

交通渋滞形成実験

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, ² 大阪大学, ³ 中日本自動車短期大学, ⁴ 名城大学, ⁵ 東京大学,
⁶ 高エネルギー加速器研究機構, ⁷ 名古屋大学, ⁸ 大阪大学

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、二度の大規模な渋滞形成実験を行い、臨界密度を推定した。

Traffic jam 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 Saga University, ² Osaka University, ³ Nakanihon Automotive College,
⁴ Meijo University, ⁵ University of Tokyo, ⁶ High Energy Accelerator Research Organization, KEK,
⁷ Nagoya University, ⁸ Osaka University

Abstract

Traffic jam is one of most familiar phenomena in daily life. Physical point of view 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

自動車の流れ、交通流は、市内や高速道路などで日常的に観測できるなじみ深い現象であり、1990年代から、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。一方、車両の数が増えると渋滞が発生する。また、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。車両が低速で走る、あるいは止まった部分である渋滞クラスターは、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。

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結果、密度をパラメー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 [2, 3]。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。

密度による相転移という機構を更に明らかにし、

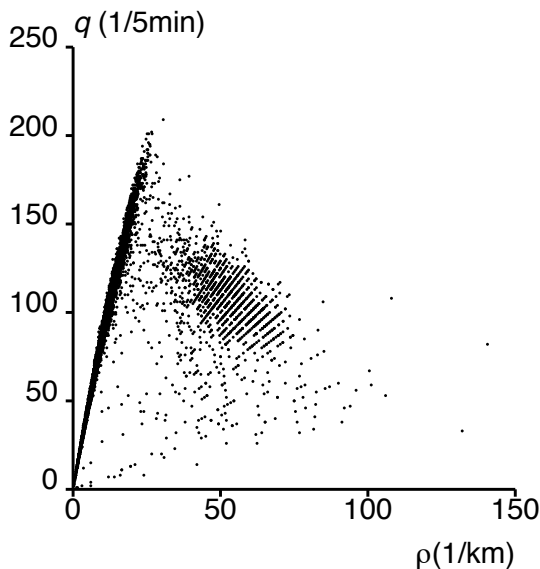


図 1: 高速道路で実測された基本図の例

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（「実験 2」）。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 [4]。本稿では、これら二つの実験の全体について、まとめを行い、今後の方向について議論する。

2 交通渋滞はどういう現象なのか

はじめに、交通渋滞とはどのような現象なのかを実測と理論とから見ておくことにする。日本の高速道路では、組になった誘導コイルを路面に埋設することで、その場所を通過する車両の数と速度を計測している。データは、たとえば、5分間の車両数（流量）とその間に通過した車両の平均速度として記録される。観測からわかることを簡単にまとめる [5]。

図 1 は、密度と流量の関係を表す基本図の実測例である。密度は、流量を速度で除して得ている。低密度側では、流量は密度にほぼ比例して増加している。つまり、速度はほぼ一定であり、これを自由流と呼ぶ。一方、高密度側では、流量は密度とともに減少傾向を示すが、大きくばらばらしている。このとき、時系列からは速度が大きく低下していることが分かる。これを渋滞流と呼ぶ。両者の境目は、25 台/km 付近にあり、低密度側の枝は高密度側にはみ出して伸びている。つまり、境目より少し高い密度では、二種類の状態が可能となっている。

渋滞の時空図を実測として捉えたものとして Treiterer らの結果が有名である [6]。渋滞は、全体に低速になる現象ではなく、低速な車両の列（渋滞クラスタと呼ぶ）とその間を結ぶ高速な流れとして現れる。また渋滞クラスタは、約 20km/h で、上流側へ移動する。

1990 年代に入り、様々な交通流の微視的な物理モデルが提案された。微視的物理モデルによる理解の例として、最も簡単なモデルである Wolfram の rule-184 に基づく理解を示す。このモデルは、一つのセルに一台の車両が入る 1 次元セルオートマトンであり、前方のセルが空いている場合にのみ、車両は一セルだけ前進する。なお、車両位置の更新は同期的に行う。

車両密度（車両数をセル数で除した量）が $1/2$ 以下であれば、各車両の前に一つ以上の空きセルがあり、車両は速度 1 で移動することができる。つまり、自由流が実現し、流量は密度に比例して上昇する。車両密度が $1/2$ を超えると、必ず連続したセルに車両が存在するようになり、停止している車両の列が発生する。そのため、流量は密度とともに減少する。また停止した車両の列、つまり渋滞クラスタは、上流側へ移動する。

このように、交通渋滞は車両が一定の長さを占有（排除体積）することと、挙動が遅れること（前が空かないと動けない）が重要な要素として働いている。低密度では自由流が、ある密度（臨界密度）を越えると渋滞流が実現する。また、渋滞流は停止した、または低速の高密度の車両の列である渋滞クラスタと、その外側の低密度で自由に走行する車両の列の、密度の異なる領域として実現する。

3 実験の概要

物理学的観点から見ると、渋滞発生は密度を制御パラメタとした相転移現象として理解できる。一方で、トンネルなどのボトルネックを渋滞の原因としたり、あるいは人間が運転していることを渋滞の原因とする誤解が多い。2003 年に実施した「実験 1」では、ボトルネック構造が無くても、ある高密度であれば渋滞が発生することを示した [2]。また、渋滞は高密度で低速な流れとしてではなく、渋滞クラスタの形成として発生し、渋滞クラスタが約 20km/h で後退することも確認した。さらに、揺らぎが時間とともに成長し、渋滞クラスタが形成されることも確認した [3]。この実験では、車両数を変えて、転移

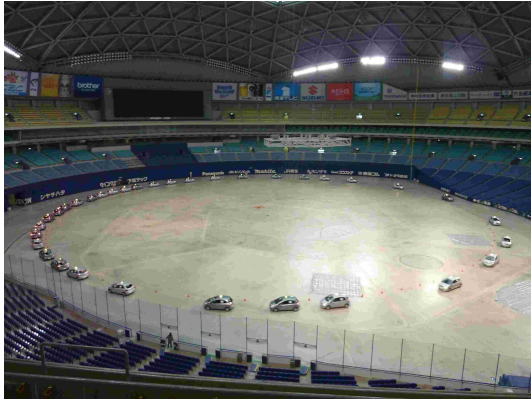


図 2: ナゴヤドーム内のコース

が起こることを見るには至らなかった。

2009年に実施した「実験2」では、密度を変えながら、転移が起こる点を見つけることを第一の目的とした。そのためにも、より精度の高い観測が可能なような準備を行った。

「実験1」より半径の大きなコースを確保するために、ナゴヤドームを借用し、ドーム内に、半径50mのコースを設定した(図2)。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。

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から開始した。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。しかし、初日はドライバー諸君が慎重であったこともあり、車両数が多くなると単にゆっくりと走行するという状況も発生した。次節の解析では、初日の練習(車両数が少ない)と二日目のデータを用いる。

「実験2」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。

4 解析

まず、速度揺らぎの増大と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

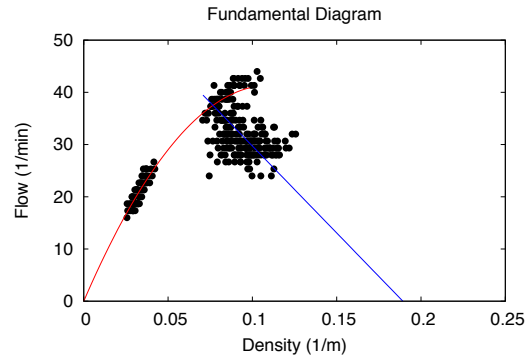


図 3: 基本図

して、渋滞への転移点を推定した。ここでは、実測との対応として渋滞発生が起こる密度を推定することを目的とし、基本図を用いた解析を示す。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。

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45秒平均で求めた。45秒平均としたのは、同一の車両を二度数えないためと、適切に多数の通過台数を得るといふ二つの点を考慮したものである。

図3に基本図を示す。低密度側の赤い曲線に沿ったデータは、初日の練習セッション(10台と12台)及び二日目の25台のセッションのデータである。25台のセッションのデータは、赤い曲線と青い直線の交叉する辺りにある。28台及び30台のセッションのデータは、赤い曲線と青い直線の両方にまたがって分布し、32台以上のセッションのデータは青い直線の周囲にばらついている。渋滞が発生し、渋滞クラスタ内で車両が停止あるいはほぼ停止したセッションのデータは後述する理由で除いている。この図は、高速道路での実測と同様の傾向を示し、低密度で流量が密度にほぼ比例して増大し、高密度ではデータが広く分散している。また、赤い曲線と青い直線の交叉する辺りでは、データが二つに分かれている。

25台のセッションでは渋滞が形成されず、28台以上のセッションでは渋滞が形成されたことから、渋滞発生の臨界密度は 0.08m^{-1} (25台)と 0.09m^{-1} (28台)の間にあると結論づける。

基本図(図3)では、渋滞クラスタ中で車両が停止あるいはほとんど停止する場合のデータを除いている。そのような場合の基本図(図4)は、自由流と非

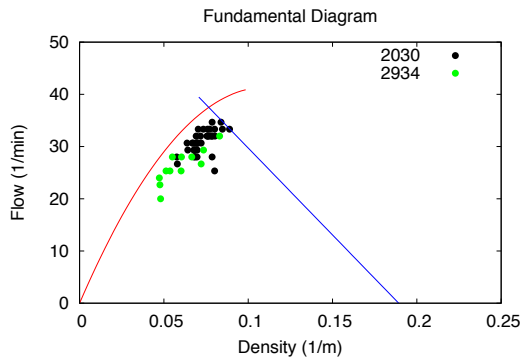


図 4: 渋滞クラスタ中で車両が停止する場合の基本図

常に似ている。しかし、自由流に比べると平均速度がやや低く、データのばらつきが少し大きい。渋滞クラスタ中で車両が停止あるいはほとんど停止する場合、停止あるいはほとんど停止している車両は、基本図にほとんど寄与しない。基本図に寄与しているのは、渋滞クラスタの外側を走っている車両である。このような現象は、実測でも指摘されている [7]。

5 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て高精度で車両軌跡を取得した。

速度揺らぎの増大、渋滞クラスタの後退、及び基本図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。対応する臨界密度は、 0.08m^{-1} (25 台) と 0.09m^{-1} (28 台) の間にある。

「実験 2」では、各車両の挙動を高精度で得ている。最初の解析として、実測との対応に基づいて、臨界密度の推定を行った。各車両のデータの解析についての今後の展望について述べる。

理論及びシミュレーションでは、空間的平均に基づく相転移が議論されている。一方、実測では観測点での時間平均に基づく相転移の議論となっている。各車両のデータは、両者の関係への示唆を与えることが期待される。

渋滞への転移は、臨界密度よりも少し高い密度で、自由流と渋滞流が共存するなど、一次転移的な特徴を示す。しかし、渋滞クラスタが移動するなど、動

的側面も本質的である。この現象で、相転移を記述する秩序パラメタが何であるかは、明らかにされていない。相転移であることから、なんらかの秩序・相関の変化が起こっていることが想定される。個々の車両の挙動から、相関等の解析を通じて、秩序変数の定義も課題である。

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] Sugiyama Y, Fukui M, Kikuchi M, Hasebe K, Nakayama A, Nishinari K, Tadaki S, and Yukawa S. *N. J. Phys.*, **10** (2008) 033001.
- [3] Nakayama A, Fukui M, Kikuchi M, Hasebe K, Nishinari K, Sugiyama Y, Tadaki S, and Yukawa S. *N. J. Phys.*, **11** (2009) 083025.
- [4] Tadaki S, Kikuchi M, Fukui M, Nakayama A, Nishinari K, Shibata A, Sugiyama Y, Yosida T and Yukawa S. *N. J. Phys.*, **13** (2013) 103034.
- [5] Tadaki S, Nishinari K, Kikuchi M, Sugiyama Y and Yukawa S. *Physica*, **A315**(1-2) (2002) 156.
- [6] Treiterer J and Myeres J A. in Buckley D J *Transportation and Traffic Theory* (Elsevier, New York, 1974) 13.
- [7] Neubert L, Santen L, Schadschneider A, and Schreckenberg M. *Phys. Rev*, **E60** (1999) 6480.