

Advanced Network Architecture Research Group
http://www.anarg.jp/

トポロジのモジュール性をもたらす TCPトラフィックのダイナミクス

平山 孝弘*, 荒川 伸一*,
新井 賢一**, 村田 正幸*

*大阪大学大学院情報科学研究科
**NTTコミュニケーション科学基礎研究所

NwGN研究会 2011/1/21

2

研究の背景

- **インターネット利用形態の多様化**
 - トラフィックの変動や多様な通信品質要求への適応性が必須
 - インターネットトラフィックの特徴を把握することが重要
- **インターネットにおけるエンドホスト間フロー制御とトポロジの相互作用に着目**
 - 相互作用により生じるトラフィックダイナミクスを評価
 - 物理トポロジの構造がフロー制御へどう影響するか

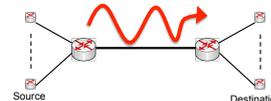
↓

- **フロー制御とトポロジとの相互作用によってトラフィックのダイナミクスが決定されるメカニズムを解明**

3

エンドホスト間フロー制御とトラフィックの統計的性質

- **インターネットトラフィックは長期依存性を持つ**
 - 時間の経過に伴いトラフィック量が大きく変動
- **エンドホスト間フロー制御が長期依存性をもたらす**
 - TCP のスロースタート、輻輳回避フェーズが大きな要因 [7]
 - ストップアンドウェイトによるトラフィックにも長期依存性 [9]
 - 小規模でシンプルなトポロジを対象にして評価



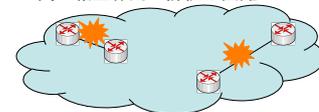
[7] K. Park, G. Kim, and M. Crowell, "On the relationship between file sizes, transport protocols, and self-similar network traffic," in Proceedings of the International Conference on Network Protocols (ICNP), pp. 171-180, Oct. 1996.

[9] K. Fukuda, M. Takayasu, and H. Takayasu, "A cause of self-similarity in TCP traffic," International Journal of Communication Systems, vol. 18, pp. 603-617, Aug. 2005.

4

大規模トポロジを用いた評価の必要性

- **小規模なトポロジのみを対象にした評価では不十分**
 - 大規模トポロジではボトルネックリンク以外のリンクでもセッション間の競合が発生
 - セッション間の相互作用の評価は困難



- **ネットワーク全体に生じるトラフィックのダイナミクスを解明するためには、トポロジを介したエンドホストの相互作用がダイナミクスに与える影響の評価が必要**

5

研究の目的

- **インターネットトポロジにおけるべき則に着目**
 - べき則: 次数 k 本のノードの出現確率が $k^{-\gamma}$ に比例
 - 次数分布が同じで構造が異なるトポロジは複数存在
 - 構造の違いによりネットワーク性能は異なる [4]

↓

**構造が異なるトポロジを比較し、
インターネットトポロジ特有のトラフィックの性質、および
その要因となる構造的特徴を解明**

[4] R. Fukumoto, S. Arakawa, and M. Murata, "On routing controls in ISP topologies: A structural perspective," in Proceedings of Chinacom, Oct. 2006.

6

シミュレーション評価

- **構造が異なる2つのトポロジを使用**
 - 523 ノード、1304 リンク
 - AT&T 社のルータレベルトポロジ ... AT&T トポロジ
 - BA モデル [2] により生成したトポロジ ... BA トポロジ
 - バッファサイズ、回線容量は均一
 - バッファサイズ=1,000パケット、回線容量=3パケット / 単位時間
- **2種のエンドホスト間フロー制御を比較**
 - ランダムに選択した 2 ノード間でセッションを生成
 - セッション数: 100,000
 - ストップアンドウェイトによるフロー制御
 - TCP Reno によるフロー制御

[2] A.-L. Barabasi and R. Albert, "Emergence of scaling in random networks," Science, vol. 286, pp. 509-512, Oct. 1999.

7

リンクを経由するトラフィック量の時間変動

- 各リンクのキュー長の時間変動に着目
 - キュー長の変動が大きい = バースト的にパケットが到着
- ハースト値 (H) より時間変動の大きさを評価
 - 長期依存性の強さを示す指標 ($0.5 < H < 1$)
 - R/S plot により測定 (セッション数: 100,000)

$H \approx 0.5$ の例 $H \approx 1.0$ の例

8

トポロジの構造とトラフィックの時間変動

- トポロジ内全リンクのハースト値を計測し分布を作成
- TCP を用いた場合にハースト値が上昇
 - TCP 特有の制御機構が変動を拡大
- AT&T トポロジではハースト値の高いリンクは少ない
 - キュー長の変動を抑制 (セッション数: 100,000)

ハースト値の分布

BA トポロジ AT&T トポロジ

9

2つのトポロジの構造的特徴の比較

- ノードの役割を分類[13]
 - トポロジをいくつかのモジュールに分割
 - Participation coefficient, P [$0 \leq P \leq 1$]

$P_i = 0$ $P_j = 1$

■ Within-module degree, Z

Z_i は大きく、 Z_j は小さい

2つの指標に基づき、図のようにノードの役割を分類

Participation coefficient, P

Within-module degree, Z

Provincial Hubs, Connector Hubs, R1, R2, R3, R4

R1: User peripheral, R2: Provincial, R3: Non-hub connectors, R4: Kinless hubs

R5: Kinless hubs, R6: Kinless hubs

[13] R. Guimerà and L. A. N. Amaral, "Functional cartography of complex metabolic networks," Nature, vol. 433, p. 895, 2005.

10

BA トポロジの構造的特徴

- 多くの "Connector hubs" を持つ
 - モジュール同士がハブノードを介し接続
- ハブノードを経由してモジュール間で大量のパケットが移動する

Participation coefficient, P

Within-module degree, Z

Provincial Hubs, Connector Hubs, R1, R2, R3, R4

Hub Line

11

AT&T トポロジの構造的特徴

- 多くの "Provincial Hubs" を持つ
 - モジュール内のノードはハブノードにより密に接続
 - モジュール間は少数のリンクで接続
 - モジュール度の高い構造
- パケットはまずハブノードに集約され、モジュール間を結ぶリンクを経由し移動

Participation coefficient, P

Within-module degree, Z

Provincial Hubs, Connector Hubs, R1, R2, R3, R4

Hub Line

12

モジュール構造とトラフィック変動との関連

- モジュール度 (Q) の異なる3つのトポロジを生成し比較
 - モジュール度が高い程トラフィック変動の大きいリンクが少ない
 - モジュール構造がトラフィック変動の大きいリンクの出現を抑制

AT&T トポロジは $Q = 0.89$

キュー長の変動の大きさ

ハースト値の順位

モジュール度の異なるトポロジにおけるトラフィック変動

13

リンクを経由するセッション数とトラフィック変動

- 経由するセッション数が小さければ変動も小さい
- キュー長の上限があるため経由するセッション数が増大するとトラフィック変動は小さくなる
- 変動が小さいリンクを経由するセッションも送信レートを制御するため中間のリンクのキュー長は大きく変動

Queue Length

Time

ハースト値:小

Queue Length

Time

ハースト値:大

Queue Length

Time

Limit of Buffer

ハースト値:小

14

モジュール構造によるトラフィック変動の抑制

- モジュール度の高い構造を持つトポロジではモジュール間を結ぶリンクにパケットが集中

Queue Length

Time

Limit of Buffer

モジュール間を結ぶリンクは多量のセッションが経路するため変動は小さい

15

モジュール構造によるトラフィック変動の抑制

- モジュール度の高いトポロジではモジュール間リンク周辺にリンクが少なく、変動が大きいリンクも少ない
 - Connector Hubがほとんど存在しないため

Queue Length

Time

モジュール間を結ぶリンク周辺のリンクでは変動が大きい

16

他のISPトポロジでの評価

- 他のISPトポロジもモジュール度が高く、トラフィック変動の大きいリンクが出現しにくいことを確認

| トポロジ | ノード数 | リンク数 | モジュール度 | 変動が大きいリンクの割合 |
|------------|------|------|--------|--------------|
| AT&T | 523 | 1304 | 0.89 | 0.11 |
| BA AT&T | | | 0.63 | 0.26 |
| Sprint | | | 0.87 | 0.12 |
| BA Sprint | 467 | 1280 | 0.68 | 0.26 |
| Verio | | | 0.81 | 0.10 |
| BA Verio | 817 | 1874 | 0.58 | 0.19 |
| Telstra | | | 0.96 | 0.14 |
| BA Telstra | 296 | 594 | 0.77 | 0.22 |

17

まとめと今後の課題

- トポロジの構造とエンドホスト間フロー制御の影響を評価
 - TCPによりキュー長の変動が増大
 - AT&TトポロジではTCPによりスループットが向上
- AT&Tトポロジはキュー長の変動を抑制
 - AT&Tトポロジが持つモジュール構造が要因
 - モジュール度が高いトポロジほどトラフィック変動を抑制
- 今後の課題
 - トラフィック変動を考慮した回線容量割り当て手法の検討
 - トラフィックの複雑な変動に適応可能なトポロジ設計手法の検討