

交通流の相転移とドライバの応答特性^{*1}

Phase Transition of Vehicular Traffic Flow Induced by Driver Response

横谷 靖^{*2}
Yasushi YOKOYA

浅野 陽一^{*3}
Yoichi ASANO

内田 信行^{*3}
Nobuyuki UCHIDA

Abstract

Microscopic dynamical properties of traffic flow are studied from the aspects of both individual vehicle and driver response in order to construct microscopic traffic flow models that exhibit phase transitions originating from human driving behavior. Several time series of single-vehicle data in real urban traffic were measured with an onboard apparatus. We found that the probability density function calculated from the time series of variation of velocity is transformed at the phase transition, where a Gaussian distribution changes into a Levy stable symmetrical distribution. The power-law tail in the Levy distribution indicates that the time series of variation of velocity exhibits critical fluctuations. We demonstrated the mathematical relationship between the driver's response to perceptual variables and a power-law probability density distribution. Furthermore, human driving behavior during deceleration in a car-following situation was measured using a wide-view driving simulator. The empirical data indicated a large dispersion of perceptual quantities about the relations with a preceding vehicle during operation of the brake pedal. These results suggest that the brake pedal operation is closely related to the power-law probability density distribution observed in the phase transition.

1. 交通状態とドライバ特性

スムーズな流れから突然混雑が始まったり、気が付いたら渋滞にはまっていたという現象は日常茶飯事である。これらの現象の中には、車線数の減少や合流部等の交通容量上のボトルネックなどの明示的な道路構造によらず、車両密度による車両間の相互作用が変化して生じるものがある¹⁾。このような相転移は、交通流動力学の特徴を最も良く表している現象の一つである。特に、渋滞相への相転移では交通流の急激な不安定化を伴い、追突などの交通事故原因にも密接に関係していると考えられる。

交通流において低密度領域における安定した走行状態は、密度が増加するに従い大きい流量を持つ状態と小さい流量を持つ流れが混在する共存領域を経て、高密度領域では渋滞流が発生する。こ

れらの異なる状態間の転移機構は、統計物理的な観点から、個々の車両を交通流の構成分子とする多体相互作用系と捉え、渋滞発生をマクロな集団運動による協同現象として動力的に理解する試みが進展している²⁾。

交通流の状態は、個々のドライバの運転行動に基づく集団運動の結果として与えられるため、相転移を理解するためにはドライバの特性をいかに抽出するかが鍵となる。特に、追従走行状態を明らかにすることは、交通流の微視的モデルを構築するための中心的な課題である。追従走行状態のモデル化は、先行車との相対関係（車間距離や相対速度など）に対するドライバの応答特性によって決定されると考えられる。すでにドライバの応答特性に基づいて交通流相転移を記述するモデルが幾つか提案されている（例えば、最適速度モデル (Optimal Velocity Model)³⁾）。このモデルでは、交通流が自由に流れる一様流から密度を上昇させていくと、一様流と渋滞流が共に安定な共存領域

* 1 原稿受理 2008年2月21日

* 2 (財)日本自動車研究所 予防安全研究部 理学博士

* 3 (財)日本自動車研究所 予防安全研究部

に入る．ここでしばらくは一様流で持ちこたえるが（準安定状態），わずかな擾乱によって急速に渋滞流に変化する．これは，統計力学的な描像における一次相転移で見られる過冷却現象に類似しており，修正Korteweg-de Vries（MKdV）方程式によって数理構造も調べられている⁴⁾．しかし，これらのモデルで想定された追従特性をドライバの応答特性および，それに基づく車両挙動と直接比較することは困難であり，数理モデルと実験データの対応関係を明らかにすることは，交通流の相転移機構を説明できる微視的なモデル構築を進める上では，ぜひ解決すべき課題である．

交通流モデルから得られたさまざまな知見と現実の交通流で見られる渋滞転移現象を結び付けているのは，今のところ路側感知器等によって得られるQ-V-K関係（流量，速度，密度）のみである．これは，交通流の断面における一定時間の平均的な流れを観測して得られる巨視的な関係であり，感知器の設置間隔等によって時間的／空間的に精度が制約されている（典型的には10²[sec]以上，10²[m]以上）．統計力学的な描像によると状態転移近傍では，車速などの車両挙動に関するゆらぎが増大することが予測されるが，この時間的／空間的スケールとの関係によっては，これまでに観測されたQ-V-K関係が転移点近傍の状態を正確に反映できず，交通流モデルとの対応付けが困難になる．

我々は，ドライバの運転操作のレベルから交通流相転移を記述できる微視的なモデルを構築し，運転支援などの予防安全対策に資することを目指している．本報では，追従走行状態での実車による車両挙動およびドライビングシミュレータによるドライバの応答特性を計測し，交通流相転移の発生機構についてドライバの応答特性の観点から分析した結果を報告する⁵⁾．

2. 追従走行での車両挙動

我々は，車載計測システムを用い，実際の交通状況下の追従走行状態に関するデータ（車速度，車間距離，前方映像など）を記録した．走行状態に関するデータの更新周期は0.1秒とした．測定場所は，つくば市内の幹線道路である．

Fig. 1に，観測された速度変化の時系列データを示す．速度変化 $\Delta v(t)$ は，式(1)で表される．

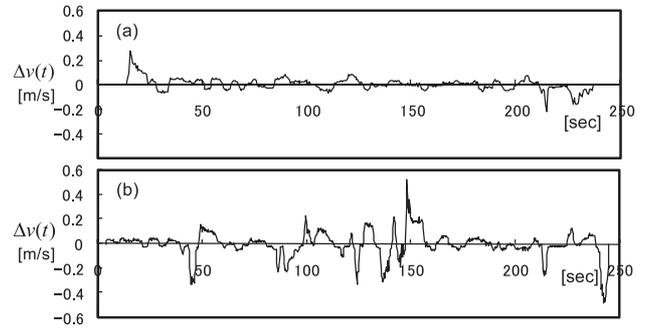


Fig. 1 Time series of successive variation of velocity: (a) stable states and (b) unstable one

$$\Delta v(t) \equiv \bar{v}_T(t) - \bar{v}_T(t - \Delta t) \quad (1)$$

ここで，サンプリング周期 $\Delta t = 0.1$ [sec]である．なお，測定系に含まれる雑音を除去する目的で，式(2)により周期 $T = 0.3$ [sec]で移動平均を取っている．

$$\bar{v}_T(t) = \frac{1}{T} \sum_{\tau=t-T+1}^t v(\tau) \quad (2)$$

Fig. 1(a)は，振幅の小さいゆらぎが見られ，安定した走行状態を表している．この領域では，速度変動と車間距離の間に車間距離が開いたら加速し，詰まれば減速するという一般的な追従関係（例えば式(3)）を確認できる．ここで， k は先行車挙動に対する感度， $f(t)$ は先行車挙動とは無関係な確率変数である．

$$\ddot{x}_{n-1}(t+T) = \kappa \frac{\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n-1}(t)}{x_n(t) - x_{n-1}(t)} + f(t) \quad (3)$$

一方，Fig. 1(b)は，頻繁な加速・減速を示し，交通流が一時的に不安定になっている．この領域では，速度変動と車間距離の間に追従関係は見られない．

次に，Fig. 1で見られたような追従走行状態の違いを明らかにするために， $\Delta v(t)$ の統計性を調べる．観測された速度変化 Δv の時系列は $\Delta v = 0$ の周りでゆらいでおり，統計的に定常であるため， Δv の確率密度関数（PDF）の統計性を議論することができる．Fig. 2に，Fig. 1で示した安定状態と不安定状態における $\Delta v(t)$ のPDF（式(4)）を示す．

ここで， n は区間 $[\Delta v, \Delta v + \delta v_n]$ に入る時系列データ数， N はデータの総数である．

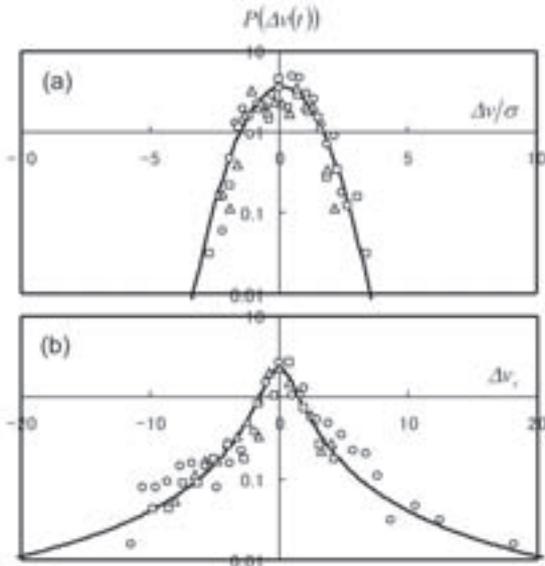


Fig. 2 Semilogarithmic plot of the probability density function of the successive variation of velocity obtained for stable states (a) and for unstable states (b)

$$p(\Delta v) = \frac{n(\Delta v, \Delta v + \delta v_m)}{N \delta v_m} \quad (4)$$

Fig. 2から、安定状態のPDFはほぼ正規分布に、不安定状態のPDFは冪分布の広い裾を持つことが分かる（図中には正規分布とLévy分布を実線で示した）。不安定状態のPDFが冪分布の裾を持つことは、Fig. 2で見られた不安定な走行状態において、臨界ゆらぎが発生していることに対応し、この区間で統計力学的描像である相転移が発生していることを裏付けている⁵⁾。

ところで、車両密度が増加するに従い、各車両は前後車両の挙動に束縛されるようになる。このような状況では、先行車両の挙動をある一定時間後に追従車両がトレースするような走行状態を示すため、この束縛状態を式(5)で表現する⁶⁾。F(t)は微分可能な連続関数、v_Bは定数であり、束縛状態にあるドメインの平均速度を表している。

$$x_n(t) = F(t + n\Delta T) + n v_B \Delta T \quad (5)$$

式(3)の追従方程式の右辺に式(5)を代入しΔT→0とすると、式(6)のようなLangevin型の方程式が得られる。ここで、K(t) = κ/(ẋ(t) + v_B)である。

$$\ddot{x}(t+T) = K(t)\ddot{x}(t) + f(t) \quad (6)$$

式(6)は、式(7)で表されるような離散確率過程と同じ構造を持っていることがわかる。

$$X_{i+1} = a_i X_i + b_i \quad (7)$$

式(7)の過程は、a_iが間欠的、またはランダムに変動し、かつ⟨ln a_i⟩ < 0（⟨⋯⟩は確率事象の平均）を満たすとき、そのPDFが冪の裾をもつことが数学的に示されている。なお、b_iはa_iと無相関な確率変数である⁷⁾。従って、a_iは、車載器で観測されたΔvのPDFと追従車ドライバの感度を結び付けていることがわかる。

3. 減速過程での運転操作

追従走行時の減速過程では、ドライバは先行車と自車の相対関係（車間距離や相対速度など）や道路の状態などのさまざまな情報処理を行っている。ドライバが何に基づいて減速操作を決定しているかは、交通流ダイナミクスを決定する基本的な問題である。これは、交通流を統計力学的描像によって理解する場合、車両間の相互作用を規定する重要なパラメータとなる。

我々は、追従走行状態において、先行車の減速に対する追従車ドライバの応答特性を調べるために、定置型ドライビングシミュレータを用いた実験を行った。実験では、20名の成人を被験者とし、直線道路において60[km/h]の速度で安全な車間距離を保って先行車に追従するように教示した。先行車は一定の周期（36 [sec]）でさまざまな減速度（−0.02G, −0.05G, −0.075G, −0.1G, −0.125G, −0.15G）（G=9.8 [m/s²]）で減速するようにプログラムした。なお、実験した追従走行状態の一部は相転移点近傍の臨界領域に含まれている。

減速過程におけるドライバの操作は、アクセルペダルから足を離し、ブレーキペダルを踏む一連の動作で構成される。追従走行状態での減速におけるアクセルおよびブレーキ操作のトリガについては、先行車の視覚的な面積の変化率や車間時間が関係していることが指摘されている^{8,9)}。Fig. 3に、全被験者によって得られた各操作時点における車間時間の平均値t̄_n、およびその標準偏差の先行車減速度a_pに対する依存性を示す。

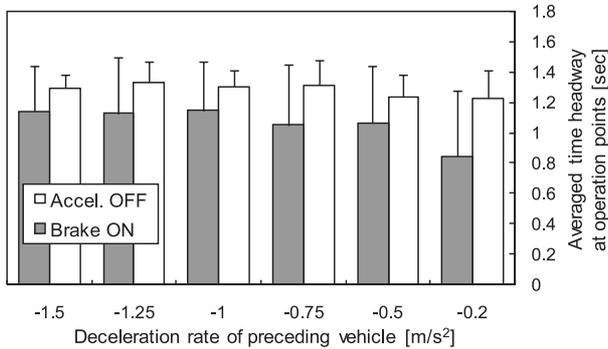


Fig. 3 Time headway averaged over all subjects at two operation points (accelerator and brake) for 6 different deceleration rates of the preceding vehicle.

アクセルOFF操作時の \bar{t}_h は、 a_p にほとんど依存しないが、ブレーキON操作時の \bar{t}_h は a_p の依存性が見られる。また、各操作時の \bar{t}_h の標準偏差は、アクセルOFF時は小さく、ブレーキON時は大きくなっている。これらの結果は、アクセルOFF操作では、先行車との相対関係（本報では車間時間を例に取った）に基づいた閾値によって決定されるように見えるのに対し、ブレーキON操作については、そのような一定の閾値によって決定されているようには見えないことを示している。

4. 交通流相転移の理解に向けて

実車計測から得られた走行状態の分析により、交通流相転移で見られる速度変位の統計的な性質は、先行車との相対関係に対するドライバーの感度（追従方程式(3)における k ）が間欠性またはランダム性を持つことによって説明できることを示した。一方、ドライビングシミュレータによって得られたドライバーの減速操作からは、ブレーキ操作

が先行車との相対関係から単純に決定されていないことが示された。これらの結果は、交通流の相転移における局所的な交通流特性が、実車走行から得られたドライバーの感度特性（間欠性またはランダム性）と結びつく可能性を示している。

注意しておかなければならないのは、今回得られた知見は、ドライバーが先行車との相対関係に対して逐次応答していることを前提としたモデルを用いて導かれているという点である。ドライバーは時々刻々に入力される情報だけでなく、その時点までに得た走行履歴に基づいた予測なども総合し、最終的な行動を決定していると考えられる。今後、ドライバーの運転操作のレベルから交通流相転移を理解するためには、これまでに得られたドライバーの応答特性の背後にある、認知や予測に関する脳内の情報処理過程まで踏み込んだ研究が必要になると考えられる。

参考文献

- 1) Y. Sugiyama et al. : Traffic and Granular Flow '03, p.45 (Springer, Berlin, 2005)
- 2) D. Chowdhury et al. : Phys. Rep. 329, p.199 (2000)
- 3) M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, Y. Sugiyama, Phys. Rev. E 51, p.1035 (1995)
- 4) T. S. Komatsu, S. Sasa : Phys. Rev. E 52, p.5574 (1995)
- 5) Y. Yokoya et al. : Traffic and Granular Flow '07, Orsay, France (2007)
- 6) K. Nakanishi et al. : Phys. Rev. E 55, p.6519 (1997)
- 7) D. Sornette et al. : Phys. I 7, p.431 (1997)
- 8) M. A. Brackstone et al., Transp. Res. Rec. 1724, p.21 (2000)
- 9) K. Morita et al., Proceedings of SICE-ICASE International Joint Conference, CD-ROM (2006)