

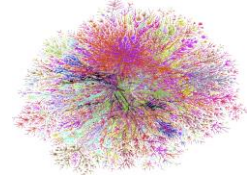


## フロー階層に着目した インターネットトポロジーの成長過程の分析

○中田 侑 荒川 伸一 村田 正幸  
大阪大学

## インターネットトポロジー

- **AS と AS 同士を繋ぐリンクにより構成されるトポロジー**
  - 大規模かつ複雑なグラフを形成
  - 2013年現在、AS は約 4 万、AS 間のリンクは約 10 万本存在
- **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
    - アプリケーションサービス事業者
    - CDN
  - 大学などの研究機関
- **2種類のリンクが存在**
  - トランジットリンク : トラフィックを流すことに対する課金が発生するリンク
  - ピアリングリンク : リンクの両端の AS が対等な関係にあり、課金が発生しないリンク

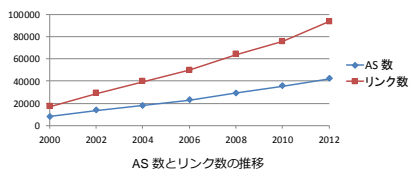


AS レベルトポロジー

※ AS (Autonomous System) : 各組織が保有・運用する自律したネットワーク

## インターネットトポロジーの大規模化

- **急増するトラフィック量に備え、AS はネットワーク機器を追加・増強**
  - 世界のトラフィック量は、毎年 約 35 % ずつ増加
- **各 AS が独自のポリシーに基づき、他の AS とリンクを構築**
  - トポロジー全体を管理する組織は存在しない
  - トポロジーの構造的特徴は明白ではない



AS 数とリンク数の推移

## トポロジーの構造的変化に関する分析の必要性

- **ネットワークの性能はトポロジーの構造に依存**
  - トラフィック負荷の分散
  - 通信品質の向上
  - 通信需要の増加に対する維持管理の容易さ
- **ネットワークの増強には、構造的特徴を踏まえた設計が必要**
  - 新たなリンクをどの AS と構築すべきか
  - リンクにどれほどの通信容量を確保すべきか
- **アプリケーションやプロトコルのパフォーマンス分析**
  - インターネットトポロジーの構造的特徴を反映した環境下での性能分析が必要

## インターネットの構造的変化に関する既存の分析

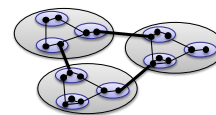
- **スケールフリー性<sup>[1]</sup>**
    - 次数分布がべき則に従う
    - 媒介中心性の分布がべき則に従う
  - **スモールワールド性**
  - **グラフメトリックの経年変化<sup>[2]</sup>**
    - AS やリンク数は線形的に増加
    - 平均ホップ長が一定
  - **Hyper Giants の台頭<sup>[3]</sup>**
    - 多量のトラフィックを送出する AS
    - 多数の小規模の ISP とリンクを構築
- ある時点でのトポロジーの特徴を分析  
↓  
今後の成長を予測するためには、**成長の分析が不可欠**
- 次数などのメトリックに基づく分析  
↓  
ネットワーク性能は AS の次数のみならず、**トラフィックの集約にも依存**  
トポロジーの構造に関する分析が必要

[1] M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "On powerlaw relationships of the Internet topology," in Proceedings of ACM SIGCOMM, vol. 29, pp. 251-262, Oct. 1999.  
[2] A. Shandhare and C. Dovrolis, "Twelve years in the evolution of the Internet ecosystem," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 19, pp. 1420-1433, Sept. 2011.  
[3] Y. Shavit and U. Weinsberg, "Topological trends of internet content providers," in Proceedings of SMPLEX, pp. 13-18, 2012.

## 研究目的とアプローチ

- **研究目的**

インターネットトポロジーの構造的成長を分析し  
トラフィック集約を明らかにする
- **アプローチ**
  - 長期的な構造的成長の分析 (2000年~2013年)
  - トラフィック集約に関連する構造を分析
    - モジュールとモジュール間のリンク
    - フロー階層: モジュールの包含関係による階層構造
  - トポロジーに通信需要を与え、各リンクに流れるトラフィック量を示す



AS  
モジュール  
多くのリンクによって密に  
連結した AS の集合

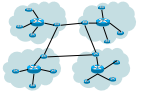
### AS レベルトポロジーのモジュール分割<sup>[4]</sup>

• **モジュラリティが高くなるようにトポロジーを分割**

- モジュラリティ  $Q$  ( $0 \leq Q \leq 1$ ): モジュール内のリンクが密、モジュール間のリンクが疎であるほど値が高くなる変数

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left[ A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta_{S_i S_j}$$

変数	説明
$m$	総リンク数
$i, j$	ノード
$A_{ij}$	隣接行列の要素。重みのないグラフで計算しているため、ノード $i, j$ 間にリンクがある場合は 1、ない場合は 0 をとる。
$k_i$	ノード $i$ の次数
$S_i$	ノード $i$ が属するモジュール
$\delta_{S_i S_j}$	$S_i$ と $S_j$ が等しい場合 1、異なる場合に 0 をとる変数。すなわち、ノード $i, j$ が同一のモジュールに属する場合 1。



モジュラリティ  $Q$ : 高  
モジュール内リンク: 密  
モジュール間リンク: 疎



モジュラリティ  $Q$ : 低  
モジュール内リンク: 疎  
モジュール間リンク: 密

完全グラフやスター型グラフなどの、モジュールに分割不可能な構造は、モジュラリティが 0

[4] M. E. J. Newman and M. Girvan, "Finding and evaluating community structure in networks," *Phys. Rev. E*, vol. 69, p. 026113, Feb. 2004.

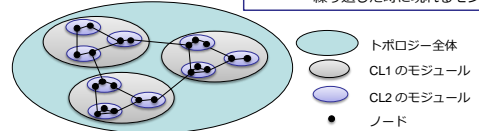
### フロー階層

• **各モジュールをさらにモジュール分割し、これを繰り返すことで得られる階層構造**

• **フロー階層の抽出手順**

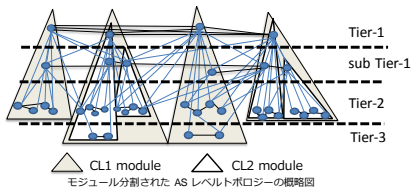
- グラフをモジュラリティが最大になるようにモジュール分割
- モジュラリティが 0 ではない場合(\*)  
⇒ 各モジュールを一つのグラフと見なし、1. に戻る
- モジュラリティが 0 の場合  
⇒ モジュールに分割しない

CL  $k$  (Containment Level  $k$ ) のモジュール:  
モジュール分割を  $k$  回繰り返した時に現れるモジュール



\*完全グラフやスター型グラフなどの、モジュールに分割不可能な構造は、モジュラリティが 0

### フロー階層の構造



△ CL1 module △ CL2 module  
モジュール分割された AS レベルトポロジーの概略図

- 階層構造を縦に分割したモジュールが存在
  - 各モジュールに上位層の AS と下位層の AS が共存
- 上位層の ISP は多くのモジュール間のリンクと隣接

※ sub Tier-1: Tier-1 か Tier-2 かの判断が分かれていない AS

### フロー階層における構造の変化

• **モジュール内の AS 数が増加**

- 特に CL1 と CL2 のモジュール内の AS 数が増大

• **階層構造の深さは変化なし**

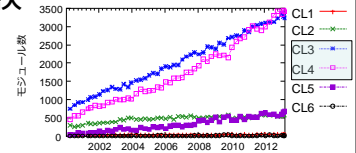
- 2000 年から 2012 年にかけて CL の最大数は 6

一つのモジュールに含まれる AS の数

Year	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6
2000	224.97	24.78	8.41	4.01	3.22	2
2002	424.32	35.73	9.81	4.32	3.35	2.75
2004	414.07	37.84	10.41	4.67	3.59	3.5
2006	528.33	43.54	11.25	5.43	3.59	2
2008	695.98	57.18	12.2	6.2	3.71	2
2010	841.98	69.16	12.26	5.71	3.81	2.17
2012	915.93	73.31	12.93	6.36	3.74	2.89

• **各 CL のモジュール数が増大**

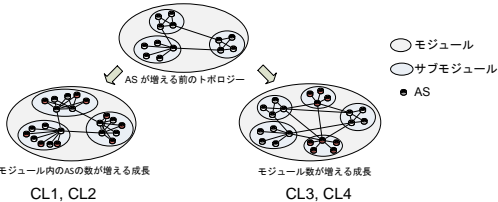
- 特に CL 3 と CL 4 でモジュール数が増大



各 CL 内のモジュール数の経年変化

### フロー階層の構造的成長

- CL1 と CL2 では、モジュール内の AS 数が増える成長
- CL3 と CL4 では、モジュール数が増える成長

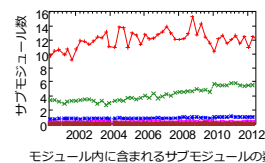


- CL1 と CL2 では、ハブとなる AS やモジュール間リンクにトラフィック負荷が集中

### トラフィックの集中が高まっているモジュール間リンク

• **モジュール内に含まれるサブモジュールの数の変化**

- 各モジュールは複数のサブモジュールを内包
- モジュール間リンクでは、サブモジュール内で発生したトラフィックが集約



モジュール内に含まれるサブモジュールの数

- CL1 のモジュール内のサブモジュール数は、2007 頃よりやや減少
- CL2 のモジュール内のサブモジュール数は、継続して増加
- CL2 のモジュール間リンクでトラフィックの集約が高まる

## リンクに流れるトラフィック量の割り当て

- AS  $i, j$  間の対地間トラフィック量  $X_{ij}$  を割り当てる
  - 各 AS に流入するトラフィック量は、AS の度数に比例すると仮定
  - Google と Akamai は他の AS に対して 895 倍のトラフィック量を流すと仮定<sup>[18]</sup>
  - AS の度数の積に基づくグラビティモデルにより  $X_{ij}$  を算出

$$X_{ij} = T_{in}(i_i) \left( \frac{T_{out}(i_j)}{\sum_k T_{out}(i_k)} \right)$$

$T_{in}(i_i)$	AS $i$ に流入するトラフィック量
$T_{out}(i_j)$	AS $j$ が送出するトラフィック量
$\sum_k T_{out}(i_k)$	ネットワーク全体に流れるトラフィック量

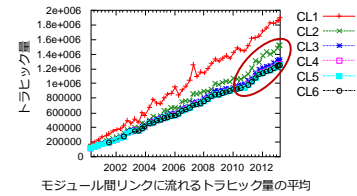
- AS 間のルーティング行列から、各リンクに流れるトラフィック量を算出

- AS 間のトラフィックは最短経路を通ると仮定

[18] Cisco, "The zettabyte era." Available: [http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI\\_Hyperconnectivity\\_WP.html](http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/VNI_Hyperconnectivity_WP.html).

## モジュール間リンクに流れるトラフィック量の分布

- 全ての CL において、モジュール間リンクのトラフィック量は継続的に増加
- 2011 年頃より、CL2 で増加量が増大



- 今後は、グローバルなリンクよりも、より局所的なリンクでトラフィック量が大きく上昇

## まとめと今後の課題

- トラフィック集約に関する構造としてフロー階層に着目
- フロー階層の構造的成長を分析
  - CL1 と CL2 では、モジュール内の AS 数が増える成長
  - CL3 と CL4 では、モジュール数が増える成長
- トラフィック集約が高まるモジュール間リンクの分析
  - CL2 のモジュール間リンクで、トラフィック集約が高まっている
  - 今後は、グローバルなリンクよりも、より局所的なリンクでトラフィック量が大きく上昇
- 今後の課題
  - 現在の構造的成長が続くことで生じる問題を明らかにする
  - 今後起こり得る問題を回避するための AS レベルトポロジーの成長方針を確立
    - トラフィックフローが、負荷の高い AS を経由せずに流れることが可能な構造への成長