autonomous System	Tier-1
286	KPN KPN Internet Backbone	Tier-2
701	UUNET - MCI Communications Services Inc. d/b/a Verizon Business	Tier-2
1239	SPRINTLINK - Sprint	Tier-2
1273	CW Cable and Wireless Worldwide plc	Tier-2
6939	HURRICANE - Hurricane Electric Inc.	Tier-2
1668	AOL-ATDN - AOL Transit Data Network	non Layer
3561	SAVVIS - Savvis	non Layer

表 2: 2012 年の AS レベルトポロジーにおける k -dense index が 16 の AS

AS 番号	AS 名	AS の特徴
1257	TELE2	Tier-2
2497	IJJ Internet Initiative Japan Inc.	sub Tier-1
2516	KDDI KDDI CORPORATION	sub Tier-1
2828	XO-AS15 - XO Communications	Tier-1
3303	SWISSCOM Swisscom (Switzerland) Ltd	sub Tier-1
3491	BTN-ASN - Beyond The Network America Inc.	Tier-1
4134	CHINANET-BACKBONE No.31 Jin-rong Street	non Layer
4436	AS-NLAYER - nLayer Communications Inc.	Tier-2
4637	ASN-TELSTRA-GLOBAL Telstra Global	sub Tier-1
5511	OPENTRANSIT France Telecom S.A.	sub Tier-1
6830	LGI-UPC UPC Broadband Holding B.V.	non Layer
20940	AKAMAI-ASN1 Akamai Technologies European AS	Hyper Giants

表 3: 2012 年の AS レベルトポロジーにおける k -dense index が 15 の AS

AS 番号	AS 名	AS の特徴
42	PCH PCH	Tier-2
293	ESNET - ESnet	Academic
577	BACOM - Bell Canada	Tier-2
702	AS702 Verizon Business EMEA - Commercial IP service provider in Europe	Tier-1
852	ASN852 - Telus Advanced Communications	Tier-2
2686	AT & T Global Network Services - EMEA	Tier-2
3292	TDC TDC Data Networks	Tier-2
3333	RIPE-NCC-AS Reseaux IP Europeens Network Coordination Centre (RIPE NCC)	Tier-2
4323	TWTC - tw telecom holdings inc.	Tier-1
4766	KIXS-AS-KR Korea Telecom	Tier-2
4788	TMNET-AS-AP TM Net Internet Service Provider	non Layer
4837	CHINA169-BACKBONE CNCGROUP China169 Backbone	non Layer
5089	NTL Virgin Media Limited	Tier-2
5400	BT British Telecommunications plc	non Layer
5413	AS5413 Daisy Communications Ltd	Academic
6539	GT-BELL - Bell Canada	Tier-2
6730	SUNRISE Sunrise Communications AG	Tier-2
7473	SINGTEL-AS-AP Singapore Telecommunications Ltd	Tier-2
8218	NEO-ASN Neotelecoms Global Backbone	non Layer
8928	INTERROUTE Interoute Communications Limited	non Layer
9002	RETN-AS ReTN.net Autonomous System	Tier-1
9304	HUTCHISON-AS-AP Hutchison Global Communications	Tier-2
9498	BBIL-AP BHARTI Airtel Ltd.	non Layer
10026	PACNET Pacnet Global Ltd	non Layer
10310	YAHOO-1 - Yahoo!	Tier-2
11164	INTERNET2-TRANSITRAIL-CPS - National LambdaRail LLC	Academic
12389	ROSTELECOM-AS OJSC Rostelecom	Tier-1
13030	INIT7 Init7 Global Backbone	non Layer
15169	GOOGLE - Google Inc.	Hyper Giants
15412	FLAG-AS Flag Telecom Global Internet AS	non Layer
16150	PORT80-GLOBALTRANSIT Port80	Tier-2
16509	AMAZON-02 - Amazon.com Inc.	non Layer
19151	WVFIBER-1 - WV FIBER	Tier-1
20485	TRANSTELECOM JSC Company TransTeleCom	non Layer
22822	LLNW-AS Limelight Networks INC. proxy AS object	Hyper Giants
29049	DELTA-TELECOM-AS Delta Telecom LTD.	non Layer
29208	DIALTELECOM-AS Dial Telecom a.s.	Tier-2
42708	PORTLANE Portlane Networks AB	non Layer

表 4: 2012 年の AS レベルトポロジーにおける k -dense index が 14 の AS

AS 番号	AS 名	AS の特徴
812	ROGERS-CABLE - Rogers Cable Communications Inc.	Hyper Giants
5580	ATRATO Atrato IP Networks	Tier-2
7843	TWCABLE-BACKBONE - Road Runner HoldCo LLC	non Layer
7922	COMCAST-7922 - Comcast Cable Communications Inc.	Tier-2
8359	MTS MTS OJSC	non Layer
8657	CPRM CPRM Autonomous System	Tier-2
9505	TWGATE-AP Taiwan Internet Gateway	Tier-2
25973	GTT Global Telecom & Technology ASN	Tier-2
32934	FACEBOOK - Facebook Inc.	non Layer

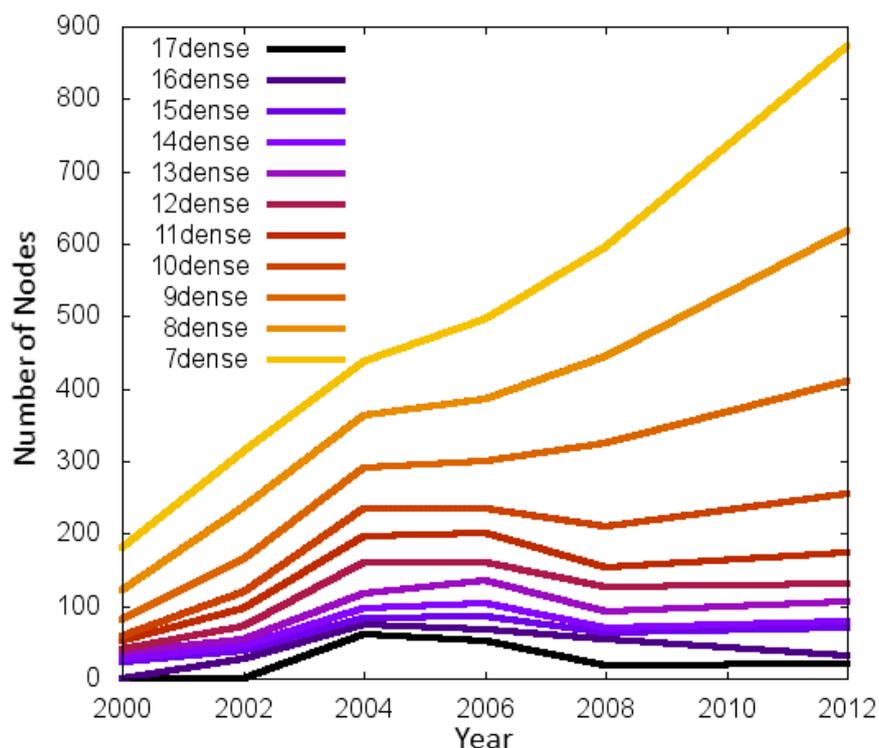


図 12: k -dense 部分グラフに含まれるノード数の推移：7-dense 以上の部分グラフを抜粋

4 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 [14] 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。

4.1 コア構造のサイズの経年変化

まず、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 12 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 12 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 の部分グラフのノード数は比較的安定していると言える。

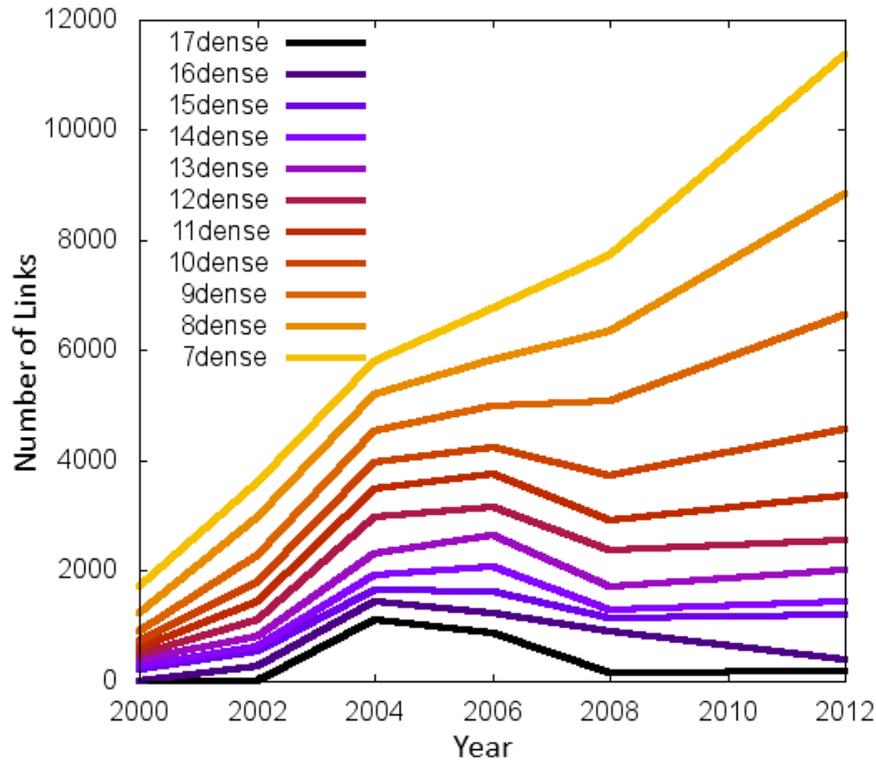


図 13: k -dense 部分グラフに含まれるリンク数の推移：7-dense 以上の部分グラフを抜粋

次に、7-dense 以上の部分のグラフについてのリンク数についても、同様に経年変化を分析した。図 13 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リンク数を表す。図 13 から、リンクに関しても、ノード数と、ほぼ同様の傾向が見られることがわかる。

これらの結果から、ノード数、リンク数のどちらの観点から見ても、11-dense から 17-dense の部分グラフが、比較的安定していることがわかる。

そこで、11-dense 以上の部分グラフを、ノード、リンクの数の変動が少なく、より安定しているコアであると考え、11-dense 以上の部分グラフには、3.3.3 節で述べたように、Tier1、Tier2 に加えて HyperGiant のようなコンテンツプロパイダも多数含まれることから、Tier1、Tier2 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にくいような性質を持っているのではないかと推測できる。

また、AS レベルトポロジー全体のノード数やリンク数が増大するにしたがって、低い k -dense の部分グラフのノード数、リンク数は大きく増大する一方で高い k -dense の部分グラフは、ノード数、リンク数の変動が少なく、安定していることから、Core-periphery モデ

ルの性質を持っていると捉える事が出来る。

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

文献 [14] のアプローチを用いて、Core の要件を満たす k -dense 部分グラフを明確にし、そのノード数の遷移を分析する。

4.2.1 Core の抽出手法

“Core-Periphery” モデルにおいて、Core が満たすべき要件を議論しているものに、文献 [14] がある。文献 [14] 中で述べられている Core の要件に、以下のようなものがある。

- (A1) Dominance: Core の影響力が Periphery を支配していること (定義式: $I(C, P)/m \geq C_r * I(P, P)/m$)
- (A2) Robustness: Core が Periphery からの影響力に耐えられること (定義式: $I(C, C)/m \geq C_d * I(C, P)/m$)

ただしここで、 $I(C, C)$ 、 $I(P, P)$ 、 $I(C, P)$ はそれぞれ以下のリンク数を表し、 C_r と C_d は、定数を表す。

- $I(C, C)$: 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

これらの要件は、インターネットのコアが持つ特徴として重要であると考えられる。例えば Dominance において、 $C_r = 1$ とした時、その定義式は、 $I(C, P) \geq I(P, P)$ となる。図 14 は、AS レベルトポロジーに対して Dominance をみたく 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フィック量と見立てると、この状態は、Periphery で発生したトラフィックの過半数が、Core に流れることを意味している。すなわち、この時、Dominance を用いた Core の抽出を行うと、Periphery から発生するトラフィ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。ここで抽出された Core は、インターネットの安定的な情報流通に寄与していると推測される。同様に、文献中で述べられている Robustness の要件についても、AS レベルトポロジーにおける何らかの重要な性質を示している可能性がある。そこで、以下ではこの二つの要件に着目して分析する。

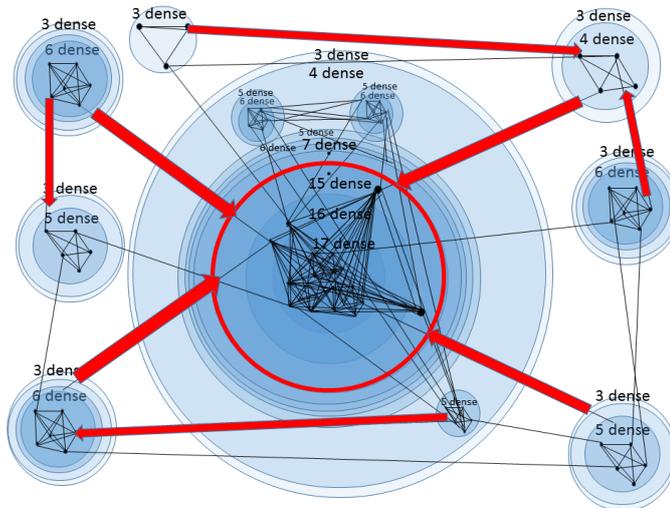


図 14: AS レベルトポロジーにおける core-periphery 構成

文献 [14] では、これらの要件を満たす Core の決定には、次のような方法を用いている。まず、Core という集合と、Periphery という集合を用意し、すべてのノードを、Core か Periphery のいずれかに分類することを考える。次に、どのノードを Core に分類し、どのノードを Periphery へ分類するか、その分類パターンをあるアルゴリズム (後述) に従って、順に変化させる。最後に、順に変化させた様々な分類パターンのうち、要件の定義を満たすような分類パターンにおける Core を、その要件を満たす Core と決定する。ここで、Core 及び Periphery への分類パターンを順に変化させるアルゴリズムは以下である。

Step 1: 初期状態として、全てのノードを Periphery とする。

Step 2: Periphery に属するノードのうち、ある指標の高いものから順に 1 つずつ、Core に加えていく。(文献中では次数の高いノードから順に Core に加えている)

ここで、ノードを 1 つ Core に加える度に、その時点での以下 3 種類のリンク数の比率を見る。

- $I(C,C)$
- $I(P,P)$
- $I(C,P)$

Step 3: 全ノードが Core に含まれると、処理を終了する。

ここで、要件の定義は以下である。

$$(A1) \text{ Dominance: } I(C, C)/m \geq C_r * I(P, C)/m$$

$$(A2) \text{ Robustness: } I(C, C)/m \geq C_d * I(P, C)/m$$

ある指標の高いものから順にノードを1つずつ、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。“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、 $\log_n k$ 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る。

ただし、この手法を本研究で用いる際、以下の点を変更して用いる。Core及びPeripheryへの分類パターンを順に変化させるアルゴリズムにおいて、全ノードを、ある指標の高いものから順に1つずつ、Coreに加えていく際には、次数ではなく、 k -dense indexの高いノードから順に、Coreに加えていく（この際、 k -dense indexが等しい複数ノードを同時にCoreに加えていく）。また、“Elite influence shift diagrams”において、横軸は $\log_n k$ の値ではなく、 k 及び k/m の二つのパターンを考える。さらに、簡単化のため、 $C_r = C_d = 1$ で考える。

図15が“Elite influence shift diagrams”の一例である。図15で、薄く灰色に網掛けた部分が(A1)Dominanceを満たす範囲、濃く灰色に網掛けた部分が(A2)Robustnessを満たす範囲である。すなわち、横軸の値は、右に行くほどCoreのAS数が増えるため、 $I(C, P)/m$ と $I(P, P)/m$ の交点は、(A1)Dominanceを満たす最小のCoreを表している。同様に、 $I(C, P)/m$ と $I(C, C)/m$ の交点は、(A2)Robustnessを満たす最小のCoreを表している。さらに、 $I(C, C)/m$ と $I(P, P)/m$ の交点は、Coreのリンク数と、Peripheryのリンク数が拮抗するときのCoreを表している点、“symmetry point”を表している。

4.2.2 Coreの経年変化

4.2.1節で説明した方法により、Elite influence shift diagramsを各年度毎に作成し、 $I(C, P)/m$ と $I(P, P)/m$ の交点、 $I(C, C)/m$ と $I(C, P)/m$ の交点における横軸座標の経年変化を調べる。ここで、Elite influence shift diagramsは各年度について、横軸を絶対数で見た場合と、全体ノード数に対する割合の相対値で見た場合の二通りを示す。ただし、Elite influence shift diagrams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められないため、交点の経年変化は、交点の座標として考えられる下限と上限の値をグラフ中で示し、経年変化を見ている。

まず、 $I(C, P)/m$ と $I(P, P)/m$ の交点を考える。図16から、絶対数で見たとき、 $I(C, P)/m$ と $I(P, P)/m$ の交点におけるノード数は、2000年から2004年までゆるやかに減少傾向に

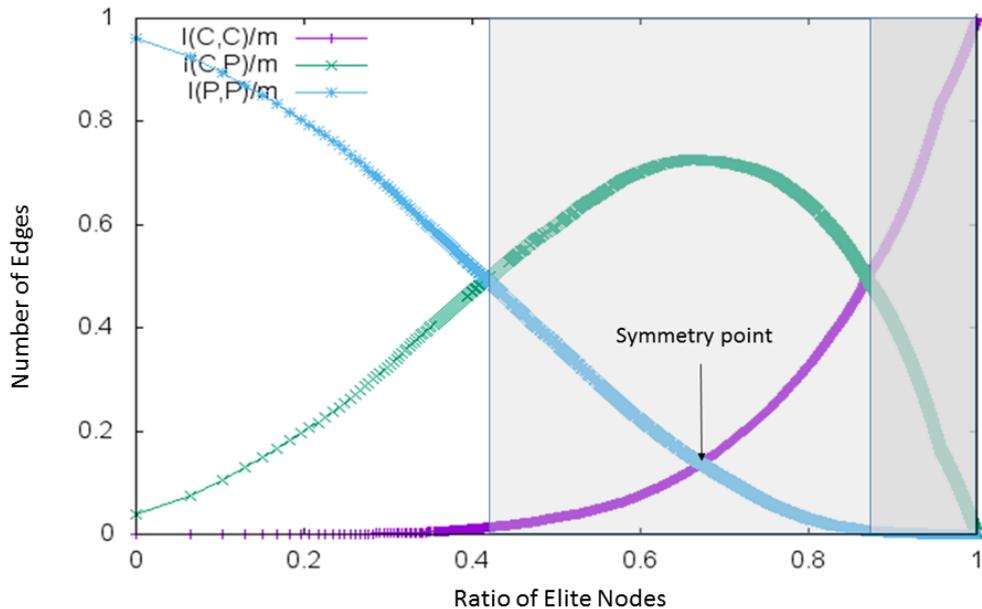


図 15: Elite influence shift diagrams の例

あったのに対して、2004年から2006年で急激に増加し、2008年以降、一定のペースで増加し続けている。また、図17から、全体のノード数に対する割合で見たとき、 $I(C,P)/m$ と $I(P,P)/m$ の交点におけるノード数は、2000年から2004年まで急激に減少している。これは、表5に見られるように、2000年から2012年にかけて、ノード数は常に増加しているにも関わらず、 $I(C,P)/m$ と $I(P,P)/m$ の交点におけるノードの数が減っているからである。それに対して、2004年から2006年には増加し、2006年以降はとても緩やかに減少している。

図16、図17の結果と、表5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。(A1) Dominanceを満たすCoreの最小ノード数は2000年から2004年にかけては、減少していたが、2004年から2006年にかけては、全体ノード数の増加以上の割合で増加し、2006年から2012年にかけては、ほぼ全体ノード数の増加とほぼ同じ割合で増加している。

このことから、トポロジーの末端で発生するトラヒックを主に仲介するAS集合は、かつては多くなかったが、近年に入り、増大しつつあることがわかる。すなわち、tier-1・tier-2以外

表 5: 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

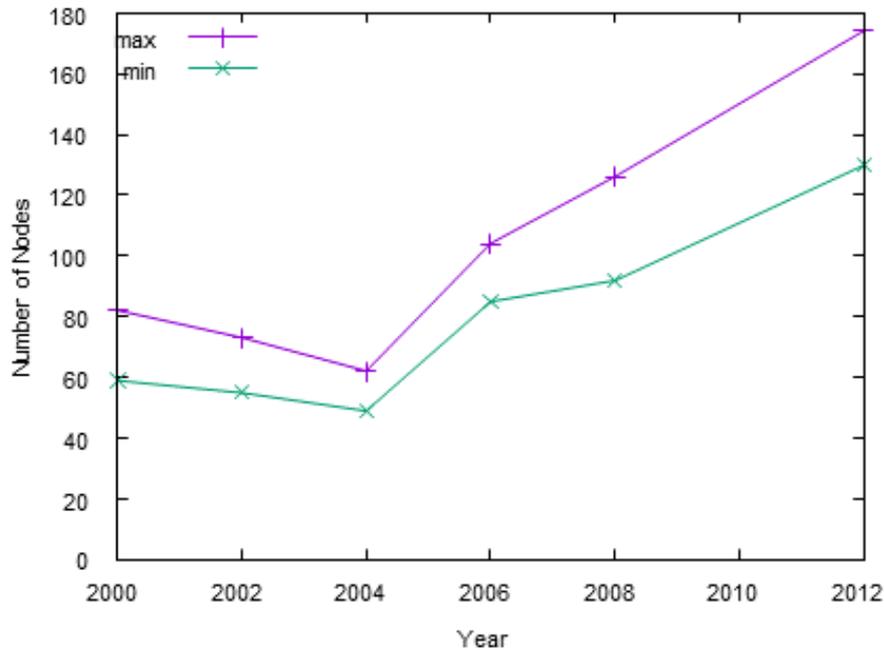


図 16: AS レベルトポロジーにおける $I(C, P)/m$ と $I(P, P)/m$ の交点の経年変化

にも、多くの AS がインターネットの安定的な情報流通に寄与しつつある。また、HyperGiant が登場した 2006 年に、Dominance を満たす Core の最小ノード数が急増していることから、この変化に HyperGiant が関与している可能性がある。

次に $I(C, C)/m$ と $I(C, P)/m$ の交点について考える。図 18 から、絶対数で見たとき、 $I(C, P)/m$ と $I(C, C)/m$ の交点におけるノード数は、2000 年から 2012 年にかけて、常にゆるやかな増加傾向にある。また、図 19 から、全体のノード数に対する割合で見たとき、 $I(C, P)/m$ と $I(C, C)/m$ の交点におけるノード数は、2000 年から 2006 年までの間、ゆるやかに減少し、2006 年以降、ほぼ横ばいである。総じて、(A2)Robustness を満たす Core の最小ノード数の割合の経年変化は少ないことがわかる。これは、(A1)Robustness を満たす Core の最小ノードの割合が 0.003 から 0.011 程度と全体ノードのうち少数であるのと比較して、(A2)Robustness を満たす Core の最小ノード数の割合が 0.1 から 0.45 程度と全体ノードのうち多数であるため、全体ノードの変化の影響を受けやすく、全体ノード数に対

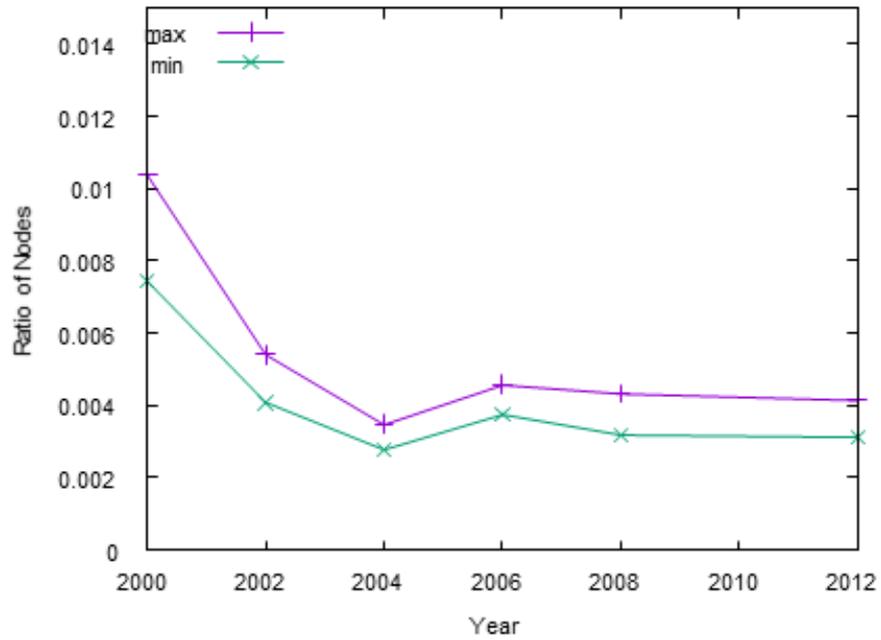


図 17: AS レベルトポロジーにおける $I(C, P)/m$ と $I(P, P)/m$ の交点の経年変化

する割合の変化としては少なくなっていると考えられる。この分析から、Robustness を満たす Core のノード数は全体ノード数に対する割合が大きく、全体ノード数の変化の影響を受けやすいため、本研究で着目している AS レベルトポロジーの Core としては妥当ではないと考えられる。

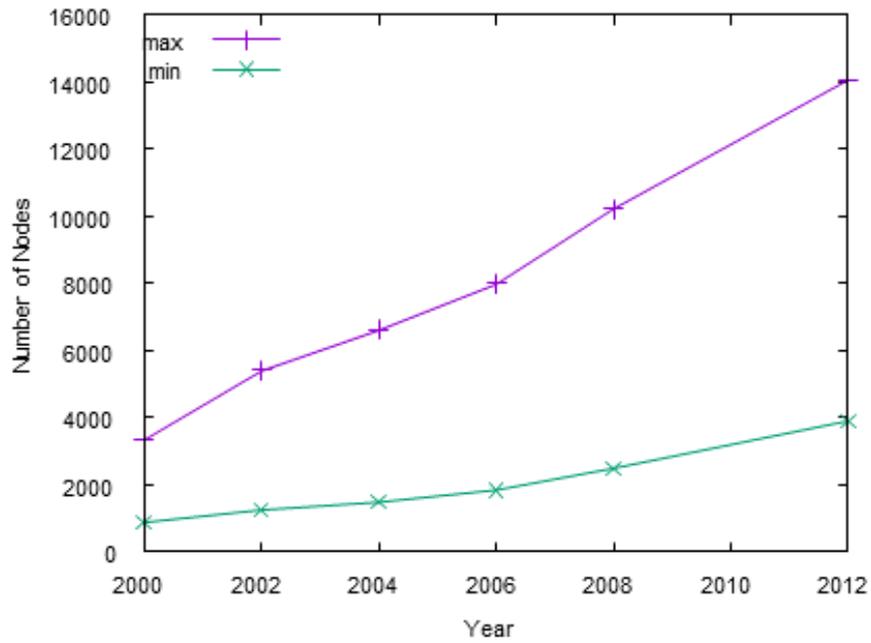


図 18: AS レベルトポロジーにおける $I(C, C)/m$ と $I(C, P)/m$ の交点の経年変化

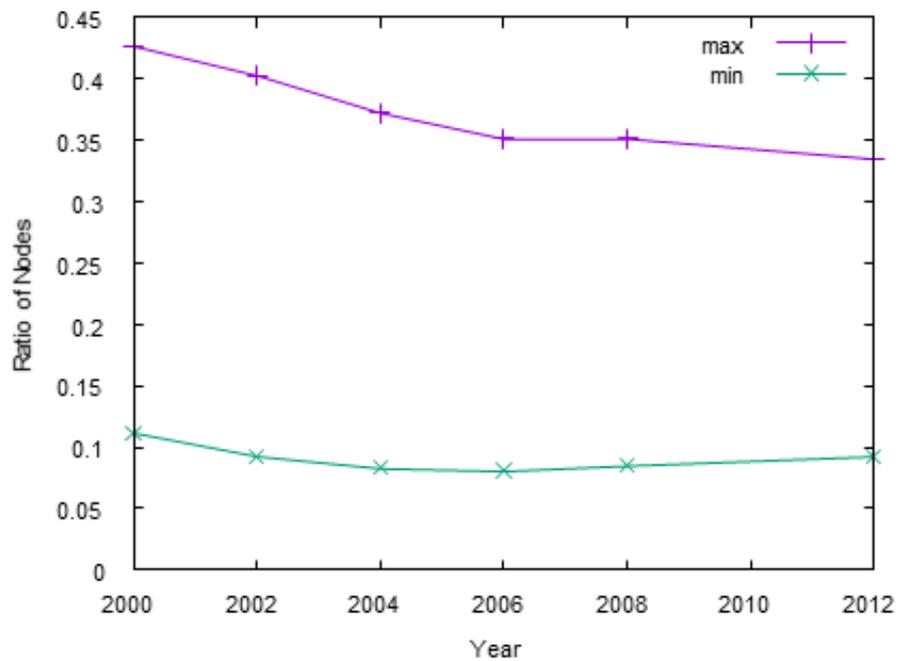


図 19: AS レベルトポロジーにおける $I(C, C)/m$ と $I(C, P)/m$ の交点の経年変化

5 おわりに

本報告では、インターネットにおける、情報流通の中心となるコアを分析し、コアの特徴を理解することを目的に、AS レベルトポロジーのコア構造の抽出と、コアの経年変化の分析を行った。コア構造の抽出に用いた k -dense 分解は、 k -core 分解よりも細かい粒度でトポロジー分解することが出来る性質を持つ。

分析の結果、AS レベルトポロジーには、他の部分と比べて、特に密な接続構造を持つ、少数のノードとリンクによって構成される集合体である 7-dense 部分グラフがただ一つ存在し、その集合体の中でもより密な接続構造を持つごく少数の集合体である 11-dense 部分グラフには、Tier1、Tier2 に加えて HyperGiant などのコンテンツプロバイダーも集中していることがわかった。ここで、11-dense 部分グラフは 12 年間、ノード数、リンク数共に変化が少ない一方で、7-dense 部分グラフは経年により、ノード数、リンク数共に大きく増加し続けていることもわかった。このことから、Tier1、Tier2、HyperGiant は、インターネット全体の成長・変化の影響を大きく受けにくいような性質を持っているのではないかと推測できる。また、全体の AS 数の増大に伴い大きく変化する 7-dense 部分グラフ及び AS 数の増大にも関わらず大きく変化しない 11-dense 部分グラフを持つ点で AS レベルトポロジーは Core-periphery の性質を持っていると考えることが出来る。Core-periphery モデルにおける Dominance という概念を用いて AS レベルトポロジーの Core と Periphery を切り分けたところ、Dominance を満たす Core は、2000 年から 2004 年まで、少数の AS により構成されていたが、2004 年から 2006 年にかけては、比較的多数の AS で構成されるようになり、2006 年から 2012 年にかけて、ますます多くの AS によって構成されるようになりつつあることもわかった。

本報告では、コアサイズの経年変化を分析したが、この変化が何によってもたらされたものであり、将来的にはどのように変化するのか、は明らかになっておらず、またどのような構造、どのようなコアサイズがネットワークの優位性を維持する進化をもたらすのかは明らかになっていない。今後の課題としては、今回分析したような経年変化がもたらされた原因と、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。

謝辞

本報告を終えるにあたりまして、大変ご多忙の中、特別研究全般に関し日頃より、熱心に、広く、的確なご指導、ご教授をいただきました大阪大学大学院情報科学研究科の村田正幸教授に、深く心より感謝申し上げます。ならびに本報告の作成にあたりまして日頃より終始、親密かつ熱心に直接ご指導頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の荒川伸一准教授には、研究の随所随所で常に適切なご指導を頂きましたことを心よりお礼申し上げます。また、本報告に関して、平素より適切なご助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科の太下裕一助教、ならびに大阪大学経済学研究科の小南大智助教に深くお礼申し上げます。最後に、日頃から親身に相談に乗っていただき、様々な質問に答えていただき、多くの助言、知識、技術をいただきました、シン・ルー氏、大場斗士彦氏、四條能伸氏、井上昴輝氏、宮川裕考氏をはじめとする研究室の方々にも深く感謝申し上げます。特に、四條能伸氏には、関連研究の知識、研究の進め方、作法と研究の細部に至るまであらゆる側面で協力して頂きました。重ねて感謝申し上げます。

参考文献

- [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] 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.
- [5] 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.
- [6] A.-L. Barabási and R. Albert, “Emergence of scaling in random networks,” *Science*, vol. 286, pp. 509–512, Jan. 1999.
- [7] T. Bu and D. Towsley, “On distinguishing between Internet power law topology generators,” in *Proceedings of INFOCOM*, vol. 2, pp. 638–647, Jan. 2002.
- [8] R. Albert and A.-L. Barabási, “Statistical mechanics of complex networks,” *Reviews of modern physics*, vol. 74, p. 47, Jan. 2002.
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] K. Saito, T. Yamada, and K. Kazama, “Extracting communities from complex networks by the k-dense method,” *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, vol. 91, pp. 3304–3311, Nov. 2008.
- [13] F. Papadopoulos, M. Kitsak, M. Á. Serrano, M. Boguñá, and D. Krioukov, “Popularity versus similarity in growing networks,” *Nature*, vol. 489, pp. 537–540, May 2012.
- [14] C. Avin, Z. Lotker, D. Peleg, Y. A. Pigolet, and I. Turkel, “Core-periphery in networks: An axiomatic approach,” *arXiv preprint arXiv:1411.2242*, Nov. 2014.