

ネットワークの構造とその流量ゆらぎ

只木進一

佐賀大学総合情報基盤センター

概要

インターネットの構造がスケールフリーであることが報告されている。その動的性質についても、短い時間スケールで巾則に従うことが知られている。巾則に従うゆらぎは、数日を越える時間スケールでも観測することができる。しかし、スケールフリーな構造から巾則ゆらぎを直接に得ることはできない。

Structure of Networks and Fluctuations in flow

Shin-ichi Tadaki

Computer and Network Center, Saga University

Abstract

The structure of the Internet has been reported to be scale-free. Its dynamical properties also have been reported to obey a power law in small time scales. The power-law fluctuations can be observed in longer time-scale than some days. A scale-free structure of a network, however, can not directly affect power-law behavior with simple processes.

1 序論

インターネットは、現代の最も基本的な通信手段の一つとなっている。企業、大学、政府などの組織業務がインターネットが稼働していることを前提としている。このような基盤としての重要性の一方で、インターネットには、全体の構造やその流量の調整を行う中核組織が存在しない。つまり、インターネットは、現代的な通信技術に支えられた人工的ネットワークであると同時に、自律的な成長と調整の機構を持ったネットワークである。

近年、インターネットを含む自律的なネットワークの構造とその動的性質に対する関心が高まっている。インターネットについても、スケールフリー的な構造と、巾則に従う動的性質に関する研究が活発に行われている [1]。

インターネットは、階層的なアドレス構造を使って、その通信を制御している。各階層間の通信はルータと通じて行われる。階層の一番下に、サーバや端

末が接続されている。各階層のインターネットの運営は、AS (Autonomous Systems) が単位となっていく。通常は、組織や地域ネットワーク団体などが AS となり、内部の運営ポリシーを定めている。AS 間はルータによって接続される。AS の下流に別の AS が存在することもある。このルータや AS のレベルで見た時に、インターネットの構造がスケールフリーであることが指摘されている [2]。

インターネット上でのデータ通信は、パケットという小さなデータ単位によって行われる。大きなファイルの転送も、小さなパケットに分割して行われる。各パケットには、送信元と受信先とともに、データが保存されている。このパケット流の時間変化は Poisson 過程で近似できると長く思われてきたが、近年の観測で巾則に従うことが報告されている [3, 4]。

インターネットは人工的な通信システムである。従って、インターネット上の流量は人間の活動の影響を受けている。人間の活動の基本周期が一日であることから、インターネット流量にも基本周期とし

て一日の周期が表れる。この周期的な挙動の影響を避けてインターネットに固有な動的性質を検討するため、従来の研究では、一日よりも短い周期での解析が行われてきた。

巾則は、様々な時系列に表れることが知られている。しかし、その起源について一貫した説明はなされていない。特に、ネットワークのスケールフリー構造とそのうえの動的性質に現われる巾則については、不明な点が多い。本研究では、その二つの関係について検討する。

2 インターネット上のパケット流の時系列

巾則に従うゆらぎは高速道路の交通流にも現われる。交通流も、人間の活動の影響をうけており、一日を基本周期とした振るまいを示す。武者一樋口の実測は4時間程のデータから $1/f$ ゆらぎを得ている[5]。

非定常の時系列の解析手法として DFA (Detrended Fluctuation Analysis) がある[6, 7]。流量時系列 $q(t)$ に対して、プロファイル $y(t)$ を定義する。

$$y(t) = \sum_{\tau=0}^{T-1} [q(\tau) - \langle q \rangle], \quad (1)$$

ここで $\langle q \rangle = (1/T) \sum_{t=0}^{T-1} q(t)$ は時間 T に渡る平均を表している。

計測時間 T を長さ l の短い区間に分割し、各区間ごとの $y(t)$ のトレンドを定義する。例えば、最小二乗法によって直線でトレンドを定義する。区間 n におけるトレンドを $\tilde{y}_n(t)$ と書くことにする。プロファイル $y(t)$ のトレンドからのずれを detrended プロファイルとして定義する。

$$y_l(t) = y(t) - \tilde{y}_n(t), \text{ if } nl \leq t < (n+1)l. \quad (2)$$

このずれの二乗平均

$$F^2(l) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} y_l^2(t). \quad (3)$$

の区間の長さ l への依存性を調べることで、長時間相関を調べることができる。

$$F(l) \sim l^\alpha, \quad (4)$$

のように l の巾則に従う場合、時系列 $q(t)$ のパワースペクトル $P(k)$ は

$$P(k) \sim k^{-\beta}, \quad \beta = 2\alpha - 1. \quad (5)$$

という巾則に従うことになる。この方法により、高速道路の流量時系列が、一日周期の変動に巾則ゆらぎが重なったものであることが明らかになっている[8]。

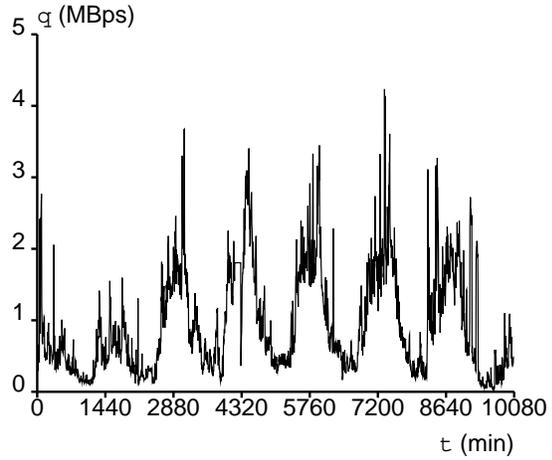


図 1: MRTG で取得したデータ

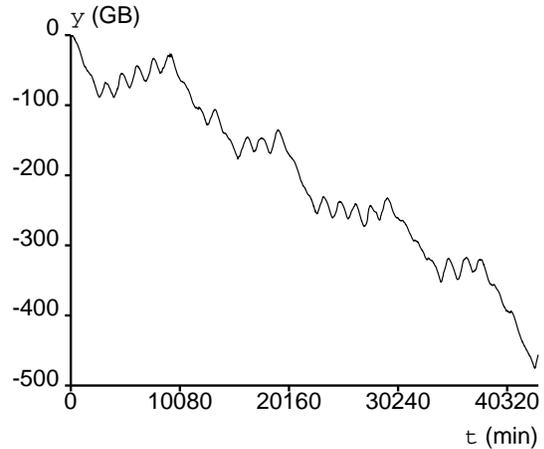


図 2: MRTG で取得したデータに対応するプロファイル

インターネットの流量観測についても同様の方法が使えるであろう。図 1 は、佐賀大学と九州大学を結ぶネットワークを通じて、佐賀大学側へ流れ込むパケットを MRTG で観測したデータである。1440 分が一日に対応しており、一日周期の活動を読みとることができる。

図 2 は、図 1 の MRTG データに対応したプロファイルである。10080 分は一週間に対応している。MRTG データで見えた一日の周期のほかに、一週間の周期ごとに急にプロファイルが減少する様子が見

える。これは、週末に利用が少ないことに対応している。

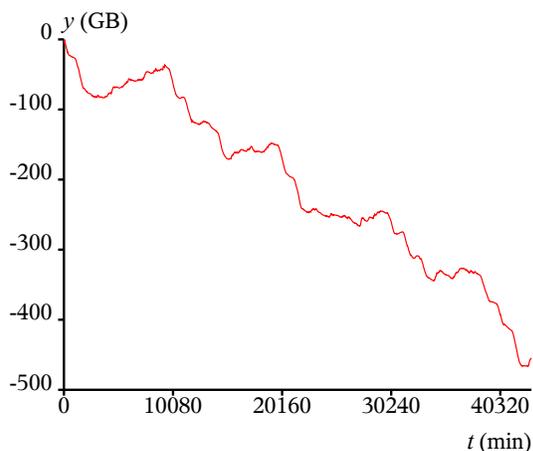


図 3: MRTG で取得したデータから一日の平均を差し引いた流量時系列に対応するプロファイル

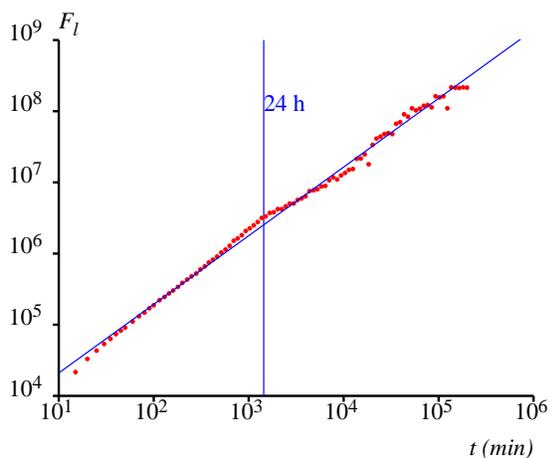


図 4: 一日の平均を差し引いた流量時系列に対応する DFA 解析結果

プロファイルは、計測時間全体の平均との差を表している。従って、図 2 に現われている 4 週間に渡る減少は、表示している区間が全計測時間の中で流量が少なかった時期に対応しているだけであって、一般的な傾向ではないことに注意しておく。

高速道路の流量解析の際と同様に、平均的な一日の流量変化を差し引いた流量時系列を構成する。これに対応するプロファイルは図 3 のように、一日周期の無いものとなる。これを用いて二乗誤差 F_l の区間長 l への依存性を見ると、きれいな直線となる。これは、パワースペクトルの巾が 0.92 に相当する。同

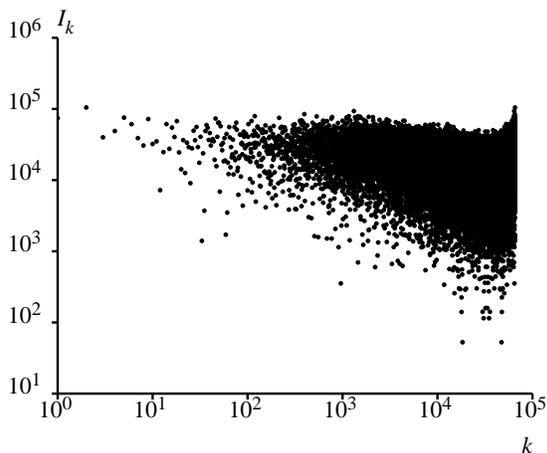


図 5: Power spectrum of the load of a central node for Barabási-Albert network.

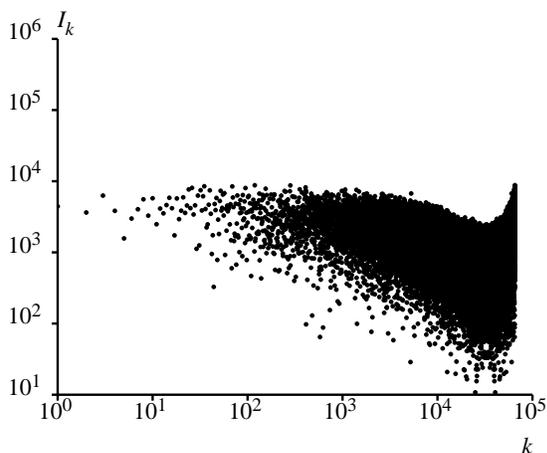


図 6: Power spectrum of the load of a central node for a regular lattice network.

様の巾則は、流量が圧倒的に少ない、佐賀大学から九州大学へ出て行く方向においても観測できる [9]。

3 ネットワーク上のランダムウォーク

流量時系列に現れる巾則の起源としては、様々なものが考えられる。各ホストが接続しているイーサネットには、CSMA / CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) というキューイングメカニズムがあり、混雑が発生するとパケット送出間隔を長くする。また、ルータにはルーティングのためのキューがある。データ転送プロトコルの TCP には、データ再送のメカニズムがある。更に、メー

ルのようにアプリケーションにも、再送機能があるものもある。このような送信メカニズムの他に、インターネットの構造がもつスケールフリー性も巾則の起源として指摘されることがある。

ネットワークの構造と動的性質の関連を調べるために、インターネットシミュレータとして知られている NS2 などを使うことも可能である。しかし、インターネットのメカニズムと構造との分離が困難になる。そこで、簡単なランダムウォークを使って構造と流量との関係を見る事にする。

ネットワークの構造として、スケールフリーネットワークとして Barabási-Albert (BA) ネットワークを、その比較対象として二次元正方格子を考える。初期にランダムにノードを選んで配置した粒子は、独立にリンクをたどってランダムウォークをするとする。つまり、インターネットが有する様々なキューイングの機構の全く無い状況で、ネットワークの構造の影響を調べることにする。

ここでは流量を直接に調べるのではなく、各サイトに保存されているパケット数の時間変化を調べることにする。図 5 と 6 に、BA ネットワークと二次元正方格子の結果を示す。どちらも、白色雑音とも巾の小さな巾則ともとれる結果である。重要なのは、両者に大きな違いが無いということである。

4 まとめ

インターネットのパケット流においても、巾則に従うゆらぎが観測できることが明らかとなった。その起源としては、インターネットの通信プロトコルなど、その機構が持っている様々なキューイングと、インターネットの構造が考えられる。

高安らの研究では、ルータのキューがほぼ輻輳した状況で、巾則が生成されることが示されている [4]。しかし、流量が少ない回線においても巾則が観測されることを説明することができない。一方、ネットワークの構造が巾則ゆらぎを作ることも単純なモデルでは示すことができないことが分かった。

インターネットが持つ機構とネットワークの複合的な影響で巾則がでる可能性もある。一方で、交通流もインターネットも人工的なシステムである。このシステムの外側の原因、つまり人間や社会の活動に含まれるゆらぎが影響する可能性もある。

参考文献

- [1] R. Pastor-Satoras and A. Vespignani, Evolution and Structure of the Internet (Cambridge University Press, Cambridge, 2004).
- [2] M Faloutsos, P Faloutsos, and C Faloutsos, ACM SIGCOMM Comp. Commun. Rev. 29 (1999) 251–263.
- [3] I. Csabai, J. Phys. A: Math. Gen. 27 (1994) L417–L421.
- [4] M. Takayasu, H. Takayasu, and T. Sato, Physica A 233 (1996) 824–834.
- [5] T. Musha and H. Higuchi, Jpn. J. Appl. Phys. 15 (1976) 1271–1275.
- [6] C.-K. Peng, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H. E. Stanley, and A. L. Goldberger, Phys. Rev. E49 (1994) 1685–1689.
- [7] C.-K. Peng, S. Havlin, H. E. Stanley, and A. L. Goldberger, Chaos 5 (1995) 82–87.
- [8] S. Tadaki, M. Kikuchi, A. Nakayama, K. Nishinari, A. Shibata, Y. Sugiyama, and S. Yukawa, J. Phys. Soc. Jpn. 75 (2006) 034002.
- [9] S. Tadaki, J. Phys. Soc. Jpn. 76 (2007) 044001.