



インターネットトポロジに現れるPower-Law特性と 経路制御への応用

荒川 伸一

大阪大学 大学院経済学研究科
arakawa @ ics.es.osaka-u.ac.jp
<http://www.anarg.jp/>



概要

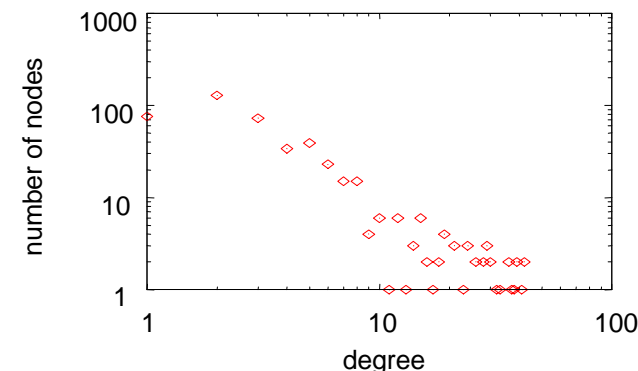
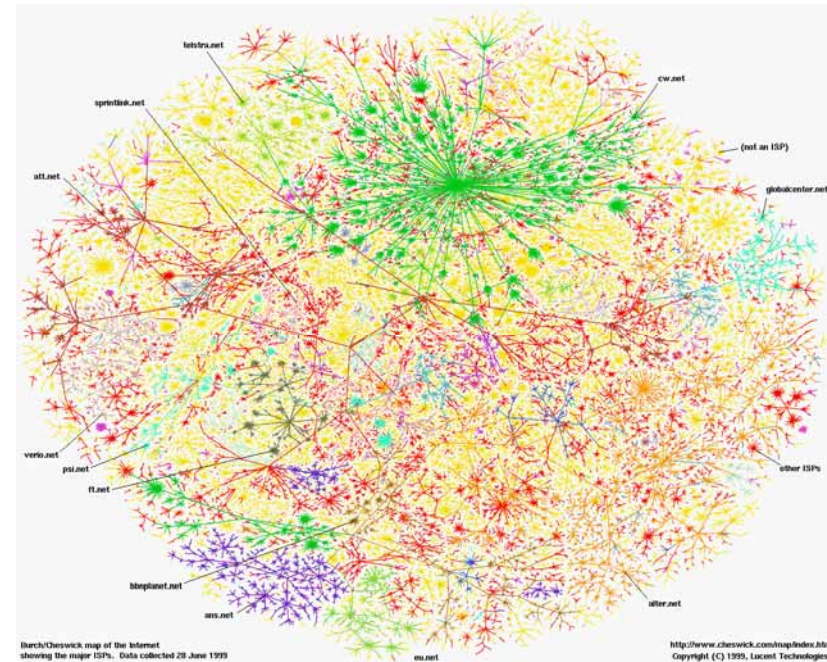
- インターネットポロジ
 - ASレベルトポロジ
 - ルータレベルトポロジ
- インターネットポロジのモデル化手法
 - HOT (Heuristically Optimized Topology) モデル
 - BAモデル
- 経路制御の評価への適用
- ルータレベルトポロジのモデル化
 - FKPモデル
 - 提案モデル
- まとめ



インターネットのトポロジ

■ <http://research.lumeta.com/ches/map/gallery/index.html>

- インターネットトポロジを観測した結果、リンク接続数がASレベル、ルータレベルともにパワー則(べき乗則、Power-Law)に従う
- 1999年のASマップ
 - BGPのルーティングテーブルを可視化
 - クラスタ毎に色づけ
 - » ハブノード: 緑色のクラスタの中央のノード
- ルータレベルトポロジ
 - Sprint社のトポロジ[2]

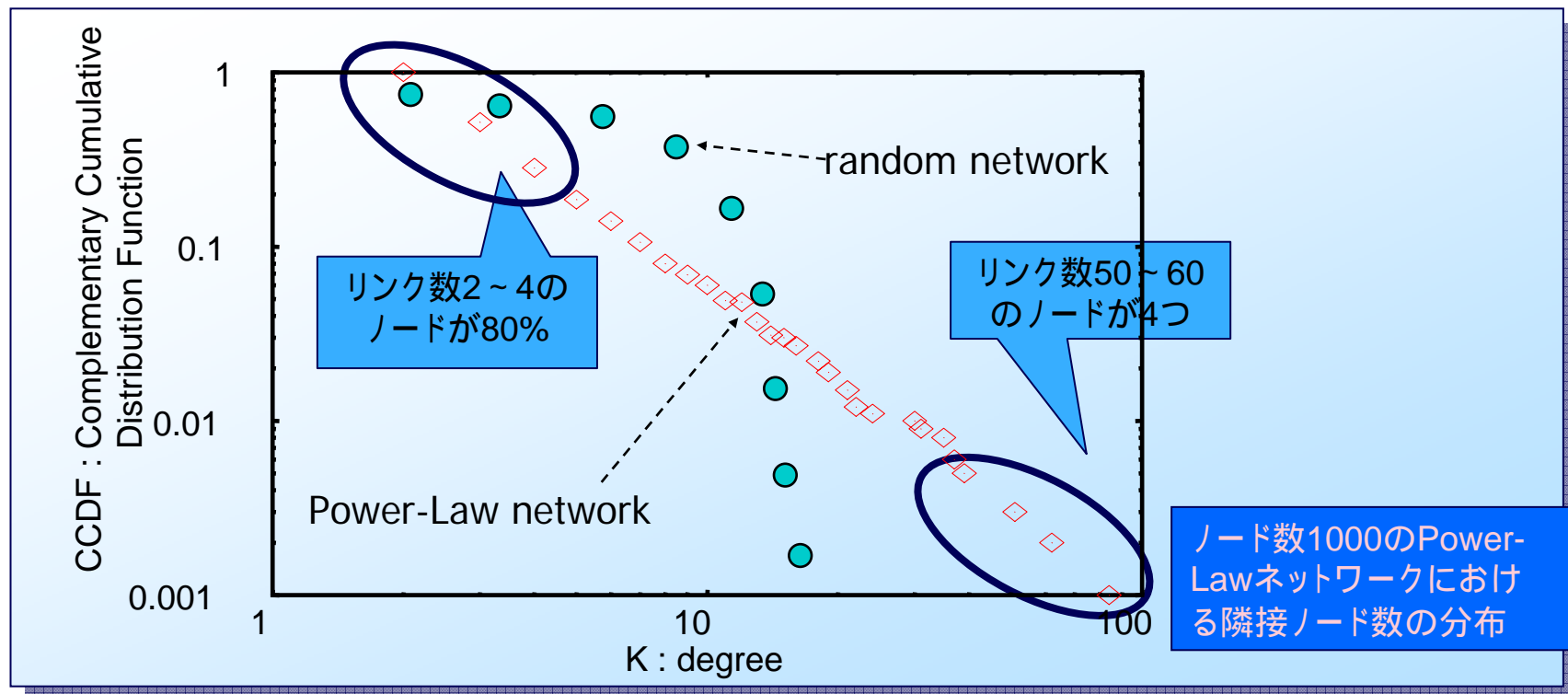


[2] N. Sprint, R. Mahajan, D. Wetherall, and T. Anderson, "Measuring ISP topologies with rocketfuel," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, pp. 2–16, Feb. 2004.



パワー則に従うネットワーク

- 隣接ノード数が k である確率: $P(k) \approx k^{-\gamma}$
 - 多くの出線数(隣接ノード)を持つ、少数のノード
 - あまり出線数を持たない、多数のノード





パワー則に従うネットワークの生成手法

- BA (Barabasi-Albert) モデル
 - ネットワークの段階的成長
 - ノード追加時の優先的接続: $\frac{d_i}{\sum_j d_j}$
 - シンプルなルールでパワー則に従うネットワークを構築可能
- 出線数の大きいノード同士が接続
- 出線数の大きいノードと小さいノードのホップ数が小さくなり、ネットワークのノード間が極めて小
 - “Small-world”



関連研究

■ フローレベルの性質

- [Goh, 2001] ノード*i*を経由するノードペア数: $P_L(l_i) = l^{-\sigma}$
 - » ノード数*n*はgiven, 最小ホップ経路選択
- [Gkantsidis, 2003] リンクを経由するノードペア数の最大値: $O(n \log^2 n)$
 - » ノード数*n*を変動 (Scaling property), 最適経路選択

■ モデルの見直し

- [Bu, 2002] non-linear attachment: $\frac{d_i - \beta}{\sum_j (d_j - \beta)}$
 - » (-, 1)
 - » ASレベルトポロジのモデル化
 - » 出線数分布だけでなく、“構造”に着目

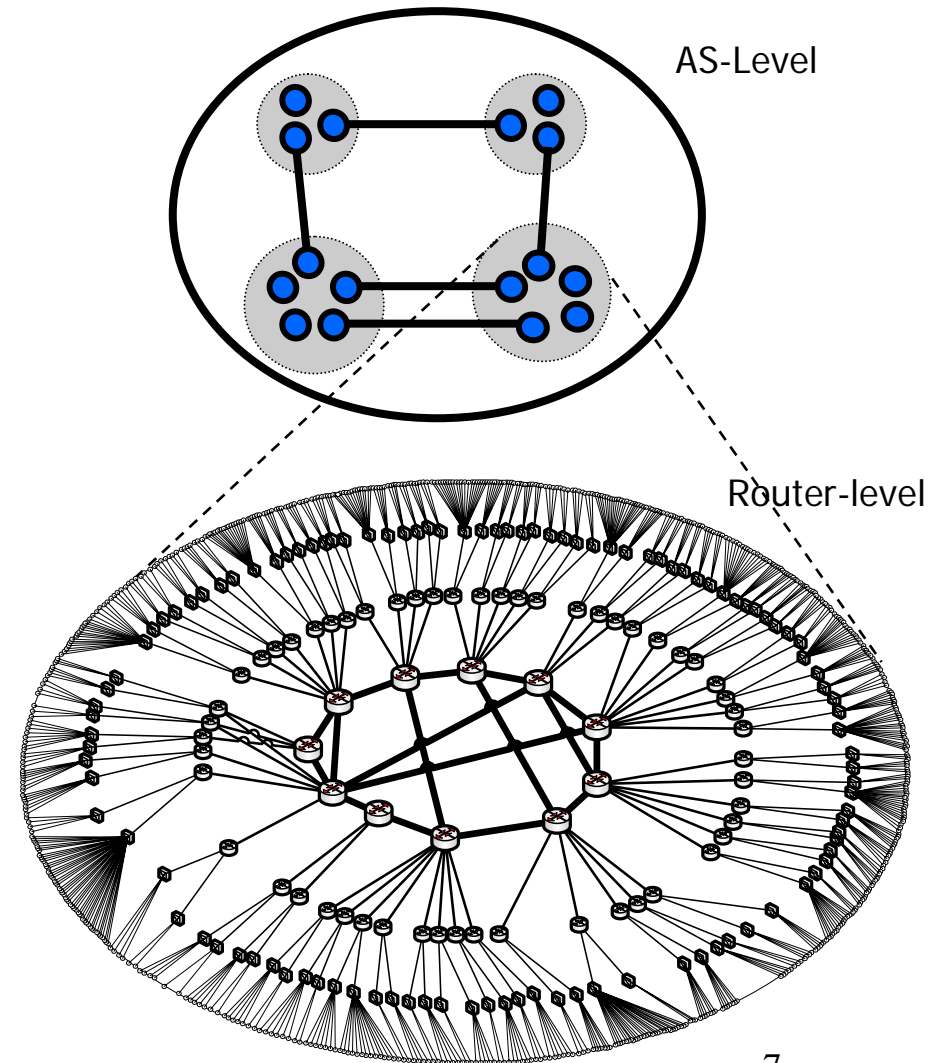
■ BA以外のトポロジの生成手法

- [Fabrikant, 2002] HOT (Heuristically Optimized Trade-off) or FKP
 - » ノード間の物理的距離とトポロジのホップ数の重み付き和の最小化
- [Li, 2004] HOT (Heuristically Optimal Topology)
 - » ルータのスイッチング能力の制限下でスループットを最大化
 - 階層構造



インターネットポロジのモデル化手法: HOT

- Heuristically Optimized Topology
- ルータの技術的な制約のもとで、ネットワークのスループットを最大化した結果、パワー則に従う[1]
- 右図のようにモデル化
 - 出線数の小さいノードは、コアノードの大容量回線収容に用いられる
 - 出線数の大きいノードは、アクセス回線収容に用いられる

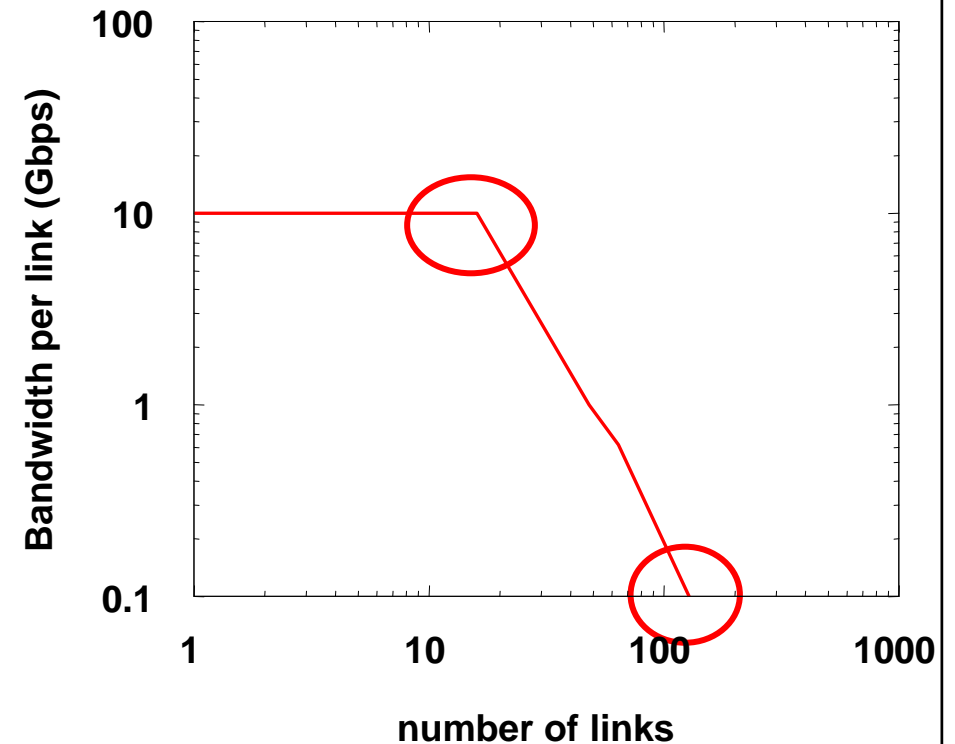


[1] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, "A first-principles approach to understanding the Internet's router-level topology," in *Proceedings of SIGCOMM*, Aug. 2004.



ルータの技術的制約

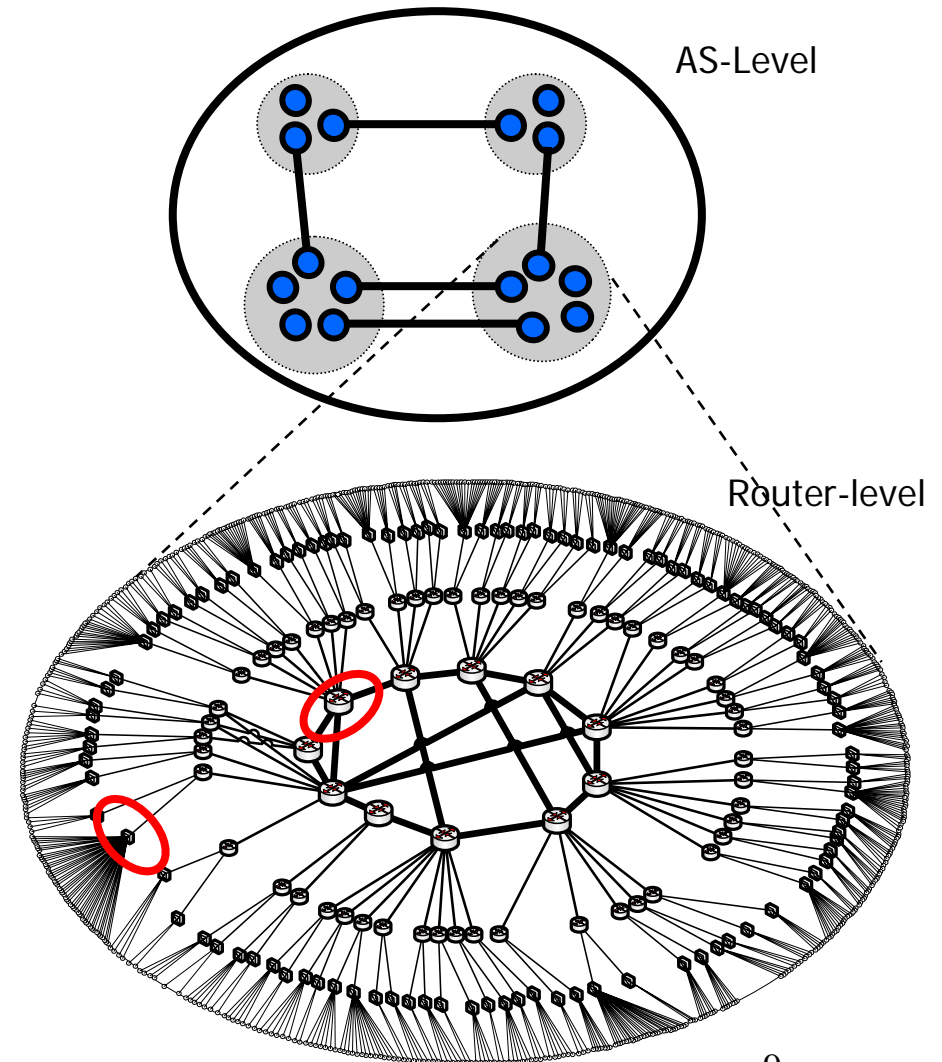
- ルータのバックプレーン処理能力に制限
- 出線数が小
 - 大容量回線を接続可能
- 出線数が大
 - 接続できるリンクの回線容量が制限
- Cisco 12416 ルータの場合
 - バックプレーン処理能力: 160 Gbps
 - 出線数 ≤ 16
 - » 1本のリンクの回線容量: 10 Gbps
 - 出線数 = 128
 - » 1本のリンクの回線容量: 100 Mbps





インターネットポロジのモデル化手法

- ルータの技術的な制約のもとで、ネットワークのスループットを最大化した結果、パワー則に従う[1]
- 右図のようにモデル化
 - 出線数の小さいノードは、コアノードの大容量回線収容に用いられる
 - 出線数の大きいノードは、アクセス回線収容に用いられる

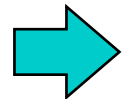


[1] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, "A first-principles approach to understanding the Internet's router-level topology," in *Proceedings of SIGCOMM*, Aug. 2004.

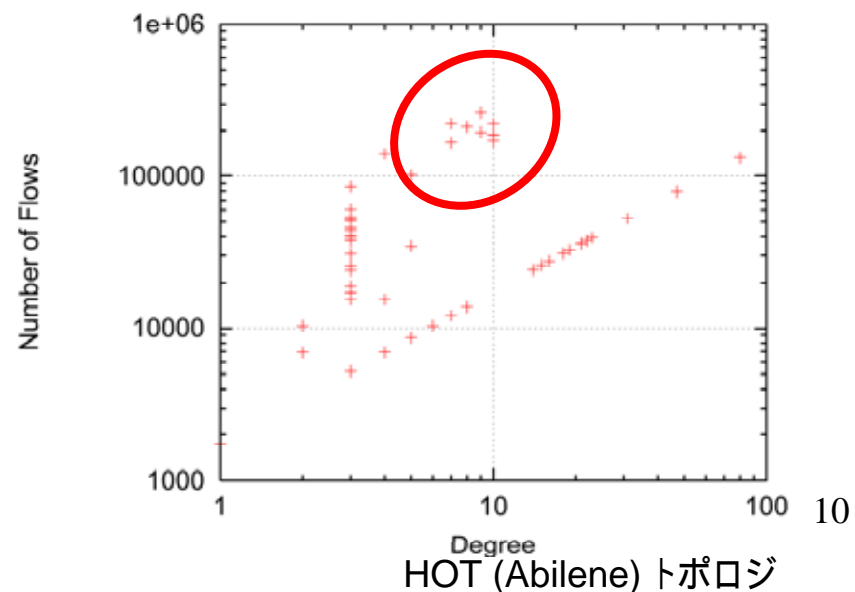
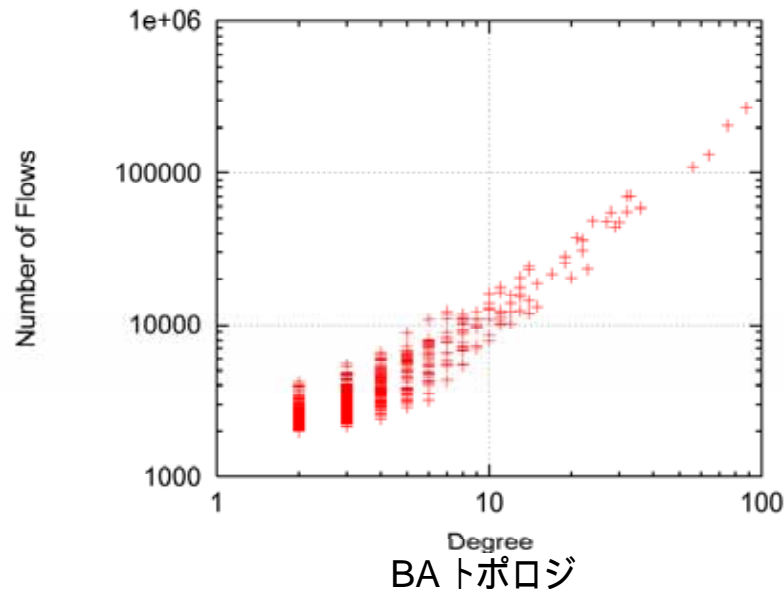


BAとHOTのフロー量の特徴

- ノードの出線数とそのノードを経由するフロー数の相関
 - BAトポロジ: 出線数とフロー数に正の相関
 - HOT (Abilene)トポロジ: コア (中央部) ノードにフローが集中



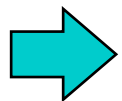
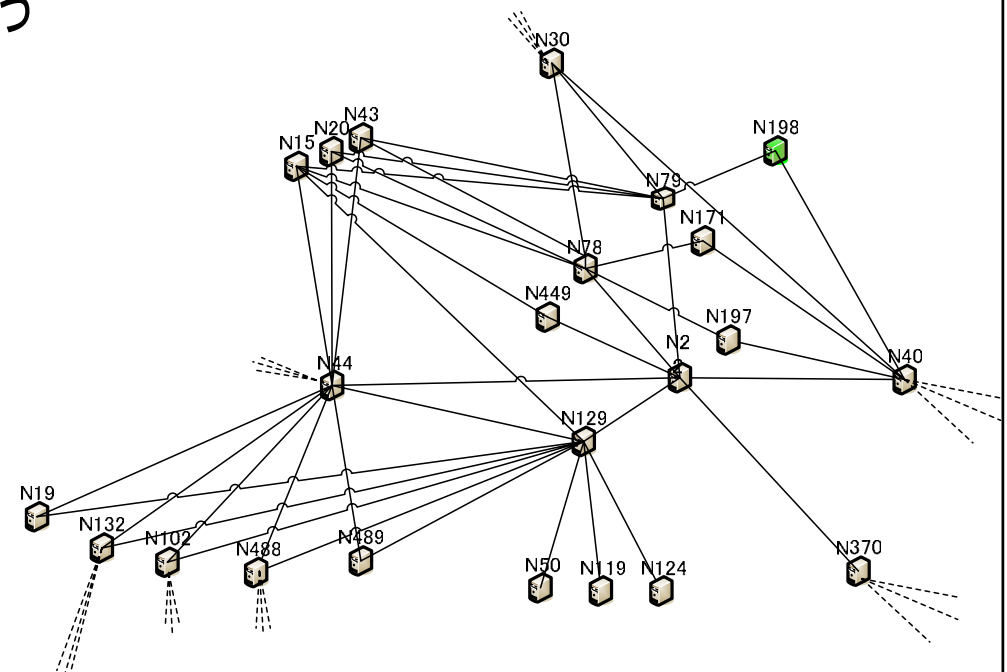
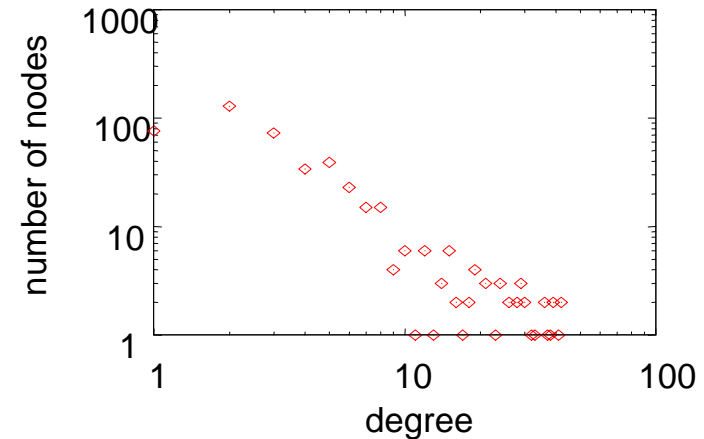
同じパワー則に従うネットワークでも、フローレベルの振る舞いは大きく異なる。ネットワークアーキテクチャやネットワーク制御手法の評価のためには適切なトポロジのモデル化が必要





Sprint トポロジ

- 実測によって得られた Sprint 社のルータレベルトポロジ
 - ノード数: 467
 - リンク数: 1292
 - 出線数分布はパワー則に従う
- トポロジ(の一部)を描画した結果、代替経路が多い
 - 実際のルータレベルトポロジはBAモデルに近いのか？



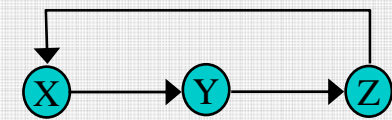
BAモデル、HOTモデル共にルータレベルトポロジを生成することはできない



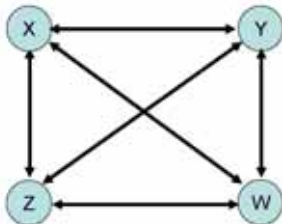
ルータレベルトポロジの構造

- ルータレベルトポロジ、特にISPトポロジは設計者の“意図”が入る
 - 通信品質、信頼性、コスト
- どのような構造になっているのか？
 - Network Motif による構造抽出
 - 以下の4ノードsubgraphの出現頻度を求める

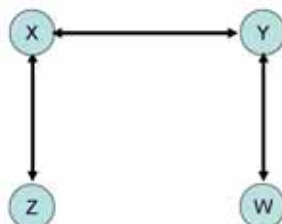
食物連鎖ネットワーク
(feed-forward型)



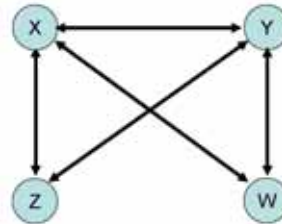
(a) full-mesh



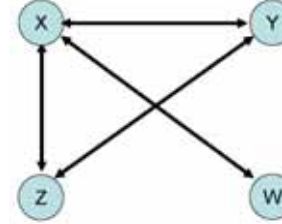
(b) tandem



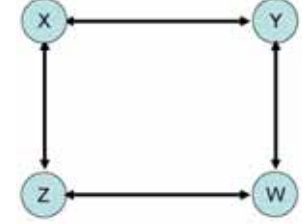
(c) sector



(d) ambrella



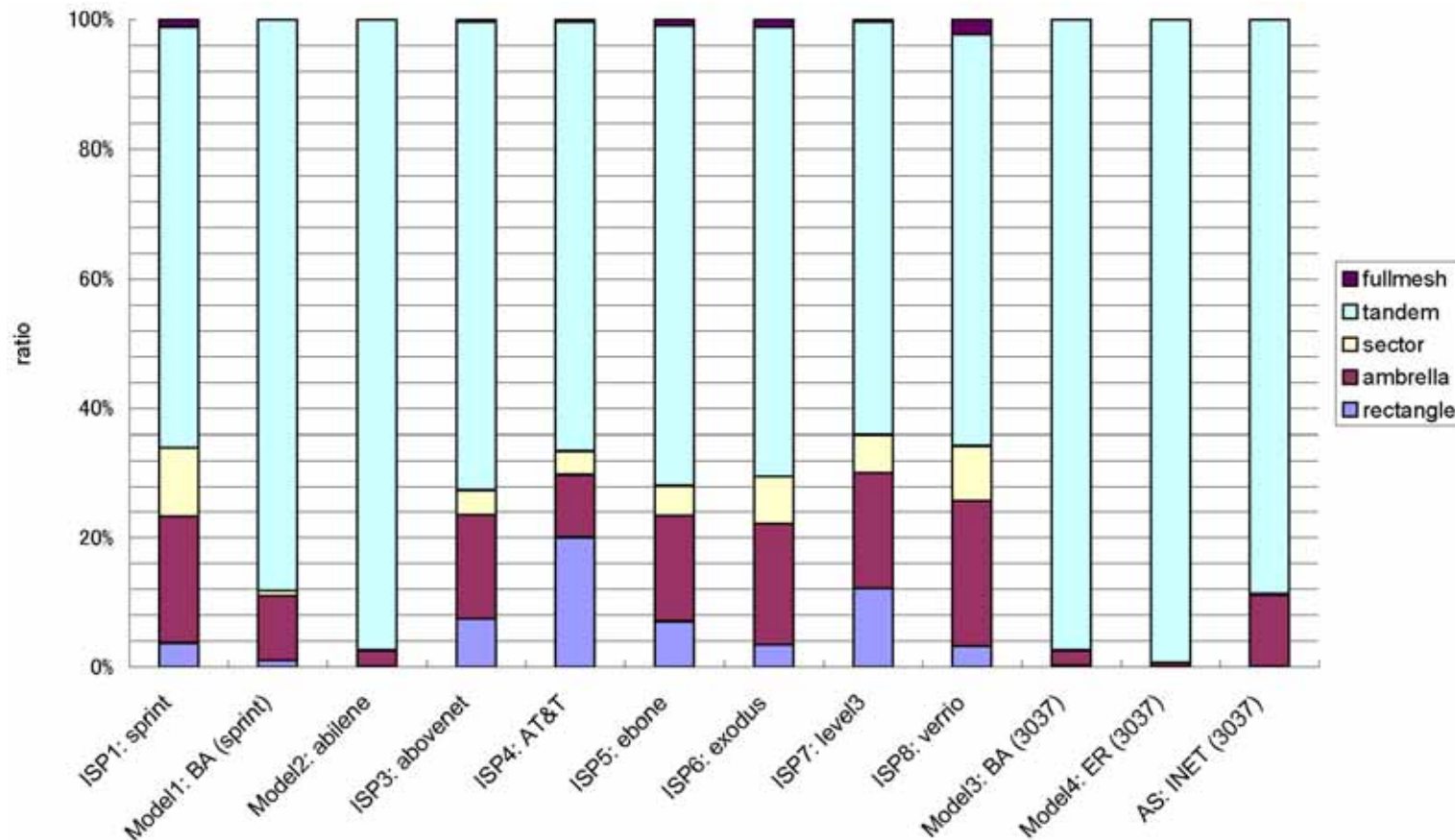
(e) rectangle





4ノードsubgraphの出現頻度 (1/4)

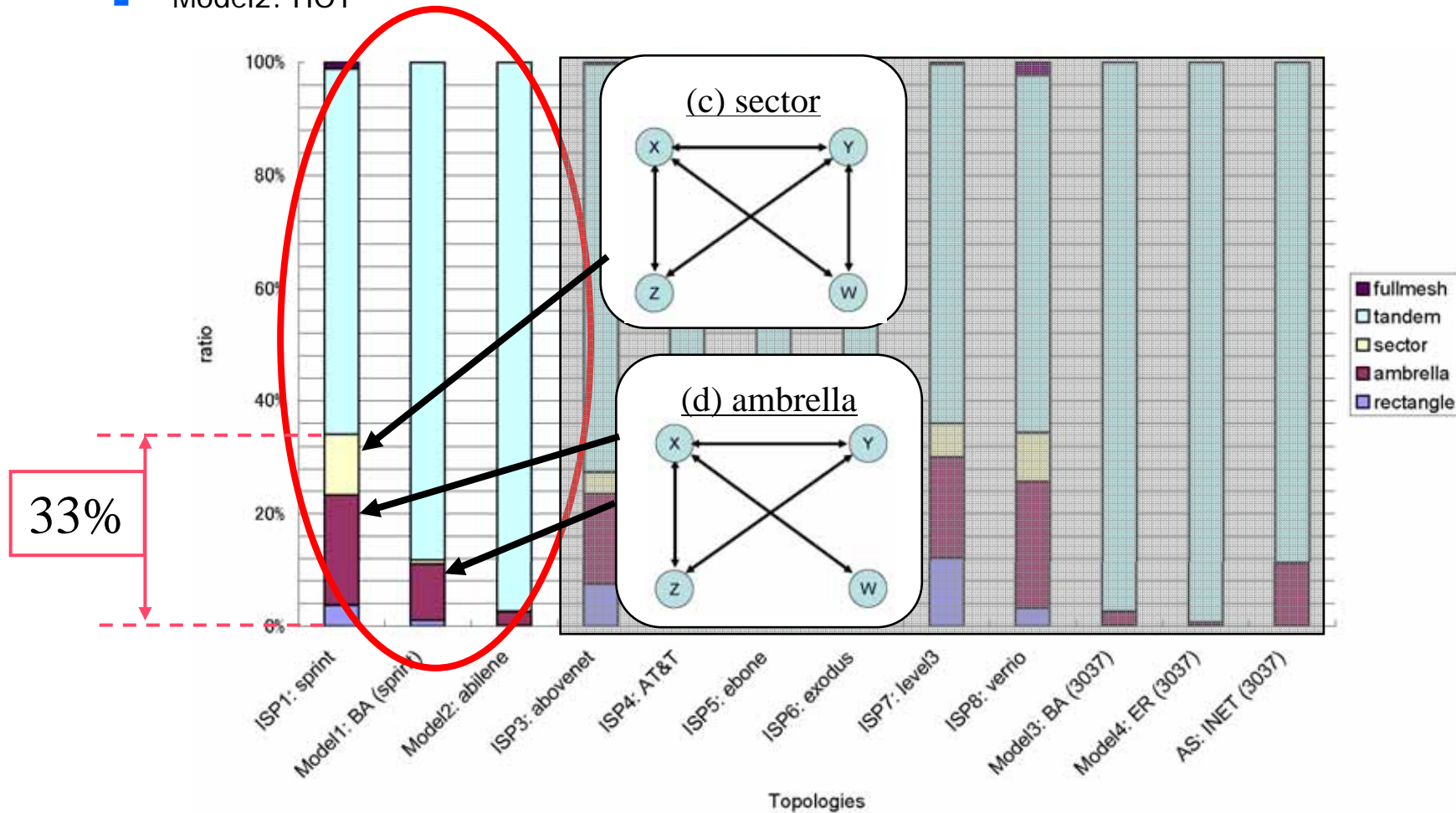
- ISP1 ~ ISP8: tracerouteによって観測されたISPトポロジ (sprint, abovenet, AT&Tなど)
- Model1 ~ 4: 既存のモデル化手法により生成したトポロジ
- INET: 1997年11月のASトポロジ, トポロジ生成ツールINETで使用





4ノードsubgraphの出現頻度 (2/4)

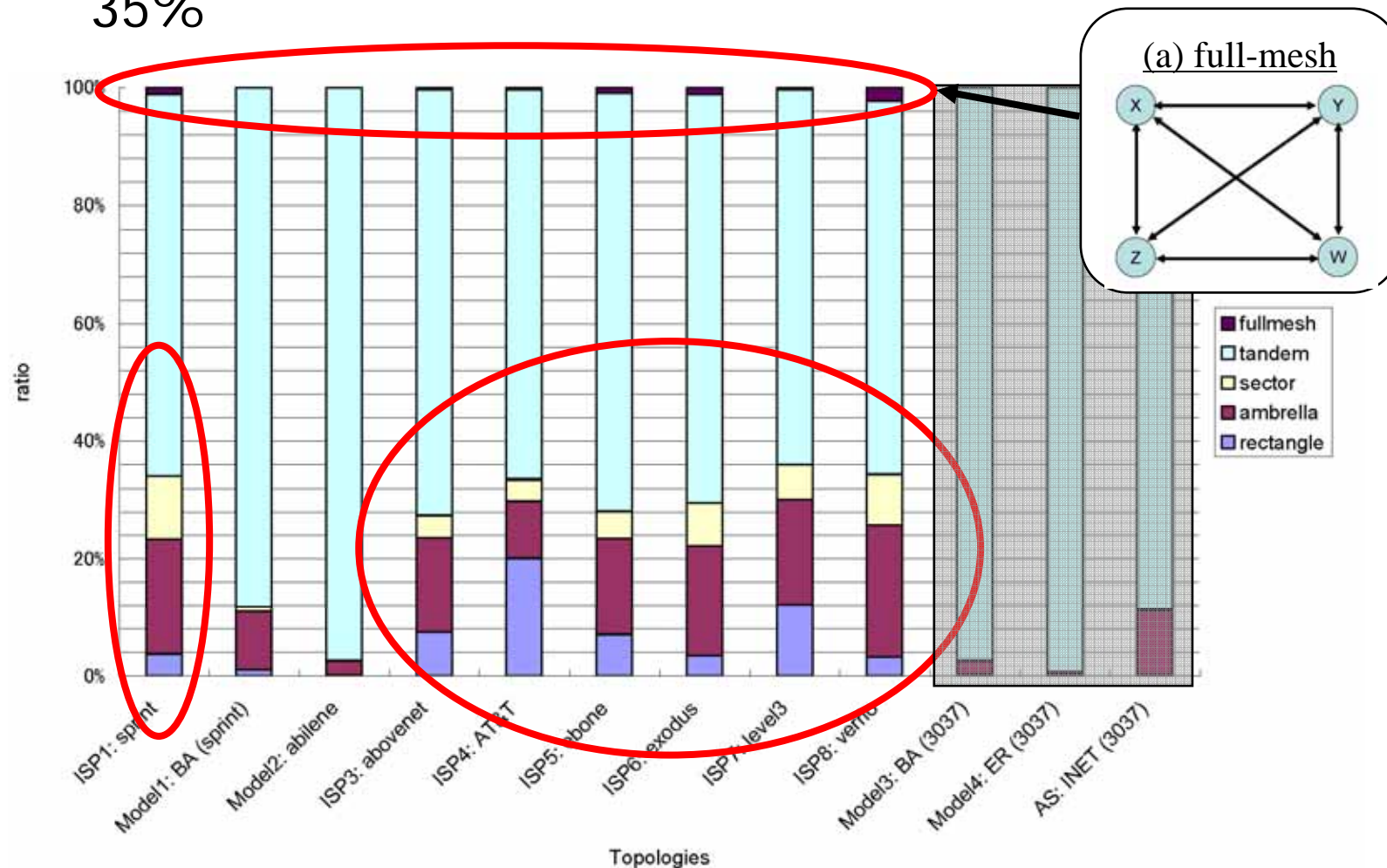
- ISP1: Sprintトポロジ
- Model1: BA modelで生成したトポロジ。Sprintトポロジとノード数、リンク数は同じ
- Model2: HOT





4ノードsubgraphの出現頻度 (3/4)

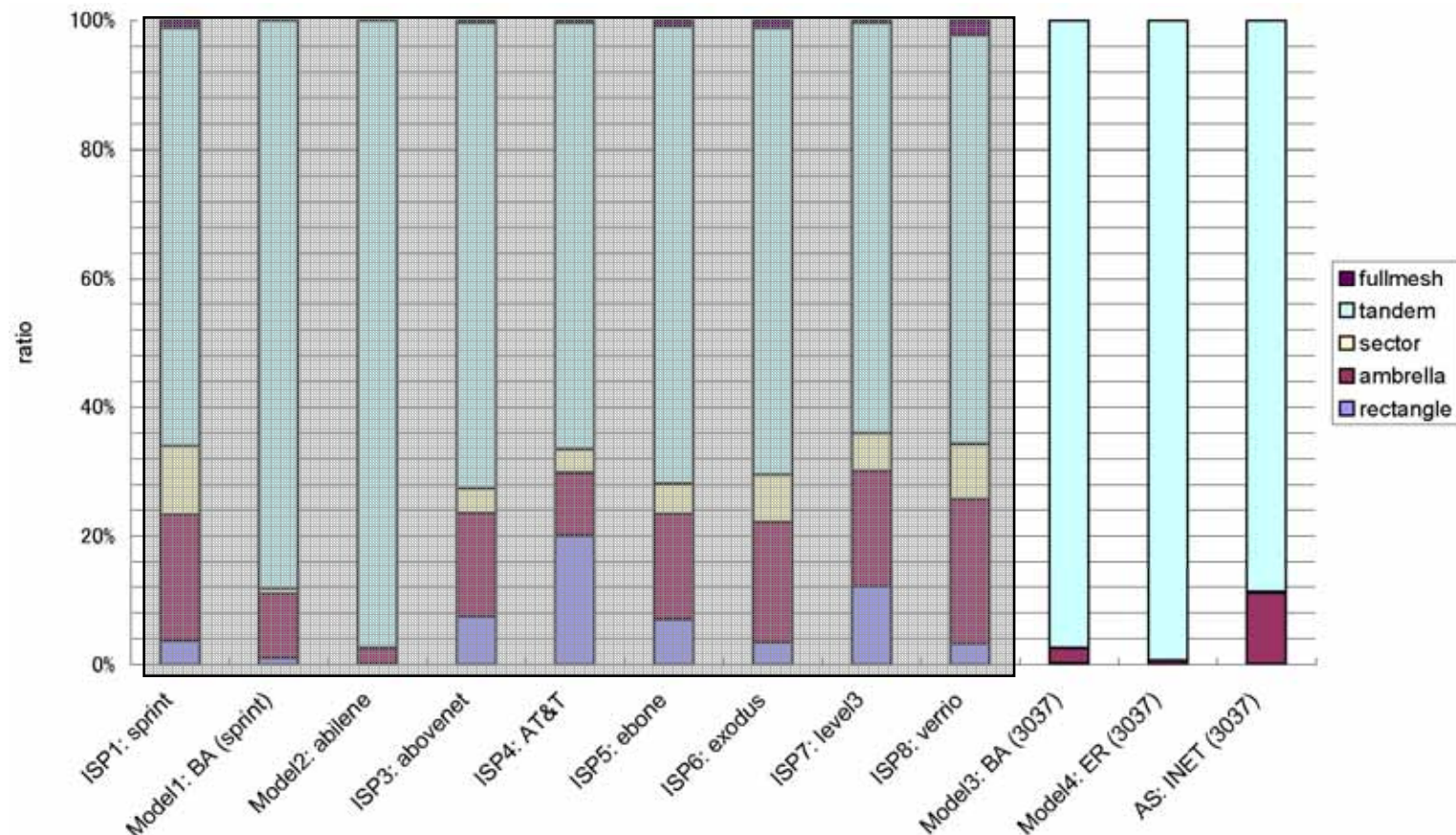
- ISP3-ISP8 (AT&Tなど) でもsector+ambrellaで30~35%





4ノードsubgraphの出現頻度 (4/4)

- AS: 1997年11月のASTポロジ
- Model3, Model 4: “AS”と同じノード数, ほぼ同じリンク数となるようにBAモデルとERモデルで生成したトポロジ
 - BAモデルはASTポロジを再現するわけではない





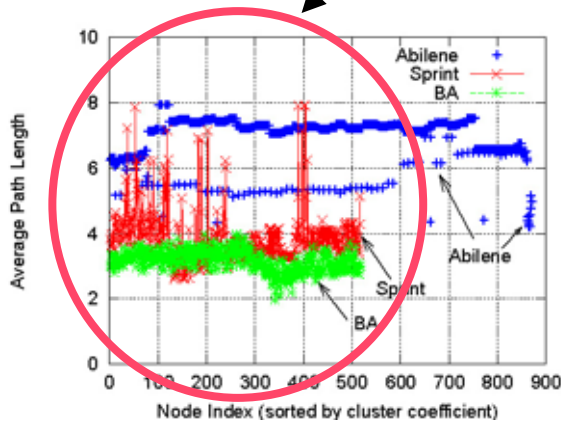
ルータレベルトポロジの構造: Sprint vs. BA

- ルータレベルトポロジはBA, ASと比べて明らかに構造が異なる
- SprintとBAトポロジを用いて詳細に比較する

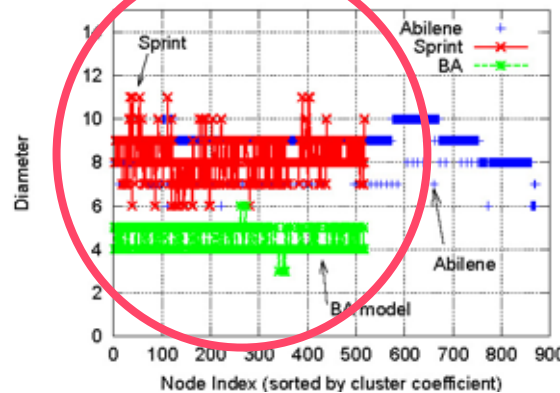
— ノ —
» ホップ間距離が大きい。ルータレベルトポロジ(Sprint)では、"Small-world"の性質は成り立たない

» Cluster係数 (三角形の出現確率): $C_e(i) = \frac{2E_i}{d_i(d_i - 1)}$

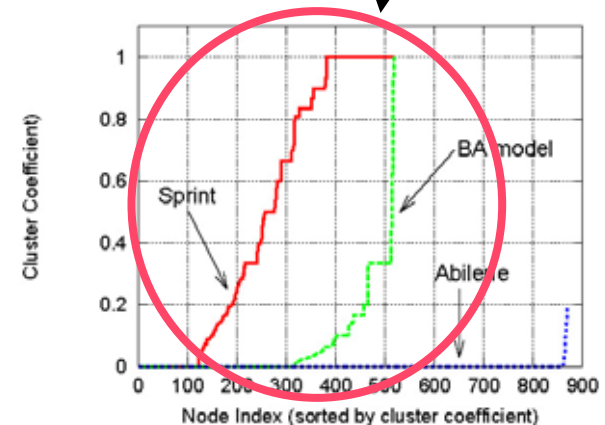
クラスタ係数が大きく異なる



平均ホップ距離



最大ホップ距離



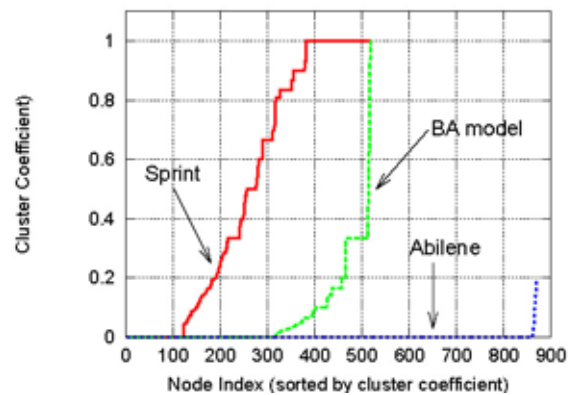
クラスタ係数



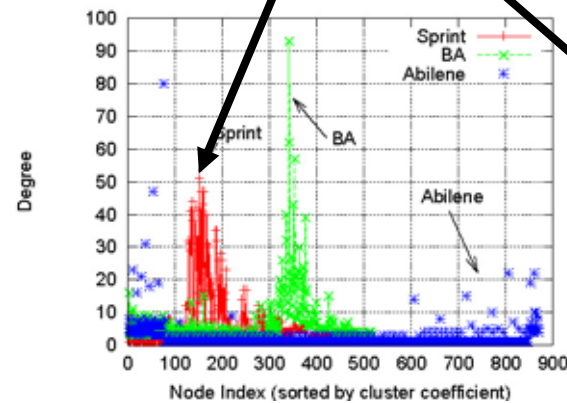
ルータレベルトポロジの構造: Sprint vs. BA

■ クラスタ係数、出線数、経路ノードペア数の相関

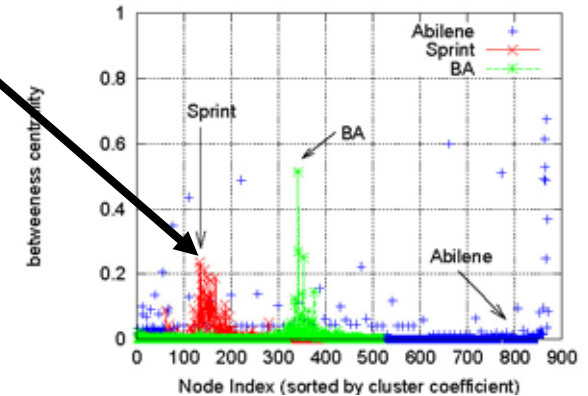
出線数の多いノードに
多くのノードペアが経
由する傾向は同じ



クラスタ係数



出線数



経路ノードペア数



経路制御手法の評価への適用

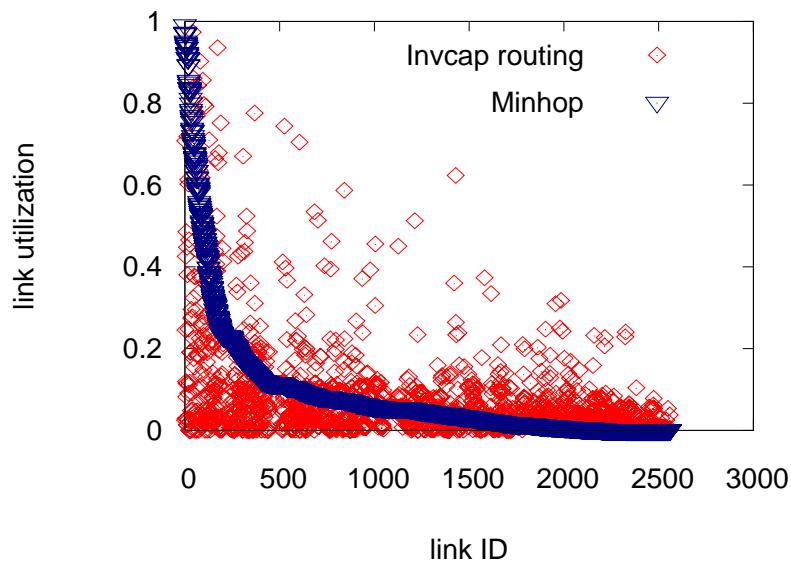
- シミュレーションモデル[3]
 - 同じノード数、リンク数を有する二つのトポロジにおいて最大リンク利用率を評価
 - » Sprint社のトポロジ、BAモデルを用いて作成したトポロジ
 - 全ノードペア間に均一にトラフィックを発生
 - 回線容量はルータの技術的な制約を考慮して決定
- 対象とする経路制御
 - 最小ホップ経路制御 (MINHOP)
 - » 経由するノードの数が最小となる経路を選択
 - Cisco社推奨のリンクコスト値を使用した経路制御 (INVCAP)
 - » リンクコストとしてリンクの回線容量の逆数の値を与える
 - 最適経路制御 (OPTIMAL)
 - » ネットワークの最大リンク利用率が最小となるように経路を選択
 - » フロー偏差法に基づく経路制御



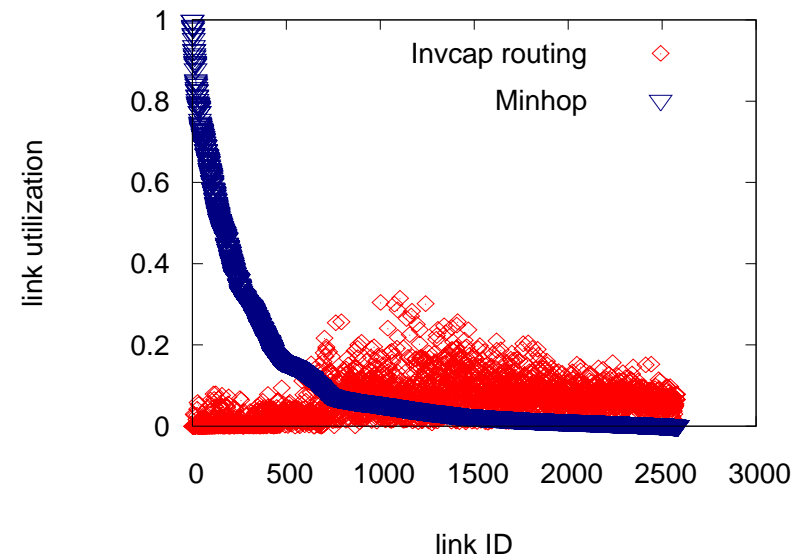
リンク利用率の比較

-Minhop routing と Invcap routing-

- BAトポロジにおいて、Ciscoの推奨する経路制御 (Invcap routing) では最小ホップ経路制御と比較して約0.3に最大リンク利用率を低減
- Sprintトポロジでは最大リンク利用率は増加
- Invcap routingは必ずしも最大リンク利用率を低下させるとは限らない



Sprint トポロジ



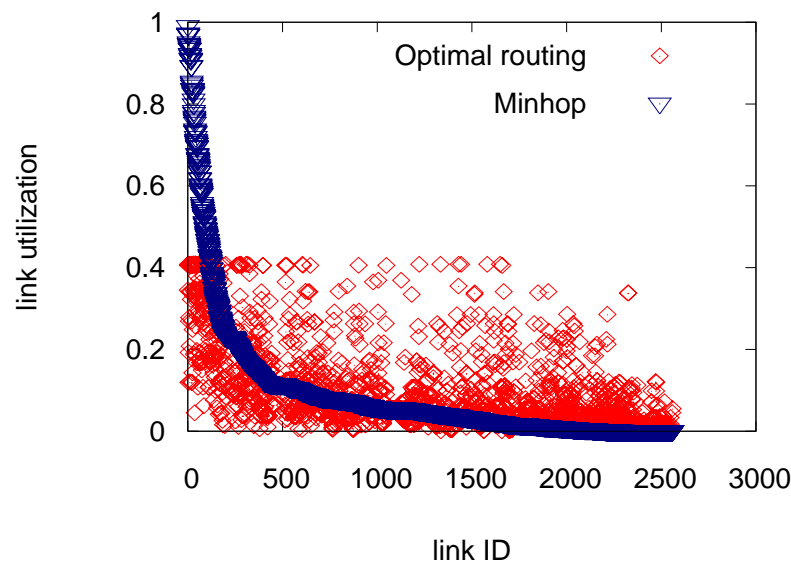
BA トポロジ



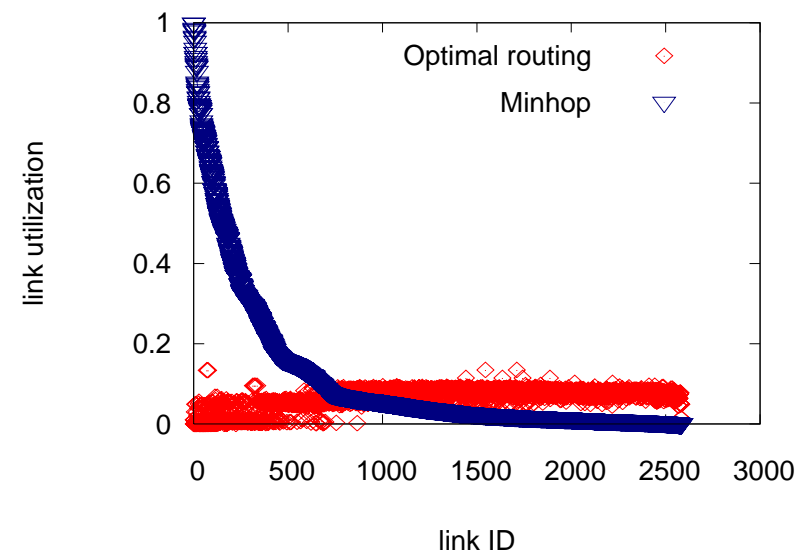
リンク利用率の比較

-Minhop routing と Optimal routing-

- Sprint トポロジにおいて、最適経路制御では最小ホップ経路制御と比較して約0.4に最大リンク利用率を低減
- BAトポロジではSprintトポロジよりも大きな効果
- 最適経路制御ではネットワーク全体に負荷を分散



Sprint トポロジ

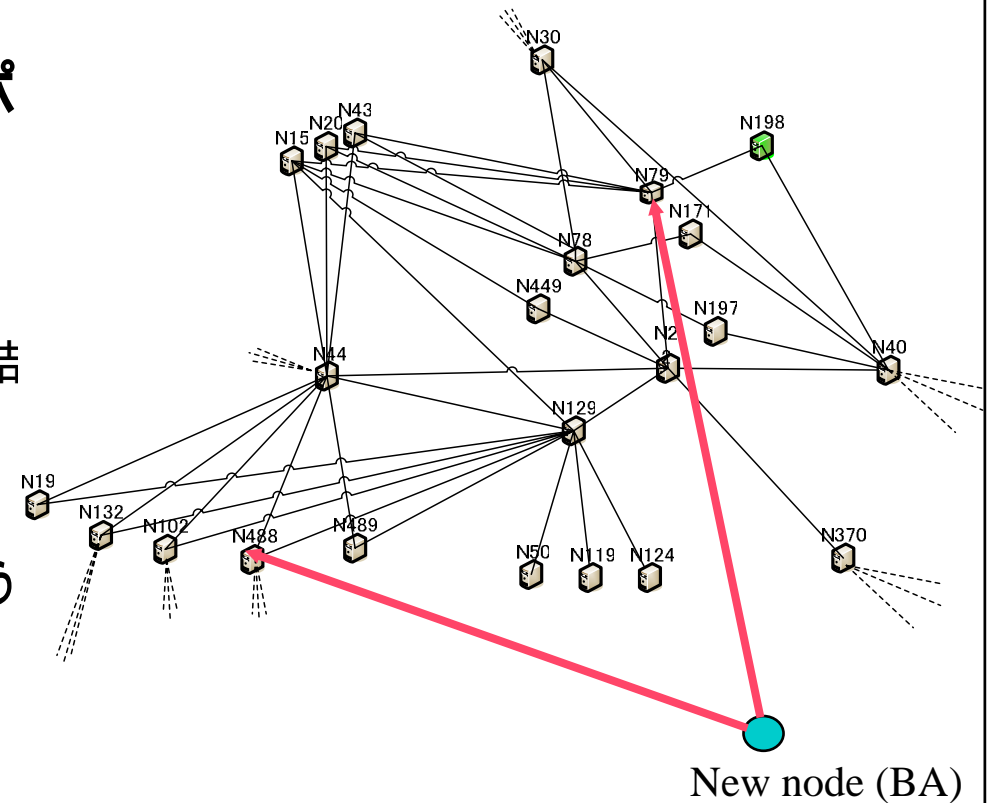


BA トポロジ



ここまでのまとめ

- BAモデルで生成されるトポロジ
 - リンク利用率が低く見積もられる
 - » 物理的距離を無視した連結
- HOT モデル
 - 学術ネットワークAbileneをうまくモデル化できている
 - 冗長性がほとんどない
 - » 冗長な予算がない？
 - » “ネットワーク設備増強”の欠落？





トポロジ生成手法:FKPモデル

- Heuristically Optimized Trade-off: FKPモデル

- 物理的距離を考慮したモデル化手法
- 物理的距離と論理的距離の重み付き和の最小化
 - » ノード i を追加する時、下記を満たすノード j に連結

$$\min \alpha \cdot d_{ij} + h_j$$

- FKPモデルで生成されるトポロジ

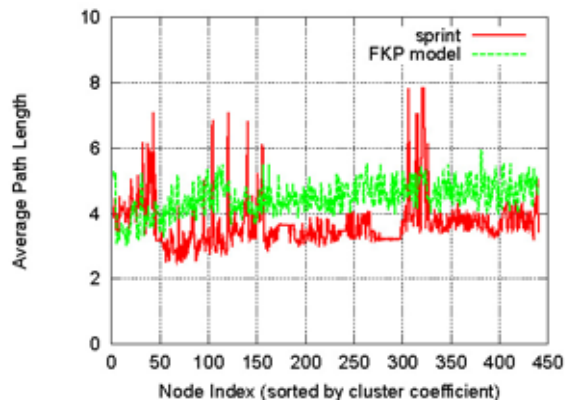
- Degree 1のノードが多い; Power-Law?
- ASトポロジに適合するように拡張もされている [Alvarez, 2004]

- ルータレベルトポロジ (Sprint)とどれくらい適合するか？

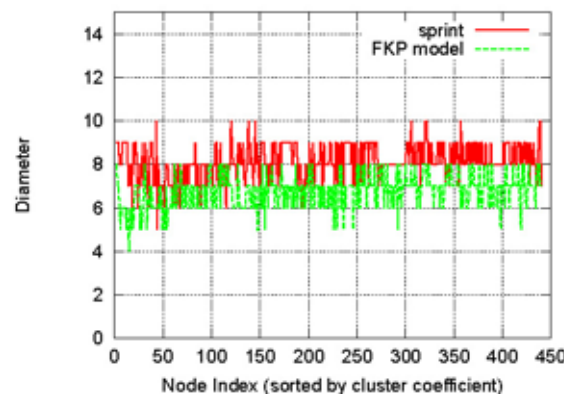


FKPモデルで生成したトポロジの特性

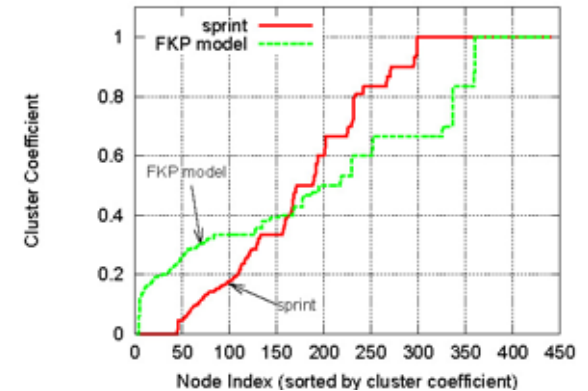
- 平均ホップ数・最大ホップ数はよく適合している
- 出線数に対して、経路ノードペア数が多い



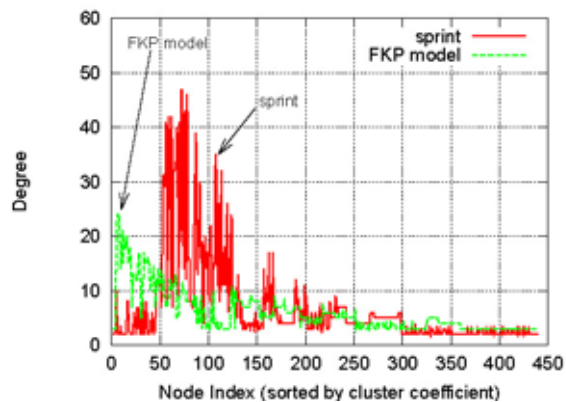
平均ホップ距離



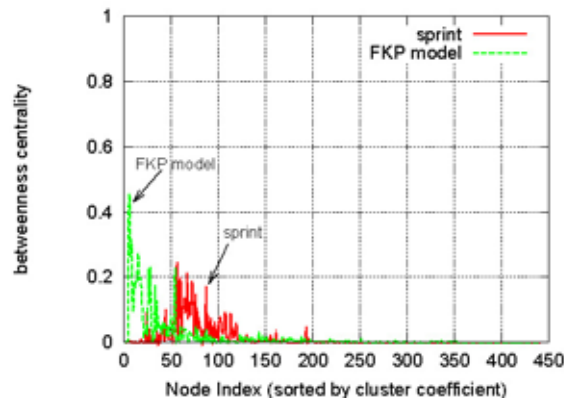
最大ホップ距離



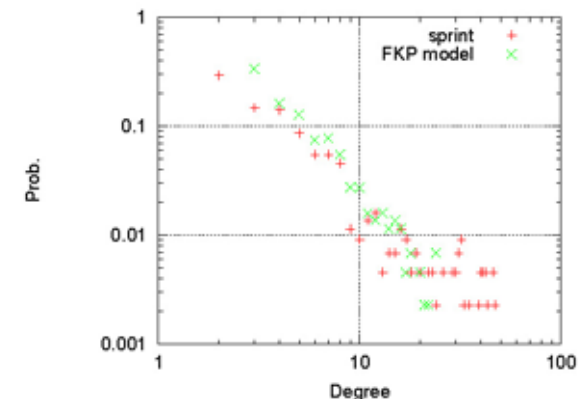
クラスタ係数



出線数



経路ノードペア数



出線数分布



提案モデル

- 詳細は文献[4]

- Incremental Growth

- » 物理的距離と論理的距離の重み付き和の最小化

- ノード i を追加する時、下記を満たすノード j に連結

$$\min \alpha \cdot d_{ij} + \overline{h_j}$$

- Network Enhancement

- » ノードを経由するノードペア数を考慮して、設備(リンク)を追加

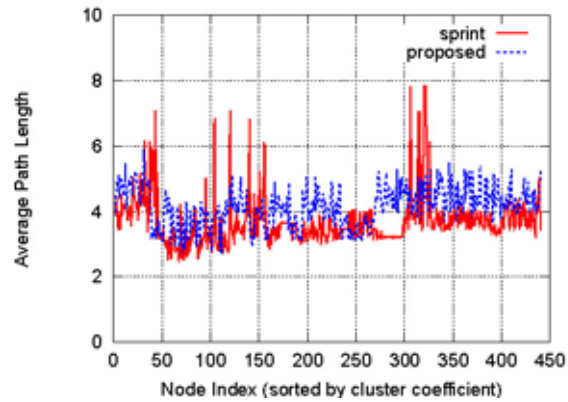
- ノード i を追加する時、トラフィック量の多いノード間を連結

$$\min \beta \cdot d_{xy} + 1/D_x$$

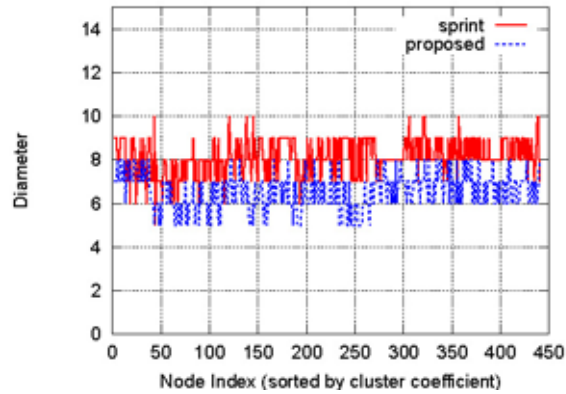
[4] 荒川伸一, 福元良太, 滝根哲哉, 村田正幸, “Analyzing and Modeling Router-level Internet Topology,” (発表予定) IN研究会, Oct. 2005.



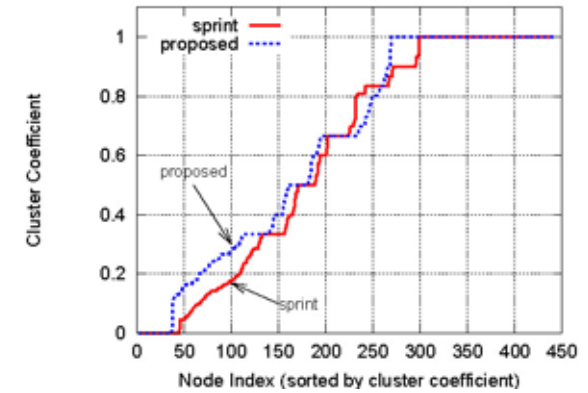
提案モデルで生成したトポロジの特性



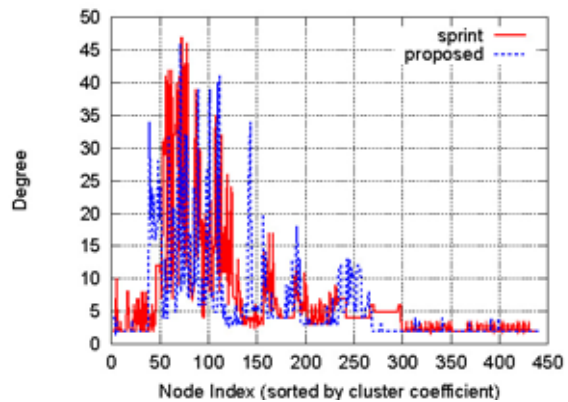
平均ホップ距離



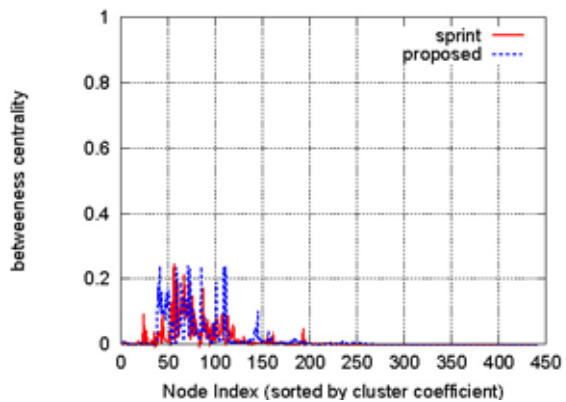
最大ホップ距離



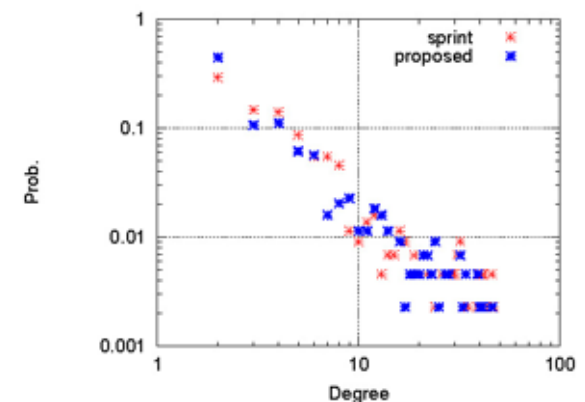
クラスタ係数



出線数



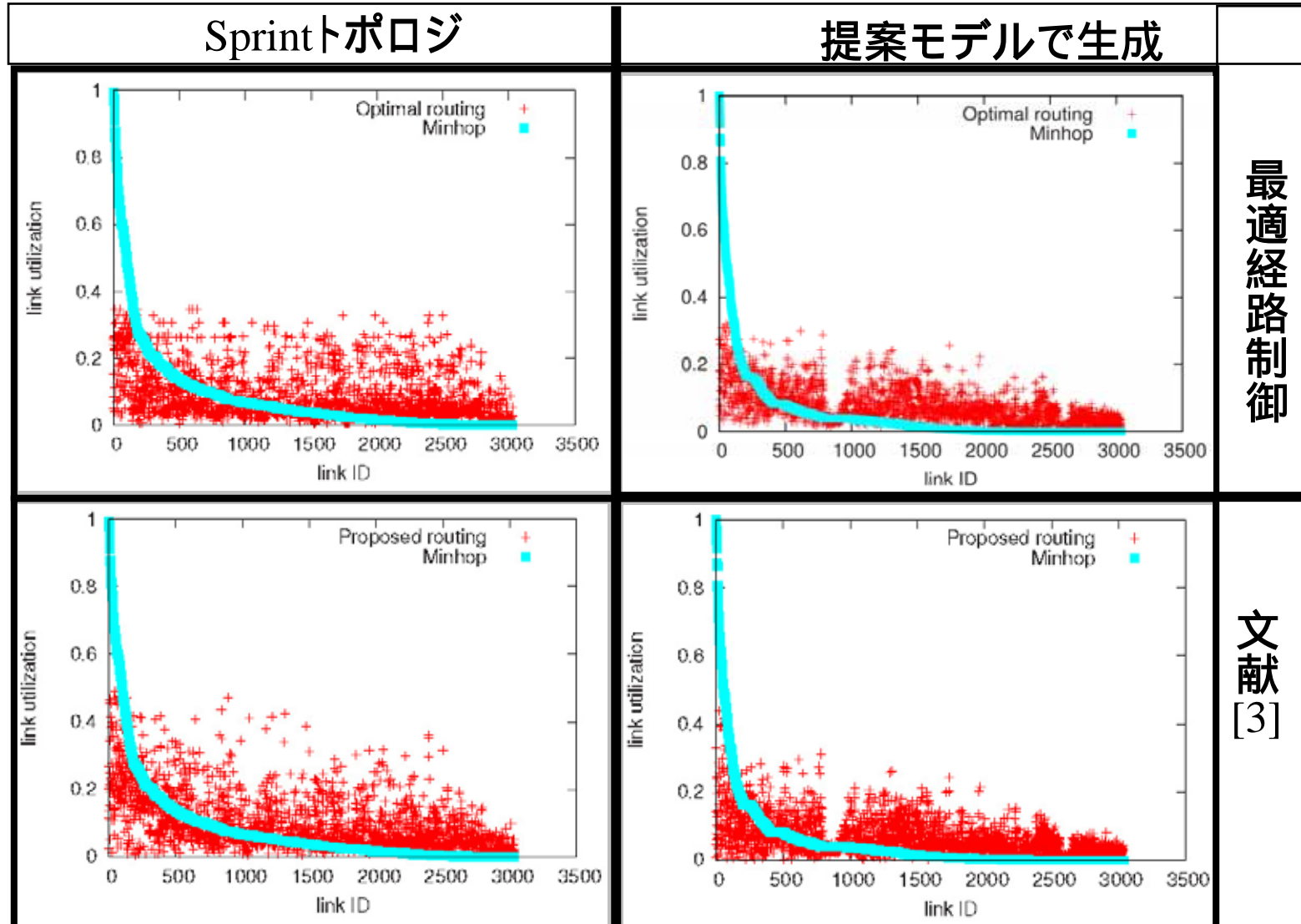
経路ノードペア数



出線数分布



経路制御の評価への適用





まとめ

- BAモデルで生成されるトポロジの構造・性能
 - 構造がルータレベルトポロジと大きく異なる
 - » その結果リンク負荷などの性能も大きく変わる
 - ネットワーク制御の評価のためにはトポロジ構造のモデル化が必要
- ルータレベルトポロジのモデル化
 - Sprintトポロジの構造・性能
 - » BAモデル: リンク負荷を過少評価
 - » HOT モデル: 冗長性がほとんどない
 - » FKPモデル: Degree1のノードが多い
 - Network Enhancementを取り入れることで、適切なモデル化が可能
- 目的に応じたモデル化
 - 経路制御: 構造の適切なモデル化
 - フローコントロール: 回線容量のモデル化が重要 今後の課題
- BAモデルはだめなのか？
 - 理論的な評価



参考文献

- [1] L. Li, D. Alderson, W. Willinger, and J. Doyle, "A first-principles approach to understanding the Internet's router-level topology," in *Proceedings of SIGCOMM*, Aug. 2004.
- [2] N. Sprint, R. Mahajan, D. Wetherall, and T. Anderson, "Measuring ISP topologies with rocketfuel," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 12, pp. 2–16, Feb. 2004.
- [3] 福元良太, 荒川伸一, 村田正幸, "パワー則の性質を有するネットワークにおける出線数情報を利用した経路制御手法の提案と評価," 電子情報通信学会技術研究報告(IN2005-68), vol. 105, pp. 43–48, Sept. 2005.
- [4] 荒川伸一, 福元良太, 滝根哲哉, 村田正幸, "Analyzing and Modeling Router-level Internet Topology," (発表予定) IN研究会, Oct. 2005.



関連文献

■ フローレベルの性質

- [Goh, 2001] ノード i を経由するノードペア数: $P_L(l_i) = l^{-\sigma}$
 - » K. L. Goh, B. Kahng, and D. Kim, "Universal behavior of load distribution in scale-free networks," *Physical Review Letters*, vol. 87, Dec. 2001.
- [Gkantsidis, 2003] リンクを經由するノードペア数の最大値: $O(n \log^2 n)$
 - » C. Gkantsidis, M. Mihail, and A. Saberi, "Conductance and congestion in power law graphs," in *Proceedings of ACM SIGMETRICS*, pp. 148–159, June 2003.

■ モデルの見直し

- [Bu, 2002] non-linear attachment: $\frac{d_i - \beta}{\sum_j (d_j - \beta)}$
 - » T. Bu and D. Towsley, "On distinguishing between Internet power law topology generators," in *Proceedings of INFOCOM*, pp. 1587–1596, June 2002.

■ BA以外のトポロジの生成手法

- [Fabrikant, 2002] HOT (Heuristically Optimized Trade-off)
 - » A. Fabrikant, E. Koutsoupias, and C. H. Papadimitriou, "Heuristically optimized trade-offs: A new paradigm for power law in the Internet," in *Proceedings of the 29th International Colloquium on Automata, Languages and Programming*, pp. 110–122, July 2002.
- [Alvarez, 2004] J. I. Alvarez-Hamelin and N. Schabanel, "An Internet graph model based on trade-off optimization," *European Physical Journal B*, vol. 38, pp. 231–237, Mar. 2004.