Core-peripheryモデルに基づく 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

大阪大学 情報科学研究科
情報ネットワーク学専攻
村田研究室 佐竹幸大

第 9回 情報ネットワーク科学研究会 2016 / 5 / 27

研究の背景

- **社会インフラ化に伴うインターネットの大規模化**
  - インターネットは多数の Autonomous System (AS) の相互接続により構成
  - 各 AS は、利用形態に応じて利己的に他の AS とリンクを構築
  - 大規模かつ複雑なグラフを形成
    - 2012年時点：AS は約 4 万
- **様々な AS が存在**
  - ISP(Internet Service Provider)
    - Tier-1,Tier-2,Tier-3
  - コンテンツプロバイダー
    - HyperGiant

ASレベルトポロジー (2012年)

Tier-1：
最大手のプロバイダ

[6]A.-L. Barabasi et al., Science, Oct. 1999.
[7] T. Bu et al., Proc. of INFOCOM, Apr. 2002.
[9] Y. Shavitt et al. , Proc. of SCNP, Jan. 2012.

- **AS レベルトポロジーの分析に関する既存研究 [6] [7] [9]**
  - BGP ルーターの経路表からトポロジーを推定し、構造的特徴を分析
    - 次数特性、クラスタ係数、平均経路長などのグラフ指標の変化を分析

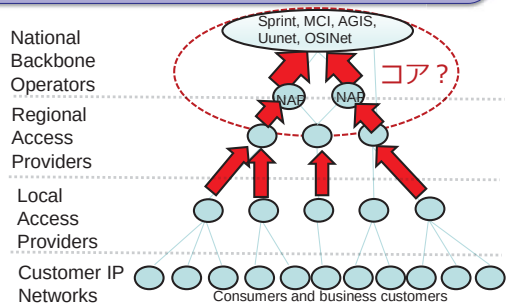
グラフ指標の変化分析は、パフォーマンスを特徴づけるために重要
一方で、インターネットにおける情報流通の複雑な挙動を理解するには不十分

研究の目的

- **インターネットにおける情報流通の複雑な挙動は十分に理解されていない**

インターネットの情報流通において中心的な役割を
果たしている AS 集合として定義される
コア を抽出し、その特徴や経年変化を分析

- インターネットを流れる情報の過半数を流通させ、情報流通の基盤となっている AS 集合を抽出
- 抽出した AS 集合を構成する AS の種別や、構成 AS 数の経年変化を分析

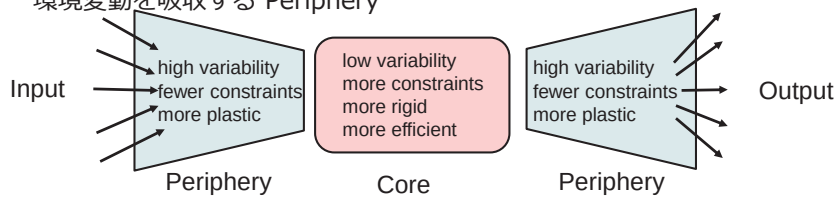


出典:.CDN 配信の仕組みと国内における配備状況, NTT コミュニケーションズ株式会社 先端IP アーキテクチャセンタ 亀井聡, https://www.janog.gr.jp/meeting/janog33/doc/janog33-traffic-kamei-1.pdf

Core-periphery モデル[3]

- **自己組織的に動作するシステムで外的環境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**
- **システムの構成を二つの要素で捉える**
  - 低変動 (安定的) かつ 効率的に動作する Core
  - 外的要因の条件に応じて動作形態を変え、環境変動を吸収する Periphery

[12] 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.
[3] 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.



- **Core が満たすべき要件を導出 [12]**

**AS レベルトポロジーにおいて
情報流通の基盤となるコアを抽出**

研究の方法

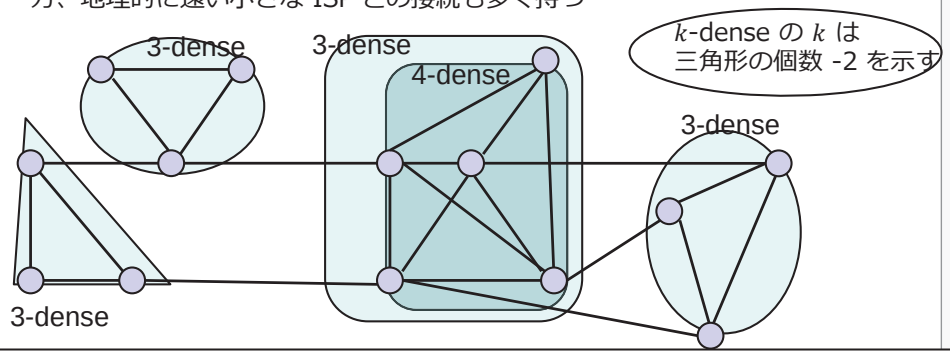
- **AS レベルトポロジーを対象に k-dense 分解法を用いて、接続構造の中心となっている AS 集合を抽出・分析**
  - AS レベルトポロジーは、インターネットにおける AS 間の接続関係を示すグラフで AS がノードに、 AS 間の関係がエッジに対応
  - AS レベルトポロジーは、 BGP ルーティングテーブルから抽出、収集 [12]
  - k-dense 分解法はグラフ分解の手法
- **接続構造の中心となっている AS 集合 の中でも特に、インターネットが情報流通を行う上で中心的役割を担う AS 集合としてのコアを公理[3]を用いて抽出し、その経年変化を分析**
  - コア の構成AS 数 ・ 構成 AS の種別 (Tier-1 や HyperGiant など)
  - Core と Periphery を接続するリンク数

[3] 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.
[12] Y. Nakata, S. Arakawa, and M. Murata, "Analyzing the evolution and the future of the Internet topology focusing on ow hierarchy," Journal of Computer Networks and Communications, vol. 113, pp. 13-18, May 2015.

k-dense分解法 [6]

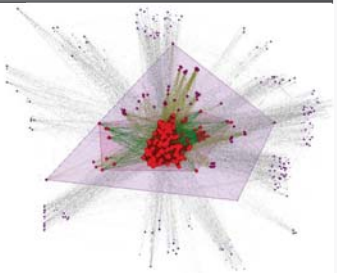
- **密に相互接続された集合をひとまとまりとした k-dense 部分グラフの組に分けるグラフ分解法**
  - 各辺が構成する三角形の個数にもとづき分解
  - 階層入れ子構造を抽出
- **AS レベルトポロジーの構造と密接に関係**
  - AS レベルトポロジーは、地理的に近い大きな ISP の集合体が相互接続される一方、地理的に遠い小さな ISP との接続も多く持つ

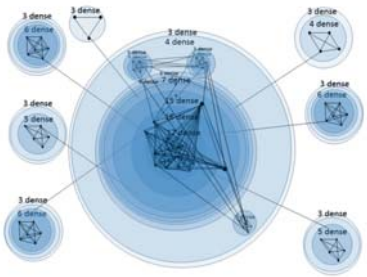
[6] C. Orsini, E. Gregori, L. Lenzini, and D. Krioukov, "Evolution of the Internet k-dense structure," IEEE/ACM Transactions on Networking (TON), vol. 22, pp. 1769-1780, Dec. 2014.



k-dense 分解法にもとづく分解結果

- **少数の AS が接続構造の中心部を形成**
  - 41909 個の AS のうち、642 個の ASが、階層入れ子構造の上位層に位置する 7-dense 以上の部分グラフを構成
  - 階層入れ子構造の上位層に位置する 7-dense 以上の部分グラフはそれぞれトポロジーにただ一つだけ存在
  - 残りの 41267 個の AS で構成される階層入れ子構造の下位層が、接続構造の中心部に対して接続

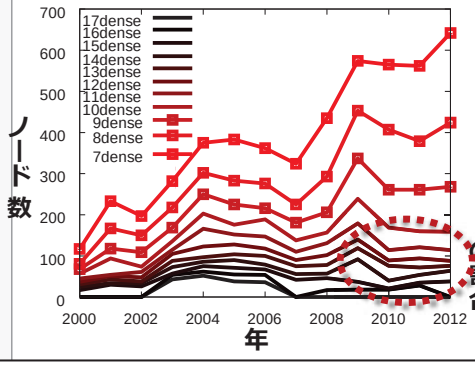


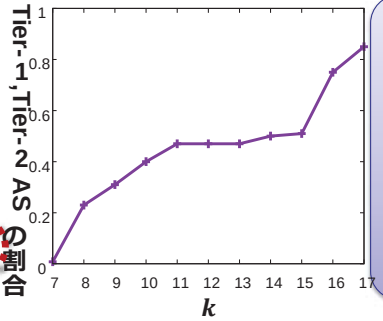


7-dense 以上の部分グラフを中心とする接続形態

接続構造の中心部の部分グラフの構成を分析

- **k-dense 部分グラフのノードの数と、 k の相関**
  - 7 ～ 10-dense (接続の中心部の階層構造の下位層) のノード数は顕著に増大
  - 11 ～ 17-dense (接続の中心部の階層構造の上位層)のノード数は比較的安定
- **k-dense 部分グラフの Tier-1,Tier-2 AS の割合と k の相関**
  - 16-dense, 17-dense の AS の多くは Tier-1, Tier-2 AS
  - 11-dense ～ 15-dense には Tier-1,Tier-2 AS 以外の AS も多く含まれる





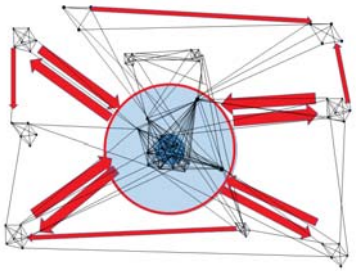
中心部の下位層が大きく変化

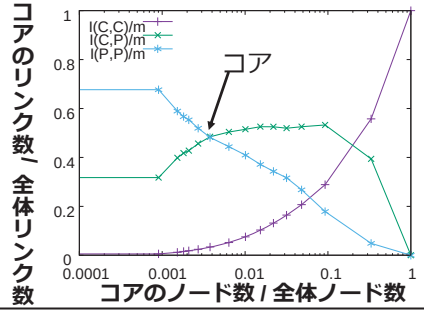
中心部の上位層の変化は少ない

⇒Core-Periphery 構成

コアの抽出方法

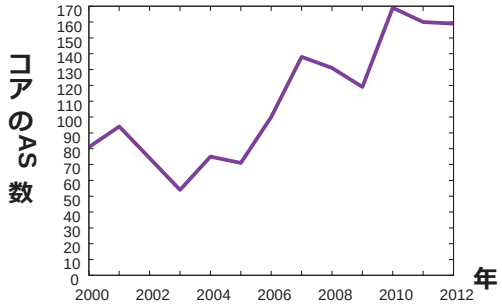
- **上位の階層に属するAS から順にAS 集合 C に追加**
  - 各時点で、三種類のリンク数 $I(C,C)$,$I(C,P)$,$I(P,P)$ を測定
  - $I(A,B)$ はA とB を接続するリンクの数、P はC に属さないAS の集合
- **公理を満たす C をコア C_L として抽出**
  - 公理：$I(C,P) = I(P,P)$
  - リンク数をトラヒック量と仮定
  - Periphery から発生するトラヒックを主に仲介するAS 集合としてのコアを C_L として抽出

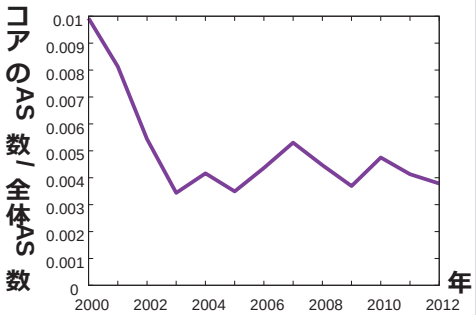




コア の経年変化

- **C_L の構成AS 数の経年変化**
  - 近年、着実に増大し続けている
  - この増大は、インターネット全体のAS 数の増大と同じ割合

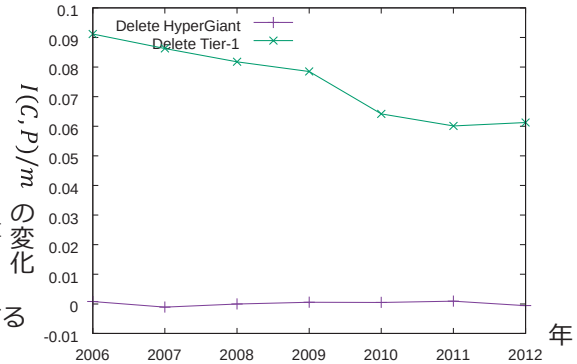




インターネットトラヒックの成長に応じて C_L の AS数は増大

情報流通におけるTier-1 ・ HyperGiant の貢献度

- **インターネットの情報流通において、C_L を形成するTier-1 が果たす役割と HyperGiant が果たす役割の経年変化**
  - 各年の AS レベルトポロジーから、複数の Tier-1 および HyperGiant を削除した際、Core-periphery間のリンク数の変化量を示す
  - 簡単には、リンク数の変化量が大きいことは、削除した AS が多くのトラヒックを流通させていたことを意味する



インターネットの情報流通において、C_L を形成する Tier-1 が果たす役割は近年減少している一方で、依然として HyperGiant よりもはるかに大きな役割を持つ

まとめと今後の課題

- **まとめ**
  - **AS レベルトポロジーを対象に接続構造の中心であるAS集合を抽出・分析**
    - インターネットの接続形態は、ごく少数の AS が接続形態の中心となっている
    - 接続構造の中心部にだけ着目すると、その下位層のAS は外的環境の変化に応じて大きく変化する一方、上位層のAS は変化が少ない (進化において rigid)
    - インターネットの接続構造の中心部には、Tier1,Tier2 AS に加えてHyperGiantなどのコンテンツプロバイダーも含まれる
  - **インターネットが情報流通を行う上で中心的役割を担う AS 集合としてのコアを公理を用いて抽出し、その経年変化を分析**
    - インターネットトラフィックの成長に応じて、情報流通において中心的な役割を果たしている AS 集合として定義されるコアの AS数は近年増大し続けている
    - インターネットの情報流通において、コア を形成する Tier-1 が果たす役割は近年減少している一方で、依然として HyperGiant よりもはるかに大きな役割を持つ
- **今後の課題**
  - トポロジーの将来的な変化予測
  - 優位なインターネット進化のために適切なコアサイズと内部構造の究明