

## 渋滞形成のサーキット 実験

福井 稔・市川邦彦・及川浩和・吉田立（中日本自動車短大）、  
菊池誠（阪大サイバー）、長谷部勝也（愛知大）、中山章宏（岐阜経済大）、  
西成活裕（龍谷大理工）、杉山雄規（名大情報）、只木進一（佐賀大 CNC）、  
湯川諭（東大工）

交通流における渋滞発生のおきみは何か？という問いについての物理的理解は以下のようなものである。信号やボトルネックなどの原因がなくても、臨界的な車両密度を超えれば車両運動の揺らぎが増幅し、自由流（自由走行する車両の流れ）の状態が不安定となり、やがては自然に渋滞が発生する。このように、「渋滞発生は相互作用する車両の多体効果による動力学的物理現象である」と理解できることが数理模型による多くの解析によって示された [1]。

しかし、以上のことは理論的には明らかに思えるものの、周期境界条件に基づく数学的理想化の結果であり、現実的とはいえないという意見もある。さらには、渋滞はボトルネックでしか発生しないという根強い信仰も残っている。我々は、数理的に得た渋滞発生シナリオが現実的であり、数理模型で理解されたように、ボトルネックのない状況で実際に渋滞が発生することを、実験によって示したいと考えた。我々はこの目的で、周期境界条件における数理模型の解析に対応する、円周上のサーキットでの車両の走行実験を行い、ボトルネックのない状況でも渋滞発生が実現されたことを報告する。

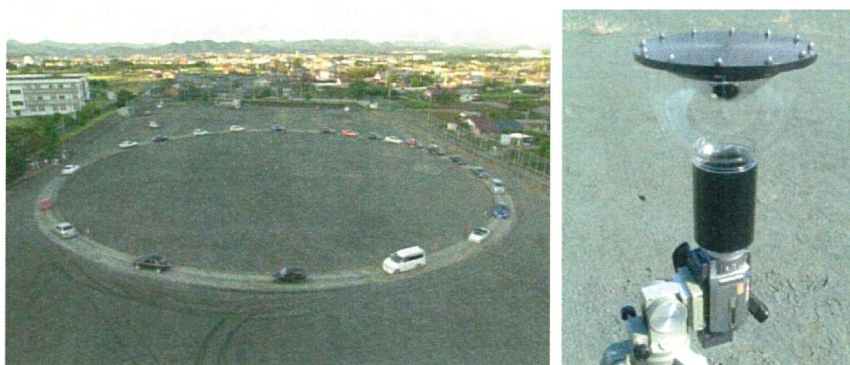


図 1: 実験の様子 (左図)。サーキットの円周の長さは 230m、車の台数は 22 台。円周の中心に全方位カメラ (右図) が設置してある。

図 1：左) は実験の全体的状況をクレーンより捉えた写真である。円周上での車両の運動を記録するために、円周の中心には凸面反射鏡を使った全方位ミラー (図 1：右) を備えたビデオカメラを設置した。これにより、サーキット上の車両を等方的に捉えた動画像を撮ることができ、各

車両の運動の正確なデータを得た。サーキットの円周の長さは230mで、車両台数は22台とした。この密度での自由走行が不安定な状態にあることは、数理模型により評価した [2]。

実験の最初に、できるだけ等間隔で一定の速度で走行するように運転を調節し、その後各車は自由に運転された。しかし、しばらくたつと車両運動の揺らぎが徐々に増幅していき、ついにはこの状態を維持することが困難になり、車両が完全に静止してしまう状況が発生した。静止した数台の車両は連なってクラスタを成し、先頭の車両が発進しても最後尾に新たな車両が到着して静止してしまう。この車両の入れ替わりは、クラスタの大きさを維持し、車の進行方向と反対向きに一定の速度で伝播して行く状態を安定に保つ。これは明らかな、いわゆる“stop-and-go wave”であり、渋滞に他ならない。このように、自由走行状態から数分後には自然に渋滞が形成された。シンポジウムでは、この経過の動画像を示した。

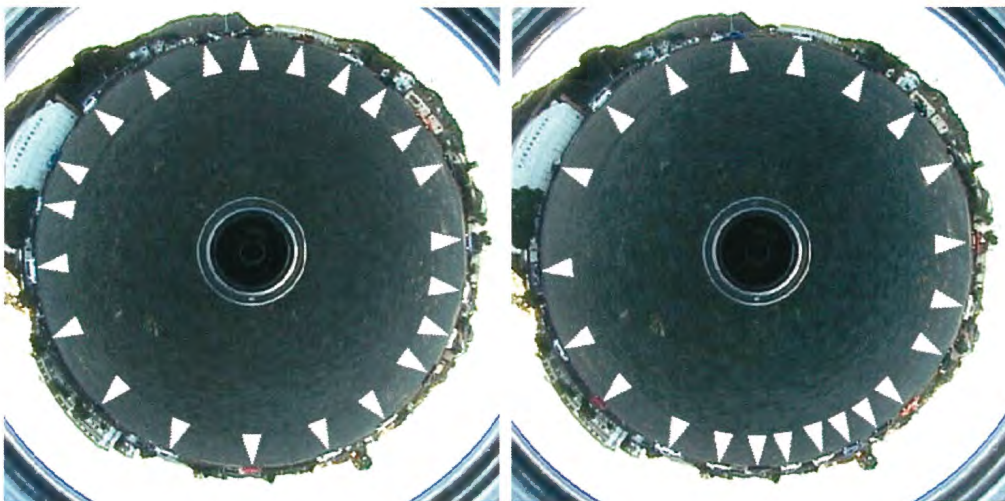


図 2: 全方位カメラから撮ったスナップショット。等速でほぼ一様に流れている初期状態（左図）。5分後に渋滞が発生した状態（右図）

この動画像をもとに、秒単位のスナップショットから各車の位置（円周上の角度）を数値化し、各車の位置の変化をトレースした時空図を描いた（図3）。図から、渋滞クラスタが一定の速度で後方に伝播している様子が良くわかる。この速度は、ほぼ20 km/hであることを得た。これは一般の高速道路のボトルネック等で見られる渋滞の後退速度である。この数値は、どこで観測された渋滞でもほぼ同じであることが知られている。例えば、交通流研究で歴史的に有名な渋滞の空撮図（図4：左）、道路公園によるデータから解析した図（図4：右） [3]を参照。また、交通工学の教科書「交通工学通論」にも、渋滞流（観測は首都高）の疎密波の特徴として、「疎密波は、交通の進行方向とは逆に上流へ伝播していく性質をもっており、このときの伝播速度は、おおむね一定で20km/h程度

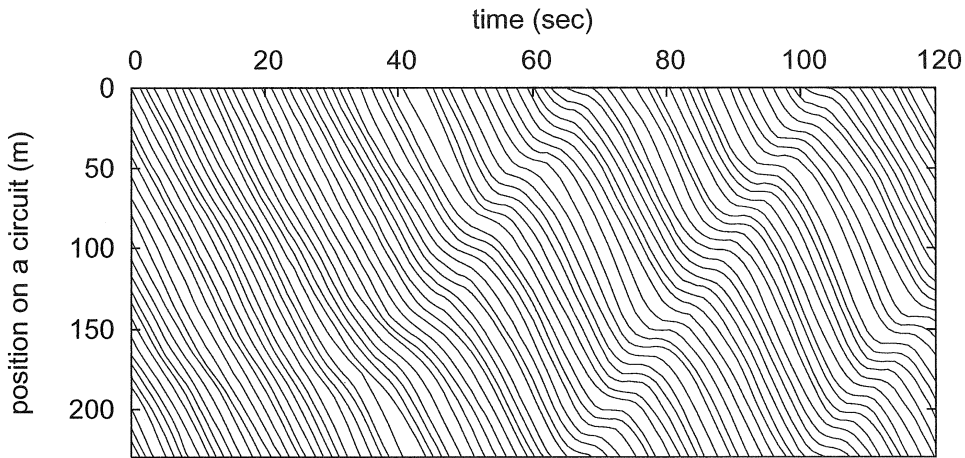


図 3: サーキット上の全車の位置の時間変化の時空図プロット。渋滞が発生する前後 2 分間のトレース。渋滞クラスタの発生と車の進行と逆方向に後退する様子が良くわかる。

である。」と書かれている。[4]。これは、実験で起きた現象が現実的な渋滞発生であることを示す一端である。実際、渋滞クラスタの後退運動は、基本的に先頭車両の発進とクラスタ最後部への車両の到着で形成されるので、渋滞のクラスタの内部に停止している車両が何台あっても、渋滞の基本的性質には関係ない。サーキット実験で形成された渋滞クラスタのサイズは数台（5 台）分であり、高速道路のボトルネックで観測される渋滞クラスタでは数十台・数百台にもなるが、本質的な違いはない。

現実の高速道路では、渋滞は通常ボトルネックの上流に発生する。ボトルネックは交通流量をある程度制限することによって、上流部の車両密度を増加させる。それによりその付近が自由流の不安定相に移行し車両揺らぎが増幅し、ここで発生した揺らぎを上流に送り込み、全体の流れが不安定になり渋滞が発生する。こうして発生した渋滞は、周期系における渋滞と同じ性質を持つことは数理模型による計算で示されている。また、この渋滞の性質は実測データと符合している。

周期系では揺らぎは周回して増幅するが、この境界条件の代わりに、ボトルネックが揺らぎの増幅を支援しているに過ぎず、渋滞発生機構の本質ではない。いずれの場合にせよ、揺らぎが消えずに増幅していく相の状態に系があることが渋滞を誘発する原因である。たとえボトルネックがあっても流れ全体の平均車両密度がある程度高くなり、揺らぎが増幅する自由流の不安定相に移行しなければ渋滞は発生しない。

このように、渋滞発生機構は数理模型で解析されたように、「車両の平均密度が臨界点を超え自由流の不安定相にあるならば、自然に渋滞が発生する」ということが本質的であることを、われわれはサーキット実験によって実証したと考える。

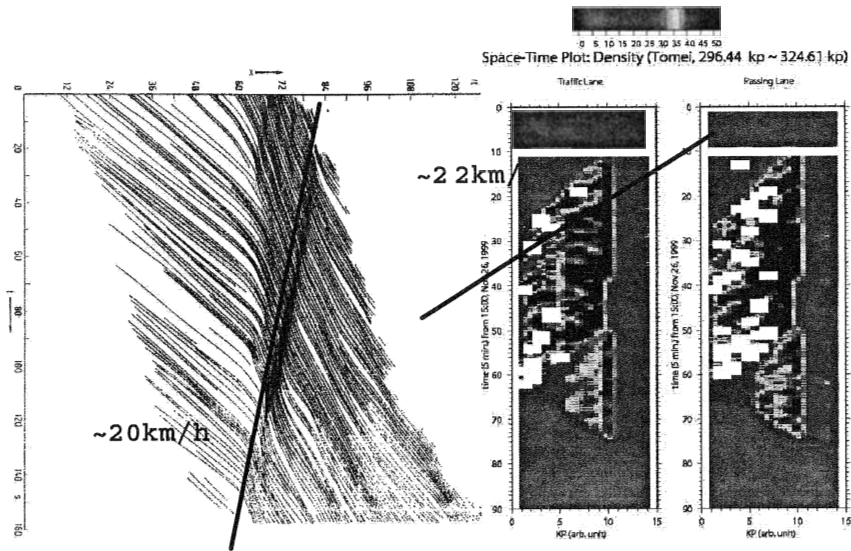


図 4: 渋滞の空撮図 (1965)J. Treiterer et al. Interim Report EEs 278-3, Columbus; Ohio State University, 1970 (左図): 日本道路公団によるループコイル-ディテクタによるデータ (1999) から描いたボトルネック上流部に発生した渋滞の時空図 (右図)

## Acknowledgments

本実験において、サーキット用にグラウンドを提供していただいた中日本自動車短期大学に謝意を表す。さらに、実験走行車の提供とドライバーとなっていたいただいた同大学の学生諸君には特に感謝するものである。この研究は日本学術振興会科学研究助成金の補助を得ている。(基盤研究 (C)15560051)。

## 参考文献

- [1] M. Fukui, Y. Suigiyama, M. Schreckenberg, D. E. Wolf (Eds.), *Traffic and Granular Flow '01* (Springer) (2003)
- [2] M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, Y. Sugiyama: *Japan J. of Ind. and Appl. Math*, **11**, 203 (1994); *Phys. Rev. E***51**, 1035 (1995); with K.Nakanishi: *J. Phys. I France* **5**, 1389 (1995).
- [3] *Oservational Aspects of Japanese Highway Traffic*, S. Yukawa, M. Kikuchi, A. Nakayama, K. Nishinari, Y. Sugiyama, S.-i. Tadaki in [1].
- [4] 「交通工学通論」(越編著、技術書院、1989)