

Fluctuation in Expressway Traffic Flow

只木進一 (佐賀大)、菊池誠 (阪大)、西成活裕 (龍谷大)、杉山雄規 (名大)、湯川諭 (東大)

1 はじめに

交通流の研究は、自動車利用の一般化とともに1950年代から始まり、その当初から、統計力学や応用数学からの関心が持たれてきた [1]。その後、1990年代に入り、直接的コンピュータシミュレーションが可能となった。その結果、高速道路上の交通流の物理的理解は、数理モデルとそのシミュレーションによって急速に進められてきている。渋滞発生の機構だけでなく、流量逆転、車線間同期などの様々な現象への理解も進みつつある [2]。また、実測データの解析及びシミュレーションとの比較も活発に行われている [3, 4]。

交通流の流量時系列が $1/f$ 的な揺らぎを有しているということが長い間言われ続けている。武者と樋口は、独自の実測データ及び流体モデルの解析から、 $1/f$ 的な揺らぎの存在を示した [5]。その後、このことを確認する実測は限られた数しか無い [6-8]。一方で、シミュレーションでは $1/f$ 的な揺らぎに関する報告がなされている [9-11]。また、交通流の関連が深いと考えられている、垂直パイプ内の粉体流でも同様に $1/f$ 的な揺らぎが報告されている [12]。

交通流は、様々な時間スケールの混ざった現象である。個々の車両の挙動が示す先行車両への応答時間は10分の1秒から数秒である。ここには、人間の応答だけでなく、車両の機械的応答も含まれている。実測データより、自由流から渋滞流への転移は数分から10分程度で起こることが分かる。もちろん、交通流は人間の社会的活動を反映して、8時間、1日、1週間などの周期的運動を含んでいる。 $1/f$ 的な揺らぎが、どのような時間スケールの部分に表れるのかは明かではない。

2 DFA (Detrended Fluctuation Analysis)

上述のように交通流は、交通流の動的性質だけでなく、人間の社会活動の周期までに影響を受けた、非定常過程である。従って、その動的性質、とくに揺らぎの性質を見るためには、時系列に含まれる「傾向」を差し引いた解析が必要である。

非定常の時系列の相関を解析する手法の一つに DFA (Detrended Fluctuation Analysis) と呼ばれる方法がある [13, 14]。この手法は、元々は DNA 塩基配列の解析手法として提案されたものである。この手法の性質についても詳細な議論が行われてきた [15]。

まず、生の時系列データ $u(t)$ ($0 \leq t < T$) からそのプロファイル $y(t)$ を求める。

$$y(t) = \sum_{k=0}^t [u(k) - \langle u \rangle] \quad (1)$$

$\langle u \rangle$ は平均値である。

$$\langle u \rangle = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} u(t) \quad (2)$$

つまり y は、平均的な積算量のまわりでの変動を表している。

次に時間区間を長さ l の重複の無い、 T/l 個の区間に分割する。各区間内での $y(t)$ の平均的挙動を $\tilde{y}_l(t)$ で表すことにする。平均的挙動は、もっとも簡単な場合には、最小二乗法を用いてその区間内の $y(t)$ をフィットしたもので構成することができる。この平均的挙動からのずれを

$$y_l(t) = y(t) - \tilde{y}_l(t) \quad (3)$$

とする。

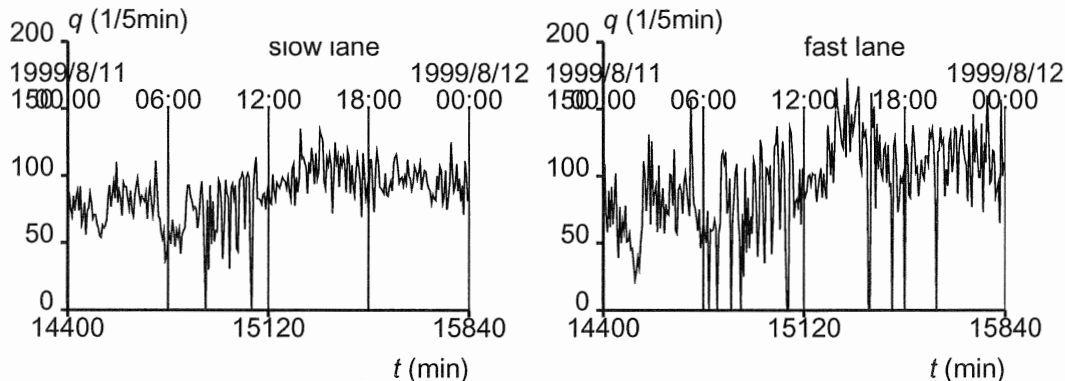


図 1: 1999 年 8 月 11 日の瀬田東インターチェンジ付近での流量時系列。左が走行車線、右が追越車線。

平均的挙動からのずれの二乗偏差

$$F_l^2(l) = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} y_l^2(t) \quad (4)$$

の区間長 l へに依存性から揺らぎの性質を議論する。

3 交通流への応用

日本の高速道路には、建設時に、ほぼ 2km ごとに計測装置が埋設されている。計測装置は、二つのコイルから構成され、その計測装置を通過した車両の数と速度が計測されている。本稿では、日本道路公団から提供を受けたデータに基づいた解析を行う。

データは、名神高速道の瀬田東インターチェンジ付近の 468km ポストの下り車線において 1999 年に取得された 1 年分のデータである (図 2)。5 分間流量とその間の平均速度が各車線ごとに記録されている。例として、8 月 11 日の流量時系列を示す (図 1)。

流量時系列 $q(t)$ からプロファイル $y(t)$ を求める。更に、最小二乗法によって各区間長 l に対応した平均的挙動 $\tilde{y}_l(t)$ を求める。例として区間長を 8 時間とした場合の、プロファイル $y(t)$ と平均的挙動 $\tilde{y}_l(t)$ の一部を図 3 に示す。

プロファイル $y(t)$ と平均的挙動 $\tilde{y}_l(t)$ の二乗偏差 F_l の区間長への依存性を図 4 に示す。この図から、二乗偏差の区間依存性が $F_l \sim l^\alpha$ というべきであり、

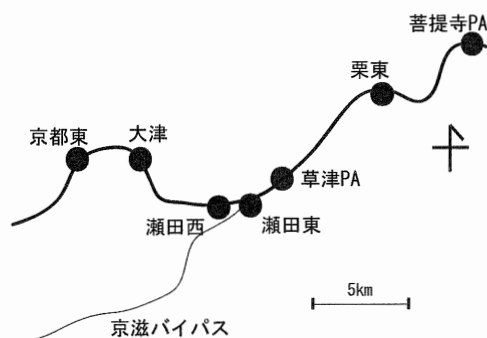


図 2: 瀬田東インターチェンジ付近の概要

そのべき指数 α が変化するいくつかの時間スケールが存在することが分かる。

1 時間から 24 時間の区間では、 $\alpha \sim 1.5$ のような振舞が見られる。べき指数 α が $1/2$ より大きい場合、正 (負) のずれが更に正 (負) のずれを誘導するような相関がある場合に相当している [16]。また、 α が 1 より大きい場合には、相関はスケールフリーではない。つまり、流量が多い日は、一日中多く、少ない日はずっと少ないという傾向に対応していると考えられる。

1 日から 15 日程度の区間では、 $\alpha \sim 0.5$ となっている。これは、平均挙動の周囲での酔歩に相当して

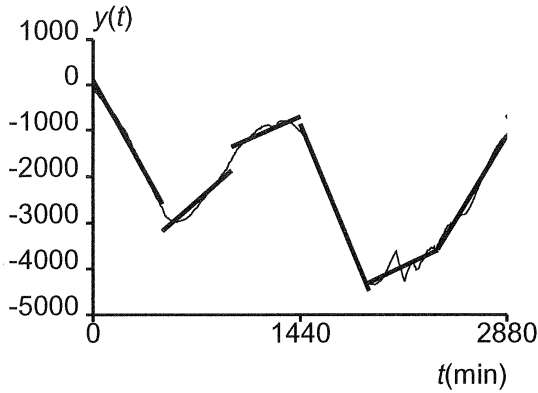


図 3: プロファイル $y(t)$ (細い実線) と区間長 8 時間に対応した平均的挙動 $\bar{y}_l(t)$ (太い実線)。

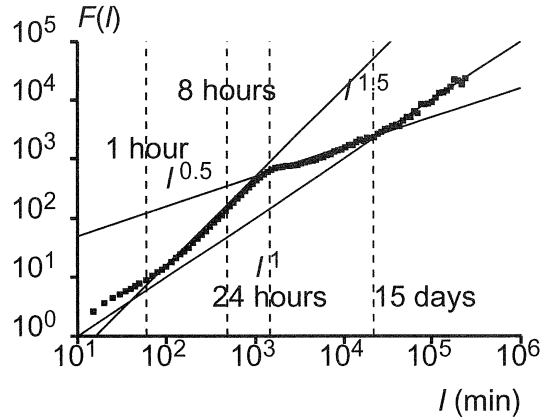


図 4: 平均的挙動からの二乗偏差 F_l 。

いる。

15 日以上の区間長では、 $\alpha \sim 1$ であり、 $1/f$ 揺らぎに対応する振舞が見える。またデータ数が少ないため明確ではないが、1 時間より短い区間にも同様の振舞が見える。

4 他の観測地点

前節に見た挙動が、観測地点に依存するかは大きな問題である。特に、渋滞の有無との関係は興味深い。比較のため伊勢道、多気インターチェンジ付近のデータにおいても同様の解析を行った。多気インターチェンジ付近は、1 車線路であり、また流量も非常に少ない。従って、渋滞の発生していない区間である。

解析結果を図 5 に示す。データにばらつきのあるものの、瀬田東でのデータと同様の解析結果となっている。つまり、これらの解析結果は、車線数や渋滞の有無とは無関係な高速道路交通流に共通の振舞であることと考えられる。

5 まとめと議論

高速道路上の交通流の流量時系列に対して DFA (Detrended Fluctuation Analysis) を行い、その特性を調べた。1 時間、24 時間、15 日という挙動の変化する時間スケールがあることが分かった。特に、 $1/f$ 的揺らぎは 15 日以上長時間相関に表れることが明らかになった。

$1/f$ 揺らぎの先駆的研究である、武者と樋口の研究では、4 時間程度の計測時間で揺らぎの議論が行われている。 $1/f$ 的振舞が観測されているのは、数 100 秒程度の領域である [5]。

一方、DFA を用いた解析では、1 時間程度よりも短い領域に $1/f$ 的揺らぎが見えている。今回用いたデータは 5 分間隔のデータであるため、この領域のデータ点は非常に限られている。より時間解像度の高い解析が必要である。

本稿では、解析対象として、渋滞が頻繁に起こる名神道瀬田東インターチェンジ付近と、渋滞が起こらない伊勢道多気インターチェンジ付近を選択した。DFA の解析結果は、ほとんど同じであった。つまり、今回得た結果は、渋滞の有無や車線数に依存しない、共通の性質であると期待できる。

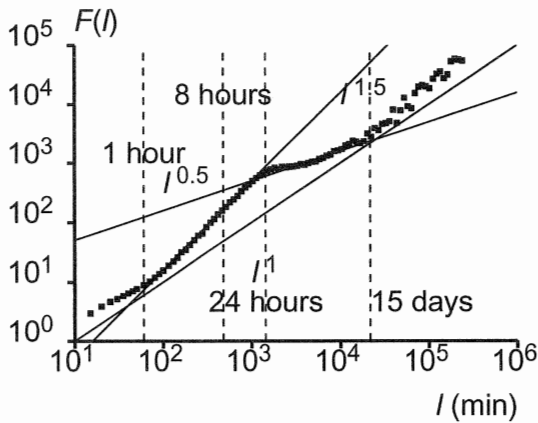


図 5: 伊勢道多気インターチェンジ付近での平均的挙動からの二乗偏差 F_l 。

参考文献

- [1] G. F. Newell, *Oper. Res.* **50** (2002) 173.
- [2] M. Fukui, Y. Sugiyama, M. Schreckenberg and D. E. Wolf (Eds.), *Traffic and Granular Flow '01* (Springer, Berlin, 2003).
- [3] B. S. Kerner and H. Rehborn, *Phys. Rev.* **E53** (1996) 1297.
- [4] S. Tadaki, K. Nishinari, M. Kikuchi, Y. Sugiyama and S. Yukawa, *J. Phys. Soc. Jpn.* **71** (2002) 2326.
- [5] T. Musha and H. Higuchi, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **15** (1976) 1271.
- [6] P. Wagner and J. Peinke, *Z. Naturforsch.*, **52a** (1997) 600.
- [7] L. Neubert, L. Santen, A. Schadschneider and M. Schreckenberg, *Phys. Rev.*, **E60** (1999) 6480.
- [8] M. Kikuchi, A. Nakayama, K. Nishinari, Y. Sugiyama, S. Tadaki and S. Yukawa, *Long-term traffic data from Japanese expressway*, in [2].
- [9] S. Yukawa and M. Kikuchi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **65** (1996) 916.
- [10] S. Tadaki, M. Kikuchi, Y. Sugiyama and S. Yukawa, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **67** (1998) 2270.
- [11] S. Tadaki, M. Kikuchi, Y. Sugiyama and S. Yukawa, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **68** (1999) 3110.
- [12] O. Moriyama, N. Kuroiwa, M. Matsushita and H. Hayakawa, *Phys. Rev. Lett.*, **80** (1998) 2833.
- [13] C.-K. Peng, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H. E. Stanley and A. L. Goldberger, *Phys. Rev.*, **E49** (1994) 1685.
- [14] C.-K. Peng, S. Havlin, H. E. Stanley and A. L. Goldberger, *Chaos*, **5** (1995) 82.
- [15] D. Vjushin, R. B. Govindan, R. A. Monetti, S. Havlin and A. Bunde, *Physica A* **302** (2001) 234.
- [16] S. Havlin, R. Blumberg Selinger, M. Schwartz, H. E. Stanley and A. Bunde, *Phys. Rev. Lett.*, **61** (1988) 1438.