

渋滞解消への数理と実証

友 枝 明 保 TOMOEDA Akiyasu

明治大学研究・知財戦略機構特任講師/JST CREST

高速道路における自然渋滞の形成メカニズムが数理モデル研究および実証実験によって明らかにされてきた。数理モデルを用いて理解することで、渋滞解消のための方法論も導くことができる。

本稿では、自然渋滞の形成メカニズムについて解説し、渋滞吸収運転がなぜ渋滞解消に有効なのかを実証実験とともに説明する。さらに渋滞解消に向けた他の取り組みとして、人の反応時間の特性、錯視現象から見る渋滞予防策についても紹介する。

1. 高速道路の自然渋滞

ETCの導入により、料金所を起点とする渋滞はほとんど解消されたが、その一方で、「サグ」と呼ばれる場所が原因となって生じる渋滞が現在最も大きな割合を占めている。

サグとは、ドライバーが気付かない程度のゆるやかな上り坂である。サグでは、ドライバーが上り坂であることを正しく認識できないため、重力の影響で車の速度は自然と低下する。このとき、道路上の車群が車間距離を詰めて（ある臨界密度以上で）走行していると、前の車の速度低下によって後続車が次々とブレーキを踏んでしまい、最終的に渋滞が発生してしまう。このように走行速度のゆるぎが後方に強まりながら伝播することで生じる渋滞は自然渋滞と呼ばれ、事故や工事によって車線数が制限される物理的なボトルネック渋滞とは形成メカニズムが異なる。

自然渋滞はある臨界密度以上で走行していると生じるが、その臨界密度はどのくらいだろうか？この値は図-1に示す高速道路の実測データから知ることが可能である。この図は基本図と呼ばれ、縦

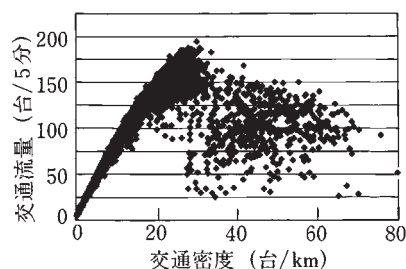


図-1 基本図（東名高速道路）

軸に交通流量（単位時間当たり何台通過したか）、横軸に交通密度（単位長さ当たりどれだけの車がいるか）をとった高速道路の交通特性を表現するものである。

この図の特徴として次のことが言える。密度がゼロでは、走行している車がないため、交通流量もゼロとなり原点を通る。一方で、車群が完全に停止する最大密度では速度がゼロとなり、交通流量もゼロとなる。これらの密度ゼロと最大密度の間には、大きく二種類の流れを示す領域が存在する。一つは低密度領域で見られる右上がりに伸びるデータ点群が示す流れである。これは、密度が小さければ車は自由に走行できるため、車の密度が増えるにつれ交通流量も増えることを意味している。もう一つは、高密度領域にみられる右下がりのデータ点群が示す流れである。これは、密度が大きいと混んで走行速度が下がって

しまい、密度が増えるにつれ交通流量は減少する。臨界密度とはこの自由流から渋滞流へと流れの様子が移り変わる密度に対応し、その値はどの基本図においても、ほぼ25台/kmとなっている。つまり、25台/kmを境に流れの様子が自由流から渋滞流へと変わるのである。このことから、臨界密度である25台/km以下(=車間距離40m以上)であれば、車の速度ゆらぎが生まれたとしても、その影響は弱まりながら伝わるため、渋滞は起こり得ないことが理論的にわかる。

2. 渋滞吸収運転とは？

渋滞解消のキーワードは「slow-in fast-out」である。車の列を考えたときに、車列の後方に加わる車の台数を前方から抜けて行く台数よりも少なくすることができれば、渋滞車列を短くすることができる。そのためには、渋滞車列から素早く抜け出すか、渋滞車列にゆっくりと近づくような走行をすれば良いということになる。

ここで紹介する渋滞吸収運転は、後者のゆっくり渋滞車列に近づき、車列に加わる車の頻度を低くする運転術である。特に、渋滞吸収運転で重要なことは、あらかじめ適切な車間距離・速度をとって走行し、交通流量が増えてきても余裕を持った車間距離を利用して、前の車が減速してもなるべく速度を一定に保って走行することである。つまり、車間距離を一定の距離に保つために細かい加減速をするのではなく、余裕を持った車間距離を利用することで、速度を一定に保ち、なるべく無駄な加

減速を行わないということである。

具体的な走行方法としては、「車間距離40m、時速70kmで走行」することである。車間距離を40mとする理由は、先に述べた通り臨界密度以下にすることからわかる。一方、車間距離を40m空けて走行しても、速度が遅すぎると、車間距離を取った車自身が原因となって渋滞が発生してしまう。そこでこのような問題を生まない最適な走行速度を求めるために重要となる量が基本図の縦軸の交通流量である。交通流量を減らさないことが渋滞吸収運転の肝なのである。つまり、車間距離を40mにとっても交通流量が下がってしまうと渋滞を生んでしまうため、交通流量を変えないように車間距離40mを実現しなければならぬのである。交通流量を下げずに車間距離40mを実現するためには、時速約70kmでの走行が適切であることが基本図の傾きからわかる。

3. 社会実験

JAF、警察庁の協力のもとで、「渋滞吸収隊」と名付けた我々の車8台による渋滞吸収運転の社会

実験を行った(2009年3月5日)。場所は中央高速道路上り線、相模湖IC～小仏トンネル間で、渋滞が発生し始める夕方に行った。

社会実験では、上野原ICで待機していた渋滞吸収隊に小仏トンネル付近の車の流れの状況が無線で伝えられ、渋滞が生まれ始めたときにスクランブル発進し、トンネルの約5km手前から時速70kmで走行した。高速道路において渋滞の先頭が後退していく速さは時速約20kmであることが知られている。渋滞が無くなるとは、渋滞の先頭が渋滞の最後尾に到着することであり、例えば、渋滞の長さが1kmで後方から加わる車がいなるとすれば、この渋滞は約3分で無くなるという計算になる。時速20kmという渋滞の先頭の後退速度を用いることで、何km手前から70kmで走ればよいか分かり、今回の実験では、5km手前から走行すればよいということがわかったのである。

渋滞吸収隊が上の運転を行った結果、図-2に示すように、渋滞吸収隊が通過したのちにトンネル付近の平均速度が時速50kmか

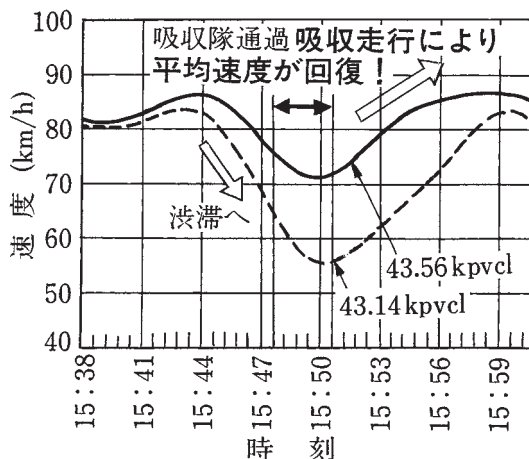


図-2 地点速度の時系列データ

ら時速 80 km へと回復し、初期渋滞を解消することができた。

この運転術は、渋滞が生まれ始めた初期段階であれば、個人の方でも大変有効である。一方、大きな渋滞に成長してしまうと、それを解消することは個人の方では困難になる。しかし、各ドライバーが統一した意識を持ち渋滞解消運転術を実践すれば大きな渋滞も解消できるのである。

4. サーキット実験

渋滞吸収運転によって地点速度は上がることがわかった。つまり、後続の車にとっては幸せな結果が得られた。しかし、渋滞吸収運転を行ったドライバー自身にとってメリットはあるのだろうか？ むしろ、ゆっくり走ること、渋滞吸収運転を行った車の到着は遅れて損をするようにも思える。しかし実際は、渋滞吸収運転を行った車もトラベルタイムが短くなり、燃費も上がるという結果が得られた。この渋滞吸収運転の効果をより詳細に調べた検証実験は以下のとおりである。

安全運転中央研修所にて図-3のようなサーキットを設営し、燃費計と GPS 機器を搭載した車 12 台を用意した。車はサーキットの地点 A を出発点とし、時速 30 km、車間距離 15 m を保ち、一列に連なって周回を始める。これは、実際の渋滞吸収運転の値からスケーリングした値である。周回を重ねたのち、先頭車のみが、A 地点から減速を開始し、A 地点からちょうど半周の距離にあたる B 地点で完全に停止し渋滞を発生させる。停止時間は 5 秒とし、5 秒後に再発進し A 地点まで戻り、

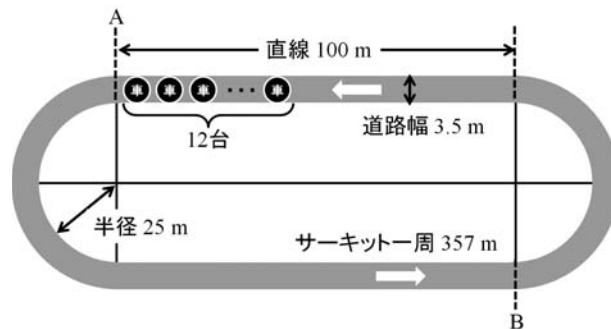


図-3 走行サーキット

1 回の実験が終了する。本実験における渋滞吸収運転は、車列の真ん中、6 台目の車だけが約 100 m 手前から徐々に時速を 30 km から 20 km へと減らしていくというものである。実験では、6 台目が渋滞吸収運転を行う場合と行わない場合それぞれについて燃費とトラベルタイムを測定した。

図-4 は、渋滞吸収運転を行わずに 12 台ともに走行したときの燃費データである。縦軸に燃料消費の累計、横軸に走行距離を示している。各車、停車後の再発進に

燃料を多く消費しており、目的地（グラフの右端）に到達した際には、測定した全ての車で約 22 cc の燃料を消費していることがわかる。

一方、渋滞吸収運転を行った場合の結果が図-5 である。渋滞吸収運転に関係のない 2 台目の燃料消費量に変化はないが、最後尾である 12 台目の車の燃料消費量は 14 cc という値を示しており、渋滞吸収運転によって 36 % もの燃料の節約になっていることがわかった。

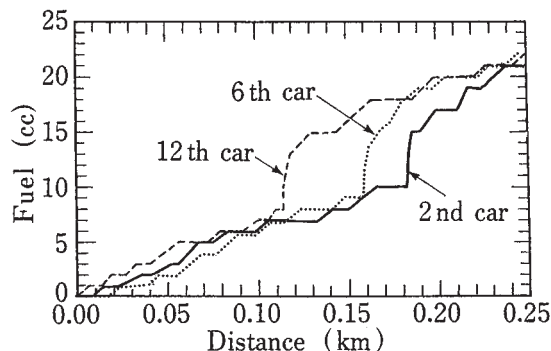


図-4 渋滞吸収運転を行わない場合の燃料消費

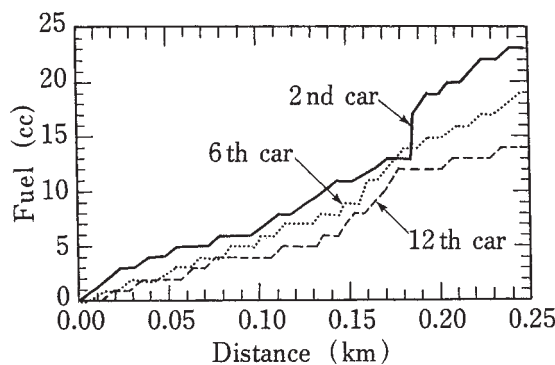


図-5 渋滞吸収運転を行った場合の燃料消費

また、渋滞吸収運転を行った場合、6台目の車以降は一度も停止することなく目的地まで到達することができ、最後尾の車の到着時間が7秒も短縮されていると言う結果が得られた。渋滞吸収運転を行った6台目の車に関していうと、燃料で14%削減、到着時間も1秒早まった。

この実験結果から、なるべく止まらずに運転するというだけで、後方の車だけでなく、渋滞吸収運転を行った車自身も、燃費の向上、トラベルタイムの短縮と、両面においてプラスに働くことがわかった。さらに、渋滞吸収運転において、十分な車間距離を空けることは、後方へ二次的な渋滞を発生させる懸念もあったが、本実験によって、その二次渋滞も発生しないことがわかった。

5. 人の反応時間と混雑解消

ここまでの渋滞解消運転術は、車列の後方に加わる車の台数を調整して渋滞車列を短くするという方法であった。もう一つの渋滞解消方法として、車列の先頭から抜けて行く車の台数を増やして渋滞列を短くする方法がある。

例えば交差点で信号待ちをしている車の列を考える。赤信号から青信号に変わった時、前の車から順番に前方へ進み、信号を通過していく。青信号になってから、最後尾の車が信号を通過するまでの所要時間を短くするにはどうすればよいだろうか？ この問題を理論的に扱うためには、発進波という波の伝播現象が重要となる。青信号になり動き出す車を順番に追いかけて行くと、ある種の波が列の後方へ伝わっているように見え

る。これを発進波（膨張波）と呼ぶ。高速道路においては、この発進波の伝播速度は先に述べたように時速約20kmである。渋滞列から抜け出すことを動き出すことができる状態と考えれば、発進波の到達したタイミングが渋滞列から抜け出すことのできるタイミングであり、発進波が速く伝わればそれだけ早く渋滞列を短くできることを意味する。つまり、渋滞列を解消するためには、発進波をいかに早く後方に伝えるかが重要となる。そのためには、前の車が動き始めたあと、次の車が動き出すまでのドライバーの反応時間が重要となる。ここでは、この「前が動いてから動く」という反応が連鎖していくダイナミクスの基礎実験として、人の行列を用いた実験について紹介する。本実験は（株）構造計画研究所に協力いただいた。

写真-1に示すように一番右の黄色のマーカーをスタートラインと設定し、50cmごとにおかれたマーカーに沿って一列に行列を作る。行列に並ぶ人数は固定し、行列の長さを変えることで密度を変化させた。この実験は、スタートの合図で先頭が動き始め、前の人か動いたら順番に後ろの人も動き始め行列を抜けて行くというものである。

スタートから最後尾の人が動き始めるまでの時間および、最後尾の人がスタートラインを通過するまでの時間の二種類を測定した。前者の測定時間は発進波が最後尾に伝わるまでの時間を意味しており、後者の測定時間はスタートからの所要時間であり、これが最小となる並び方は、渋滞から最も早

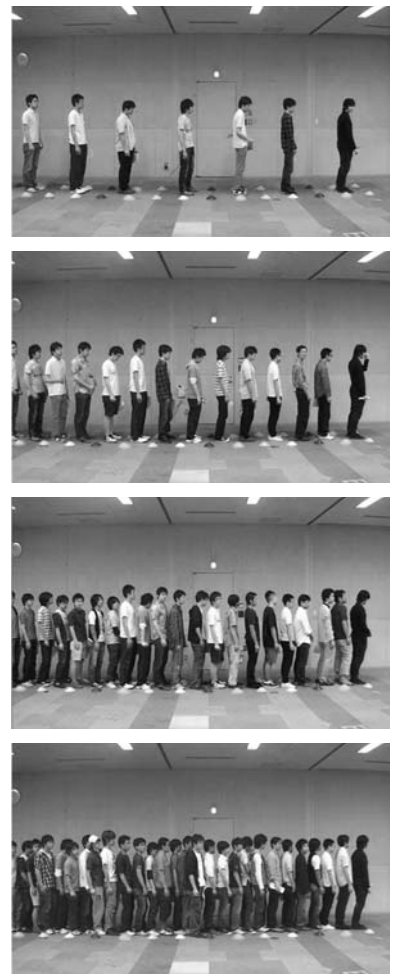


写真-1 密度を変化させた各行列。上から順に密度1.0, 2.0, 3.0, 4.0。

く抜け出せることを意味している。

一つ目の測定時間データを用いて、反応が伝わる速度が得られる。この速度は人の反応時間の積み重ねとして考えることができ、興味深いことに、密度に対して線形な関係ではなく、べきの関係があることが示された（図-6）。つまり、並ぶ間隔を二倍に広くした

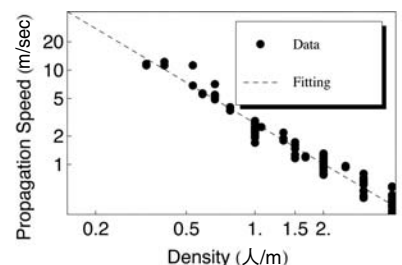


図-6 密度と反応の伝播速度のべき関係

とき、反応の伝わる速さは二倍になるのではなく、それ以上に速く伝わるのがわかった。この結果から、渋滞から早く抜けるためには、並ぶ間隔を広くとれば良いように思える。しかし、渋滞から早く抜けたとしても目的地までの距離が長くなってしまふとトータルの時間はかえて長くなってしまふ。つまり、動き出すことができるまでの時間と実際に目的地に到達するまでの時間の和が最小となるような並び方が良いということである。

このトータルの時間が二つ目の測定時間に対応する。図-7がその結果であり、密度3.0において最小の所要時間となることが明らかになった。密度3.0は高い密度のように思えるが、所要時間の最小値は歩行速度が速いほど低い密度にシフトすることも理論的に示すことができる。つまり、速く動くほど、より小さい密度に最小値が存在することとなる。

この結果は、大規模なマラソン大会のスタート時の選手配置にも応用できる。スタート時には多くの選手を並べるため、周辺の道路を封鎖する必要がある。最後尾の人の所要時間が大きくなればなるほど、競技のみならず、周辺道路への影響も大きくなる。さらに、この基礎研究を発展させることで、赤信号が青信号に変わり車が順番に動き出すときの最適な車間

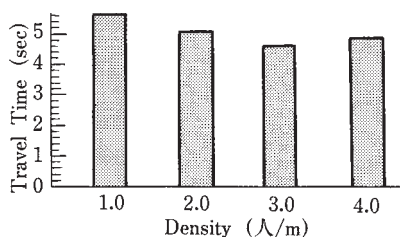


図-7 所要時間の比較

距離を求めることも可能であり、都心部の渋滞解消にもつながるのである。

6. 錯視現象と渋滞予防

前節までは、渋滞が生まれてしまった場合に、どのように解消するか?という方法であり、渋滞列を短くすることによって解消する方法であった。一方で、渋滞のタネである速度ゆらぎを抑えることも渋滞を未然に防ぐという意味で極めて重要である。実際、サグ部における速度低下に対して注意喚起をする看板を設置することで、渋滞を解消しようという試みもあるが、自然渋滞の形成メカニズムを知らないドライバーにはその意図が伝わらず、必ずしも全員が速度回復をできるとは限らないのである。ここでは、渋滞を予防する一つの方法として、根本的な原因であるサグ部に潜む錯視現象につ

いて説明する。

サグ部によって発生する自然渋滞は、ドライバーが上り坂だと気がつかないことから生じる速度ゆらぎが原因であった。これは、ドライバーが上り坂であることを正しく認識できないという一種の錯視現象が引き起こしている。このサグに潜む錯視現象を解消することで渋滞の芽を摘んでしまおうというのがここで紹介する方策である。サグ部に潜む道路傾斜に関する錯視現象は縦断勾配錯視(写真-2)と呼ばれており、縦断勾配錯視に影響する一つの要因として、側壁パターン(ストライプ線)の傾きが報告されている。そこで、縦断勾配錯視を解消し、正しく道路傾斜を認識させる方策として図-8に示すような二種類の道路環境を考える。道路路面は、サグ部に対応する凹型の道路構造を考え、遠坂に二種類の側壁パター



写真-2 縦断勾配錯視の例：香川県屋島ドライブウェイ、屋島ドライブウェイ株式会社との協力のもと撮影。(錯視の説明：近坂(手前道路)は下っているように見えるが、実は上り坂である)。

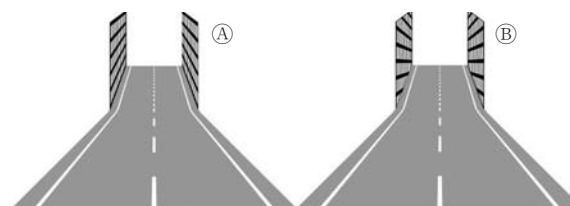


図-8 実験における各提示画像

ンを導入する。これらの画像を一枚ずつ被験者（のべ174名）に提示することで、道路の傾斜がどのように変化しているかを検証した。実験の測定は五項目の間隔尺度を用いて行った。

測定結果（図-9）から、道路の傾斜認識において、ストライプ線を水平面と認識する傾向が強く見られた。さらに、近坂（手前道路）の傾斜は、遠坂（奥道路）の傾斜に対する相対的な判断の結果として得られることもわかった。

つまり、ストライプ線によって、水平面の認識が変化し、結果として道路傾斜の認識も変化しうるのである。このストライプ線による道路傾斜の認識変化は、サグ部のみならず、傾斜誤認が生じるトンネル内部などにも容易に応用でき、渋滞予防の方策となりうる。

さらに、道路環境から錯視現象を取り除くことは渋滞予防になるだけでなく、標識を見えやすくするなど安全な交通環境の構築にもなる。

おわりに

個々の意識を変えるだけでも渋滞は多いに解消されることがわかっていただけだと思う。「渋滞を減らすためには何をすればよいか」、「なぜその方法で渋滞が解消できるのか」という疑問に対して、本稿を通じて具体的かつ理論的に理解していただくと同時に、実際の渋滞に遭遇した時に少しでも多くの人に渋滞解消運転を実践していただければ幸いである。

本稿における渋滞吸収実験の結果は東京大学西成研究室の結果であり、著者が在籍していた当時の研究結果である。ここに執筆にあたり協力いただいた東京大学西成研究室に感謝します。

また本稿で紹介した様々な実験を行うにあたりご協力をいただいた、JAF、警察庁、安全運転中央研修所、（株）構造計画研究所、屋島ドライブウェイ株式会社の皆様に心より感謝の意を表します。

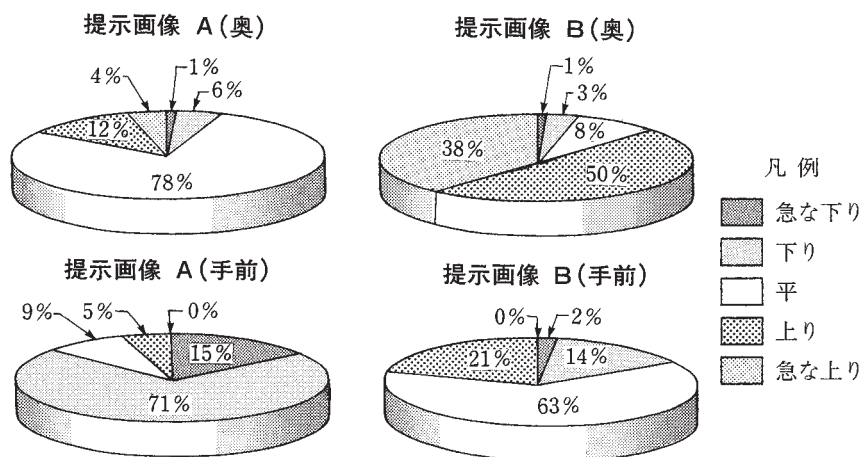


図-9 傾斜認識の傾向

