

道路交通流の混雑と渋滞

NATURE OF ROAD TRAFFIC CONGESTION

大口 敬¹ OGUCHI, Takashi

¹ 博士 (工学) 東京都立大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (<http://www.comp.metro-u.ac.jp/~oguchi/>)
Dr.Eng., Assoc. Professor at Dep. Civil Eng., Graduate School of Eng., Tokyo Metropolitan University

概要

本稿では、道路上の自動車交通流現象における混雑あるいは渋滞と呼ばれる交通現象について、その工学的意味と特性について論ずる。具体的には交通渋滞という交通流状態が、交通容量と交通需要の関係により工学的に厳密に定義されることを示し、この交通流状態が非渋滞の状態と比較してどのような点で異なる特性を持つのかを明らかにする。また、このような交通流の渋滞現象を表現するための交通流シミュレーション技術として求められる要件について整理を試みる。

1. 交通の混雑・渋滞

(1) 人間の感覚を表す言葉

道路交通では、自動車の交通需要が増えるほど道路の交通サービスの性能は低下する(図-1)。具体的には旅行時間(コスト)の増大や混雑による快適性の低下などが生じる。鉄道やバスサービスでは、(激しい混雑状況下では駅/バス停での乗降時間増大による団子運転が生じるが)こうした需要増大による旅行時間増大は原則として生じない(自動車交通に比べれば無視できる)。歩行者交通でも自動車交通と同様な傾向が見られるが、もともとそれほど高水準のサービスではないので需要増大によるサービス低下は自動車交通ほど極端ではない。従ってこれは自動車交通に特徴的な特性である。図-1の縦軸を「旅行時間の逆数=旅行速度」とすると、一般に交通需要に対して単調減少となる。

道路の自動車交通においては、交通需要が少ない状態から徐々に増大するに従って、交通量と速度には負の相関、交通量と交通密度には正の相関関係があり、人々は交通量増大に伴う速度低下や密度増大を混雑・渋滞(congestion/delay)と感じる。図-2の $Q-V-K$ 関係で、交通量 Q (=交通流率)が0から Q_{dc} の範囲では、 Q が交通需要を意味し、太い実線の関係が速度低下や密度増大による混雑・渋滞を意味する。

しかし交通需要が Q_{dc} を超えると図-2の交通量 Q は交通需要を意味しない(詳細は2.で議論する)。少なくとも図-2の淡い緩い相関の部分では、速度0までの速度低下と密度 k_j までの密度増大が生じ得ることを示している。これは traffic jam の jam という言葉の目一杯詰まった状態を意味し、極めて激しい混雑・渋滞、「交通がにっちもさっちも行かない」ような感覚を意味する。ま

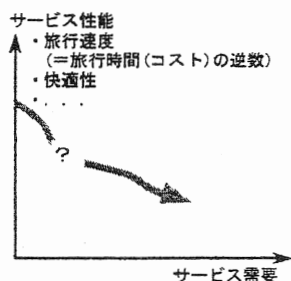


図-1 自動車交通のサービス需要とサービス性能

た特に交差点で交差方向の車両に行く手を遮られて身動きできなくなる状況を gridlock 又は deadlock(膠着)と呼ぶこともある。

一般利用者の感覚としては、「混雑」と「渋滞」に明確な違いはあるまい。また地方都市の渋滞を大都会の人間が渋滞とは感じないように、混雑・渋滞は相対的な感覚であって、空いた道路が常態なら少しの交通増大も混雑・渋滞と感じるのである。

(2) 交通工学上の「交通渋滞」の定義

交通工学においては、「交通渋滞」は『交通容量上の隘路(ボトルネック)に、その地点の交通容量を超える交通需要が流入しようとするときに、そのボトルネックを先頭にしてその上流区間に生じる車両列における交通状態』として厳密に定義される。この定義による「交通渋滞」は、「混雑・渋滞(congestion/delay)」とは1対1の対応ではなく、むしろ「待ち行列(queue)」のある特定の状態を意味するものと考えられる。

ここで「交通渋滞」の状態にある道路区間には次のような典型的な特徴がある。

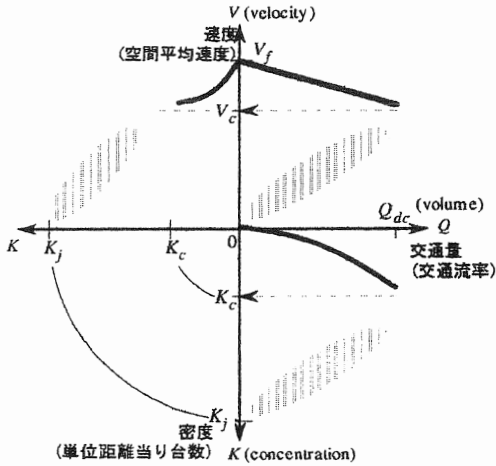


図-2 自動車交通の交通量・速度・密度の関係 (Q-V-K関係)

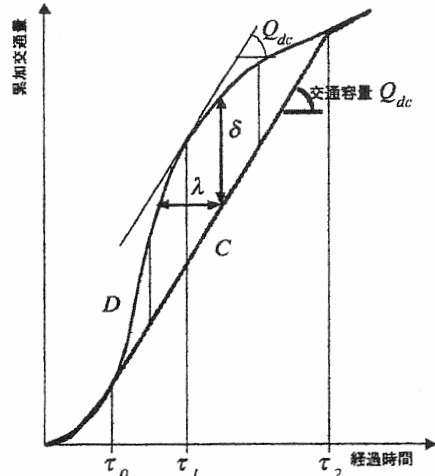


図-3 ボトルネック上流区間における累加交通量

1. 交通需要が超過するのは下流のボトルネック容量 (図-2 の Q_{dc}) であり、観測している道路区間の交通容量は超過していない。
2. 渋滞状態に陥った区間では交通量と速度は正の相関関係となり、「非渋滞」の場合とは逆でなる (図-2 の淡い緩い相関部分)。
3. 一旦交通渋滞の状態に陥る (図-3 の時刻 τ_0) と、交通需要 D がボトルネック容量 Q_{dc} を下回っても (時刻 τ_1) 渋滞車列の上流延伸が止まるだけで、この容量よりも低い需要状態で時間がしばらく経過し、それ以前に超過した需要の累加交通量を全て相殺した時点 (時刻 τ_2) で初めて渋滞が解消する。こうした交通渋滞状態の交通流特性については、2. で改めて議論する。なお交通経済学では、交通需要の増大による旅行時間増大を「交通混雑 (congestion)」と呼び、交通工学上の交通渋滞状態は特に「超混雑 (hypercongestion)」と呼んでいる。

(3) 連続流区間と中断流区間

道路には「連続流区間 (non-interrupted flow facilities)」と「中断流区間 (interrupted flow facilities)」がある。これらは道路区間の特性であり交通流状態の違いではない。前者の典型は単路部や分合流・織込み区間を含めた高速道路であり、後者の典型は交通信号制御された街路区間である。どちらの区間についても交通工学上の「交通渋滞」状態は生じ得るが、その見かけの様相はだいぶ異なる。

a) 連続流区間における交通渋滞の特徴

連続流区間における非渋滞状態では、交通量増大による速度低下は生じるが、速度の変動は少ない安定した交通流状態が確保され、「定常交通流 (steady-state/stable

flow)」状態である。従って図-2の太い実線の相関関係は安定して観測される。一方渋滞状態に陥ると、著しい速度低下を起こすだけでなく、速度変動の激しいいわゆるアコーディオン現象^{2),3)}が生じ、「非定常流 (unsteady-state/unstable, or oscillatory flow)」とも呼ばれる。従って実際には比較的高速度-低密度や低速度-高密度の状態を繰返しながら、図-2の淡い緩い相関関係が観測される。

b) 中断流区間における交通渋滞の特徴

中断流区間では、交通流の外からの介入によって交通流が分断され停止・発進が強制されるため、定常流/非定常流の概念は存在しないと解釈できる。

信号交差点では、飽和交通流率と青時間比率から流入部の交通容量が決まる。これを超える交通需要が到着すると交通渋滞が発生する。非渋滞状態であっても信号交差点では待ち行列が形成され、特にサイクルが長いと利用者の平均遅れ時間 (delay) が長くなるため、非渋滞でも利用者は「混雑・渋滞」という感覚を持ってしまいやすい。しかし実際には最低でも1サイクル以上の時間の間交通流を観測し、サイクル当たりで捌け残りが生じて待ち行列が上流へ延伸することが確認されなければ、交通渋滞状態と判断できないのである。

高速道路の料金所では強制的に一旦停止を強いられるためこの直近上流区間も中断流区間である。料金所のサービス率 (交通容量) を下回る交通需要でも交通到着の確率の変動により待ち行列がある長さの平衡状態になることは待ち行列理論から求められるが、この待ち行列は交通渋滞ではない。料金所をボトルネックとする交通渋滞とは、待ち行列が平衡状態の場合よりも長くなって、上流へ延伸している場合を指すのである。

道路ネットワークにおける過飽和状態のリンク (sat-

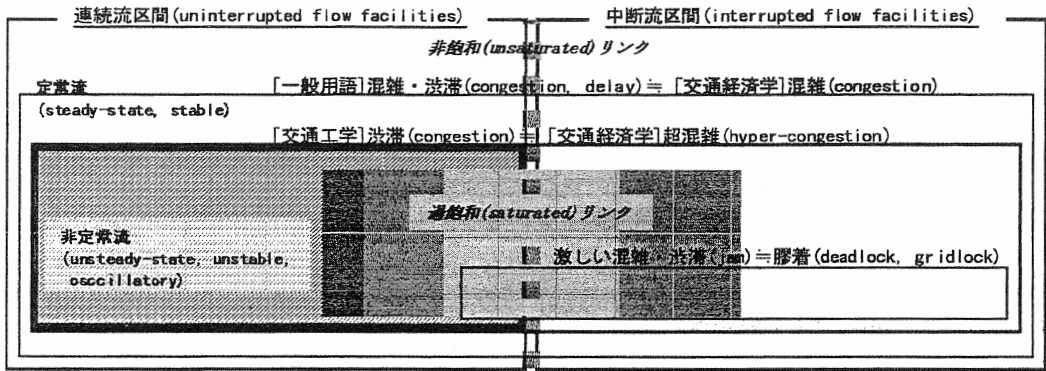


図-4 交通流の状態の表現が表す範囲の整理

urated link, 対語は非飽和:unsaturated) とは、上流リンクとの接続ノードで「先詰まり」状態が生じる状態である。リンクの過飽和状態は交通工学上の渋滞が時間的に累加した結果生じる現象であり、「過飽和」と「交通渋滞」の概念は全く同一ではない。非飽和リンクでもそのリンクの一部が渋滞状態となることがある。

図-4 は1. で扱ってきたさまざまな交通流の状態の表現が表す範囲を整理してみたものである。

2. 交通渋滞状態の交通流

交通工学上定義される交通渋滞状態の交通流は、単に混雑した交通状況としての意味を超えて際立った特徴を有する。交通容量上のボトルネックで一旦発生した交通渋滞は、時間的に影響が累加されるとともに空間的にも道路の上流区間へ影響が延伸する。

(1) 対象道路区間の一断面の交通流特性

「交通渋滞」は運転者の立場からすればある種の「時間遅れ」を意味する。非渋滞状態であっても、交通需要が増大すれば速度は低下するので、(理想的に) 交通量 0 の場合の速度の期待値 (図-2 の V_f) の場合よりは「時間遅れ (delay)」は存在する。しかし非渋滞状態では、旅行速度と時間遅れは本質的に対象道路区間におけるその時点の交通需要量で決まる。これは、図-2 の交通量 Q は、これを観測している道路区間の交通需要と一致することを意味する。

一方「交通渋滞」状態になると、図-2 の交通量 Q は対象道路区間の下流に存在するボトルネックの交通容量を意味しており、交通需要ではない。図-2 の渋滞側の淡い緩い相関関係は、下流のボトルネック容量と対象道路区間の車両通行性能で決まる平均速度との関係を意味しており、交通需要と関係がない。

ここで対象道路区間の車両通行性能とは、車線数、上

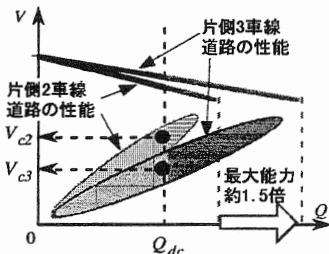


図-5 渋滞状態における平均速度の違い

り坂、急カーブなど主に道路幾何構造で決まる。例えば片側3車線の道路区間と片側2車線の道路区間があり、各道路区間の下流に交通容量 Q_{dc} が同じボトルネックがある場合を想定する。一般に交通需要が Q_{dc} よりも少なく非渋滞であれば、車線数の多い道路区間の方が同じ交通量でも高速で走ることができる。しかし交通需要が Q_{dc} を超過して下流ボトルネックから渋滞行列が伸びると、車線数の多い道路区間の方が平均速度が遅くなってしまふ (図-5 参照)。

またある対象道路区間に生じた交通渋滞状態であっても、下流のボトルネック容量が異なれば渋滞中の平均速度は異なる。例えば一般に、高速道路でサグ (sag) に起因する自然渋滞よりも工事や事故に起因する渋滞の方が交通容量が低いので、上流に生じる渋滞状態中の平均速度は低くなる。渋滞が一旦発生して解消するまでは、交通需要がどのように (容量の 10 倍でも 1.2 倍でも) 変化しようとも対象道路区間の交通流には影響せず、渋滞原因となる下流ボトルネック容量が対象区間の速度を規定する。

(2) 利用者の経験する時間遅れの特性

図-3 は、あるボトルネックに対する交通需要 (D) とボトルネックを通過する交通量 (C) を累加交通量で表している。交通需要がボトルネック容量 (Q_{dc}) を上回る

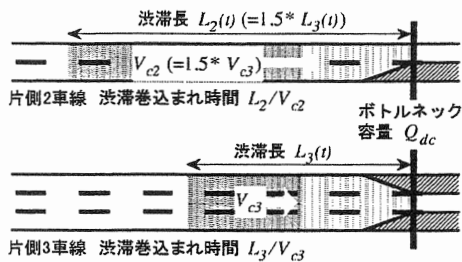


図-6 渋滞長と渋滞巻込まれ時間の関係

時刻が t_0 で、ここで渋滞が発生し、その後曲線 D と C は乖離する。ある時刻における縦軸の差 δ はその時刻の渋滞車列中の待ち行列車両数 (= 渋滞長) であり、ある累加台数における横軸の差 λ はその車両の渋滞による時間遅れ (= 渋滞に巻込まれた時間) を意味する。

ある時刻にボトルネックを通過した車両がこの渋滞により被る時間遅れ λ は、渋滞が発生してからその時刻までの超過需要の累積で決まる。すなわち交通需要 (曲線 D の傾き) と交通容量 (曲線 C の傾き = Q_{dc}) の差を車両毎に累積したものであり、その時点の交通需要の多寡とは関係ない。また λ は渋滞車列が形成される道路区間の車線数などでは変わらない。2. の (1) に示したように渋滞車列中の平均速度は片側 3 車線区間では片側 2 車線区間より低くなるが、図-6 のようにその分渋滞長も短くなるので、結局渋滞による時間遅れは変わらないのである。

(3) 道路ネットワークにおける交通流の特性

道路をネットワークで考えると、渋滞を起こすボトルネックが複数発生する可能性があるため、次のようなことを考える必要がある。

1. 上流側ボトルネックの交通容量により下流側ボトルネックに到着する交通需要が押さえられる
2. 下流側のボトルネックによる渋滞車列が上流側ボトルネックまで到達する (下流側リンクが過飽和となる) 間は、上流側ボトルネックによる渋滞の影響が見えなくなる
3. 渋滞車列が上流リンクへ延伸して枝別れする場合、下流のボトルネック容量は渋滞流状態における合流比率で各枝毎に割られる
4. 下流から渋滞が延伸していると、そのリンクの交通量はその渋滞流状態の交通流率に支配され、そのリンクの性能や交通需要とは関係がない

下流側のリンクの時間的に前の時刻の交通流状態が上流側のリンクの時間的に後の時刻の交通流状態に影響を与えるため、通常の上流から下流へ流れる交通の流れとは逆向きに影響を与える。さらに実際のネットワークの接続関係上はループとなる場合もあり、必ずしも

上流・下流の関係は固定的ではないため、交通流状態を知ることは容易ではない。

3. 交通渋滞を考慮した交通流シミュレーション

道路ネットワーク上で交通渋滞状態を扱う過飽和リンクでは、物理的な長さを持つ待ち行列 (physical queue) を動的に扱う必要があるため、そのネットワークとしての交通流状態を解析するために特にシミュレーション技術が重要と考えられ、現在様々な交通流シミュレーションが開発されている⁴⁾。

こうしたシミュレーションには、渋滞の原因となるボトルネックとその交通容量を明示的に外生的に与えるものと、交通流内部のモデルパラメータによって内生的に求められるものがある。前者の手法ではそのボトルネック容量をパラメータとしてキャリブレーションする必要があるし、後者の手法ではボトルネック容量が適切に実現されるかどうか検証しなければならない。従ってシミュレーションでは、必ずボトルネックに着目してここで発生する交通流現象を適切にモデル化し、本稿で議論したような上下流への空間的・時間的に変動する影響を再現することが求められる。

例えば高速道路サグに起因する交通渋滞現象をシミュレーションで再現するには、渋滞を起こすサグで渋滞しそれ以外のサグでは渋滞が起らないような追従挙動モデルが求められ⁵⁾、こうした渋滞発生現象の確率的な変動特性^{6),7)} を再現する必要がある。現在筆者らはこうした要件を満たすような交通流シミュレーションの開発に取り組んでいるところである。

参考文献

- 1) Highway Capacity Manual, *Transportation Research Board*, National Research Council, Special Report 209, 1985.
- 2) G. F. Newell: Instability in Dense Highway Traffic - A Review, *Proc. of 2nd International Symposium on Theory of Traffic Flow*, pp.73-83, 1963.
- 3) 越止毅, 岩崎征人, 大藤泉, 西宮良一: 渋滞時の交通流現象に関する研究, *土木学会論文報告集*, No.306, pp.59-70, 1981.
- 4) 交通工学研究会: やさしい交通シミュレーション (交通工学講座シリーズ), 丸善, 2000.
- 5) 大口敬: 高速道路単路部渋滞発生解析-追従挙動モデルの整理と今後の展望-, *土木学会論文集*, No.660/IV 49, pp.39 51, 2000.
- 6) 大口敬, 片倉正彦, 鹿田成則, 大谷武彦: 高速道路単路部渋滞発生時の交通現象解析, *土木計画学研究・講演集*, No.21(2), pp.905-908, 1998.
- 7) Katakura, M., Oguchi, T. and Shikata, S.: A Detecting Method of Traffic Congestion on Expressways, *Proc. of 7th WC on Intelligent Transport Systems*, on CD-ROM, 2000.