

1 次元交通流—交通工学からのアプローチ

東洋大学工学部 環境建設学科

尾崎晴男

高速道路の交通流を典型とする1次元と見なしうる交通流について、交通工学からのアプローチを紹介する。交通流の観測方法と得られた基本特性、追従理論、未解明の隘路現象の3項目について、具体例を中心に解説する。

1. 交通流の観測と基本特性

交通流がいかなる特性を有するのかを把握するため、交通工学においてさまざまな工夫がなされてきた。現在広く利用されている方法と、これによって得られるデータについて、観測者の位置から大きく分類して述べることにする。

1.1 交通流の外部からの観測

1.1.1 観測の考え方

道路のひとつの断面において、通過する車両を観測する方法が基本である。この方法によって、時間当たりの通過交通量(volume, flow rate)を計数する。また、連続して通過する車両の通過時刻差に注目した特性量のひとつに、車両先頭部の通過時刻を基準とした車頭時間(headway, gap)がある。

2箇所の断面で同時に観測を実施すれば交通流の空間的な特性が把握できる。2箇所の断面間の距離は、目的に応じて数mから数kmまでがある。2断面間の車両の出入り台数を把握し、その区間内の車両の存在台数をあらわした指標が存在密度(density, concentration)である。また、距離の知られた2断面で同一の車両を認識して通過時刻を計測すれば、2断面間の旅行時間から走行速度を知ることができる。

1.1.2 現行の方法例

道路に埋設されたループコイル上に車両が存在したときのインダクタンス変化を利用するセンサーや、上方や側方から超音波などの電磁波を照射し、反射波の変化から物体の存在を識別するセンサーが現在の主流な観測方法である。これらの機能を有するセンサーを車線単位に設置し、自動的に観測する方法が広く行われている。地点速度は、これらのセンサーを進行方向に5m程度離して2台設置し、同一の車両を感知した時刻差から算出している。また、2つのセンサーで同時に感知したか否かで、車長5mを境にした大型車と小型車の判別にも利用されている。なお、数mの間隔の同時観測では

同一車両の通過時刻差はたかだか1秒程度、というヒューリスティックな認識方法が通例である。しかし渋滞した交通流ではこの方法による同一車両の同定が困難となる場合があり、データの使用上は注意を要する。

最近では、交通流のビデオ映像を画像処理して車両の存在を識別する方法も開発されつつある。輝度変化の大きい背景条件や、車両の重なりなど、まだ改善を要する項目も多いが、すでに一部では実用化されている。特筆すべきは、複数車線にわたってカバーしやすい点と、ナンバープレートの文字を抽出して車両を特定できる機能である。いくつかの箇所でプレート情報を照合させることよって、数kmにわたる区間の旅行時間や経路の観測に有効である。

1.2 交通流の内部からの観測

道路路線の長い区間にわたった交通流の状態を車上から観測する方法である。交通流の流れに乗った観測方法であることから、フローティング法と呼ばれている。特定地点の通過時刻からの旅行時間調査や渋滞列の長さの観測など、自動観測では手薄なデータを得るために、高速道路の管理者である道路公団等で定常的に実施されている。

また、車両の詳細な走行特性を把握するために、計測機器を搭載した実験車両を利用した事例がある。追従特性の把握に利用された例¹⁾では、車両の走行速度、加速度、前車との車間距離、ハンドルやペダルの運転操作などが観測項目である。

1.3 得られた基本特性

交通量、平均速度、存在密度という状態量間の「基本図」と呼ばれる関係が有名である。ただし、観測機器の向上や観測例の増加などから、かつて言われてきた基本的関係の修正が近年なされてきている^{2), 3)}。

1次元交通流に影響を与える要因もいくつか見いだされてきた。主なものを挙げると、車種構成（乗用車、大型車など）、道路構造（車線幅員、沿道条件など）がある。

基本図にも示されているように、交通流には、同じ通過交通量でも高速の状態と低速の状態の2種類の流れの状態がある。高速の状態を自由流（非拘束流）と呼び、流れの中で生じた乱れが下流に伝播する特徴がある。もう一つの低速の状態は渋滞流（拘束流）であり、乱れが上流に伝播する。また、渋滞流中の流れの微少な乱れは、統合して速度と存在密度の大きな振動的変化に卓越してくる。これを渋滞流の疎密波現象とよんでいる。この疎密波現象は、地点速度の低下をもって判定する渋滞列の延伸長の計測において攪乱要因となっている³⁾。

2. 追従特性

道路を通行する車両が増えてくると、各車両は自由に希望する速度を選択して走行するわけにはいかなくなってくる。ニューヨークの海底トンネル内の渋滞問題等を契機に、1950～60年代にかけて車両の追従特性の研究が盛んになったことがある。アメリカではゼネラルモーターズの研究所が拠点となり、精力的な研究が行われた。わが国では、京都大学工学部の米谷と佐佐木の研究が名高い^{4), 5), 6)}。

その研究結果は追従理論としてまとめられた。代表的な理論式は図1のように進行方向にx座標をとったとき、n番目車両に追従走行するn+1番目の車両の加速度が、式(1)のように両車両の速度や車頭距離といった走行状態の関数で記述されるとしたものである。なお式中のTは追従車の反応遅れ(reaction time)と呼ばれる。

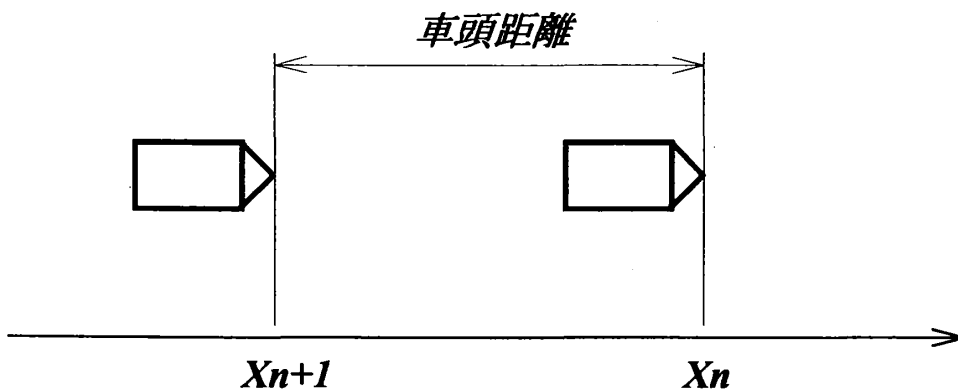


図1 追従関係の概念図

$$\ddot{x}_{n+1} = \text{func}(x_n, x_{n+1}, \dot{x}_n, \dot{x}_{n+1}, T) \quad (1)$$

例えば
$$\ddot{x}_{n+1}(t) = \text{const.} \cdot [\dot{x}_n(t-T) - \dot{x}_{n+1}(t-T)] \quad (2)$$

追従理論式の関数形として、式(2)をはじめとしてさまざまな形式が提案されたが、反応遅れ $T=0$ と見なした条件で時間積分すると、それまでに観測された交通流の基本図のモデル関数に整合する、ということまでひとまず決着した形になっている⁷⁾。追従理論はこのほか交通流の安定性の検討などに応用されたが、先に述べた疎密波の記述などを念頭に置いたものではない。

3. 1次元道路の交通容量と隘路現象

3.1 道路の交通容量と渋滞

道路の1車線を相次いで通過する車両の最小車頭時間は、乗用車の場合2秒弱である。したがって1時間当りの最大通過可能量はおよそ1800台強となる。交通運用の実務上

は、2000(台/時/車線)程度が相場となっている。この最大通過可能量を「交通容量」という。交通容量の値に影響する要因として現在までに定量化されているものは、車線幅、沿道条件、大型車混入率などがある。

交通渋滞とは、通過しようとする交通需要がある地点の交通容量を超過したため、その上流側に溢れた分が溜まっている状態、ということになる。

3.2 1次元道路の隘路現象

3.2.1 サグとトンネル⁸⁾

隘路、あるいはボトルネックと呼ばれる地点がある。周囲よりも交通容量が小さい地点のことで、ここを先頭に渋滞が生じやすい。一般的には車線の数や幅員の減少地点や交差点などが典型的な例である。交通工学においてその原因が解明されていない隘路問題として、図2に示すようなサグという、縦断勾配の変化が「峠」とは逆のすりばち状の構造の地点がある。また長大トンネルにも渋滞の常襲箇所が多い。サグもトンネルもは見かけ上は単なる一本道である。しかしこれがわが国の高速道路の代表的な隘路となっている。



図2 サグの模式図

サグやトンネルには、1)渋滞が発生しやすい地点であること、2)渋滞継続の先頭となる地点であること、というふたつの特徴がある。後者の意味するところは、他の要因で渋滞が発生した後、サグやトンネルが渋滞の先頭として残ることである。例えば、交通事故が発生したために事故地点を先頭に渋滞が生じた場合、事故処理の終了後に近隣のサグやトンネルに渋滞の先頭が移動して継続する現象をいう。

サグやトンネルは、1980年代まで交通工学では、交通容量が低いと認識されていなかった。したがって過去の追従理論では念頭に置かれていない問題である。

3.2.2 隘路現象の特徴

サグやトンネルの隘路現象の特徴を1方向2車線の都市間高速道路を例にまとめてみよう。

1)発生時⁹⁾

2車線合計で3000(台/時)程度の需要量で発生することが多い。この交通量は2車線道路の交通容量の目安となる $2000 \times 2 = 4000$ (台/時)程度に比較して、はるかに小さい値で

ある。なお、発生時には追越車線の利用率が6割以上となっており、追越車線では1車線で2000(台/時)程度のレベルに達している。車両の追越車線への偏在という日本のドライバーの習性が、渋滞発生を引き起こしやすいひとつの要因と言えるのである。

2) 継続中⁹⁾

渋滞発生の原因に関わらず、サグやトンネルが定常的な隘路として安定している状態では、2車線合計で2500(台/時)程度の通過量に落ち込んでしまうのが普通である。この交通容量も2車線道路の交通容量の目安となる4000(台/時)程度に比較すると、はるかに小さい値である。

もう一つの特徴は、隘路を通過した後に緩慢な加速状態で交通流が安定することである。隘路地点の通過時の30(km/hr)程度から80~100(km/hr)まで速度が上昇するまでに2~3km程度を要することが通常観測される。

3) 人的要因の影響^{9), 10), 11)}

ドライバーが知覚する明るさ環境に渋滞継続中の隘路の交通容量が依存する特性が観測されている。例えば、夜間から継続するサグを隘路とする渋滞で日の出後に交通容量が増加した例、トンネルを隘路とする渋滞では、トンネル内部の照明の明るさを増加したところ交通容量が増加した例、またトンネル内部が外界よりも相対的に明るくなる日の入り後に、隘路の交通容量が増加した例などが報告されている。

わが国の高速道路には多くのサグやトンネルがある。しかし、隘路となる箇所とされない箇所があることが解っている。特にサグに関しては、ドライバーから見て道路構造が明らかにサグと認識できる箇所では生じにくいことが知られている。

さらにドライバーが渋滞に巻き込まれた時間が長くなるにつれて、交通容量が更に低下すること、都市内の高速道路の方が都市間高速道路よりも交通容量が大きいことなど、人的要因の影響と考えられる特徴がいくつか観測されている。

3.2.3 サグ渋滞の原因仮説¹²⁾

上記の特徴から見て、サグやトンネルを先頭とする渋滞の原因は、人間たるドライバーに多分に関わるらしいことが推測される。そこで、縦断勾配が増加する道路構造の変化を認知することが困難なサグに関しては、ドライバーによる勾配変化を補償する加速ペダルの調節が遅れることが、隘路となる理由ではないか?という仮説を筆者は立てている。

この仮説はシミュレーションでは検証しているが、人間の実際の運転行動からの実証作業が残っている。具体的には、道路構造とドライバーの勾配変化の認知能力や加速ペダルの踏み込み行動との関係の解明を作業中である。

3.2.4 渋滞軽減対策

ドライバーの運転特性を解明し、サグやトンネルが隘路とならないための道路設計の方法は、今後の研究に待つところが大きい。そこで当面の対策として、各地で車線

数を増加する事業が進行中である。たとえば、名神高速道路の天王山、梶原トンネルといった隘路を含んだ区間などが挙げられる。

さらに情報・通信技術を活用したインテリジェント交通システム(ITS: Intelligent Transport Systems)の貢献が期待できるものと考えられる。たとえば、目的地までの経路別の所要時間や渋滞先頭の位置を情報板や車載システムに提供すれば、隘路を通過する交通需要の低減、ドライバーの積極的な運転行動などの多様な面で効果が期待できそうである。またドライバーの運転支援や自動運転による人的要因を解消する対策も夢ではないはずである。

参考文献

- 1) 赤羽弘和, 大庭孝之, 桑原雅夫, 越正毅 (1988) 車両の走行挙動計測システム, 土木計画学研究・講演集, 11.
- 2) Highway Capacity Manual (1985) Transportation Research Board.
- 3) 越正毅, 岩崎征人, 大蔵泉, 西宮良一 (1981) 渋滞時の交通流現象に関する研究, 土木学会論文報告集, 第306号, 59-70.
- 4) Edie, L. C. and Foote, R. S. (1958) Traffic Flow in Tunnels, Proc. Highway Research Board, 37, 334-344.
- 5) Gazis, D. C., Herman, R. and Potts, R. B. (1959) Car-Following Theory of Steady State Traffic Flow, Oper. Res., 7, 499-505.
- 6) Kometani, E., Sasaki, T. (1958) On the Stability of Traffic Flow, J. Operations Research (Japan), 2, 11-26.
- 7) May, A. D. and Keller, H. E. M. (1967) Non-Integer Car-Following Models, Highway Research Record, 199, 19-32.
- 8) 越正毅 (1986) 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, 第371号/IV-5, 1-7.
- 9) 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和 (1993) 高速道路のトンネル, サグにおける渋滞現象に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 458, 4-18.
- 10) 岩佐昌明, 越正毅, 桑原雅夫, 尾崎晴男 (1990) 高速道路サグおよびトンネルの交通容量, 土木学会第45回年次学術講演会, 544-545.
- 11) 大口敬 (1992) 高速道路サグの道路構造と視認性, 高速道路と自動車, 35, 11, 31-37.
- 12) 尾崎晴男 (1994) 車両の追従挙動とサグの隘路現象, 東京大学学位論文.