

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18500215
 研究課題名 (和文) 交通流を含むトラフィックの統計的性質
 研究課題名 (英文) Statistical properties of traffic
 Including vehicle traffic
 研究代表者
 只木 進一 (TADAKI SHIN-ICHI)
 佐賀大学・総合情報基盤センター・教授
 研究者番号：00202169

研究成果の概要：交通流やインターネットを流れるデータが、特徴的な時間スケールを持たない長時間相関を持つことが指摘されてきている。こうした流れは、人間の活動を反映して、一日などの周期性を持っている。本研究では、周期運動や傾向を除く手法を用いて、数か月にわたる相関が確かに存在することを初めて明らかにした。

こうした長時間相関の起源について、内的機構と外的機構が指摘されている。インターネットについて、需要そのものに長時間相関がある可能性についても指摘した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,100,000	0	1,100,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	390,000	2,790,000

研究分野：統計力学

科研費の分科・細目：情報学・統計科学

キーワード：時系列解析、インターネット、べき則ゆらぎ、周期性、雑音の効果

1. 研究開始当初の背景

- (1) 交通流の研究は、自動車が普及し始めた1950年代に始まった。当初には、力学的あるいは流体力学的研究が行われたが、その後は交通工学として研究が進められてきた。1990年代に入り、数理モデルの構築とそのシミュレーションを通じた物理的理解を目指した研究が再興し、非平衡現象やパターン形成という観点からも注目されるようになった。

さらに、熱的緩和が重要でないような大きな粒径の粒子の流れである粉体流、

情報ネットワーク上でのデータ流、さらに蟻や分子モーターなどの生物系における自己駆動粒子との関連の研究も活発にすすめられている。

- (2) 武者と樋口による先駆的研究(1976)により、高速道路交通流にべき則($1/f$)揺らぎがあることが示唆された。この研究では、観測時間が短いことが問題であり、検証研究が求められていた。

一方、高速道路交通流は、人間の活動の影響をうけているために、8時間、1日、

1 週間といった、様々な周期性を有していることが予想される。そのため、単純に長時間データを解析するだけでは、べき則ゆらぎの存在を確認することはできない。

周期性や短時間の傾向を処理する手法を用いることで、長時間相関の存在が明らかになりつつある。

- (3) 本研究の研究代表者を含む研究グループは、東名道や名神道などの高速道路の実測データを取得し、交通流の性質に関する研究を進めてきた。

このデータに対して通常のパワースペクトル分析を行うと、予想通り 8 時間や 1 日の周期性が強く、べき則ゆらぎを明確に得ることは困難であった。

- (4) 本研究の研究代表者を含む研究グループが行ってきた、最適速度交通流模型を使ったシミュレーションでは、雑音を与えると、流量にべき則ゆらぎが現れる。しかし、個々の車両の挙動の時間スケールは数秒であり、数か月に及ぶ長時間のべき則ゆらぎの説明にはならない。

2. 研究の目的

- (1) 高速道路交通流データやインターネット流量データの解析を通じて、その長時間相関の性質を解明することを本研究の第一の目的とする。前述のように、交通流やインターネットは人間の社会活動の影響下であり、8 時間や 1 日などの周期性を含む。そうした周期性を適切に処理する方法により、長時間相関の存在を明らかにする。特に、高速道路交通流データと類似の性質をもつことが期待されているインターネットのデータ流についても、長時間相関の有無を明らかにする。

- (2) 長時間相関の起源について、検討する。交通流もインターネットも、内的要因として待ち行列効果・排他体積効果を有している。しかし、こうした効果の特徴的時間は非常に短い。
また、いずれの流量もネットワーク構造の影響を受ける可能性を排除できない。

- (3) 交通流において車両間の相関を生じさせるには、一定の密度が必要である。密度上昇の起因となるのが、トンネルなどのボトルネック構造である。
ボトルネック上流には渋滞が形成されるが、渋滞形成はボトルネック入口から 1km ほど上流であることが指摘されている。

このことについても、シミュレーション及び解析的研究により明らかにする。

3. 研究の方法

- (1) データの取得：本研究の基本的視点は、実際の流量データを解析することで、長時間相関の有無を知ることである。交通流データに関しては、旧日本道路公団(2005 年 10 月民営化)を用いることとした。当該データは、5 分ごとに、流量と平均速度が 1 ヶ月ごとにまとめられている。長時間相関を得るため、1 年をまとめて使用した。

本研究の研究代表者は、大学全体の情報基盤の整備運用を担う組織に所属している。そこでは、日常的運用管理のために様々なログを収集している。その中から、パケット流量及び電子メールのログを解析対象とした。

- (2) Detrended Fluctuation Analysis : 交通流やインターネット上のデータ流には、様々な「傾向」が存在する。両者とも、その需要は次第に増加している。また、人間の活動に対応した様々な周期運動が含まれている。

こうしたデータのワースペクトルは、様々な周期運動に対応したピークや、短時間領域の大きな雑音に影響される。そのため、長時間相関を見つけ出すのが困難となる。

本研究で用いる DFA (Detrended Fluctuation Analysis) は、当初は DNA (DeoxyriboNucleic Acid) に含まれる長距離相関の解析手法として開発されたものである。この手法を用いると、流量のような加算的な量の時系列から、短時間の傾向 (trend) を取り除き、長時間相関を得ることが可能である。

- (3) 高速道路流量データも、インターネットの流量取得方法の一つ MRTG (Multi Router Traffic Grapher) も、5 分平均としてデータを取得する。時間解像度を上げると、交通流データの場合、計測器を通過する車両数が減り、統計としての意味がなくなってしまう。インターネット流量の場合、ユーザ挙動や通信機器の非同期性が重要になり、雑音が大きくなってしまう。

流量データ等に含まれる短時間の雑音が、ワースペクトルや DFA の結果に与える影響について評価しておく必要がある。そのため、人工的に作られた長時間相関を持つデータを生成し、その解析を行う。

長時間相関は、データの Fourier 成分

のべき則分布として現れる。ランダムな時系列の Fourier 成分に、べき則分布を加えることで、人工的に長時間相関を持つ時系列を生成することができる。

- (4) 交通流の数理モデルの研究は、1990 年代に物理モデルの構築を契機に、再興された。物理モデルは、流体力学モデル等の巨視的現象論的モデルと、個々の車両の挙動を記述する微視的モデルに大別される。微視的モデルには、セルオートマトンモデル等の空間時間離散モデルと、追従モデル等の連立微分方程式型のモデルがある。

最適速度モデルは、追従モデルの一つである。各車両は、車頭距離に対応した最適（安全）速度と、現在の速度の差に比例した加減速を行い、最適速度へと調整する。このモデルを時間方向に離散化したものを結合写像型最適速度モデルと呼ぶ。本研究の交通流シミュレーションには、この結合写像型最適速度モデルを用いる。

4. 研究成果

- (1) 交通流及びインターネット流量の長時間相関（雑誌論文④、⑦、学会発表①）：ここでは、インターネット流量の長時間相関について述べる。

研究代表者の所属する佐賀大学から SINET への経路の packets 流量を解析対象とする。データの一部を図 1 に示す。この図は、1 週間のデータを示しているが、1 日（1440 分）の周期性が明瞭にあらわれている。

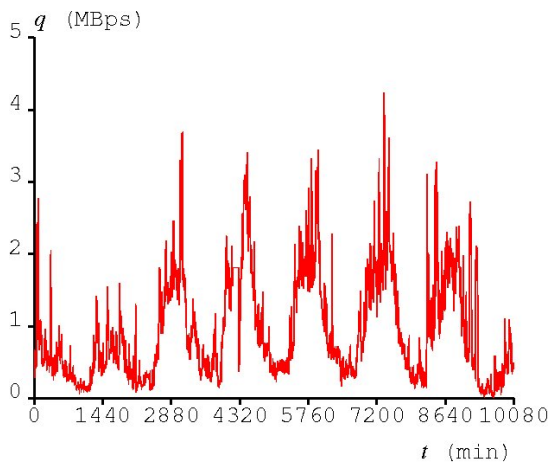


図 1 パケット流データ

このデータに対して DFA 解析を実行する。流量 $q(t)$ ($0 \leq t < T$) に対して、プロファイル $y(t) = \sum_{i=0}^t [q(t) - \langle q \rangle]$ で定義する。ここで、 $\langle q \rangle$ は時間平均である。

データを区間長 l に分割し、各区間のプロファイル $y_j(t)$ を最小二乗法にてフィットし、トレンド $y_j(t)$ を得る。 j は区間のインデックスである。トレンドは、区間ごとに作成することに注意する。プロファイルのトレンドからの差の二乗の和 $F_l^2 = T^{-1} \sum_{t=0}^{T-l} [y(t) - y_l(t)]^2$ を求める。この F_l^2 が区間長 l に対してどのようにスケールするかを調べることにする。

その結果は、1 日周期の変動にべき則ゆらぎが加わった典型的な形であることが明らかとなった。

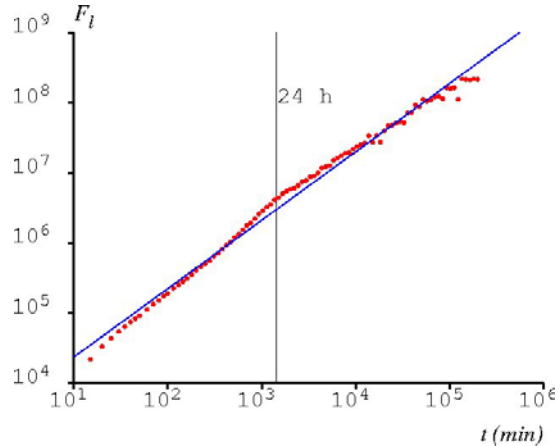


図 2 DFA 解析結果

そこで、流量データより平均的 1 日の挙動を生成し、その部分を除いたデータを作成した。そのデータに対して、再度 DFA を実行した。

図 2 にその結果を示す。結果は $F_l \sim l^{-\alpha}$ 、 $\alpha \sim 0.96$ である。これは、通常のパワースペクトルのべき則 $P(k) \sim k^{-\beta}$ において $\beta \sim 0.92$ に対応する。

- (2) 電子メール重要の長時間相関（雑誌論文③）：インターネットの長時間相関の起源としては、いくつかのものが考えられる。インターネットを構成する機構には、様々な待ち行列や排他制御がある。例えば、通信機器の一つのポートが一度に一つの packet しか扱えない排他体積効果、TCP やメールサービスの再送機能などである。こうした待ち行列や排他制御機構がべき則ゆらぎを生成する例が多数知られている。しかし、これらの特徴的時間は短く、数ヶ月にわたる相関の起源としては考えにくい。

インターネットの構造がスケールフリーネットワークであることが指摘されており、それが時系列のべき則ゆらぎとして現れるという指摘もある。ネットワークのサイズに対応する時間が非常に短く、時系列の長時間相関の起源とも考えにく

い。

残る可能性としては、インターネットの需要そのものが長時間相関を有しているというものである。ネットワーク構造の影響を受けない需要として、組織内から組織内メールサーバへ送信される電子メール送信を取り上げ、DFA による解析を行った。送信イベント回数の時系列から、べき則ゆらぎを得ることができた。

- (3) 短時間雑音のパワースペクトル及び DFA への影響 (雑誌論文②): 交通流やインターネット流量の観測において、5 分平均での計測が行われている。時間解像度を上げることで、短時間の雑音が入ることが予想される。そのような雑音の長時間相関解析への影響を調べておく必要がある。

長時間相関のあるランダムな時系列を人工的に構成する方法として、Fourier 変換を使った方法がある。本研究では、べき則ゆらぎと短時間雑音のあるランダム時系列を Fourier 変換法により生成し、それらに対するパワースペクトルと DFA の結果を解析した。

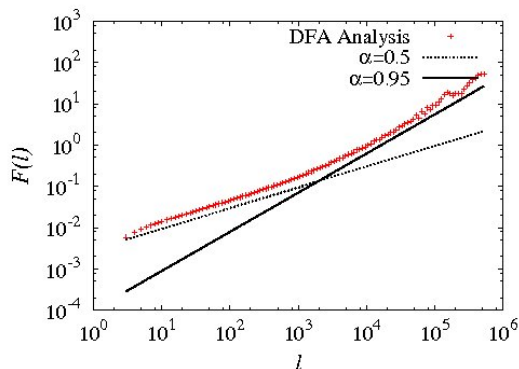


図 3 人工的時系列に対する DFA 解析

その結果を図 3 に示す。短時間領域にはランダムに対応した傾き 0.5 の領域が発生し、長時間側には時系列に導入した長時間相関の領域が現れる。

別の言い方をすると、上図のような DFA 解析の結果が得られた場合には、曲線の折れ曲がりより短い領域で、雑音の効果が大きいことが分かる。

- (4) ボトルネック上流の一樣流 (雑誌論文⑧、⑨、学会発表②): トンネルなどのボトルネック上流に発生する渋滞について、遠方では走行と停止を繰り返すのたいてい、ボトルネックに近づくとも様な流れになることが指摘されている。このことを、結合写像型最適速度モデルを用いたシミュレーションにより示した。

結合写像型最適速度モデルにおいて、ボトルネックは最適速度の最高速度を低下されることで実装される。低下率 r と表すことにする。ボトルネック前後の流量保存則より、低下率 r とボトルネック直前の密度 ρ_H の関係を得ることができる。

このことより、ボトルネック上流に渋滞を発生させる低下率 r の範囲を特定することが可能となった(図 4)。また、このことは、交通流が移流不安定性とボトルネックによる一樣流生成のバランスで決定されていることが明らかになった。

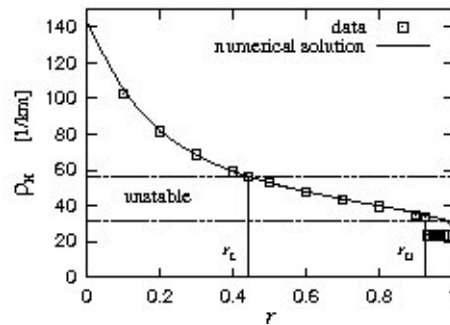


図 4 低下率とボトルネック上流密度

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- ① Y. Sugiyama, M. Fukui, M. Kikuchi, K. Hasebe, A. Nakayama, K. Nishinari, S. Tadaki and S. Yukawa, *Traffic jam without bottleneck*, New J. Phys. Vol.10 033001-1 – 033001-7 (2009) 査読有
- ② 只木進一, 「短時間ノイズのパワースペクトル及び Detrended Fluctuation Analysis への影響」第 14 回交通流のシミュレーションシンポジウム(名古屋大学) 69 – 72 (2008) 査読有
- ③ 松原義継、日永田泰啓、只木進一, 「インターネット需要の長時間相関: 電子メールの場合」第 14 回交通流のシミュレーションシンポジウム(名古屋大学) 73 – 75 (2008) 査読有
- ④ S. Tadaki, *Long-term power-law fluctuation in Internet traffic*, J. Phys. Soc. Japan Vol. 76, No.4, 044001-1 – 044001-5, (2007) 査読有
- ⑤ 只木進一, 「ネットワーク構造とその流量ゆらぎ」, 第 13 回交通流のシミュレーションシンポジウム(名古屋大学) 41-44 (2007) 査読無

- ⑥ 中山章弘、福井稔、長谷部勝也、菊池誠、西成活裕、杉山雄規、只木進一、湯川諭、「交通渋滞実験の詳細データ」第 13 回交通流のシミュレーションシンポジウム(名古屋大学) 7 - 10 (2007) 査読無
- ⑦ S. Tadaki, M. Kikuchi, A. Nakayam, K. Nishinari, A. Shibata, Y. Sugiyama and S. Yukawa, *Scale-free features in the observed traffic flow*, Traffic and Granular Flow '05 (Springer-Verlag, Berlin) 709 - 715 (2007) 査読有
- ⑧ S. Yamamoto, Y. Hieida and S. Tadaki, *Effects of bottlenecks on vehicle traffic*, J. Phys. Soc. Japan, Vol.75, No.11, 114601-1 - 114601-5 (2006) 査読有
- ⑨ 只木進一, 山元祥平, 日永田泰啓、「ボトルネックによる渋滞形成」, 第 12 回交通流のシミュレーションシンポジウム(大阪大学), 53 - 56 (2006) 査読無

[学会発表] (計 2 件)

- ① S. Tadaki, *Packet flow and its temporal properties on networks*, Traffic and Granular Flow 2007 (Paris, 2007)
- ② 只木進一, 山元祥平, 日永田泰啓, 「ボトルネックによる渋滞形成」九州大学応用力学研究所研究集会「非線形波動現象における基礎理論、数値計算および実験のクロスオーバー」(九州大学, 2006)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

只木 進一 (TADAKI SHIN-ICHI)

佐賀大学・総合情報基盤センター・教授

研究者番号：00202169

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者