

Osaka University

## Analysis, Modeling, and Design of ISP Topologies Considering Traffic Dynamics

平山 孝弘  
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

Osaka University

### 研究の背景と目的

- インターネットの普及と発展**
  - 利用者数や接続端末数の増加によるトラフィック量の増加
  - 利用形態の多様化による通信品質要求の多様化
- ISP管理者はトラフィック増加や変動に設備増強で対応**
  - 輻輳の頻発が発生すると機器の交換や増強が必要
  - 高性能ルーターの多用は設置コスト、電力コストを増大

↓

**トラフィックダイナミクスを考慮したネットワーク設計**

- トラフィック変動の大きさに合わせて余剰な設備量を調整
- トラフィック変動を抑制するネットワークを設計し、設備量を削減

Osaka University

### ISPトポロジーにおけるトラフィックダイナミクス

- ISP(ルーターレベル)トポロジーにおけるトラフィックの振舞い**
  - 大規模なトポロジーでは様々な箇所ですべてのフロー間の競合が発生
  - 個別のフローの振舞いを詳細に分析するだけでは不十分

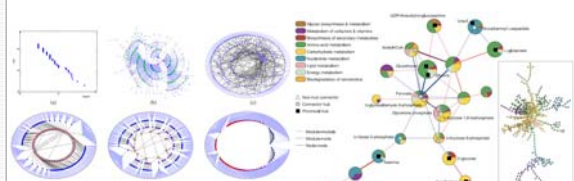
構成要素間の相互作用により現れる全体の性質を分析

- ISPトポロジーが有するべき則の性質に着目**
  - 次数(リンク数)  $k$  のノードの出現確率が  $k^{-\gamma}$  に比例
- 他の学術分野のべき則に従うネットワークの知見を利用**
  - 構成要素間の相互作用により全体の性質が決定されるネットワーク
  - 数学、物理学: 次数分布がべき則に従うネットワークに関する分析
    - トポロジー生成手法 [19,20, 22, 23], トラフィックダイナミクス [24-26, 29, 31], 資源割当 [28,30]
  - 生物学、社会科学: 構造分析や構造とネットワーク性能の関係の分析 [14, 15]

Osaka University

### 利用した知見の一例: トポロジーの構造的特徴

- 次数分布だけではネットワーク性能は決定されない**
  - 次数分布が同じでも構造によりネットワーク性能に差異 [22]
- ISPトポロジーの構造的特徴がトラフィックダイナミクスに与える影響を調査**
  - Ex. モジュール構造に着目: 局所的なノード集合(モジュール)に分割し、モジュール内、モジュール間の接続性や次数分布を分析



構造が異なるトポロジーの例 [22]      大腸菌の代謝ネットワークとモジュール構造 [14]

Osaka University

### 博士論文の構成

- 1. Introduction** 研究の背景と論文の概要
- 2. Analyzing Dynamics of Feedback-induced Packet Delay in ISP Router-level Topologies**
  - ISPトポロジーのモジュール構造がトラフィック変動に与える影響の調査
- 3. Performance Evaluation of Link Bandwidth Distribution in ISP Router-level Topologies**
  - ISPトポロジーの回線容量分布に観測されるべき則と回線容量分布の性能評価
- 4. Modeling Link Bandwidth Distribution in ISP Router-level Topologies**
  - ISPの回線容量分布におけるべき則出現のメカニズムの解明およびモデル化
- 5. Design of Interconnected Networks between ISP Topologies**
  - トラフィック収容に必要な総回線容量を軽減するISP間接続手法の提案
- 6. Conclusion and Future Work** まとめと今後の課題

Osaka University

## Chapter 2

### Analyzing Dynamics of Feedback-induced Packet Delay in ISP Router-level Topologies

[2] Takahiro Hirayama, Shin'ichi Arakawa, Ken-ichi Arai, and Masayuki Murata, "Dynamics of feedback-induced packet delay in ISP router-level topologies," IEICE Transactions on Communications, vol. E95-B, pp. 2785-2793, September, 2012.

Osaka University 7

### 本章の背景および目的

- **トラフィックダイナミクスの解明はネットワーク設計に重要**
  - トラフィック変動の大きさに合わせて余剰設備量の調節が可能
    - 変動の小さい箇所には余剰設備を少なく、変動の大きい箇所には余剰設備を多く配置
  - トラフィック変動を抑制するネットワーク設計への応用が可能
- **ISPトポロジーの構造的特徴とエンドホスト間フロー制御との相互作用に着目**
  - 小規模なトポロジーではフロー制御がトラフィックダイナミクスに影響 [37-39]
  - ルーターレベルトポロジーの構造がフロー制御へどう影響するか

↓

**フロー制御とISPトポロジーの構造が  
トラフィックダイナミクスに与える影響を評価**

Osaka University 8

### トポロジーの構造とトラフィックの時間変動

- **各リンクを経由するトラフィック量の変動の大きさを計測**
  - 変動の大きさはハースト値( $H, 0.5 < H < 1$ )により評価。 $H$ が大きいほど変動も大
- **TCPのフロー制御機構によりトラフィック変動は拡大**
- **ISPトポロジーは変動の大きいリンクの出現を抑制**

BA トポロジー  
(BAモデルにより生成)

AT&T トポロジー  
(ISPトポロジーの計測結果から生成)

Osaka University 9

### 2つのトポロジーの構造的特徴の比較

**BAトポロジー**

- モジュール同士を次数の大きなノードが接続
- モジュール内外ともに密に接続
- モジュール内のトラフィック集約、モジュール間のトラフィック転送の両方を同じノードが担う構造

モジュール性の低い構造

※モジュール：局所的（州や都市など）なノード集合

**ISPトポロジー**

- モジュール間には次数の小さいノードで速に接続
- モジュール内は次数の大きいノードが密に接続
- モジュール内のトラフィック集約、モジュール間のトラフィック転送の役割を分担

モジュール性の高い構造

Osaka University 10

### モジュール構造によるトラフィック変動の抑制 (1/2)

- **モジュール度の高い構造を持つトポロジーでは、モジュール間を結ぶリンクにバケットが集中**

モジュール間を結ぶリンクは多量のセッションの多重化により小さく変動

Osaka University 11

### モジュール構造によるトラフィック変動の抑制 (2/2)

- **モジュール度の高いトポロジーではモジュール間リンクの周辺にリンクが少ないため、変動が大きいリンクが出現しにくい**

モジュール間を結ぶリンク周辺の一部のリンクでは変動が大きい

大半のリンクは経由トラフィック量が少なく、変動も小さい

Osaka University 12

### 本章のまとめ

**目的：ISPトポロジーにおけるトラフィックダイナミクスの解明**

- **トポロジーの構造とフロー制御の相互作用に着目**
  - TCPによりバケット転送遅延時間が増大
  - TCPによりリンクを経由するトラフィック量の時間変動が増大
- **ISPトポロジーの構造とトラフィックダイナミクスの関係に着目**
  - モデルにより生成したトポロジーに比べて遅延の増大を抑制
    - 輻輳が発生しやすいリンクが少ない
  - モデルにより生成したトポロジーに比べてトラフィック変動を抑制
    - モジュール度が高いトポロジーほどキュー長の変動が大きいリンクが少ない
- **ISPトポロジーのモジュール構造がトラフィック変動を抑制**
  - ISPトポロジーにおけるトラフィックダイナミクスの議論に重要な構造的特徴
  - 今後のネットワーク分析やネットワーク設計へ応用可能
    - トポロジーの構造とトラフィック変動を考慮した設備設計、など

Osaka University

## Chapter 3

### Performance Evaluation of Link Bandwidth Distribution in ISP Router-level Topologies

[1] Takahiro Hirayama, Shin'ichi Arakawa, Shigehiro Hosoki, and Masayuki Murata, "Models of link capacity distribution in ISP's router-level topologies," International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNN), vol. 3, pp. 205-216, September 2011.

Osaka University

## Chapter 3, 4 の背景と目的

- ISPトポロジーにおける回線容量設計の重要性
  - ネットワークの性能は回線容量分布に強く依存
  - いかに設備を配置しトラフィックを収容するかが課題
- 回線容量設計のメカニズムの解明はネットワーク設計に有用
  - 新たなネットワーク設計・制御手法の評価環境として利用可能
- ISPの回線容量分布や設計ポリシーは原則として非公開
  - どのようなポリシーに基づいた設計により、現在の分布が形成されたのか？
  - 一般論としては、ISPは長期的なトラフィック監視に基づき回線容量を設計
    - 現在の分布はトラフィックダイナミクスの影響を受けた結果
    - ノード次数や媒介中心性をもとに設備量を割り当てる手法 [28, 30, 66]とは異なる

**ISPトポロジーにおける回線容量分布の特徴と分布形成のメカニズムを解明**

Osaka University

## ISPトポロジーの回線容量分布

- ルータレベルトポロジー (IIJ) の回線容量分布にべき則
  - 上位のリンクにおいて回線容量と順位との間に  $k^{-\gamma} (\gamma \cong 1)$  の関係
- べき則に従う回線容量分布は指数分布や一様分布に比べ多量のトラフィックを収容可能

**収容可能なトラフィック量の向上を目指した結果、回線容量分布にべき則**

IIJの回線容量分布

Osaka University

## Chapter 4

### Modeling Link Bandwidth Distribution in ISP Router-level Topologies

[3] Takahiro Hirayama, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "Modeling link capacity distribution with consideration of TCP traffic dynamics in router-level networks," submitted to Computer Communications, 2012.

Osaka University

## トラフィックダイナミクスと回線容量設計

- ISPはトラフィック需要に合わせてネットワークを設計
  - トラフィック需要の変化に応じて段階的に設備を増強
    - 増強の積み重ねにより現在の回線容量分布を形成
  - トラフィックダイナミクスはトポロジーの構造とTCPフロー制御が大きく影響

**TCPトラフィックを考慮した回線容量設計を評価し、ISPの回線容量設計のメカニズムを解明**

- トラフィックの観測とボトルネックの増強の反復により回線容量分布の特徴を再現可能
  - ボトルネック：パケット棄却率が最大のリンク
  - ボトルネックの回線容量を2倍に増強

**トラフィックの観測と回線容量増強の繰り返りでべき則が出現**

IIJの回線容量分布

Osaka University

## TCPトラフィックを考慮した回線容量設計のモデル化

- モジュール間を接続するリンクやそれに隣接するリンクが増強されやすい傾向
  - TCPフロー制御とISPトポロジーの構造を考慮しモデル化

Step 1. 回線容量を増強し優先度を減少

Step 2. ボトルネックに隣接する下層のリンクの優先度を加算

Step 3. さらに下層のリンクの優先度を加算

※増強されたリンク周辺では他モジュールへ向かうトラフィック量が増加するため優先度が上昇

— ボトルネックリンク  
 - - - Step 2. の重みの分配先  
 - - - Step 3. の重みの分配先

エンドホストは回線容量の増強に合わせて送信レートを変更

Osaka University 19

### 回線容量割当モデルの評価

- モデルにより増強を繰り返した場合と近い分布を再現可能
- モデルにより増強を繰り返した場合と近いスループットの分布を再現可能
  - ネットワークの性能評価に利用可能

モデルにより生成した回線容量分布 (AT&Tトポロジー、傾き-1)

増強を繰り返し得られた回線容量分布 (AT&Tトポロジー、傾き-1)

Osaka University 20

### Chapter 3, 4のまとめ

目的：ISPの回線容量分布の特徴と分布形成のメカニズムの解明

- 実際のISPトポロジーの回線容量分布を分析
  - べき則の性質を観測
  - べき則分布は指数分布、一様分布よりも多くのトラフィックを収容可能
- TCPトラフィックを考慮した増強を繰り返し分布を評価
  - 回線容量分布にべき則が出現。実際のISPトポロジーの分布と一致
  - モジュール性の高い構造が分布の傾き(べき指数)に影響
- 増強の繰り返しを再現する回線容量設計モデルにより検証
  - トポロジーの構造とTCPトラフィックの影響を考慮した回線容量設計
  - 増強の繰り返しで得られる分布と近い特徴を持つ分布を生成可能

現在の回線容量分布はモジュール構造とトラフィック収容のための回線容量増強により形成

- 今後のネットワーク設計や性能評価に応用することが可能

Osaka University

## Chapter 5

### Design of Interconnected Networks between ISP Topologies

[4] Takahiro Hirayama, Shin'ichi Arakawa, and Masayuki Murata, "Analysis of interconnection topology between ISP router-level topologies", submitted to Physical Review E, 2012.

Osaka University 22

### 本章の背景と目的

- インターネットは複数のISP間の相互接続により形成
  - 他のISPから流入するトラフィックの収容もまたISPの重要な課題
- 各ISP間の接続関係は独自の判断に基づき構築
  - 個々の判断による接続関係では、さらなる性能向上が見込めない
- トポロジー間の接続構造がネットワーク性能に影響 [11, 12, 13]
  - トラフィック収容に必要な設備量の削減にはISP間の接続構造を考慮する必要

↓

ISPトポロジー間の接続構造とネットワーク性能の関係を評価

Osaka University 23

### ISPトポロジー間の接続モデル

- 2つの完全に同一な構造を持つ、トポロジー間を接続
  - Ex. 2つのAbilene(-inspired) トポロジーを接続
- トポロジー間の接続構造の分類
  - 単一のトポロジーが持つ構造と性能の関係 [16]
    - 階層構造を持つトポロジーの構造を5種類に分類
  - 2つのトポロジー間の接続構造の構築へ拡張

↓

- 5種類それぞれの構造を有するトポロジー間の接続構造を比較
  - 確率的な性質を分析し、トポロジー間接続へ応用

Abilene トポロジーの接続

[16] P. S. Dodds, D. J. Watts, and C. F. Sabel, "Information exchange and the robustness of organizational networks," Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), vol. 100, pp. 12516-12521, Oct. 2003.

Osaka University 24

### トポロジーが持つ構造の分類

- トポロジーが持つ構造を5つに分類
  - N分木を基本とし、リンクを追加することで様々な構造を生成
  - Random (R, 右上)
    - ランダムにリンクを追加
  - Local Team (LT, 右下)
    - 近いノード間にリンクを追加
  - Random Interdivisional (RID, 左上)
    - N分木下層のノード間に様々な長さのリンクを追加
  - Core-periphery (CP, 左下)
    - 上層にリンクを密に追加
  - Multiscale (MS, 中央)
    - 近距離から長距離まで様々な長さのリンクを追加
    - 上層は密、下層は疎

地域間リンクの取り得る距離

地域間リンクを持つ階層の深さ

[16] P. S. Dodds, D. J. Watts, and C. F. Sabel, "Information exchange and the robustness of organizational networks," Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS), vol. 100, pp. 12516-12521, Oct. 2003.

Osaka University 25

### ISPトポロジー間の接続構造と総回線容量

- リンク数が少ない場合、Core-periphery (CP) 構造が総回線容量を軽減
  - 他方のトポロジーへのトラフィックを少ないホップ数で転送可能
  - トポロジー間を低次数ノードが接続し、負荷を軽減

Abileneトポロジー接続時のトラフィック収容に必要な総回線容量

Osaka University 26

### ISPトポロジー間の接続構造と総回線容量

- リンク数が増加すると、Multiscale (MS) 構造が総回線容量を軽減
  - 負荷が分散され、総回線容量を削減
  - 上層にのみリンクを追加する CP では、トポロジー間をつなぐノードの次数が増加し負荷が増大するため MS と逆転

Abileneトポロジー接続時のトラフィック収容に必要な総回線容量

Osaka University 27

### 本章のまとめ

目的：他のISPから流入するトラフィック収容に必要な総回線容量を軽減するISPトポロジー間接続手法の提案

- トポロジー間の接続構造とトラフィック収容に必要な総回線容量の関係性を評価
  - 様々な構造を持つトポロジー間を接続し比較
  - Multiscale構造はトポロジーの構造、次数分布に関わらず最も総回線容量を削減可能
    - 様々な距離を持つリンクが混在し、上層は密、下層は疎に接続
    - Core-periphery構造ではリンクの増加に伴い負荷が増大

ISPトポロジー間の接続には、Multiscale構造を有する接続構想の構築が適している

Osaka University 28

### 本研究のまとめ

#### ISPネットワーク設計のためのトラフィックダイナミクスの解明

- ISPトポロジーが持つ構造的特徴に着目

- モジュール構造がトラフィックダイナミクスに与える影響を解明
  - ISPトポロジーのモジュール構造が転送遅延の増大とトラフィック変動を抑制
- ISPトポロジーにおける回線容量分布形成のメカニズムの解明
  - ISPトポロジーの回線容量分布のべき則の観測とその要因の解明
  - モジュール構造とトラフィックダイナミクスを考慮したモデル化
- 総回線容量を軽減するISPトポロジー間接続法の提案
  - Multiscale構造により必要な総回線容量を軽減する

#### 今後の課題

- モジュール構造を考慮したトポロジー設計および回線容量設計手法の提案
- フロー制御を考慮したトポロジー間接続の評価、3つ以上のトポロジー間を接続した場合の評価