



## Topological Evolutionary Methods for the Reliable and Sustainable Internet

中田 侑  
大阪大学大学院情報科学研究科  
情報ネットワーク学専攻  
先進ネットワークアーキテクチャ講座

### 研究背景

- **トラフィックの増大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
  - モバイル端末の多様化、動画コンテンツの高精細化、ビッグデータ利活用などによりトラフィックは今後も増大
- **インターネットの社会インフラ化**
  - 金融、医療、行政サービスなど、様々な分野で常に利用
  - 社会インフラの要件として、将来の増大するトラフィック量を収容し続ける**持続成長**が必要
- **持続成長が可能なインターネットの実現に向けた課題**
  1. 通信需要の増大に伴うネットワークの一部へのトラフィック集中の抑制
    - 必要な設備増強やルーターなどの冷却コストが増大
  2. 各 ISP の、トラフィックの転送量の増大に見合った収入の獲得
    - ISP は設備増強に必要な費用以上の収益が必要
  3. AS 間で交換されたトラフィックを利用者まで安定して届けるネットワーク
    - ネットワーク機器などの障害に対する高い信頼性が必要

### 研究の目的

- **インターネットの持続成長可能性はトポロジーの構造に依存**
  - ネットワークの一部に集中するトラフィックの量や、各 ISP がトラフィック交換から得られる収入は、トラフィックの流れに依存
  - トラフィックの流れはインターネットトポロジーの構造に依存
  - 障害に対するネットワークの信頼性は物理トポロジーの構造に依存
- **インターネットトポロジーは AS のリンク構築により大規模化**
  - インターネット全体を管理する組織は存在しない
    - インターネットの持続成長をより可能にするための最適な設計は不可能
  - 各 AS が独自のポリシーに基づき、他の AS とリンクを構築
    - 自身の収入やネットワーク性能の向上を目指してリンク構築相手を選択
  - インターネット全体の持続成長は考慮されていない



持続成長が可能なインターネットに必要な  
トポロジーの構造的特徴の分析、及び成長方針の提案

### 博士論文の構成

1. Introduction
  - 研究の背景と論文の概要
2. Analyzing the evolution and the future of the Internet topology focusing on flow hierarchy
  - 一部のリンクへのトラフィック集中が抑えられるトポロジーの成長方針の提案
3. A provider and peer selection policy for the future sustainable Internet
  - 各 ISP が継続的に設備増強をするためのリンク構築相手選択ポリシーの提案
4. Analyzing and utilizing the collaboration structure for reliable router-level networks
  - AS 内のネットワークの信頼性向上に必要な構造的特徴の分析
5. Conclusion
  - まとめと今後の課題



## Chapter 2 Analyzing the Evolution and the Future of the Internet Topology Focusing on Flow Hierarchy

1. Y. Nakata, S. Arakawa, and M. Murata, "Understanding the evolution of the Internet topology through hierarchical analysis," in *Proceedings of European Conference on Complex Systems*, Sept. 2013.
2. Y. Nakata, S. Arakawa, and M. Murata, "Analyzing the evolution and the future of the Internet topology focusing on flow hierarchy," *submitted to Journal of Complex Networks*, 2014.
3. Y. Nakata, S. Arakawa, and M. Murata, "Analyzing the evolution of the Internet topology focusing on containment hierarchy," in *Proceedings of IEICE (IN2013-248)*, vol. 112, pp. 489-494, Mar. 2013.
4. Y. Nakata, S. Arakawa, and M. Murata, "Analyzing the evolution of the Internet topology from a hierarchical flow perspective," in *Proceedings of IEICE (PN2013-10)*, vol. 113, pp. 13-18, Aug. 2013.

### 本章の研究背景と目的

- **トラフィックが急激に増大する箇所ではトラフィックの収容が困難**
  - インターネット全体の通信需要は年間約 21% の割合で指数的に増大
  - 回線の容量は過去 10 年で 100 倍に増大しているが理論限界に近づきつつある<sup>[1]</sup>
  - ルーターの消費電力は、20 年後には現在の約 11 倍に増大<sup>[2]</sup>
- **各リンクへのトラフィック集中の度合は大域的な構造に依存**



トラフィックの集中を抑えられる  
インターネットトポロジーの成長方針を説明

- **アプローチ**
  - トラフィックの階層的な集約を表す構造に着目しトラフィックが集中する箇所を特定
  - トラフィックの集中が抑制されるためには、トポロジーがどのような構造になるように成長するべきなのかを示す

[1] R.-J. Essiartre, and R. W. Thach, "Capacity limits of optical fiber networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 662-701, Feb. 2010.  
[2] A. A. M. Saleh, and J. M. Simmons, "Technology and Architecture to Enable the Explosive Growth of the Internet," *IEEE Communications Magazine*, vol. 49, no. 1, pp. 126-132, Jan. 2011.

## トラフィックの階層的な集約を表す構造

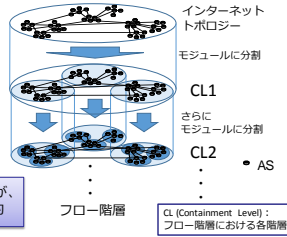
- **トラフィックは階層的に集約**
  - 各 AS のトラフィックが隣接する ISP に繋がるリンクに集約
  - 集約されたトラフィックが、より大規模な ISP 間のリンクに集約
- **トラフィック集約の階層性を示す構造に着目し、トラフィックが集中するリンクを特定**

### モジュール

- リンクで密に繋がった AS のまとまり
- トラフィック集約の 1 ユニットとみなす
- モジュール間のリンクにトラフィックが集約

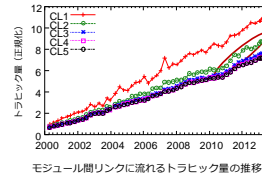
### フロア階層

- 各モジュールを、繰り返しモジュール分割することで得られる階層構造



下位 CL のモジュール内のトラフィックが、上位 CL のモジュール間のリンクで集約

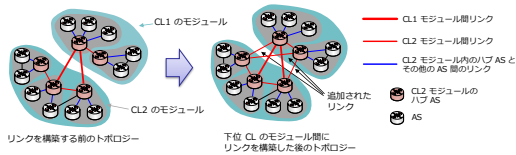
## モジュール間リンクに流れるトラフィック量の推移



- CL1 のモジュール間リンク: 多量のトラフィックが継続して集中
- CL2 のモジュール間リンク: 2011 年頃からトラフィックがより集中

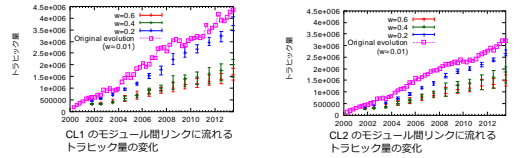
CL1 と CL2 のモジュール間リンクへのトラフィック集中が抑えられるようにトポロジーが成長していく必要がある

## トラフィックの集中が抑制されるトポロジーの成長方針



- **下位 CL モジュールのハブ AS 間にリンクを構築**
  - 各 CL のモジュール内のトラフィックは、ハブ AS 間のリンクに集約
  - 集約されたトラフィックの多くは、さらに 1 階層上のモジュール間リンクで集約
  - 下位層のハブ AS 間のリンクの増加により、上位 CL のモジュール間リンクへのトラフィックの集中が抑制

## トラフィック集中の抑制に対する効果の評価



- **トポロジーの成長に伴うトラフィック集中の変化を分析**
  - 2000 年のトポロジーに対し、各階層のモジュール間リンクの割合  $w$  が指定した値になるように、AS とリンクを追加
- **集中が抑制されるために必要なモジュール内リンクの数を分析**
  - $w = 0.4$  となるようにモジュール間のリンクが増えることで、トラフィックの集中が抑制

## 本章のまとめ

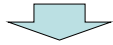
- **トラフィック集中が抑えられるインターネットトポロジーの成長方針を提案**
  - フロア階層の経年変化を分析しトラフィックが集中するリンクを特定
    - CL1 のモジュール間リンク: 他のリンクよりトラフィックの集中
    - CL2 のモジュール間リンク: 2011 年頃よりトラフィックの集中が加速
  - 下位層のモジュール間リンクが増加する成長によりトラフィック集中が抑制
    - モジュール内のハブ AS に繋がるリンクに対する、モジュール間のリンクの割合が 4/6 程度である場合、トラフィック集中が抑えられる

## Chapter 3 A Provider and Peer Selection Policy for the Future Sustainable Internet

1. Y. Nakata, S. Arakawa, and M. Murata, "A provider and peer selection policy for the future sustainable Internet," submitted to *International Journal of Management and Network Economics*, 2014.

### 本章の研究背景および目的

- インターネットがトラフィックを收容し続けるためには、各 ISP の設備増強が必要
  - 各 ISP は設備増強に必要な費用以上の収入が必要
- 他の AS とのトラフィック交換によりネットワーク収益を獲得
  - ネットワーク収益は、主に他の AS から受け取るトランジット料と支払うトランジット料の差額
  - トラフィックの増大に対してネットワーク収益が大きい場合、設備増強が可能
- 隣接するリンクに流れるトラフィックの量に依存
  - 各 AS のリンク構築によるインターネットトポロジーの変化により変動



各 ISP が設備増強に必要なネットワーク収益を獲得できるトポロジーの成長のためのリンク構築相手選択ポリシーを提案

### ISP のネットワーク収益とトラフィック量の推移

- ISP  $i$  のネットワーク収益  $f_i$ 
  - 文献[3]では現実的なパラメータを用いてネットワーク収益を定義

$$f_i = C_i + I_i - P_i - R_i - L_i$$

$C_i$ : カスタマーからのトランジット料  
 $I_i$ : プロバイダーへのトランジット料  
 $P_i$ : プロバイダーからのトランジット料  
 $R_i$ : プロバイダーからのトランジット料  
 $L_i$ : ISP 内部の運用コスト

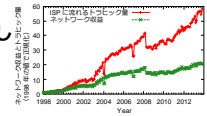
トランジットリンク  
 ・ トラフィックの交換に対してトランジット料が発生するリンク  
 ・ カスタマー: トランジット料を支払う側の AS  
 ・ プロバイダー: トランジット料を受け取る側の AS  
 ・ ビアリングリンク  
 ・ トラフィックの交換に対してトランジット料が発生しないリンク

$$T(x) = 20 \cdot e^{0.75x}$$

$$R(x) = 300 \cdot e^{0.25x}$$

$$L(x) = 100 \cdot e^{0.5x}$$

$S_{ij}$ : ISP  $i$  のカスタマーの場合  
 $S_{ij}$ : ISP  $i$  のプロバイダーの場合  
 $S_{ij}$ : ISP  $i$  とピアリングリンクを構築している AS の場合



- ISP に流れるトラフィックの増加に対しネットワーク収益の増加は小さい

現状のポリシーによるトポロジーの成長では、トラフィックの増大に応じた設備増強が困難

[3] A. Dhamdhere and C. Dovrolis, "The Internet is flat: Modeling the transition from a transit hierarchy to a peering mean," in Proceedings of ACM CONEXT, pp. 1-12, Dec. 2010.

### 設備増強が可能な ISP の割合

- トラフィックの増大に対し設備増強のための十分なネットワーク収益を獲得できる ISP の割合を分析
  - ある時刻  $t$  における ISP の設備の増強可能性を定義
  - (定義) 時刻  $t$  における、ISP に流れるトラフィック量の増加量に対するネットワーク収益の増加量

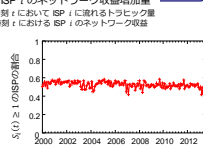
$$S_i(t) = \frac{\Delta U_i(t)}{\Delta F_i(t)}$$

$\Delta F_i(t) = \frac{F_i(t) - F_i(t - \Delta t)}{F_i(t - \Delta t)}$   
 $\Delta U_i(t) = \frac{U_i(t) - U_i(t - \Delta t)}{U_i(t - \Delta t)}$

$S_i(t) > 1$  の時、ISP  $i$  はトラフィックの増大に対して設備増強のためのネットワーク収益が十分増大  
 $S_i(t) < 1$  の時、ISP  $i$  はトラフィックの増大に対して設備増強のためのネットワーク収益が十分増大

- 約半数の ISP は、トラフィックの増大に対し十分なネットワーク収益が得られない

各 ISP がトラフィックの増大に応じて設備増強が可能となるトポロジーの成長が必要



### 提案するリンク構築相手選択ポリシーの概要

- AS  $i$  のリンク構築相手選択ポリシー

- 隣接する ISP は選択しない
- AS  $i$  から候補である ISP までのパスが、AS  $i$  のプロバイダーの他のカスタマーを経由する場合、その ISP を候補から外す
- トラフィックの転送量が同程度の ISP のみを候補とする
- 1.-3. で選択された候補のうち、最も増強可能性が低い ISP とリンクを構築
  - AS  $i$  が新しい AS の場合、選択相手をプロバイダーとしてトランジットリンクを構築
  - AS  $i$  が既存の middle-level ISP の場合、ピアリングリンクを構築

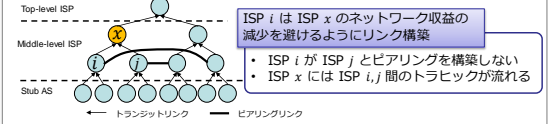
各 ISP の増強可能性が共有されているものとする

(※) 以下を満たすとき、ISP  $a$  と ISP  $b$  は同程度のトラフィックを転送すると見なす

$$0.2 < \frac{P_{a,b}}{P_{b,a}} < 2$$

$P_{a,b}$ : ISP  $a$  から他の全 AS までのパスのうち、ISP  $b$  を含むパス数

- ポリシーにより得られる大局的な構造



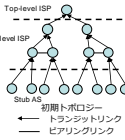
ISP  $i$  は ISP  $x$  のネットワーク収益の減少を避けるようにリンク構築

- ISP  $i$  が ISP  $j$  とピアリングを構築しない
- ISP  $x$  には ISP  $i, j$  間のトラフィックが流れる

### 提案するポリシーによる増強可能性の向上

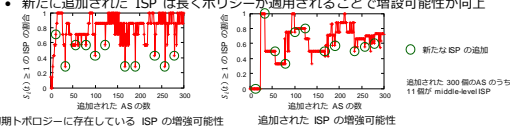
- 初期トポロジーに AS を追加し ISP の増強可能性の変化を分析

- Step 1 [新しい AS を一つ追加]
  - 新しい AS は、stub AS または middle-level ISP
  - 追加された AS がポリシーを実行
- Step 2 [既存の middle-level ISP のリンク構築]
  - 増強可能性が 1 未満の middle-level ISP がポリシーを実行
  - 全ての middle-level ISP の増強可能性が 1 以上、またはリンク構築相手が存在しなくなるまでポリシーを実行



- 増設可能性の向上を確認

- 初期トポロジーに存在しているほぼ全ての ISP の増設可能性が 1 以上に向上
- 新たに追加された ISP は長くポリシーが適用されることで増設可能性が向上



### 本章のまとめ

- ISP の増強可能性を高めるリンク構築相手選択ポリシーを提案

- 各 ISP に流れるトラフィック量とネットワーク収益の推移を分析
  - 現状のポリシーによるトポロジー成長では、各 ISP はトラフィックの増大に応じた設備増強が困難になることを確認
- トラフィックの増加に応じた設備増強が可能な ISP の割合を分析
  - 各 ISP の増強可能性を定義: トラフィックの増加に対するネットワークの収益の増加量
  - 約半数の ISP がトラフィックの増加に見合ったネットワーク収益が得られていない
- 提案したポリシーによるリンク構築により、全 ISP の増強可能性の向上を確認
  - 初期トポロジーに存在しているほぼ全ての ISP の増設可能性が 1 以上に向上
  - 新たに追加された ISP は長くポリシーが適用されることで増設可能性が向上

## Chapter 4 Analyzing and Utilizing the Collaboration Structure for Reliable Router-level Networks

1. Y. Nakata, S. Arakawa, and M. Murata, "Analyzing and utilizing the collaboration structure for reliable router-level networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E95-B, pp. 2013–2021, June 2012.
2. Y. Nakata, S. Arakawa, and M. Murata, "Analysis of the collaboration structure in router-level topologies," in *Proceedings of International Conference on Advances in Future Internet*, pp. 64–69, Aug. 2011.
3. Y. Nakata, S. Arakawa, and M. Murata, "Analysis of the collaboration structure in the Internet topology," in *Proceedings of IEICE (PN2010-54) workshop*, pp. 3–5, Mar. 2010.

### 本章の研究背景と目的

- AS 間で交換されたトラフィックは AS 内部のネットワークを経由
  - トラフィックは AS 内部のネットワークを経由してゲートウェイから利用者へ転送
  - AS 間で交換されたトラフィックを、AS 内部のネットワークユーザーまで安定的に届けることは、各 AS の重要な課題
- ネットワーク障害に対する高い信頼性が必要
  - 障害発生時にネットワークが分断されると、代替経路が見つからない
  - 障害に対する信頼性が高い物理トポロジーが必要

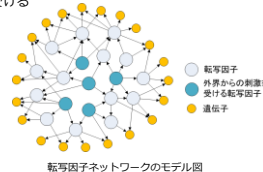
障害に対する高い信頼性を有する  
ルーターレベルトポロジーに必要な構造を解明

- アプローチ
  - 生物の細胞内に存在する“転写因子ネットワーク”に着目
    - 長い進化の過程で様々な環境変化を経験しており、故障に対する信頼性が高い<sup>[5]</sup>
    - ルーターレベルトポロジーと信号伝達の流れに類似点が多く存在
  - 構造的特徴の違いから、障害に対する信頼性向上に必要な構造を解明

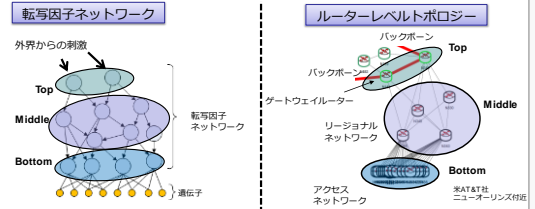
[5] H. Morita, H. Goshima, H. Mochizuki, M. Tomoyasu, and A. Furukawa, "An experimental study on the effect of network control mechanism in GFP-expressing *S. pombe* cells," *Proceedings of CNDM*, Feb. 2011.  
[6] S. Bandy, L. H. Lee, J. Li, and M. S. R. Rao, "Discovering a hidden distributed architecture behind scale-free transcriptional regulatory networks," *Journal of Molecular Biology*, vol. 361, pp. 204–212, April 2006.

### 転写因子ネットワーク

- 細胞内に存在するネットワーク
  - タンパク質の一種である転写因子により構成
  - 遺伝子の発現を制御するための信号を伝達
- ルーターレベルトポロジーとの類似点
  - 次数分布がべき則に従う
  - 階層構造を有する
  - 特定の転写因子が外界からの刺激を受ける
    - ルーターレベルトポロジーのゲートウェイルーターに対応



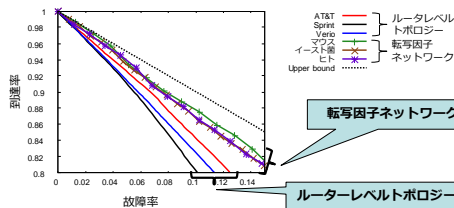
### 信号伝達の流れ



- 外界からの刺激を受けた転写因子から遺伝子までに向けて制御信号が伝達される
- AS 間で交換されたトラフィックは、バックボーンからアクセスネットワークに向けて流れる

### ノード故障に対する信頼性の比較評価

- 評価指標
  - 故障率：ランダムで故障したノードの割合
  - 到達率：Top のノードから送出された信号を受け取ることが可能なノードの割合
- 転写因子ネットワークの方が信頼性が高い

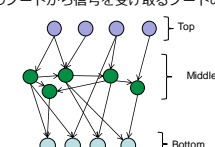


### コラボレーション構造 [6]

- 転写因子ネットワーク内の信頼性向上に寄与する構造
  - 2 つのノードが 1 つのノードに情報を伝達する構造
  - コラボレーション構造により複数のパスが発生 → 信頼性が向上
- コラボレーション構造を形成しているノードの階層を分析
  - $D_{collab-betw}^{L_1, L_2}$ :  $L_1$  階層のノードと  $L_2$  階層のノードから信号を受け取るノードの割合,  $L_1, L_2 \in \{top, middle\}$

$$D_{collab-betw}^{L_1, L_2} = \frac{|S_{L_1} \cap S_{L_2}|}{|S_{L_1} \cup S_{L_2}|}$$

$S_{L_1}$ : 階層  $L_1$  のノードから情報を受け取るノードの集合  
 $S_{L_2}$ : 階層  $L_2$  のノード、または  $L_1$  階層のノードから信号を受け取るノード

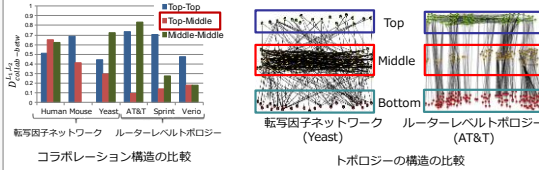


[6] N. Eshwardaj, K.K. Yan, and M.B. Gerstein, "Analysis of diverse regulatory networks in a hierarchical context shows consistent tendencies for collaboration in the middle levels," *PNAS*, vol. 107, pp. 6841–6846, March 2010.

## ルーターレベルトポロジーの信頼性が低い原因

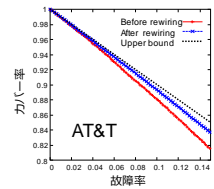
- Top-Topのコラボレーション構造は多い
  - 異なる階層間を繋ぐリンクは冗長
- Top-Middleのコラボレーション構造が少ない
  - Middleのノード間に冗長なリンクが少なく、TopやMiddleのノードからBottomのノードまでの代替経路が少ない

⇒故障によってBottomのノードが分断されやすい



## コラボレーション構造が信頼性に与える影響を評価

- ルーターレベルトポロジーのTop-middleのコラボレーション構造を増大
  - リンクの張り替えにより増大
  - トポロジーのノード数とリンク数は一定
- 評価指標
  - カバー率：ネットワークから分断されず他のノードと通信できるノードの割合
  - 故障率：ランダムで故障したノードの割合
- 調査した全てのトポロジーで信頼性が向上
  - AT&T, Ebone, Exodus, Level3, Sprint, Telstra, Tiscali, Verio



## 本章のまとめ

- ルーターレベルトポロジーのノード故障に対する信頼性向上に必要な構造を分析
  - 転写因子ネットワークの知見に着目
    - 長い進化の過程で様々な環境変化を経験しており、故障に対する信頼性が高い
  - 転写因子ネットワークがルーターレベルトポロジーより信頼性に優れていることを確認
  - ルーターレベルトポロジーと転写因子ネットワークのコラボレーション構造を比較
    - 転写因子ネットワークは、Top-Middleのコラボレーション構造が多い
  - ルーターレベルトポロジーにおいて Top-Middleのコラボレーション構造を増加させることで信頼性が向上することを確認

## 博士論文のまとめと今後の課題

- 将来の増大するトラフィックに対する持続成長可能なインターネットに必要なトポロジーの構造および成長方針を分析
  - 一部のリンクへのトラフィック集中を抑える成長方針の提案
    - トラフィック集約の階層性を示すフロア階層によりトラフィックが集中するリンクを特定
    - トラフィックの集中を抑制するために必要なリンクとその量を確認
  - 各ISPが継続的に設備増強をするためのリンク構築相手選択ポリシーを提案
    - 各ASが継続的に提案したポリシーを利用することで、各ISPのネットワーク収益の増加量が、流れるトラフィックの増加量より大きくなることを確認
  - ルーターレベルトポロジーの信頼性向上に必要な構造的特徴を解明
    - 転写因子ネットワークの知見に着目し、ルーター故障に対する信頼性向上に必要な構造的特徴を分析
    - バックボーンのリーターとリージョナルネットワーク内のルーターによるコラボレーション構造が、ルーター故障に対する信頼性向上に貢献
- 今後の課題
  - 各ASの利己的なリンク構築に対し、各ASのメリットを満たしつつもインターネット全体の持続成長が可能となるために必要な協調性の解明
  - 回線容量を考慮した持続成長可能性の分析、および成長方針の提案