

Title	7.インターネットやWWWのトモグラフィー : Scale-Freeネットワークのサンプリング(<小特集>インターネットとアルゴリズム)
Author(s)	林, 幸雄
Citation	電子情報通信学会誌, 89(4): 322-325
Issue Date	2006-04-01
Type	Journal Article
Text version	publisher
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/4732">http://hdl.handle.net/10119/4732</a>
Rights	Copyright (C)2006 IEICE. 林 幸雄, 電子情報通信学会誌, 89(4), 2006, 322-325. <a href="http://www.ieice.org/jpn/trans_online/">http://www.ieice.org/jpn/trans_online/</a>
Description	

# インターネットや WWW のトモグラフィー

## —Scale-Free ネットワークのサンプリング—

Tomographies of Internet and WWW : Sampling of the Scale-Free Networks

林 幸雄

### Abstract

人工物であるにもかかわらず、インターネットや WWW の実態は大規模な自律分散システムであるがゆえに容易に把握できない状況にある。一方、そのトポロジーや通信特性を把握することは、より安定で高品質な通信インフラを構築するために不可欠である。本稿では、インターネットのトポロジーデータの収集法とサンプリング問題、及び Web 探索の研究動向について、アルゴリズムの観点を変えて紹介する。

キーワード：トポロジカルマップ、べき乗則、最適ビーコン問題、次数優先探索、ランダムウォーク

### 1. はじめに

1990 年代初頭以降、NSF の管理 (administration) から離れたインターネットバックボーンの実態を把握することは、そのパフォーマンスや安全性を知り、より安定で高品質な通信を目指す上で重要である。少々大げさにいえば、未知なる世界に足を踏み入れるわけにはいかないから。しかしながら、日々成長し集中管理されていない巨大なシステムのトポロジー、連結性、待ち時間 (latency) などを測定することは困難な課題である。

一方、1997~1998 年ごろからこうした計測が盛んに行われるようになり、代表的な組織的プロジェクトとして CAIDA<sup>(明註)</sup>がある。図 1 はそのトップページを示し、研究報告のみならず、生データや解析ツールの公開なども積極的に行っていることが伺える。

本稿では、インターネットの特性把握に関して、文献 (1) 7 章のレビューを参考にしながら、計測手段、サンプリング問題、効率的なアルゴリズムなどの観点から概説する。また、WWW のトポロジカル構造と確率的探索に関する最近の研究動向についても触れる。

### 2. インターネットの計測

インターネットの特性を調べるには、2 端末間の RTT (Round Trip Time) を計測する ping や、パケット経路を返答する traceroute コマンド、BGP (Border Gateway Protocol) ルーティング表などが使われる。また、ネットワークは階層的にとらえられ、ルータ間あるいは、AS (Autonomous System) と呼ばれる数千台の機器を含んだ拠点間のつながりで区別される。

初期の計測では、BGP ルーティング表から抽出された AS 間ネットワークにおいて、その結合次数分布にべき乗則<sup>(明註)</sup>が発見された<sup>(2)</sup>。ちょうどこの世紀末前後に、インターネットのみならず、WWW や電子メールの送受信、知人関係や性的接触、遺伝子など種々のネットワークにおいて、それらの次数分布がべき乗則に従う SF (Scale-Free) 構造が観測され反響を呼んだ。ただし、AS ネットワークにおける分布の形は測定法に敏感なようで、より精密な測定では多少異なる (すそ野のみがべき乗則に従う) 分布を持ち、SF 構造の生成規則として知られる成長と優先的結合<sup>(明註)</sup>にも従わないようである<sup>(3)</sup>。また、計測誤りの理由として、ルーティング表から変更された実際の経路、不完全で古いルーティング記録、複数の起源 AS による衝突などが指摘され、IP-to-AS マッピングの動的計画法による改善も提案されている<sup>(4)</sup>。最近の CAIDA の報告<sup>(5)</sup>では、以下の三つの測定法に対して、ネットワーク科学<sup>(6)</sup>で用いられるトポロ

林 幸雄 正員 北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科  
E-mail yhayashi@jaist.ac.jp  
Yukio HAYASHI, Member (School of Knowledge Science, Japan Advanced Institute of Science and Technology, Nomi-shi, 923-1292 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.89 No.4 pp.322-325 2006年4月

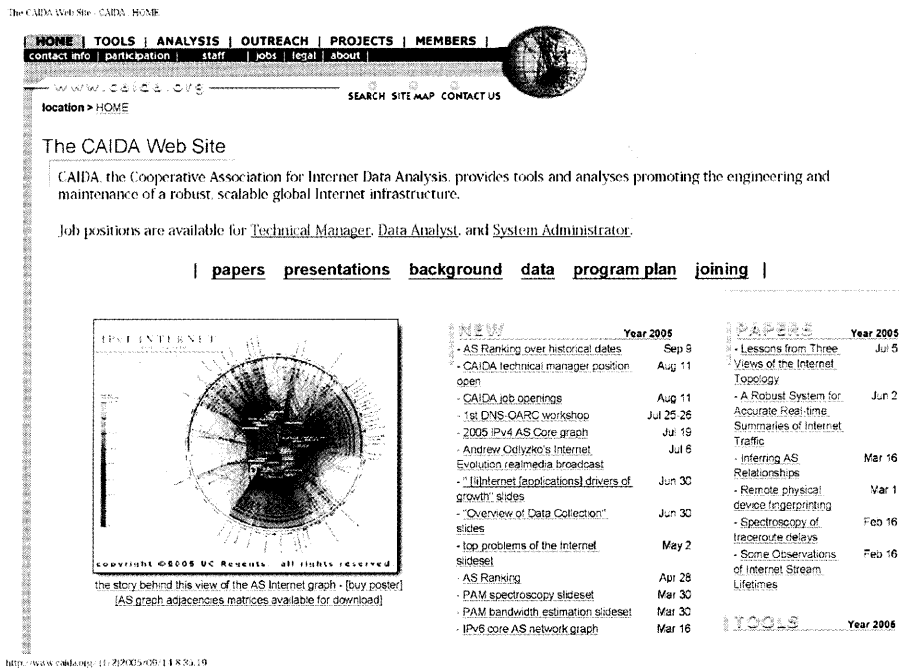


図1 CAIDA プロジェクト (<http://www.caida.org>)

ジー分析手段である，結合相関や媒介中心性などを含めた様々な指標による比較検討が行われている。

- traceroute : トラヒックに関する data plane
- BGP : ルーティング表に関する control plane
- WHOIS : オペレータが保守するデータベースに関する management plane

### ■ 用語解説

**CAIDA** Cooperative Association of Internet Data Analysis の略。UCSD を基盤に発展し，現在では日本の WIDE をはじめ，Sun や Cisco を含む複数のスポンサーを持ち，大学等の共同研究機関で構成されている。

**べき乗則** べき乗則とは，リンク数=次数  $k$  を持つノードの頻度が  $P(k) \sim k^{-\gamma}$  で表されること。ただし，べき指数  $\gamma$  の値は対象ごとに異なる。

**成長と優先結合** 各時刻ごとにネットワークに新ノードが追加され，その新ノードから既存のノードに新たに張られる(複数の)リンクの結合確率が，既存のノードの次数に比例する生成規則。

**$t$ -spanner** 部分グラフ  $G'$  における任意のノードペア間の距離が，元のグラフ  $G$  の距離の  $t$  倍以下に抑えられるとき， $G'$  は  $t$ -spanner と呼ばれる。

**クローラ** クローラとは，リンク巡航して Web の構造情報などを収集するソフトウェアロボットのこと。

**蝶ネクタイ構造** 5,600 万ノードからなる双方向に巡航可能な強連結成分(SCC)を中心に，SCC に入るのみの 4,400 万ノードからなる IN 成分，同じくそれぞれ 4,400 万ノードからなる SCC から出るのみの OUT 成分と，IN や OUT にぶら下がる Tendrils で構成された，蝶ネクタイのような構造。

**P2P システム** サーバ/クライアント方式ではなく各端末間で分数ファイル共有や転送を行う peer-to-peer のシステム。こうした P2P 技術の普及により，新たなトラヒック問題が起き得る<sup>(13)</sup>。

インターネットに限らずより一般的な SF ネットワークにおいて，ランダムなノードのサンプリング，リンクのサンプリング，雪玉(開始ノードから順にリンクをたどる)サンプリングを考えると，それらの方法で抽出した連結成分に対して上記の指標値に違いが生じる<sup>(7)</sup>。ただし，サンプリングに影響された値の上下傾向を結論づけるには，議論の余地があろう。

さて，実際のインターネット上の測定でもサンプリングは必要で，ビーコンと呼ばれる計測環境を設置したノードを介して連結性や遅延などの情報が得られる。そこで，何個のビーコンをどこに配置するかによって，測定範囲や効率が変わる。残念ながら，一般的なグラフ  $G = (V, E)$  において，各ビーコンとその隣接ノードとの間の計測で全リンクをカバーできる最小ビーコン数と配置を決める問題(最適ビーコン問題)は NP 困難である<sup>(8)</sup>。

一方，距離マップの作成を考慮して多少問題設定を変えた議論もある。与えられた距離内でビーコンがノードを探索するとき最小のビーコン数を求めるビーコン数問題に対する  $k$ -HST (Hierachically well-Separated Trees) 上の貪欲アルゴリズムや，与えられた  $N$  個のビーコンを最適配置するビーコン配置問題に対して最大距離が最適値の高々 2 倍に抑えられる  $O(N|E|)$  の 2 近似アルゴリズム，探索すべきリンク数を減らす  $t$ -spanner<sup>(用語)</sup> アルゴリズムなどが提案されている<sup>(9)</sup>。

更に，あるビーコンから計測可能な IP 経路上のリンク集合 DEMS (Deterministically Monitored Edge Set) を求めるグラフ理論的アルゴリズムと，それら DEMS の和集合が全リンクをカバーするという制約下で最適

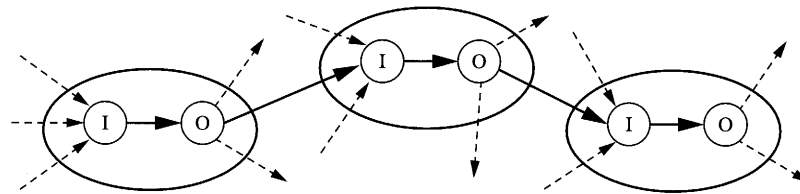


図2 多くの被参照リンク及び参照リンクを持つ誘題ごとのコミュニティ核(IとO)を経由する模式図

ビーコン数の  $(1 + \ln(|E|))$  倍以下の解を求める近似配置アルゴリズムが提案され、ある ISP (Internet Service Providers) トポロジに対する実験例において文献(8)の方法よりも 50~70%少ない結果が報告されている<sup>(10)</sup>。このように、実際のネットワークでは比較的少ないビーコン数で十分かもしれない。

### 3. Web リンクデータ収集と探索

次に、参照リンクによる論理的ネットワークである Web の効率的な探索アルゴリズムと、その発展形として次数を利用した確率的探索について紹介する。

1999年5~10月に Alta Vista 社製クローラ<sup>(用註)</sup>で収集された約2億ページ(ノード)と15億リンクのデータから、WWW の特徴的な蝶ネクタイ構造<sup>(用註)</sup>が抽出され、その入出次数はべき乗分布に従うことが発見された<sup>(11)</sup>。こうした SF 構造を持つネットワーク上では、ランダムウォークよりも次数優先探索(現ノードに隣接するノード中で最大次数のものに移動)の方が任意のページ間の平均探索時間や探索範囲のカバー率において有利である<sup>(12)</sup>。つまり、全くランダムに移動するより、トポロジカルな情報を利用した方が探索に有利というわけである。ただし、この探索では比較的小規模な P2P システム<sup>(用註)</sup>を意識してか、各ノードの次数があらかじめ分かっていることが前提である。

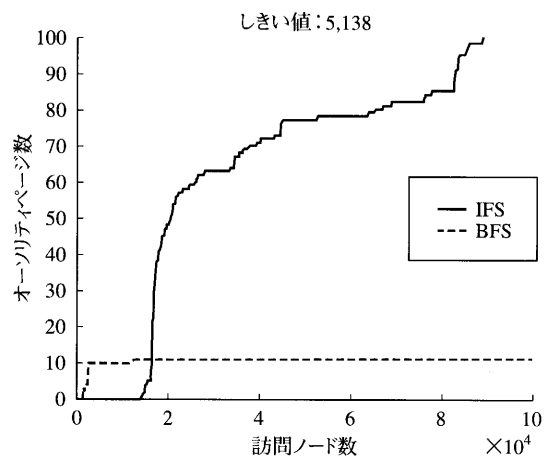
一方、Web では、被参照リンクはページ内に記述されていないので、入次数は探索を行いながら随時加算される量と考えられる。そこで、探索範囲内で随時加算される入次数が最大のノードに遷移する入次数優先探索 (IFS) を行うと、従来の幅優先探索 (BFS) に比べて入出次数共に大きな(多くから参照される、あるいは多くのリンク先を持つ有益そうな)ハブページを収集できることや、そうしたハブページ間をトラバースする現象(図2)が、約10万ページの実験例から示された<sup>(14)</sup>。図3(a),(b)は、その訪問ノード数に対する累積獲得として、入次数が大きなオーソリティページ数と出次数が大きなハブページ数の変化を示す。図中のしきい値以上の次数を持つページを累計し、それらは約10万ページまで探索したときの入出次数の上位100番以内に相当する。

更に、局所的情報である隣接ノードの次数(の関数)に従った遷移確率を考慮した関連研究では、サイズ  $N$

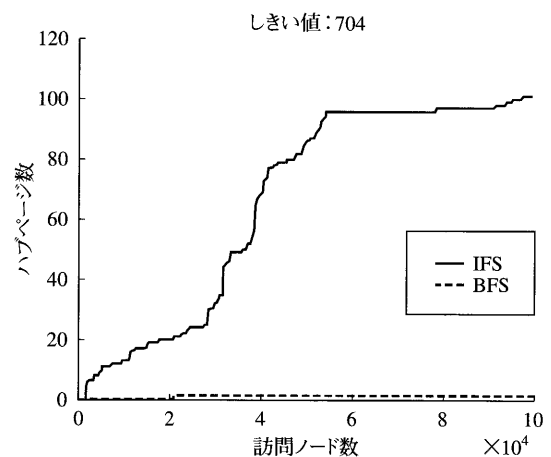
の有限グラフ上のランダムウォークによる平均ヒット時間とカバー時間が、従来の  $O(N^3)$  から  $O(N^2)$  まで抑えられる<sup>(15)</sup>。このアイデアに、直前に通過した  $k$  個のノードへの遷移を禁止した  $k$ -タブーと、 $l$ -ステップ先に目標点があれば移動できる  $l$ -先読みを加えると、 $(k, l, \beta)$ -ランダムウォークとして一般化できる<sup>(16)</sup>。その際、ノード  $u, v \in V$  の遷移確率を

$$p_{u \rightarrow v}^{(\beta)} = \frac{k_v^{-\beta}}{\sum_{w \in \mathcal{N}(u)} k_w^{-\beta}}$$

と定義する。ここで、 $v \in \mathcal{N}(u)$  は  $u$  の隣接ノードで、



(a) 入次数が大きなオーソリティページ数



(b) 出次数が大きなハブページ数

図3 訪問ノード数に対する累積獲得数

$k_v$ はその次数を表す。また、 $\beta$ はべき指数パラメータで、 $\beta = -1$ の場合が確率的な次数優先探索（決定論的は $\beta \rightarrow -\infty$ ）、 $\beta=0$ の場合がランダムウォークに相当する。 $(k, l, \beta)$ の値の組合せで様々な探索が考えられる。特に、確率的な次数優先探索をランダムグラフやSFネットワーク上で行った場合、タブーや先読みが平均ステップ数に与える効果について興味深い実験結果が示されている<sup>(16)</sup>。更に、次数優先探索はべき乗次数分布を崩さないサンプリング法<sup>(17)</sup>とも関連がありそうである。

#### 4. おわりに

インターネットやWWWのトポロジーを抽出する計測技術とアルゴリズムの現状を概説した。

様々な課題が未解決であるが、例えば、計測手法ごとに異なる特徴が得られるのかどうかを明らかにすることや、サンプリングの影響を取り除く手法を開発すること等は、実務的に重要であろう。また、SF性を利用した効率的かつ頑健なビーコン配置アルゴリズムの開発や、局所情報に基づく確率的探索の特性解明などは、大規模システムを扱う上で強力な武器となろう。こうした取組みの今後の進展が期待される。

#### 文 献

- (1) A. López-Ortiz, "Algorithmic foundations of the internet," ACM SIGACT News, Technical Columns, vol.36, no.2, pp.45-63, 2005.
- (2) M. Faloutsos, P. Faloutsos, and C. Faloutsos, "On power-law relationships of the internet topology," Proc. of SIGCOMM, pp.251-262, 1999.
- (3) Q. Chen, H. Chang, R. Govindan, S. Jamin, S.J. Shenker, and W. Willinger, "The origin of power laws in internet topologies revised," Proc. of INFOCOM, 2002.
- (4) Z.M. Mao, D. Johnson, J. Rexford, J. Wang, and R. Katz, "Scalable and accurate identification of AS-level forwarding paths," Proc. of INFOCOM, 2004.
- (5) P. Mahadevan, D. Krioukov, M. Fomenkov, B. Huffaker, X. Dimitropoulos, K. Claffy, and A.Vahdat, "Lessons from three views of the Internet topology," CAIDA Technical Report, 2005.
- (6) 林 幸雄, "Scale-Free ネットワークの生成メカニズム," 応用数理, vol.14, no.4, pp.58-74, 2004.
- (7) S.H. Lee, P.-J. Kim, and H. Jeong, "Statistical properties of sampled networks," Phys. Rev. E, Stat. Nonlinear Soft Matter Phys., vol.73, pp.016102, 2006.
- (8) J.D. Horton and A. López-Ortiz, "On the number of distributed management points for network tomography," Proc. of IMC, pp.204-209, 2003.
- (9) S. Jamin, C. Jin, Y. Jin, D. Raz, V. Shavitt, and L. Zhang, "On the placement of internet instrumentation," Proc. of INFOCOMM, pp.295-304, 2000.
- (10) R. Kumar and J. Kaur, "Efficient beacon placement for network tomography," Proc. of IMC, pp.181-186, 2004.
- (11) A. Broder, R. Kumar, F. Maghoul, P. Raghavan, S. Rajagopalan, R. Stata, A. Tomkins, and J. Wiener, "Graph structure in the web," Proc. 9th WWW Conf., pp.309-320, and Comput. Netw., vol.33, no.1-6, pp.309-320, 2000.
- (12) L. Adamic, R.M. Lukose, A.R. Puniyani, and B.A. Huberman, "Search in power-law networks," Phys. Rev. E, Stat. Nonlinear Soft Matter Phys., vol.64, pp.046135, 2001.
- (13) 亀井 聡, "P2P技術がネットワークインフラに及ぼす影響と課題," コンピュータソフトウェア, vol.22, no.3, pp.8-18, 2005.
- (14) 松久保潤, 林 幸雄, "局所的なリンク構造に基づくコミュニティ構造の抽出法," 情処学論, vol.46, no.1, pp.301-310, 2005.
- (15) S. Ikeda, I.Kubo, N. Okumoto, and M. Yamashita, "Impact of local topological information on random walks on finite graphs," Proc. of the ICALP, LNCS, vol.2719, pp.1054-1067, 2003.
- (16) 緒方 司, 小野廣隆, 定兼邦彦, 山下雅史, "進化的ネットワークにおける局所情報に基づく探索戦略," 情処研究会ネットワーク生態学シンポジウム, 予稿集 CD-ROM, pp.36-37, 2005.
- (17) M.H. Stampf and C. Wiuf, "Sampling properties of random graphs : The degree distribution," Phys. Rev. E, Stat. Nonlinear Soft Matter Phys., vol.72, pp.036118, 2005.



はやし ゆきお  
林 幸雄 (正員)

昭60豊橋技科大・工・電気電子卒。昭62同大学院修士課程了。富士ゼロックス(株)、(株)ATR視聴覚機構、人間情報通信研究所を経て、現在、北陸先端大に勤務。博士(工学)。数理工学、Web情報空間、ネットワーク生態学に關する研究に従事。