

交通渋滞形成実験における相転移

只木進一¹, 菊池誠², 福井稔³, 中山章宏⁴, 西成活裕⁵
柴田章博⁶, 杉山雄規⁷, 吉田立³, 湯川諭⁸

¹ 佐賀大学総合情報基盤センター, ² 大阪大学サイバーメディアセンター
³ 中日本自動車短期大学, ⁴ 名城大学理工学部
⁵ 東京大学先端科学技術研究センター, ⁶ 高エネルギー加速器研究機構
⁷ 名古屋大学情報科学研究科, ⁸ 大阪大学理学研究科

概要

交通渋滞は、日常的に経験する現象である。交通渋滞は、物理的には、相転移現象として記述することができる。つまり、車両密度が臨界値を越えると、交通流は渋滞した流れへと転移する。このような理解の仕方が正しいことを示すため、大規模な渋滞形成実験を行い、臨界密度を推定した。

Phase transition in traffic flow experiments in circuit

Shin-ichi Tadaki¹, Macoto Kikuchi², Minoru Fukui³, Akihiro Nakayama⁴
S Katsuhiko Nishinari⁵, Akihiro Shibata⁶, Yuki Sugiyama⁷
Taturu Yoshida³, and Satoshi Yukawa⁸

¹ Computer and Network Center, Saga University, ² Cybermedia Center, Osaka University
³ Nakanihon Automotive College, ⁴ Faculty of Science and Technology, Meijo University
⁵ Research Center for Advanced Science & Technology, University of Tokyo
⁶ High Energy Accelerator Research Organization, KEK
⁷ Department of Complex Systems Science, Nagoya University
⁸ Department of Earth and Space Science, Osaka University

Abstract

Traffic jam is one of most familiar phenomena in daily life. Physical points of views describe it as phase transition. It says that traffic flow with car density exceeding a critical value breaks down to traffic jam. For verifying this view, we performed a large scale experiment. We observe the emergence of traffic jam in a circuit. The critical density is estimated.

1 はじめに

交通流は、市内や高速道路などで観測できるなじみ深い現象であり、その物理的理解に対する研究が行われてきた [1]。交通流には、少なくとも滑らかな流れと渋滞があることが、直観的に分かる。車両の数が少なければ、各車両は許される最高の速度で走ることができる。車両の数が増えると渋滞が発生す

る。渋滞は、高密度の遅い一様な流れではなく、車両が停止と走行を繰り返す非一様な流れである。車両が止まった部分は、上流側に伝わる。実際の高速道路での観測で得られる密度と流量の関係は基本図と呼ばれる。ここにも、密度によって、自由流と渋滞の二つの領域が現れる [2]。

様々なタイプの交通流モデルが提案され、解析的あるいはシミュレーションにより調べられてきた。

それらのモデルにより、密度をパラメタとした交通渋滞形成の描像が描かれてきた。このような描像を確認するため、我々は実際の車両を用いた実験を行い、ボトルネック構造が無くても渋滞が発生することを示した [3, 4]。以降、この実験を「実験 1」と呼ぶ。「実験 1」により、高密度の流れが不安定化して渋滞が発生するという物理的機構が明らかになった。

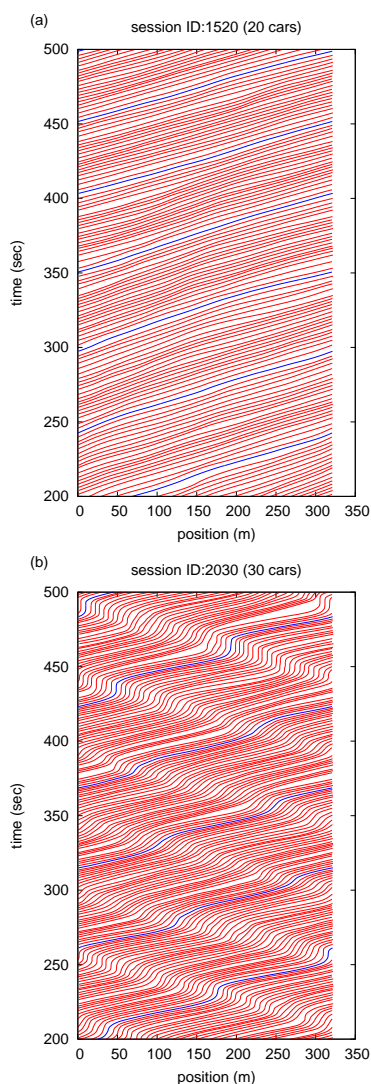


図 1: 20 台 (a) 及び 30 台 (b) での走行の車両の軌跡。縦軸は時間 (秒)、横軸は位置である。車両は左から右へ走行している。青い曲線は、一つの車両の軌跡である。30 台の走行では、渋滞部分が上流に伝わっているのがわかる。

密度による相転移という機構を更に明らかにし、同時に転移を起こす密度を実験的に得ることを目的とした、「実験 1」より大きな規模の実験を行った。高い解像度での車両の軌跡を得ることで、密度や速

度の空間変化を調べることができた。このことにより、臨界密度を推定した。

2 実験の概要

「実験 1」より半径の大きなコースを確保するために、今回はナゴヤドームを借用することとした。ドーム内に、半径 50m のコースを設定した。また、全て同一仕様の車両 (トヨタ Vits, 排気量 1.3L、車長 3,885mm) を使用し、「実験 1」同様に、中日本自動車短期大学の学生諸君にドライバを務めてもらった。二日間で、5 回の練習を含めて 19 回の走行のデータを取得した。走行車両数は 10 台から 40 台まで変化させた。以下では、各走行を 4 桁の番号で表すことにする。最初の 2 桁は走行の時間的な順番を、最後の 2 桁は走行台数を表す。図中では「Session ID」と表記する。

各走行は、車両がコース外に縦列駐車した状態から、先頭から車両がコースに入ることで開始した。ドライバへは、危険の無いよう 40Km/h を超えないことと、車間距離を空けすぎないことだけを指示した。

今回の実験では、コース中心にレーザースキャナ (Sick LD-LRS 1000) を設置して、車両位置を計測した。スキャナは、5Hz で回転し、1/1920 度 (0.16m に相当) 毎、約 10^{-4} 秒毎に反射物までの距離を取得する。

車両 (車長 3.9m) は、50m 程度からの反射として、連続したおよそ 24 個 ($=3.9/0.16$) のデータ点列として記録される。スキャナが回転して記録するため、一台の車両に対するデータ点列の最初と最後の記録時刻は約 10^{-3} 秒程度異なる。そこで、連続したデータ点の中心を車両の位置として取り出す。スキャナが同じ位置を計測するのは、1/5 秒後であることから、車両の中心位置は、およそ 0.2 秒間隔で取り出すことができる。

このデータを 3 点の平均値で置き換えることで平滑化するとともに、0.2 秒毎の同時刻面に線形射影することで、車両の軌跡データを生成した。また、その軌跡から車両の速度を求めた。

図 1 は、20 台及び 30 台の走行 (1520 番と 2030 番) に対する車両の軌跡である。20 台の走行 (図 1(a)) では、車両は滑らかに走行している。密度揺らぎは発生するが、渋滞には至らない。30 台での走行 (図 1(b)) では、渋滞が発生し、車両が停止と走行を繰り返す渋滞クラスタが薄い縞模様として表れている。この縞

模様は、高速道路での実測と同様に、上流側（左）に伝播する。図 1(b) の場合、縞模様はおよそ 24Km/h で上流に伝播している。この値は、高速道路での実測値とほぼ同じである。

3 解析

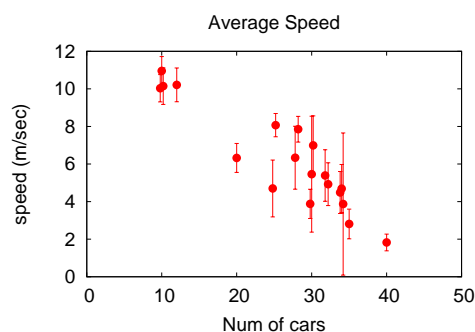


図 2: 車両数に対する平均速度。エラーバーは、標準偏差に対応する。同一車両数のデータを左右に少しずらし、見やすくしている。

最初に平均速度と車両数の関係を調べる。各走行で 100 秒以降の平均を求める (図 2)。平均速度は、車両数とともに減少している。25 台から 34 台の領域では、速度の揺らぎが大きくなっており、流れが非一様であることを示している。このことは、この領域で渋滞が発生していることを示唆している。

次に密度と流量の関係を表す基本図を調べる。高速道路上の実測では、断面での流量 q と平均速度 v を計測し、密度 ρ を $q = \rho v$ を用いて計算する。高速道路上での実測から得られる知見は、たとえば、文献 [2, 5, 6] で議論されている。

本実験の結果から実測に対応する基本図を得るために、コースを 120 度毎に 3 分割し、各地点での速度と流量を 30 秒平均で求め、流量は 1 分平均に変換した (図 3)。30 秒平均としたのは、同一の車両を二度数えないためには、30 秒以下である必要があるが、平均時間を短くすると、通過台数が減り、ばらつきが大きくなりすぎることを考慮したものである。

20 台未満の走行 (図 3(a)) では、流量は密度に対して増加しており、速度はほぼ一定であり、自由流であることが分かる。20 台の走行は、流量と密度の関係が一意でないが、後述するように密度波が下流に流れていることから、自由流の特徴を表している。

25 台、28 台及び 30 台の走行 (図 3(b)) 一部では、自由流に対応する挙動が見える。残りの走行では、

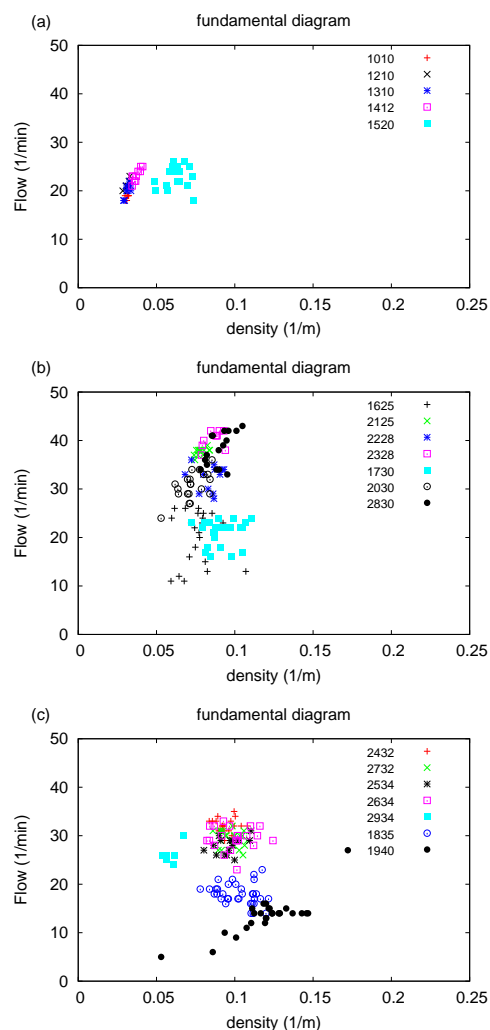


図 3: 基本図

データ点が広く分散し、渋滞に対応した挙動が見える。32 台以上の走行 (図 3(c)) では、データ点が広く分散し、渋滞発生の特徴を現している。

渋滞が発生すると、渋滞クラスタが上流に伝播する。この様子を次に調べる。時空図 (図 1) から、渋滞クラスタの伝播を読み取ることが困難な場合がある。そのため、密度波の伝播を直接調べることにする。図 4 は、密度波の伝播の様子である。20 台の走行 (図 4(a)) では、密度波は下流側に伝播している。一方、30 台の走行 (図 4(b)) では、密度波は上流側に伝播している。速度の等高図においても、同様に、20 台の走行では、等速の部分が下流に、30 台の走行では上流に伝播することを見ることができる。

25 台及び 28 台の走行についても、同様に密度波及び速度の等高図を調べることで、渋滞の発生をみ

ることができる。その結果、両走行とも、渋滞及び自由走行の両方の場合がある。つまり、この周辺に転移点があることが推定される。

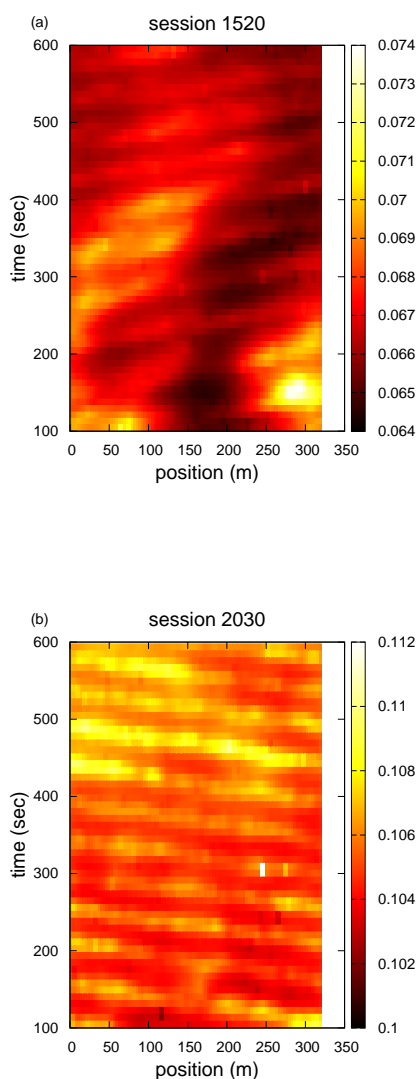


図 4: 20 台 (a) 及び 30 台 (b) の走行に対する密度波の伝播

4 まとめと議論

密度による渋滞への相転移現象を実験的に確かめる実験を行った。半径 50m のコースを作成し実験を行い、レーザースキャナを用いた車両軌跡の取得を行った。

速度揺らぎの増大、基本図中のデータ点の散乱、

渋滞クラスタの後退といった実測から知られている渋滞形成の様相を鍵として、渋滞への転移点を推定した。25 台と 28 台の周辺に転移点があることを推定した。

35 台及び 40 台の走行では、平均速度の揺らぎが小さい。また基本図中では、40 台の走行のデータが、ほぼ直線的に並んでいる。密度の非一様性の無い、高密度で低速な流れが形成されていることを表している。

前回の実験 (文献 [3, 4]) より規模が大きいため、渋滞クラスタが大きく、安定に形成された。前回より高精度で取得した車両軌跡に基づき、流れの揺らぎなどの解析が今後の課題である。

謝辞

実験場所を提供して頂いた株式会社ナゴヤドーム、及びレーザースキャナ活用の技術支援を頂いたジック株式会社に感謝いたします。中日本自動車短期大学の及川浩和氏及び学生諸君には、実験の補助をして頂きました。本研究は科学研究費補助金基盤 (B)(No. 20360045) および 2008 年度三菱財団自然科学助成の支援を受けています。

参考文献

- [1] Fukui M, Sugiyama Y, Schreckenberg M, and Wolf D E, editors. *Traffic and Granular Flow '01*. Springer, Berlin, 2003.
- [2] Kikuchi M, Nakayama A, Nishinari K, Sugiyama S, Tadaki S, and Yukawa S. In Fukui M et al. [1], pages 257–262.
- [3] Sugiyama Y, Fukui M, Kikuchi M, Hasebe K, Nakayama A, Nishinari K, Tadaki S, and Yukawa S. *N. J. Phys.*, 10(3) 033001, 2008.
- [4] Nakayama A, Fukui M, Kikuchi M, Hasebe K, Nishinari K, Sugiyama Y, Tadaki S, and Yukawa S. *N. J. Phys.*, 11(8) 083025, 2009.
- [5] Yukawa S, Kikuchi M, Nakayama A, Nishinari K, Sugiyama S, and Tadaki S. In Fukui M et al. [1], pages 243–256.
- [6] Tadaki S, Nishinari K, Kikuchi M, Sugiyama Y, and Yukawa S. *Physica A*, 315(1-2) 156 – 162, 2002.