

道路ネットワークの渋滞マネジメント

—基本原則と喫緊課題への応用—

和田 健太郎

本稿は、道路ネットワークを対象に、渋滞現象の主要な特性、渋滞マネジメントの基本的な考え方（新型コロナウイルス禍の混雑問題への応用）、および、代表的なスキームについて解説を行う。また、大規模イベントの例として、東京オリンピック・パラリンピックで実施予定の交通マネジメントについても、その考え方を簡単に見る。

キーワード：交通渋滞、道路ネットワーク、ネットワーク交通流、交通制御、交通需要マネジメント

1. はじめに

1.1 混雑を避けるための鉄則

“もしプリンシプルのようなものがあるとすれば、ひとつと同じことはしないということだ。”

独創的な仕事を成し遂げた、物理学者 朝永振一郎の言葉である [1]。研究テーマや手法にも流行り廃りがあるわけであるが、そういうものに振り回されずに独自性のある仕事をしたいものである。しかし、それがインパクトのある重要な仕事であって欲しいと思うのも常である。そうすると、多くの人が同じことを考えるので抜け駆けするのは難しい。悩ましい問題である。

基本的な構図は、本稿のテーマである（道路）混雑問題でも変わらない。混雑を好む人はまれであるし、みなが（上の言葉のように）ひとつと同じことをしなければ、混雑は生じない。にもかかわらず、混雑が生じるのは、多くの人が同じことを考える、あるいは、同じ行動をとらざるをえないこと、そして、他の人の行動を正確には予測できない、からである。当事者にとっては、「避けたくても避けがたい」、それが混雑である。

混雑問題を考えるうえでのもう一つのポイントが、「量の問題」ということである。つまり、あるモノやスペースなどが、それを欲する/利用したい人の量に比べて、相対的に少ない（かつ、容易には増やせない）ために混雑は顕在化する。まとめると、需要集中、および、容量・供給制約が混雑問題に共通する特徴である。

混雑現象の基本原則は、以上のように単純である。対策としても、需要分散するか、容量を拡大するか、のいずれかである。しかし、その問題解決は案外難しい。

本稿は、道路交通における渋滞マネジメントの基本的な考え方を解説することを目的とする。具体的には、まず、「問題を知る」ということで、単路およびネットワークの交通渋滞現象について見ていく。そのうえで、交通渋滞対策の基本的な考え方と代表的な対策スキームについて解説する。またここでは、大規模イベントの渋滞対策の例として、東京オリンピック・パラリンピックにおいて予定されている交通マネジメントについて、その考え方を簡単に見ていく。

ただし以下では、本題に入る前に、現在の喫緊課題であり長期戦が想定される、新型コロナウイルスにまつわる混雑問題を取り上げ、交通工学的な混雑対策の視点と考え方を（本稿のハイライトとして）提示したい。

1.2 新型コロナウイルスにまつわる混雑問題

1.2.1 行動変容：呼びかけベースの3密回避

新型コロナウイルスの感染拡大を防ぐための行動指針として、3密を避けることが提示されている。より具体的な「人との接触を8割減らす、10のポイント」には、「スーパーは1人または少人数ですいている時間に」とある。こうした呼びかけや自主的な“行動変容”によって混雑の発生を防げたとすれば、それはすごいことである。しかし、それがうまくいかなかったとしても「意識が低い」と個人に責任を帰すことは適切でないだろう。なぜなら、先に述べたように、抜け駆けするのが難しいのが混雑であり、量の問題であることを思い出せば、個人にできることにはおのずと限界がある。いずれにしても、個人の心掛けや良心に頼った対策（だけ）ではうまくいく保証はない。また長期戦に向けては、みながそれほど意識せずとも自然に混雑を回避できる持続可能な「仕組み」の整備が重要である。

1.2.2 容量拡大：営業時間の維持・延長

スーパーの混雑問題に対して、営業時間の短縮をや

わだ けんたろう
筑波大学システム情報系
〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1
wadaken@sk.tsukuba.ac.jp

めるべき、あるいは、むしろ延長すべき、という意見もある。これは、容量・供給の拡大に当たり、一見有効に見える。しかし、話はそう単純ではなく、混雑緩和という観点で上手くいくとは限らない、というのは、潜在的な需要のすべてが現在表に現れているとは限らないためである：混雑やそれによる感染リスクにより、一部の需要は買い物を取りやめたり、回数を減らしたりしている。つまり、容量拡大によりそのリスクが減少すれば、現在より需要は増える可能性が高い。このような需要を「誘発需要」と呼び、容量拡大による混雑減少効果を打ち消す力となる。

“道路建設による新たな容量は中長期的には必ずしも渋滞緩和にはつながらない”

この現象は、交通計画上の重要な教訓である。

なお、必要な PCR 検査が実施できないというような、全体として需要が満たされていない状況では、供給の拡大による対策が必要であることは言うまでもない。

1.2.3 需要誘導：混雑情報、インセンティブ

混雑情報やインセンティブなどを提供することで、需要を分散させる方法もある。このうちインセンティブの提供では、適切な混雑課金やオフピークの割引を設定することで、社会的に最適な状態（交通問題では総旅行費用の最小化）を実現することが理論上可能である。教科書的な説明をすれば、自分が混雑に参加することによって生じる他者の混雑費用/感染リスクの増加（負の外部性）分を迷惑料（ピグー税）として徴収できるならば、最適状態を達成することができる。

ここから言えるのは、たとえ多くの人が自分の感染リスクを正しく理解して個人にとって最適な行動をしたとしても、負の外部性を認識せず/過小に見積もり、最適状態より過剰に混雑するということである。また、新型コロナウイルスの感染リスクによる負の外部性は、混雑より大きいと考えられるので、最適状態の実現には強いインセンティブの提供が必要ということになる。

混雑対策の観点での実用上の課題は、(1) 厳格に混雑を回避するのは難しいこと、(2) 適切な課金/割引額の設定が難しいこと、である。前者はインセンティブに対する人々の反応次第ということであり、後者はその反応も見据えて適切な額を設定するとすれば容易に入手・推定するのが難しい人々の選択・嗜好に関する情報（需要関数情報）が必要になる、ということである。

1.2.4 需要の数量規制：入店制限、割当制、予約

最近普及しつつある混雑緩和策がスーパーの入店制限である。これは、量の問題に対して、量を直接ターゲット以下に抑制するという極めて工学的な対策法で

ある。このような数量規制が特に有効なのは、制限すべき量があらかじめわかっている場合である。たとえば、米国のいくつかの州では、営業禁止規制の解除条件として、施設内の人の密度（占有率）の上限を設定するようである。

数量規制の他に対するアドバンテージは、その実効性にある。つまり、どのくらいの人がどの時刻に集中するかや、おのおの人が店舗にどのくらい滞在するかなど、さまざまな不確実性がある中でも、（フィードバック制御により）ほぼ確実に混雑の発生を防ぐことができる。このような特徴は、何も店舗側のみメリットをもたらすものではない。他者の行動を予測しないでいい点や、ほぼ混雑しないと保証された環境は、消費者にもストレスの軽減や安心感をもたらすはずである。

さらに、道路渋滞も含め多くの混雑問題では、いったん混雑してしまうとその捌け性能（単位時間当たり）に目的を完遂する数）が低下する。例えば、混雑した店内では買い物時間がそうでない場合に比べて伸びる、といった具合である。したがって、入店制限は、単に混雑を回避できるだけでなく、より多くの需要の受け入れにつながる可能性をも秘めている。

なお、入店制限によって、店舗に入れない人が入口で行列を作ってしまう、という問題が発生するだろう。しかし、この問題は、数量規制自体の問題というよりは、ターゲット数量を、「現地で」「早いもの順に割り当てる」という単純割当ルールの問題である。海外のスーパーでは、この行列を解消するために、インターネット上で整理券を発行している例もある。つまり、技術的には容易に実装可能な予約制の導入で、状況は十分に改善可能である。また、「早い者勝ち」ではない割当ルールとしては、ランダムな割当「抽選」、高齢者や障害者、妊婦といった特定の人たちに優先権を与えるなど、さまざまなものが考えられる。

素朴な入店制限に対して、“人間的でない”との意見もあるようである（確かに自由な選択を制限する面はある）。しかし、密集を回避することが重要でそれを長期的に続けていく必要があるとすれば、実効性の高い数量規制の方法を（スーパーに限らず）より積極的に活用し、上記にも例をあげたさまざまな工夫により進化させていくのがよいのではないかと著者自身は考えている。なお、渋滞問題に対する、自由な選択を担保した数量規制の仕組みも提案されている（3.1.3 節を参照）。

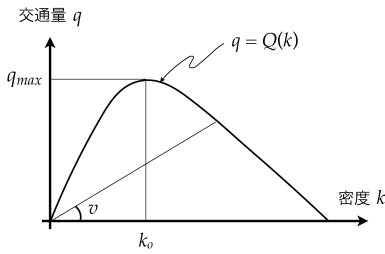


図1 交通量と密度に関する基本図

2. 交通渋滞の発生・進展メカニズム

2.1 単路の場合

2.1.1 交通渋滞とは何か？

前置きが長くなったが、本題の渋滞問題に話を移そう。道路上の交通を「流れ」としてマクロに捉えるための状態量は、交通量 q [台/時]、密度 k [台/km]、(空間)平均速度 v [km/時] である。その定義より、 $q = kv$ が成り立ち、この関係を基本恒等式と呼ぶ。

これに対して、(交通流は時空間的に変動するものがあるが) ほぼ同じ道路・交通条件下で見出せる規則性を、(交通)基本図 (FD: Fundamental Diagram) と呼ぶ。最も基本的な(相関)関係は、「密度が増加すると平均速度が減少する」というものであり、 k に関する単調減少関数 $V(\cdot)$ によって、 $v = V(k)$ と表される。これは、個々の車両の視点では「速度が高いほど車間距離を大きくとる」あるいはその逆の関係に対応しており、自然な関係であることが理解できるであろう。

ただし、重要な交通流特性を表し、交通流解析で最もよく用いられるのは、交通量と密度に関する基本図である： $q = Q(k) \equiv kV(k)$ 。その関係は単調ではなく、図1に示すように、一つのピークをもつ凹型となるのが典型的である。このピーク q_{max} は単位時間当たりにその道路で捌くことができる最大交通量「交通容量」を表し、容量に対応する密度 k_0 を臨界密度と呼ぶ。また、この臨界密度により交通状態が二つの“相”に識別される。すなわち、一般に、ある交通量 q に対して二つの密度 k が対応し (2 価関数)、 $k \leq k_0$ となる密度が低い領域を「自由流領域」、 $k \geq k_0$ となる領域を「渋滞流領域」と呼ぶ。

原点から基本図の各点 (k, q) への傾きが平均速度であるから、自由流領域は交通量 (あるいは密度) の増加にともなう速度の低下が起こる領域であることがわかる。一方、渋滞流領域は、「交通量の減少にともなう速度の低下 (!?)」よりは、速度の低下にともなう交通量の減少と解釈するのが直感には合う。どうも因

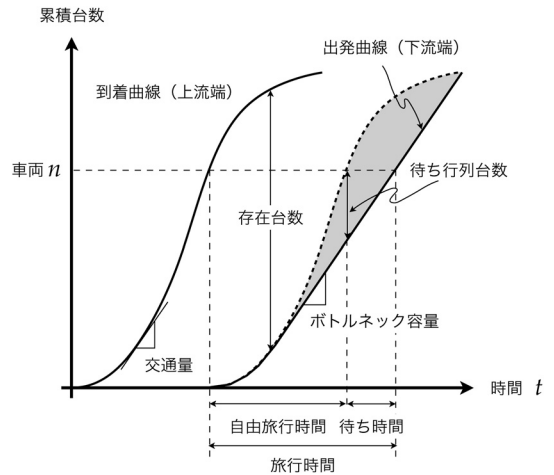


図2 累積図による渋滞解析

果が逆転しているようである。これを理解するためには、「渋滞」とは何かを述べる必要がある。当然これは誤った解釈であり、その正しい解釈を得るためには交通工学的に渋滞とは以下のように定義される現象である：ある道路区間を通過しようとする単位時間当たりの車の台数 (交通需要) がその区間の交通容量を超過し、その超過地点の上流に待ち行列として滞留する現象。この超過地点は周辺より相対的に容量が低い地点であり、ボトルネックと呼ばれる。高速道路では、サグ (勾配が下りから上りへと変化する地点) やトンネル、分合流、一般道では交差点が主なボトルネックである。つまり、上述の渋滞流領域の現象は、基本図の対象地点下流のボトルネックを起点とする待ち行列が当該地点に延伸し、交通量・速度がともに下流交通に“制約”される現象を表している。以上、自由流の交通量は上流 (需要) の影響から決まり、渋滞流は下流の制約から決まる、というように実際に因果の向きが逆転しているのである。

2.1.2 待ち行列法による交通渋滞の解析

以上のように、渋滞現象の全容を捉えようとすれば、時空間ダイナミクスを考える必要がある。しかし、単路を対象とするのであれば、時間のみを考えればほぼ事足りる。その解析法は、OR 分野では馴染みの深い「待ち行列」として交通渋滞を捉えるものである。なお、待ち行列と聞いて確率解析を想像する方も多と思われるが、到着率がサービス率より大きくトレンドで大勢が決まる (時間スケールの) 渋滞現象分析では、決定論的な取り扱いで十分である。

図2は、この交通渋滞解析法を図示したものである。実線は、ある道路断面を通過する車両の累積台数の時

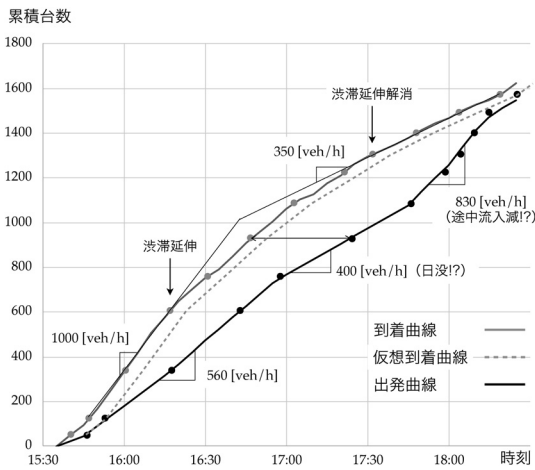


図3 J1リーグ試合終了後の渋滞の累積図

間推移（累積曲線）を表したものであり、このような図を「累積図」と呼ぶ[2]。累積曲線は、本来、車両が通過するごとに1増加するという階段関数となるが、ここではそれらを粗視化して流体として近似している。また特に、対象道路区間の上流端の累積曲線を到着曲線、下流端のそれを出発曲線、そして、到着曲線を自由旅行時間（交通量がゼロのときの旅行時間）分水平方向にシフトさせた点線を“仮想”到着曲線と呼ぶ。

この図には交通渋滞に関わる重要な情報がほぼすべて含まれるといっても過言ではない。まず、各累積曲線の傾きは単位時間当たりその地点を通過した台数であるので、交通量に他ならない。また、上下流端の累積曲線のある時点での垂直方向の差は、その区間に到着したが出発していない存在台数であり、区間長で除せば密度になる。また区間内で、First-In-First-Out (FIFO)、つまり、追い越しがないとすれば（渋滞中はほぼ成立する）、二つの累積曲線の高さ n の水平方向の差は n 番目に区間に到着した車両の旅行時間を表す。

次に、仮想到着曲線と出発曲線の関係を考えよう。この二つの曲線は仮に渋滞が全くなく遅れが生じなければ一致する。しかし、仮想到着曲線の傾きが区間内のボトルネック容量以上となれば渋滞が発生する。そして、出発曲線の傾きは容量に抑えられ、仮想到着曲線と乖離することになる。したがって、図2の灰色の面積が渋滞による総遅れ時間を表す。水平方向の差は各車両の遅れ時間、垂直方向の差は待ち行列台数である。

2.1.3 実際の累積図と渋滞の特徴

図3は、2019年11月9日（土）14時から県立カシマサッカースタジアムで行われたJ1リーグ試合終了前後の鹿島バイパス（鹿島消防署南交差点→洲崎

交差点間）で、著者の監修の下観測された実際の累積図である[3]。これは、上下流端で累積交通量をカウントし、かつ、計12回およそ15分弱間隔で渋滞中を走行し実測した旅行時間（図中の点とその流入/流出時刻を表す）を用いて修正したものである。

この図より、渋滞が（仮想到着/出発曲線が乖離する）16時前から始まり18時過ぎまで2時間半ほど続いたことがわかる。また、通常6分ほどの旅行時間が最大1時間弱（＝到着/出発の最大水平距離）まで伸びていることも見てとれる。時間の推移に沿ってより詳しく見ていくと、まず、渋滞開始時にはボトルネック容量（560 [台/時]）の2倍弱の到着交通量（1,000 [台/時]）が発生し、渋滞が急激に悪化している。しばらくすると、到着曲線の傾きが緩くなるが、これは需要が実際に減ったことを表しているわけではなく、渋滞が上流端まで延伸し「観測交通量＝ボトルネック容量」となっていることを表す（実際、到着/出発曲線の傾きが時間のズレはあるがほぼ一致する）。さらに時間が経つと、17時半には傾きが350 [台/時]まで減少しており、渋滞が上流端のよりも下流側に縮退している。

以上のように、渋滞が延伸している最中は実際の交通需要はわからないが、図中の細かい実線のように補間すると、17時頃には需要が減り始めていると見積もることができる。これにより、到着交通量が容量を超過していた時間（需要超過時間）は渋滞継続時間の半分以下の1時間程度であることがわかる。この「渋滞継続時間 >> 需要超過時間」という関係は渋滞現象の一つの重要な特徴であり、多くの場合に成り立つ。また、渋滞の本質は時々刻々の超過需要の“時間累積”であり、それほど大きな超過需要がなくとも時間とともに大渋滞になりうる。今回は大規模イベント後の渋滞であるので容量に対して倍近い到着交通量が観測されたが、日常の渋滞の多くは時々刻々の需要超過が数%から十数%であると言われている[4]。さらに、最も渋滞が長いときに交通需要がピークにあると錯覚しがちであるが、最大渋滞長が実現するのは到着交通量が容量を下回る時刻であり、それより（ずっと）前に需要のピークはある。

2.1.4 なぜ需要は時間的に集中するのか？

そもそも、なぜ交通需要は時間的に集中するのだろうか。それは、スケジュール制約があるためである。たとえば、通勤やサッカーの試合に向かう場合には、渋滞による追加遅れを予想したうえで、なるべく勤務/試合開始時刻に近い時間に目的地に到着しようと考えてるであろう。一方、退勤や試合後には、退勤/試合終了

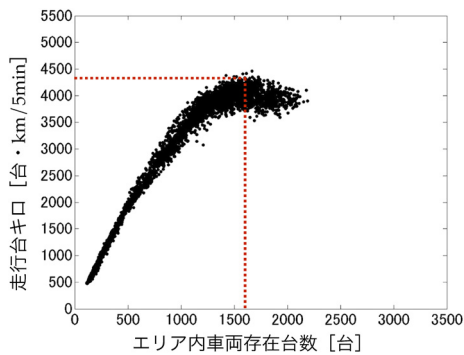


図4 那覇中心部の Macroscopic Fundamental Diagram

時刻に近い時間に現在地を出発しようとする。そうすると、スケジュールからの乖離が小さくなる時間帯が最も渋滞が激しくなる、と予想される。

図3の試合後の例で言えば、明らかに試合直後にスムーズに帰宅できるのがベストである。実際には、試合終了直前に渋滞が始まり、試合（および選手挨拶）の終わった16時からおよそ30分後に待ち行列が最大となっている。スタジアムから駐車場、そこからの渋滞末尾への移動も考えると、上述の予想は当たらずとも遠からず、ということであろうか。いずれにしても、このような出発時刻にスケジュール制約がある状況は、需要や渋滞の動きが比較的に予想しやすい。

一方、目的地到着時刻にスケジュール制約がある状況では、渋滞規模によって渋滞の開始やピーク時間が決まるが、どの程度の渋滞規模になるかは、そもそもの需要規模や個人がどれだけスケジュール制約を厳密に考えているか（渋滞遅れとスケジュール乖離とのトレードオフ）、に依存する。したがって、日々繰り返し行われている通勤は別として、個人個人の経験値がより少ないと考えるられる観光やイベント交通では、需要や渋滞の予測の難易度がより増すであろう。

2.2 ネットワークの場合

2.2.1 MFDとネットワーク交通容量

ネットワークを考えたとしても、渋滞現象を考える以上、上記で見てきた時間ダイナミクスが最重要であることに変わりはない。しかし、単路と異なり、ボトルネック容量という、固定的に考えてよいサービス供給量があるわけではなく、供給量がネットワーク上の空間的な交通流パターンに依存するためより複雑である。

道路ネットワークの処理性能としてはさまざまな定義が考えられるが、近年道路交通分野では、あるエリアを対象とし、その中のネットワークで「単位時間当たりに移動を完了する量」（以下「スループット」と呼

ぶ）を指標とすることが多い。図4は、那覇中心エリア内の主要道路ネットワークを対象として、実際に、スループットの代替性指標である走行台キロとエリア内の車両存在台数との関係を表した一例である[5]。これは単路における基本図をネットワークレベルに拡張したものであり、「MFD: Macroscopic Fundamental Diagram」と呼ばれる。MFDのアイディアは、Daganzo[6]によって提案されたが、単路と同様に凹型のMFDが最初に提示されたときは新鮮な驚きがあった。

MFDが凹型であることは次のことを意味する。車両存在台数が比較的に少ない領域では台数の増加とともに走行台キロは増える。言いかえると、交通需要がほぼ遅れを被ることなく移動を完了できる領域であり単路の自由流とはほぼ同じである。しかし、徐々に走行台キロの伸びが鈍くなり、あるところでピークを迎える（図中の点線付近）。この走行台キロのピークがネットワークの交通容量と解釈でき、空間的なネットワーク交通流パターンにより決まると考えられる。

さらに、それ以上に車両存在台数を増加させると、処理量が低下してくる。この低下メカニズムは、単路とは異なり、異なる終点をもつ交通同士の種類2の相互作用によるものである[7]。まず一つ目は、異なる終点をもつ交通の一方が他方をブロックする現象である。たとえば、右折専用車線が溢れて、直進車線に待ち行列が延伸する状況がイメージしやすい。このような状況は単独ではささやかなものであるが、車両の密度が高いエリアで連鎖的に発生すると、最終的に全く交通が流れなくなる状態が生じうる。これが東日本大震災時に東京で生じた「グリッドロック」状態である。もう一つの要因が通過交通である。たとえば、目的地が集中するエリア（たとえば都心部）において、そこを目的地としない（代替経路のある）通過交通が容量に占める割合が増加すると、そのエリアで移動を完了する量を減らす要因となる。その典型例は、渋滞がバイパスにまで延伸し、その機能が失われた状況である。

2.2.2 ネットワーク交通流の予測困難性

以上のMFDは、ネットワーク交通を広域に渡って集計化してしまう「粗っぽいアイディア」に見えるかもしれない。なぜこのような考えが必要とされるのか？この背景には、混雑したネットワーク（MFDの渋滞領域）における動的交通流の予測困難性がある。つまり、従来の「予測 → 制御」パラダイムでなく、詳細な予測に頼らない頑健な制御法の必要性が認識され、MFDの考えにつながっている。

予測困難性の問題を図5を用いて簡単に説明しよう

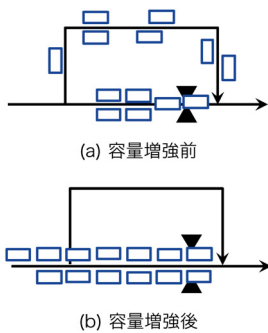


図5 動的な容量増強パラドクス

[8]. この例では、左から右へ移動する需要が一定の流量で到着し、二つの経路のうち一つを選ぶ状態を考える。人々が旅行時間の短い経路を選ぶとすれば、距離の短い「下の経路」から使われ始める。そして、ボトルネック（黒三角印）を起点とした待ち行列がある程度溜まり、距離の長い「上の経路」と同程度の旅行時間になった時点で、両経路が使われるであろう。この状態を表すのが、図5(a)である。図5(b)は下経路の容量を増強した結果として起こりうる改悪した状態を表す（「容量増強のパラドクス」とも呼ばれる）。つまり、両経路の旅行時間を同程度にするためにはより多くの待ち行列を下経路で作る必要があるが、そうした状態になる前に分岐点まで渋滞が延伸してしまう。その結果、上経路が使われないばかりか、“ネットワーク容量”の減少により、待ち行列が伸び続けるのである。要するに、予測困難性の問題とは、渋滞の延伸によってネットワーク流パターンや容量が急激に変わりうる、ということの意味している。どこで渋滞が始まるかは予測できたとしても、渋滞がどう時空間的に進展するかを予測するのはかなり難しい問題ということである。

3. 交通渋滞マネジメント

3.1 基本的な考え方と代表的なスキーム

以上で問題とする現象を見てきたわけであるが、それが理解できれば、対策の意図を理解するのはさほど難しくない。しかも、それは1.2節において、既に述べていることも多い。したがってここでは、各種対策が道路交通においてどのように具体化されるのか（代表的なスキーム）を中心に見ていこう。

3.1.1 容量拡大：決定的なボトルネックの解消

先でも述べたように、誘発需要の影響があるため、容量拡大のみで渋滞問題の根本的な解決を図ることは難しい。とはいえ、決定的なボトルネックを解消していくことは重要である。インフラ整備を必要としない交

通運用による容量の改善としては、交通信号制御の改善や路上駐車排除、高速道路における柔軟な車線運用（動的な合流比率や車線数の変更）などが挙げられる。（他の対策でも同様であるが）容量拡大が特に効果的なタイミングは、渋滞発生直後である。つまり、容量拡大による遅れ減少効果はその実施タイミングだけでなく、渋滞解消まで持続するのである（図2を参照）。

3.1.2 需要誘導：交通需要マネジメント

交通需要を時間的・空間的（あるいは別の交通手段）に分散させる方法を交通需要マネジメント（TDM: Transportation Demand Management）と呼ぶ。呼びかけや混雑情報の提供、時差出勤やフレックスタイム、課金などさまざまなものが含まれる。

呼びかけ（+ 最悪シナリオ予想）はときとして大きな効果を生む。大阪G20の際に「交通量50%削減」が“自主的な”協力により達成されたのは驚きであり、外出“自粛”が大きな成果をあげたのは記憶に新しい。

混雑情報の提供は主に需要の空間的な分散に用いられるが、その効果は限定となる可能性が高い。それは、渋滞は需要の時間集積が主要因であり、時間分散効果の方が一般的に効果が大きいためである。しかし、事故や災害、イベントなど利用者の経験・知識が期待できない突発渋滞においては、非効率な道路ネットワーク利用の迅速な是正に混雑情報提供が重要である。

時差出勤やフレックスタイムは、先に述べたスケジュール制約を緩和する方法であり、実施されれば需要の時間分散効果は高いであろう（時間集積の経済性とのトレードオフ関係にあることには注意）。

最後に課金についてであるが、時々刻々の課金額の変更が可能であれば、需要の時間分散を促し、渋滞（負の外部性）を完全に解消することは理論上可能である。スケジュールからの乖離が小さくなる時間帯が最も渋滞が激しくなるとの先の考察から考えれば、その時間帯に課金額を最も高くするのが原則である。ただし、最適/適切な課金額を設定するには、課金なしの場合に生じるであろう渋滞の規模やピーク等の予測が必要となる上、正確な需要情報の把握や混雑した道路ネットワークの渋滞予測は難しいという、難点もある。

3.1.3 需要の数量規制：単純割当とその高度化

1.2節でも述べたように、数量規制の大きな利点は、その実効性の高さである。高速道路のランプ閉鎖/制御はその典型例であり、たとえばランプ下流にあるボトルネックへの需要の到着を容量以下に抑制することで、予測に頼ることなく渋滞発生を回避することができる。これをネットワークに拡張すれば、あるエリア

に流入する交通量を MFD の容量（あるいはそれに対応する車両台数）以下に抑制する，という発想になるであろう。これらは渋滞地点を「高速道路から一般道へ」「エリア内から境界へ」変えただけのようにも見えるが，エリアの交通処理性能は一定以上混雑すると低下してしまうし，通常のボトルネックもいったん渋滞すると捌け交通量が低下する“Capacity Drop”という現象が一般に発生する。“Less is More”ということである。

しかし，境界における渋滞が一定以上になればそれ自体が問題となってくるであろう。この問題を解決するアイデアがスーパーの例でも述べた予約制の導入である。これによりその地点でわざわざ“順番待ち”をする必要がなくなるわけである（他の地点ではその可能性は残ってしまうのが難点である）。

さらに，この考え方を究極まで追求したのが著者も含めたグループで提案・研究を進めている「ボトルネック通行権取引制度」という近未来型の TDM スキームである [9]。これは，渋滞が頻発するボトルネックを対象として，a) その地点を特定の時刻のみに通行できる権利「ボトルネック通行権」を道路管理者が設定・発行し，b) その時刻別の通行権を自由に売買取引できる市場「通行権取引市場」を創設する，という制度である。この制度下では，通行権の発行枚数をそのボトルネック容量以下に抑えれば，原理的に渋滞は発生しない。また，取引市場の導入により，自由な選択の制限（早い者勝ち等の単純割当）の弊害を回避している。さらに，通行権価格は市場取引の結果として決まるため，詳細な需要情報を把握する必要はなく，一定の条件下では効率的な状態が達成できることがわかってきている。

こうしたアイデアは，ひと昔前であれば非現実的であっただろうが，現在・将来にわたる技術の発展を想定すれば，十分実現可能であると考えられる。受容性や市場の具体的なメカニズムの設計 [10] などまだまだ課題は多いが，このような（ネットワーク交通流の特性を考慮した）新たな仕組みと最先端の技術がセットで導入されてこそ，道路交通システムを飛躍的に向上させることができると考えられる。

3.2 大規模イベントの交通渋滞マネジメント

最後に，大規模イベントの渋滞マネジメントとして，東京オリンピック・パラリンピック（以降，オリパラ）で実施が予定されている道路交通マネジメント [11] の考え方を，ここまでの話と関連づけて（紙面の制約の都合上）簡単に見ていく。今回のオリパラは，主要区

間である首都高速道路（首都高）の片側 2 車線のうち 1 車線を関係者専用レーンとするのが経済活動との両立の観点から難しく，一般車両との混用で大会関係者の輸送を行うことが特徴である。このような不利な条件の中でどのように定時性を“確実に”確保するかが重要となるが，その要となるのが先にも述べたランプ制御（正確には本線料金所からの流入も制御する）である。

しかし，首都高が円滑に走れるとなれば，ランプ制御により時々刻々の需要が抑えられたとしても“総”需要が減るとは限らない（ランプで待ってでも利用する）。そうすれば，ランプ渋滞による一般道への影響も懸念される。そのために，導入されることになったのがロードプライシングである。日中一律 1,000 円（予定）という課金額の設定上（深夜には割引も行う），ピーク需要をどこまで減らせるかは未知数であるが，総量としては確実に首都高の需要を減らすことができるであろう。いずれにしても，混雑の緩和のために料金を調整することはわが国においては画期的なことである。

なお，オリパラほどの大規模イベントとなると非常に大きな追加需要が発生するため，最終的な交通マネジメントの困難さは，通常の交通需要をどこまで減らせるかに大きく左右される。その意味で，（奇しくも定着しつつある）テレワークの推進等の呼びかけベースの TDM も当然ながら重要である。

4. おわりに

本稿では，道路ネットワークにおける渋滞現象の主要な特性を見たうえで，渋滞マネジメントについて解説した。本稿では，数理的な説明は行わなかったが，ここでの議論には交通流理論や動的交通ネットワーク均衡理論といった背景理論がある。その詳細については拙稿 [12, 13] やその中の文献を参照されたい。

参考文献

- [1] 伊藤大介（編），『追想 朝永振一郎』，中央公論社，1981。
- [2] G. F. Newell, *Applications of Queueing Theory*, Springer, 1982。
- [3] 中田浩二，『MaaS 時代のサッカースタジアムと地域活性化』，筑波大学システム情報工学研究科社会学専攻修士論文，2020。
- [4] 大口敬（編），『「交通渋滞」徹底解剖』，交通工学研究会，2005。
- [5] 王鵬飛，赤松隆，和田健太郎，“Macroscopic Fundamental Diagram における渋滞領域発生メカニズムに関する実証研究。”土木計画学研究発表会・講演集，51, p. 156, 2015。
- [6] C. F. Daganzo, “Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches,” *Transportation Research Part B*, 41, pp. 49–62, 2007。

- [7] K. Wada, K. Satsukawa, M. Smith and T. Akamatsu, "Network throughput under dynamic user equilibrium: Queue-spillback, paradox and traffic control," *Transportation Research Part B*, **126**, pp. 391–413, 2019.
- [8] C. F. Daganzo, "Queue spillovers in transportation networks with route choice," *Transportation Science*, **32**, pp. 3–11, 1998.
- [9] T. Akamatsu and K. Wada, "Tradable network permits: A new scheme for the most efficient use of network capacity," *Transportation Research Part C*, **79**, pp. 178–195, 2017.
- [10] T. Akamatsu and K. Wada, "A hybrid implementation mechanism of tradable network permits system which obviates path enumeration: An auction mechanism with day-to-day capacity control," *Transportation Research Part E*, **60**, pp. 94–112, 2013.
- [11] 神田昌幸, 荒井俊之, "東京 2020 大会の取り組み—大会輸送を成功に導く先進的な交通マネジメント—," 土木学会誌, **105**, pp. 48–55, 2020.
- [12] 赤松隆, 和田健太郎, "動的交通ネットワーク流問題," 第 26 回 RAMP シンポジウム論文集, pp. 31–46, 2014.
- [13] 和田健太郎, "交通ネットワーク流の安定性と制御," 計測と制御, **55**, pp. 368–375, 2016.