

第 5 章

交通工学

交通工学（traffic engineering）は、安全で円滑かつ持続可能な人および物資の移動を実現することを目的とした科学技術分野の学問である。交通工学は、内燃機関大衆車が普及した 20 世紀初頭に興り、第 2 次世界大戦以降の世界的なモータリゼーションの進展に伴い発展した。その当初の範疇は、道路上の自動車交通が引き起こす交通混雑や交通事故を軽減するために必要な道路の計画、設計、運用方法であった。現在は、自動車だけでなく歩行者、自転車や公共交通（バス、路面電車、LRT など）のほか、すべての道路利用者を対象として、安全、円滑だけでなく交通公害（環境負荷）などの観点も含めた持続可能性などを考慮して広範な交通問題に対応している。本章では、交通工学の基礎として、複数の道路利用者の移動によって生じる流れ（交通流）を科学的に解析・記述する方法や、道路交通の安全、円滑を実現するための技術を概観する。

5.1 道路交通の基礎

5.1.1 交通流の記述

まず、交通の流れを記述するための変数について定義していく。自動車交通の流れについて、図 5.1 に表す時間距離図で表現する。これは、横軸に時間、縦軸に距離をとり、個々の車両の軌跡を表したものである。ここで、ある地点を車両の先頭が通過してから、次の車両の先頭が通過するまでの時間間隔を車頭時間、ある地点を車両の後端部が通過してから次の車両の先頭が通過するまでの時間を車間時間と呼ぶ。また、ある時刻において、前の車両の先頭部から後続車両の先頭部までの距

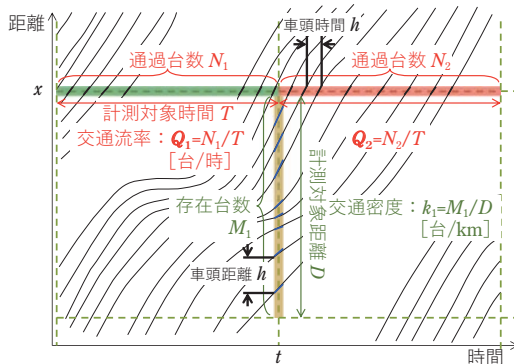


図 5.1 時間距離図.

離を車頭距離，前の車両の後端部から後続車両の先頭部までの距離を車間距離と呼ぶ。

次に，この時間距離図を用いて，交通の流れを表す交通量，交通密度，速度を定義する．1時間あるいはそれよりも短い時間を集計単位として，ある地点を通過した車両数，あるいはこれを単位時間当たりの車両数にしたものを交通流率〔台/時〕と呼ぶ（一般に交通量とも呼ばれる）．交通密度は，1km あるいはそれよりも短い道路延長方向の距離を集計単位として，ある時点に存在する車両数を単位距離当たりの車両数に換算したもの〔台/km〕である．速度〔km/時〕は，異なる速度を持つ個々の車両からなる交通の流れを代表する速度である．この代表値には，「空間平均速度」を用いる．空間平均速度とは，ある時刻に単位区間内に存在する車両の速度の平均値として定義されるが，これを直接観測することは困難である．交通流中の車両速度や車頭距離が変化しない安定した状態（定常状態）であれば，空間平均速度はある地点で観測された車両速度の調和平均として推定することができる。

5.1.2 交通流の基礎

交通量 Q ，交通密度 K ，（空間平均）速度 V の間には，

$$Q = KV \quad (\text{式 1})$$

という関係が成立する．このとき，地点で観測される各車両の速度値を普通に（算術）平均したのでは，（式 1）は一般には成立しない．（式 1）は物理学の基本法則「質量保存則」に相当し，交通に限らず「流れ一般」に対して普遍的に成立する．

図 5.2 は，道路に設置された車両感知器で 5 分間ごとに計測・集計された交通量

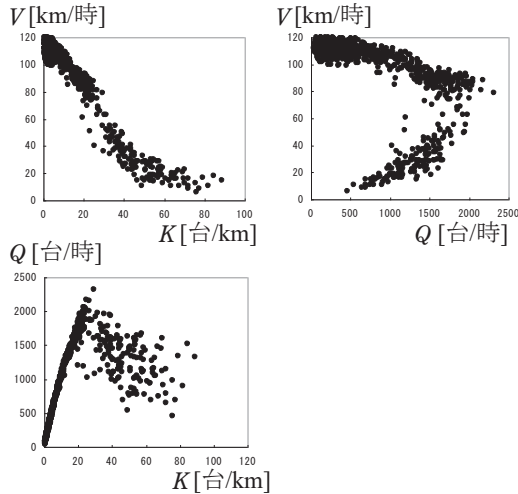


図 5.2 交通量・交通密度・速度関係の実測例.

と速度から(式1)を用いて交通密度を計算し、この3変数の相互関係を示したものである。交通密度がゼロに近づくと速度が最大値(自由速度)をとり、速度がゼロに近づくと交通密度が最大値(飽和密度)をとる。両者はおおよそ単調減少の関係にある。また、交通量が極大値となる交通密度(臨界密度)と速度(臨界速度)が存在する。臨界密度より高い密度(臨界速度より低い速度)の状態が交通渋滞状態であり、逆に臨界密度より低い密度(臨界速度より高い速度)の状態は渋滞していない交通状態を表す。臨界密度周辺の状態を臨界流状態と呼ぶこともある。

図5.2のように、一般的に交通密度と速度の間には単調減少の関係がある。このことと(式1)の関係を合わせると、交通量-交通密度(交通量-速度)関係が2次関数で、交通量の極大値の存在が導かれる。これが道路交通において、「最大交通量(交通容量)が存在する」ことの理論的根拠である。

ここまで、車両が車線に従って一方向に進行する流れについて扱ってきたが、歩行者交通では車線の概念が存在せず、人はさまざまな方向に移動することができる。また、開発途上国などでは車両が車線に従わずに走行し、車線数よりも多い数の車両が横方向に並んで走る場合も見られる。このような車線に従わない交通でも、単路や通路などのまっすぐな細長い形状の区間を一方向に移動し、かつ定常的な(速度・密度の偏りのない)流れについては、交通量のある断面を単位時間・単位幅員当たりには通過する車両/歩行者数として、交通密度を区間内の単位面積当たりの車

両/歩行者数として定義することで、上記と同様に交通流を扱うことができる。

歩行者交通で、オープンスペースのように四方八方に人が移動できる場所や曲がり角では、歩行者が特定の地点に集中し、空間を適切な単位で区切ることが難しい場合がある。このときは、隣接する人との位置関係から個々人が実際に占有する空間の面積を求める手法などが用いられる。

5.1.3 交通渋滞

道路の交通容量は、車線数、勾配の変化やトンネル等での明暗の変化、交通信号による通行時間の制限などさまざまな要因によって決まるため、道路区間ごとに交通容量は異なる。前後区間と比較して相対的に交通容量の低い場所を、交通容量上のボトルネック（bottleneck：隘路）と呼ぶ。

交通渋滞は、交通工学上、「ボトルネックの交通容量を超える交通需要が流入した場合に、ボトルネックを先頭にしてその上流側に車両列が滞留する状態」と定義される。また、滞留する車両列自体を交通渋滞と呼ぶこともある。日本の高速道路では、単路部のサグ部（縦断勾配が下り方向から上り方向へ変化する区間）やトンネル入り口が主なボトルネック^[1,2]で、全渋滞箇所の約8割を占めるが、欧米では分合流部や織込み区間が主要なボトルネックである。一般道では、交通量の多い信号制御された重要交差点、大規模ショッピングセンターの駐車場待ち行列や路上駐停車の存在する区間がボトルネックとなりやすい。このように特定の道路上の地点をボトルネックとして発生する交通集中による渋滞のほか、交通事故により一部の車線が閉塞して一時的にボトルネックとなり発生する突発的な交通渋滞、道路工事による車線閉塞を原因とする交通渋滞がある。

上述の交通渋滞の定義に基づくと、単に走行速度の閾値で交通渋滞を判定することはできない。日本の都市間高速道路では時速40km以下、首都高速道路では時速20km以下を交通渋滞の判断基準としているが、これはあくまで実務的・便宜的な基準である。

ボトルネック交通容量を超過した交通需要が到着すると、ボトルネックの上流に交通渋滞が形成される。渋滞の末尾では、交通流は上流の非渋滞流から下流側の渋滞流へと不連続に遷移し、渋滞の末尾の位置はある速度で上流へ延伸する。渋滞末尾の延伸速度は、衝撃波（ショックウェーブ）理論^[3]を用いて計算できる。図5.2の関係を図5.3のように単純化し、交通量-交通密度関係を模式的に三角形の関数形で表すことができると仮定する。交通容量 C_b のボトルネック（図5.4のBN地点）

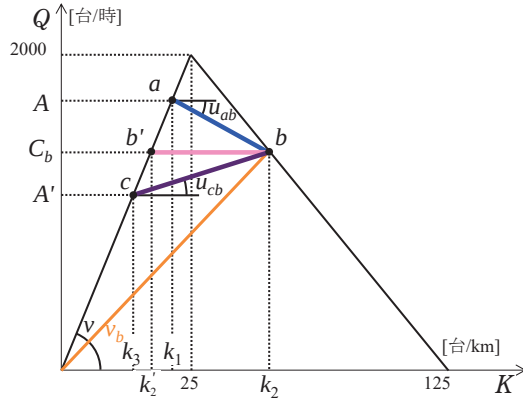


図 5.3 交通量-交通密度関係モデル.

に流入する交通需要 A の交通状態は、図 5.3 の点 a (交通量 A , 交通密度 k_1 , 速度 v) で表される。ここで $A > C_b$ の場合、ボトルネック上流に交通渋滞が発生し、その状態は図 5.3 の点 b (交通量 C_b , 交通密度 k_2 , 速度 v_b) で表され、その末尾は上流へと移動する。この末尾の不連続面 (衝撃波) の速度 u_{ab} は (式 2) で与えられる。

$$u_{ab} = (A - C_b) / (k_1 - k_2) \quad (\text{式 2})$$

(式 2) は図 5.3 の点 a と点 b を結ぶ傾きを意味し、図中の u_{ab} は負の傾きなので、交通渋滞の末尾は上流に移動する。図 5.4 では、非渋滞流の状態 a と渋滞流の状態 b の境界が速度 u_{cb} で移動する。ここで、時刻 T_1 に交通需要が図 5.3 の点 c (交通量 A' , 交通密度 k_3 , 速度 v) に変化し、 $A' < C_b$ が成り立つと、点 b と点 c を結ぶ傾き u_{bc} は正なので、 b と c の境界である交通渋滞の末尾は縮退し、時刻 T_2 に消滅する。

たとえば、ボトルネック交通容量 $C_b = 1600$ [台/時] に交通需要 $A = 1800$ [台/時] が到着すると、 $u_{ab} = (1800 - 1600) / (22.5 - 50) \div -7$ [km/時] で交通渋滞が延伸し、 $T_1 = 2$ 時間なら、その交通渋滞長 L の最大値は約 14km となる。ここで交通需要が低下して $A' = 1500$ [台/時] になると、 $u_{cb} = (1500 - 1600) / (18.75 - 50) = 3.2$ [km/時] で、時刻 T_2 は $T_1 + L/u_{cb} \div 6$ 時間 30 分となる。

一般に、交通需要の増大により交通渋滞が生じてても、ボトルネック交通容量に対する交通需要の超過割合は高々十数% (本計算例では、 $1800/1600 = 1.125$ なので超過割合は 12.5%) であること、交通需要が超過する時間 (同 2 時間) より交通渋滞の継続時間 (同 6.5 時間) はかなり長いことが知られている^[4]。

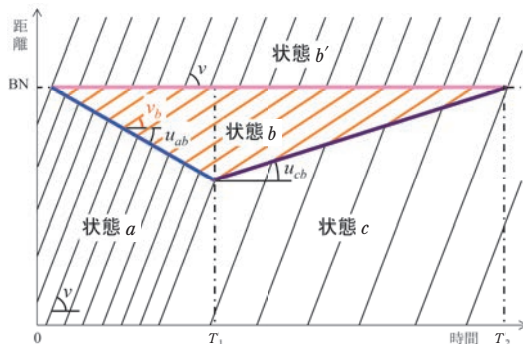


図 5.4 交通渋滞の延伸・縮退の衝撃波。

なお、実際の道路では、一つのボトルネックでの交通容量は一定ではない。日本の高速道路の主なボトルネックであるサグ部やトンネル入り口では、勾配変化等によるわずかな速度擾乱をきっかけに減速波が上流に伝搬し、交通渋滞に移行してしまうが、交通渋滞が発生する交通需要は、通常の単路部交通量の 75～90% の範囲で大きく変動する。これは、運転者の前方車への追従特性に個人差・車両差があるためと考えられている^[5]。

また、いったん交通渋滞状態に移行すると、ボトルネック交通容量はさらに低下し、通常区間の 60% 前後にまで低下する。これは、低速な交通渋滞状態で飽きや疲れが生じて追従挙動が緩慢になることに起因する。上述の例では交通容量を 1600 台/時の一定値としていたが、これを低下させると、交通渋滞の伝搬速度や継続時間が増大してしまうことがわかる。

5.1.4 道路ネットワーク交通流

5.1.3 節で説明したように、交通渋滞はボトルネック周辺で生じる局所的な現象として捉えられ、個別の道路区間ごとにその観測がなされている。その一方で、都市全体の道路ネットワークに着目すると、ボトルネックは各所に点在し、その状態を面的に把握することが求められる。交通渋滞はボトルネックでの交通容量を交通需要が超過するときに生じる非線形的な現象であり、また、いったん渋滞が発生すると、利用者はそれを回避するように経路選択を行うため、ネットワーク上では単一のボトルネックだけに着目すればよいのではなく、面的な評価が必要となる。

集計的に道路ネットワーク全体の交通状態を捉える巨視的な指標として、近年

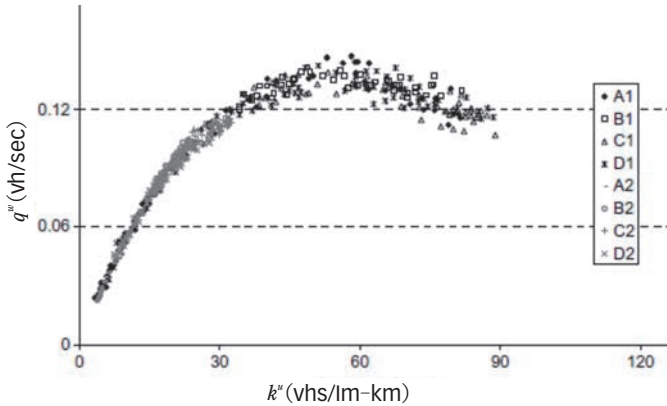


図 5.5 Macroscopic Fundamental Diagram の例^[6]

MFD (Macroscopic Fundamental Diagram) が用いられている。MFD は、道路ネットワーク上の空間平均密度（または車両存在台数）と空間平均交通量（またはトリップ完了流率、スループットとも呼ぶ）との関係を示すもので、図 5.5 にその例を示す。図 5.2 の個別道路区間ごとの交通量-交通密度関係と同様に、ある空間平均密度にてスループットが最大となる状態が見られ、それよりも密度が増大するとスループットが低下する^[6]。スループットが最大のとき、ネットワーク全体としてのパフォーマンスが最大化されていると解釈することができ、それよりも空間平均密度が高くなると、各所に点在する交通渋滞の影響により、全体としての性能が低下する。そのため、MFD は高速道路ネットワーク等の流入制御を行うための評価手法として利用が期待され、MFD の特徴の理解や制御手法に関する研究が近年進められている。

5.2 道路交通の安全

5.2.1 交通事故発生状況

道路交通事故の統計情報のうち、死者数は、日本では通常、警察統計における 24 時間死者数（事故発生後 24 時間以内に死亡した者の数）が用いられる。世界保健機関（WHO）等で一般的に用いられる死者数は、事故発生から 30 日以内に死亡した者の数であり、国際比較を行う場合は 30 日以内死者数が使用される。届け出のない事故は統計データとして記録できないため、軽微な負傷事故など、国や事故

類型によっては統計にて十分な実態把握ができないケースもあることに注意が必要である。

WHO が 2018 年に発行した Global Status Report^[7]によると、世界中の交通事故死者数は年間約 130 万人に上り、5～29 歳の若者の死因の第 1 位となっている。また、年間 2000～5000 万人以上が交通事故により負傷していると推計されている。事故死者数のうち半数以上が、歩行者、自転車、二輪車といった交通弱者であり、中低所得国での交通事故死者が 93%を占める。

日本の交通事故死者数（24 時間死者数）は、1970 年に 1 万 6765 人という最多の死者数を記録した。1992 年に二度目のピークを迎えた後は減少に転じ、2022 年には 2610 人となっている。近年の人口 10 万人当たりの事故死者数（30 日死者数）の推移を国際比較したものが図 5.6 である。アメリカを除き、全体としては減少傾向が見られる。また、交通事故死者数の状態別構成率と年齢別構成率を国際比較したものがそれぞれ図 5.7、図 5.8 である。OECD 諸国と比較すると、日本は歩行中の事故死者、高齢者の死者が非常に多いことが特徴的である。

日本の交通事故について、道路形状別の事故発生状況（2022 年）で見ると、交差点および交差点付近での事故が 57%と半分以上を占める。事故類型では追突事故が約 30%と最も多く、次いで出会い頭が約 25%となる。

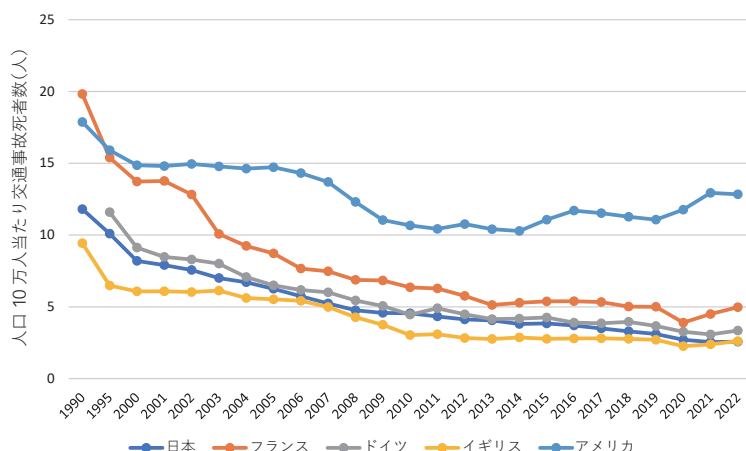
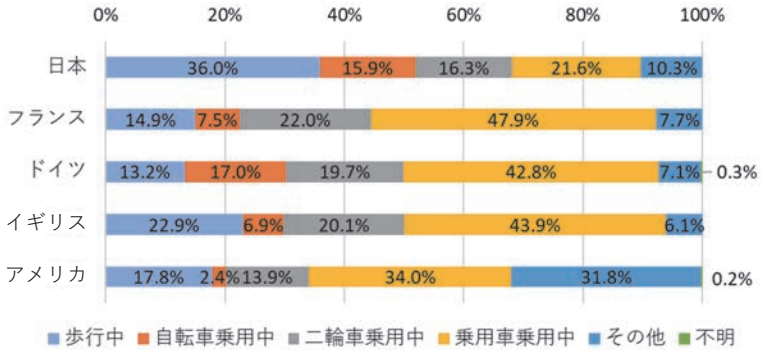
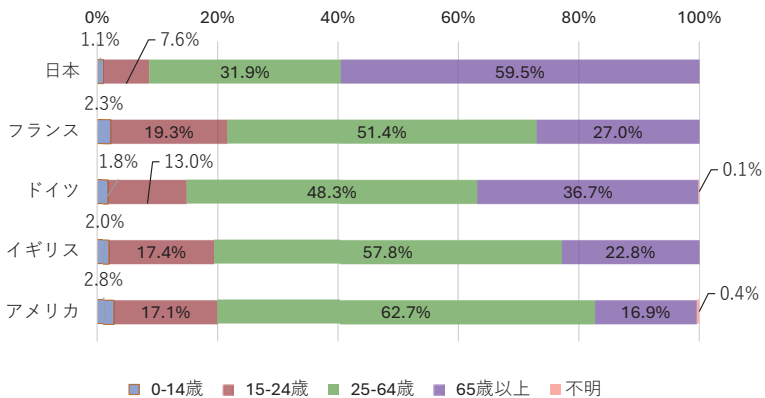


図 5.6 人口 10 万人当たり交通事故死者数の国際比較（IRTAD より）。



2022年のデータ、ただしイギリスは2021年、アメリカは2019年のものを用いた。

図 5.7 交通事故死者数の状態別構成率の国際比較（IRTAD より）。



2022年のデータ、ただしイギリスは2021年、アメリカは2019年のものを用いた。

図 5.8 交通事故死者数の年齢別構成率の国際比較（IRTAD より）。

5.2.2 事故リスクの評価

交通事故対策のためには、交通事故に係るリスクを適切に把握することが必要である。交通事故の発生には、道路の幾何構造や交通状況、土地利用、ドライバー特性などさまざまな要因が影響する。

各種の要因のうち、交通流に着目すると、追突事故では交通量が多いほど事故率（単位交通量当たりの事故発生件数）が高くなることや、逆に車両単独事故の事故率が低下することが示されている^[8]。交通量が多いと、渋滞流の末尾に後続車が衝

突することによる事故の発生が考えられる。また、自由流と渋滞流が時間的・空間的に混在する状況では、各車両の速度差が生じることから、車線変更時の車両相互事故などが発生することが知られている。

また、交通事故は特定の地点で頻繁に発生することが知られている。たとえば幹線道路では、全体の12%の区間に死傷事故の約6割が集中している(2015~2018年)ことから、事故危険箇所に対して集中的に対策することが効果的である。

交通事故分析は、実際に発生した交通事故データを用いた統計的分析が基本ではあるものの、交通事故は希少事象であるため、統計的に有意となるデータを集計するためには数年の集計時間を要する。短時間で対象となる地点の危険度を把握したり、対策の効果を測定するための方法として、代理安全評価指標(Surrogate Safety Measure, SSM)を用いた評価手法がある。SSMは、道路利用者同士の挙動から潜在的な衝突危険度を評価するための指標である。交錯の仕方に応じてさまざまな指標が提示されており、代表的なものには二者の動線が交差するときの交差点の通過時間差(Post Encroachment Time, PET)や、同一方向に進む2台の車両が現在の速度を維持し続けたときに衝突するまでの時間(Time to Collision, TTC)などがある。近年ではETC2.0などのプローブデータ(5.5.1節参照)から、急減速などの突発的行動の発生頻度を抽出して評価することも行われている。

5.3 道路の交通機能と計画・設計・運用

この節では、道路の計画、設計、運用に関する基本事項を概説する。

5.3.1 道路の機能と機能階層型ネットワーク

道路の持つ機能は、交通機能と空間機能に大別される。このうち、交通機能とは、人やものが移動するための機能であり、道路が第一義的に持つものである。交通機能は、さらに、トラフィック機能(通行機能、移動機能などとも呼ばれる)、アクセス機能(沿道出入機能とも呼ばれる)、滞留機能の三つに分類され、また、自動車や歩行者、自転車など、異なる移動手段のそれぞれに対して定義できる。トラフィック機能とは、その道路を円滑に通過できるようにするための機能であり、アクセス機能とは、沿道施設やほかの道路への出入りのしやすさを表す機能、滞留機能とは、自動車が駐車したり歩行者が滞留したりできることを表す機能である。一方、空間機能とは、道路が存在することで生じる空間により派生する機能である。

とくに都市部の道路には、都市の骨格形成や沿道立地の促進などの市街地形成機能、延焼防止などのための防災空間機能、緑化や景観形成、沿道環境保全のための環境空間機能、交通施設やライフライン（上下水道などの供給処理施設）などの収容空間機能などがあるとされている。

道路の第一義的機能である交通機能のうち、トラフィック機能に対して、アクセス機能および滞留機能はトレードオフの関係にある。すなわち、沿道出入や路上での滞留は、通過しようとする利用者にとっては妨げとなるし、その逆もまたしかりである。そのため、一つの道路区間が、トラフィック機能、アクセス機能と滞留機能のすべてを担うことはできず、一つひとつの道路が優先すべき役割を明確に機能分担しながら、道路ネットワーク全体として必要な機能を達成することが効率的とされる。このようにして個別の道路を、通行、アクセス、滞留機能の優先度に応じて分類、すなわち階層化して構成した道路ネットワークを、機能階層型道路ネットワーク（functionally hierarchical road network）という。

道路ネットワークの階層化により、自動車のトラフィック機能が優先される道路では、沿道出入や滞留がなくなり、高速での円滑な移動が実現する。たとえば、高速道路や主要幹線道路などがこれに該当する。逆に、トラフィック機能が制限される道路からは、高速走行したい自動車が排除され、沿道出入や滞留がしやすくなったり、歩行者や自転車などのための空間を形成できたりする。代表的なものとして、都市内のメインストリートや住宅地の中の生活道路・細街路などが該当する。移動には、日常的な短距離移動から都市間を結ぶ長距離移動まで、さまざまなスケールが存在する。機能階層型道路ネットワークは、それに呼応して、長距離移動なら高速道路、短距離移動なら区画道路と、移動スケールに応じた道路階層を利用させることで、全体の効率化を実現するものである（図 5.9 参照）。また、相互に干渉する道路利用者を別の階層に分離することは、交通事故の低減などといった安全性の向上につながると期待される。トラフィック機能優先の道路を住宅地やまちなかの外に配置し、自動車の通過交通を排除することで、騒音や排出ガスなどの低減などといった居住環境・都市環境の改善も期待される。

5.3.2 サービスの質と道路の性能評価

道路の計画、設計、制御を行うに当たっては、各道路区間が担うべき機能を明確にし、それが達成されるようにすることが重要である。言い換えれば、道路の計画、設計、運用の各段階において、道路利用者が主観するサービスの質（Quality of

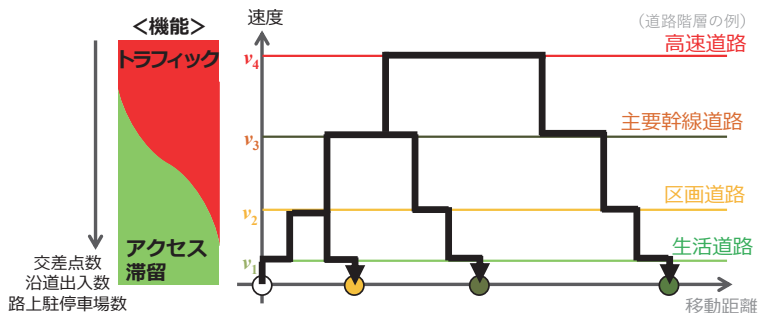


図 5.9 移動スケールと道路の階層の対応関係（概念図）。

Service, QoS) を、各種サービス指標 (service measure) を用いて評価しながら、道路の機能を維持することが重要であるといえる。サービス指標は、たとえば、自動車のトラフィック機能に関しては、空間を占有する車両台数の多さを示す交通密度、信号待ちなどにより通行に余分に要する時間である遅れ時間、遅れ時間を含む区間全体の移動に要する旅行時間や旅行速度、追い越しができずに先行車を追従し続けなければいけない車両の割合などが考えられる。同様に、歩行者のトラフィック機能に関しては、歩行者の混雑度合いや所要時間だけでなく、歩道の有無や自動車・自転車への暴露度合いなどにより認知される安全性や安心感などをサービス指標とすることが考えられる。また、個々の交差点から、交差点を含む道路区間、複数の道路区間からなる路線や経路、地域の道路ネットワーク全体まで、サービス指標の評価対象は、計画・設計・運用の規模と対応してさまざまに設定することが可能である。

このような道路のサービスの評価に関する研究は、モータリゼーションが早くに進展したアメリカで世界に先駆けて発展し、その成果をまとめた指針である Highway Capacity Manual (初版 1950 年～最新第 7 版 2022 年) が定期的な出版されている^[9]。1965 年に出版された第 2 版以降では、サービス指標の定性的な満足度を A～F に分類したサービス水準 (Level of Service, LoS) を用いてサービスの質を評価する概念が打ち出され、対象を自動車から歩行者、自転車、公共交通等のマルチモーダルに広げながら発展を続けている。日本でも、道路の階層に応じてサービスの質に関する性能目標を設定し、目標が達成されているかを評価する「性能照査型」の道路の計画、設計、運用に関する研究と実務展開が進んでいる^[10,11]。従来、これらの研究は自動車交通を主な対象としてきたが、近年は、環境問題や都市の活

性化、健康増進などさまざまな観点から、より持続可能な交通手段に注目が集まる中、歩行者、自転車、公共交通、物流交通などの多様な利用者を考慮することが求められている。

道路において実現されるサービスの質／サービス指標は、5.1 節で概説したように、道路の構造・制御条件だけでなく交通量などの条件に影響される。そのため、同じ道路であっても常に一定ではなく、時々刻々、また日々変動している。このような変動の中から、評価対象とする時間帯の平均値などを代表値として評価に用いることが多いが、このような、日による、または、1 日の中の時間帯による変動に対するサービス指標の確かさを「信頼性 (reliability)」として評価することもある。たとえば、旅行時間信頼性は、道路利用者が日々の移動に要した旅行時間を踏まえつつ、予定到着時刻に間に合うように出発時刻を決めるといった行動に対して非常に重要である。旅行時間信頼性を測る指標として、評価対象時間帯に実現した旅行時間の分布から得られるパーセンタイル値がよく用いられる。さらに、災害発生時などを想定した、道路ネットワークそのものの連結信頼性や冗長性の評価も重要である。

5.3.3 交差部の計画、設計と制御

道路同士が交わる交差部は、道路利用者の安全性、円滑性の両方に影響を及ぼす「交通の要衝」である。道路が平面交差すると、ある道路を直進通過したい交通流は、ほかの交通流によって少なからず阻害され、トラフィック機能が低下する。したがって、交差部の計画、設計、運用に当たっては、道路ネットワークの機能階層性が確保されるよう十分留意する必要がある。

自動車のトラフィック機能が最優先される高速道路は、限られた道路としか接続しないことで交差部を最小とし、接続が必要な箇所は立体交差させることによって交通流が阻害されないようにしている。一般道路であっても、一定レベル以上のトラフィック機能を確保すべき幹線道路などでは、細街路との交差部で必要以上に通行が阻害されないよう図 5.10 に示すように、道路幾何構造上の工夫や交通運用・規制が必要である。こうした考えを、アメリカでは「アクセスマネジメント (Access Management)」と呼んで体系化が試みられている^[12]。また、幹線道路同士の交差部を部分立体交差させることなどにより、交差点での遅れ時間を削減することも重要である。

交差部を平面交差させる場合、方向別・交通手段別の交通需要や周辺環境条件に

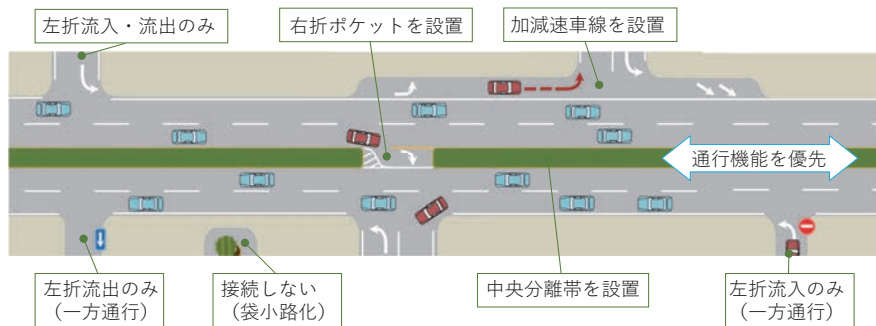


図 5.10 アクセスマネジメントの概念図。

応じて、適切な制御方式を選定する必要がある。信号制御は平面交差点の代表的な制御方式であるが、交通需要が極めて少ない場合においても必ず遅れ時間が発生するため、条件によって必ずしも望ましい制御とは限らない。交通需要条件等に応じて、信号制御、ラウンドアバウト、無信号制御（従道路一時停止）など（図 5.11）のさまざまな制御方式の場合の円滑性（遅れ時間など）や安全性を評価する手法が研究されている。

多くの国において、歩行者の安全性確保は大きな課題であり、横断歩行者に対して譲らない自動車、横断歩道や信号を無視した歩行者の乱横断などが問題となっている場合がある。機能階層型道路ネットワークの構築により、多くの歩行者が見込まれる場所では原則として自動車の通行を最小限に抑えることが重要である。加えて、歩行者の通行が予想される箇所では適切な横断機会を与えることが重要であり、条件に応じて、横断歩道の位置（単路部／交差点）、信号機の有無、構造について工夫する必要がある。

5.3.4 交通信号制御

交通量が比較的多い平面交差点には、信号制御が必要となる。信号交差点では、交差点を通過しようとするさまざまな方向の交通流に対して、通行可能な時間を割り当てることになる。一つの交差点において、（歩行者も含む）ある一組の交通流に対して同時に与えられている通行権、あるいは通行権の割り当てられている時間帯のことを「現示（Phase）」と呼び、現示の組み合わせのことを「現示方式」という。現示方式は、図 5.12（上図）のように交差する道路に交互に青を出すような単純 2 現示制御のほか、右左折分離制御、歩車分離制御など、さまざまな種類が存

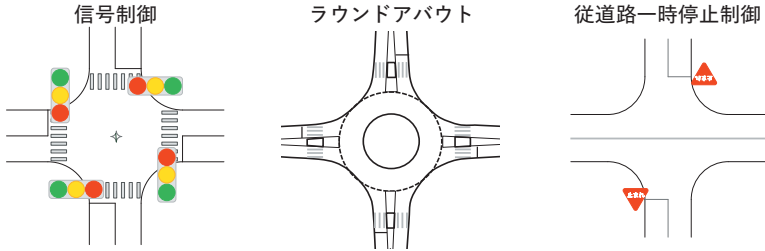


図 5.11 平面交差の制御方式の例.

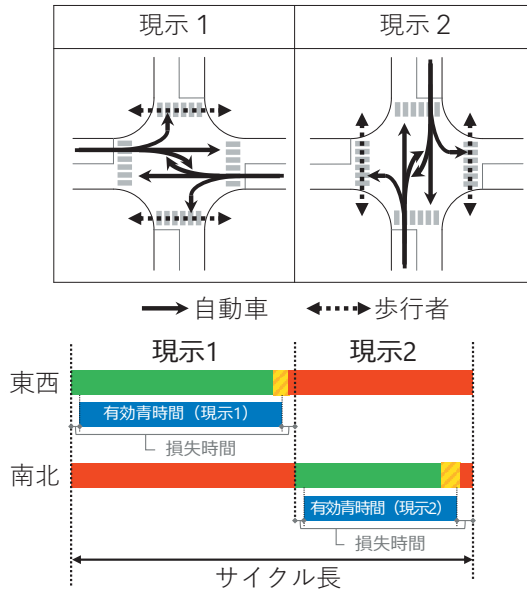


図 5.12 現示方式とサイクル長, 有効青時間の例.

在する.

信号制御には、サイクル長、青時間スプリット、オフセットという三つの信号制御パラメータが用いられることが一般的である。「サイクル長」は、図 5.12 (下図) のように信号表示が一巡するまでの時間である。また、各現示で青信号開始時に十分な待ち行列があれば、一般に最大交通流率(飽和交通流率) [台/時・車線] が実現する。1 回の青信号で通過した台数 [台/車線] を飽和交通流率で割ったものを

「有効青時間」といい、これをサイクル長で除したものが「青時間スプリット」である。さらに、隣接する交差点を相互に連動させた「系統制御」において、隣接交差点間の同一方向の青表示時間の開始時点のずれを「(相対) オフセット」という。

信号交差点では、交通需要がゼロであっても信号制御パラメータに応じて遅れ時間が生じる。また、信号交差点、とくに、交通量の多い道路同士が交差する重要交差点は、一般道における交通容量上のボトルネックとなることが多いが、信号交差点の交通容量はサイクル長と青時間スプリットに左右される。そのため、交差点の幾何構造設計（流入路車線数の確保や専用／混用の車線運用、交通島による動線分離など）と、現示方式・信号制御パラメータを組み合わせた適切な設定が求められる。近年では、平面幾何構造と信号制御の工夫によって右折車と対向直進車の交錯を減らし、円滑化や安全性向上を実現する、新たな交差点「反転交差点（Alternative Intersection）」についての検討^[13, 14]も進んでいる。

5.4 道路の安全・円滑対策技術

交通安全の向上には、インフラを主対象とする交通工学のみならず車両技術や人間側の要因の解明など、多角的な取り組みが必要であるが、前述のとおり、道路における交通渋滞は渋滞末尾等で交通事故発生リスクを増大させる。また、道路の機能が不明瞭なために、高速走行する車両、沿道出入車両や駐停車、自転車や歩行者などの異なる挙動を行う利用者が同じ時空間に混在することは安全性を低下させる。本節では、交通渋滞の解消や機能階層型道路ネットワークの実現は、安全性の向上にもつながるとの前提のもと、それに関わる対策技術を概観する。なお、事故多発地点などを対象として、事故要因に対して直接対策する個別の技術については、第6章「安全性向上のための技術：インフラ編」、ACC（Adaptive Cruise Control）などの車両技術による対策技術については第7章「安全性向上のための技術：自動車編」で紹介する。

5.4.1 道路の交通渋滞対策

交通渋滞の緩和・解消には、交通需要の調整かボトルネック交通容量の増大が必要となる。伝統的には、前者は、交通需要マネジメント（Transportation Demand Management, TDM）と呼ばれ、自動車利用者に対して、交通手段の転換、出発時刻や経路の変更、乗り合いによる効率的利用などの行動変容を促す施策であり、

後者は、道路整備によるネットワークの増強や車線数増などの物理的な施策が中心であった。近年では、よりリアルタイムに近い形で交通状況を把握できるようになったことを背景に、両者について、より動的な調整を図る動的交通・需要マネジメント（Active Transportation and Demand Management, ATDM）^[15]の導入も欧米を中心に進んでいる。

交通需要マネジメント施策の代表例として、交通情報の提供や道路通行料の課金により自動車利用者の出発時刻や経路変更を促すものがある。また、北米を中心として、高速道路において所定の乗員人数（通常、2～3人）以上が乗車した車両のみが通行可能な専用車線である HOV（High Occupancy Vehicle）車線（図 5.13）や、所定の乗員人数に達しない車両には通行料金の支払いを課す車線である HOT（High Occupancy Toll）車線を設けることによって相乗りを促進する方策なども存在する。ATDM では、交通情報をよりリアルタイムに、あるいは近未来の予測を含む形で提供したり、交通状況に応じて道路通行料金を動的に変更したり、HOV／HOT 車線も交通状況に応じて動的に適用・変更される。HOV／HOT 車線に限らず、通行可能な車両や料金を動的に変更しながら運用する車線は“managed lane”と総称される。

一方、ATDM のうちボトルネックを中心とした特定区間における車線規制・運用などに関わる動的交通マネジメント（Active Traffic Management, ATM）施策には、ランプメータリング、車線別可変速度規制、臨時的路肩走行運用、可変チャネリゼーションや動的合流制御、リバーシブル車線などがある。ランプメータリングは、高速道路入口で交通量を調整することで、高速道路本線を渋滞させないようにしたり、渋滞区間へのさらなる交通流入による追突事故等の発生を防止するもので

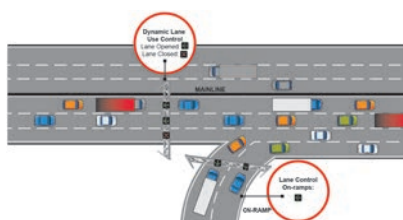


図 5.13 HOV 車線（執筆者撮影）。

ある。車線別可変速度規制（図 5.14 (a)）は、高速道路における交通状態や路面・天候等の条件によって制限速度を調整するもので、交通量が交通容量に近づいている区間に対して上流から徐々に制限速度を下げ、交通流全体の速度調和を図ることで渋滞発生を遅延・抑制する効果や、渋滞末尾での追突事故を抑制する効果がある。臨時的路肩走行運用（図 5.14 (b)）は、交通渋滞が深刻な場合に路肩走行を認め



(a) 車線別可変速度規制（執筆者撮影）



(c) 可変チャネリゼーション^[16]



(b) 臨時的路肩走行における走行禁止時（左）と路肩解放時（右）（執筆者撮影）



(d) リバーシブル車線（執筆者撮影）



(e) 発光型視線誘導システム^[17]

図 5.14 動的交通マネジメント ATM の例。

ることで交通容量を臨時的に増強する。可変チャネリゼーション（図 5.14 (c)）^[16]は、高速道路の合流部やジャンクションにおいて、時々刻々異なる本線・合流車線の交通需要比率に対して動的に車線を配分するものであり、動的合流制御は、交通量や合流比率に応じて合流や車線変更の位置を動的な交通情報板で運転者に知らせるものである。どちらも、動的に異なる交通パターンに応じて交通容量を最大化することで渋滞発生を抑制し、また、動線の錯綜による事故を防ぐことが期待される。リバーシブル車線は、多車線のうち一部を、交通需要の多い方向に割り当てるようにリバーシブルで運用するものである。時間帯によって交通需要の方向別比率が大きく異なる道路において、交通容量を効率的に配分することができ、一般道路（図 5.14 (d)）や高速道路料金所などにも適用例が見られる。日本では、高速道路の主要ボトルネックであるサグや上り坂区間などにおいて、道路脇に LED 発光灯を連続的に設置し、交通状況に応じて速度を変えながら進行方向に流れるように点灯させる発光型視線誘導システム（図 5.14 (e)）^[17]を導入し、渋滞の緩和を図っているが^[18]、これも一種の ATM といえる。

ATM は、車線の動的な運用により時空間的な偏りを持つ交通需要に対して既存の道路インフラによる交通容量を最大限活用することを可能とするものである。一方で、開発途上国などで道路ネットワーク整備が不十分な場合や、そもそも交通需要が交通容量をはるかに超過している区間などにおいては、動的な調整だけで交通渋滞の緩和・解消を実現するのは難しい。このような場合には、道路ネットワークの増強や車線数増といった物理的対策を着実に進めつつ、ATDM の導入によりその効果を最大化することが必要である。限られた空間制約の中で、状況によっては、道路幅員を変えずに車線幅員を狭めて車線数を増やす対策も考える。

5.4.2 機能階層に応じた安全・円滑対策

機能階層型道路ネットワークの実現には、ネットワークを構成する各道路において、それぞれの機能に応じたサービスの質が担保されることが重要である。すなわち、トラフィック機能の優先度が高い道路では、自動車の走行速度を一定以上とするための円滑化対策が必要であり、アクセス・滞留機能や歩行者などの利用者の優先度が高い道路では、逆に自動車の速度を抑制する静音化対策が必要である。

円滑化対策としては、5.4.1 節で述べた交通渋滞の緩和・解消はもちろんのこと、遅れ時間の削減や追越機会の提供などによるサービスの質の向上が挙げられる。このために交差部では、5.3.3～5.3.4 節に述べたとおり、立体交差やアクセスマネジ

メントの採用といった適切な交差形式の選択や、道路幾何構造および制御の工夫が必要である。ATMの一手法として、信号交差点において自動車の到着を車両感知器（5.5.1節参照）により検出し、青時間の延長・短縮などを動的に行う感應制御も有効である。道路の優先すべき対象が公共交通ならば、バスの到着タイミングに合わせて信号を調整する公共車両優先システム（Public Transport Priority Systems）の導入やそれに合わせた道路構造の検討も積極的に行うべきである。一方、山間部などの道路や往復二車線道路などでは、追越機会を提供するため付加車線を設けることが円滑化に重要であり、3車線のうち中央車線を交互に追越車線として利用する「2 + 1車線」などもその適用例である。

静音化対策としては、領域内の制限速度を一律30km/h以下とする「ゾーン30」の適用などに加えて、車道に凸型路面を設置することで速度抑制を図る「ハンプ」や車道の線形を狭くする「狭さく」や蛇行させる「シケイン」などの物理デバイスの設置が考えられる^[19]。また、歩道と車道の境界をあえて設けずに道路利用者の注意力を向上させることで歩行者にとって安全性の高い空間とする「シェアードスペース（shared space）」もヨーロッパを中心に広まりつつある^[20]。

いずれにしても、円滑化対策や静音化対策は、どちらか一方だけを実施するのではなく、エリアにおいて一体的に対策することで、道路利用者のニーズを損なうことなく、ニーズに見合った階層の利用を促すことが非常に重要である。また、各階層においては、道路線形や交差点配置、幾何構造などにより、その機能が道路利用者から自然にわかるようにし、利用者が自発的に安全な行動をとるようにする（Self-explaining road）ことが望ましい。

5.5 交通の観測・予測技術

交通工学の一つの大きな課題は、実験室における実験が極めて困難なことである。したがって、交通流の解析、および、それに基づく計画・設計・運用を行うに当たっては、道路で発生している事象を丹念に観測・調査することが重要である。時々刻々変化する交通状況に対して適切なマネジメントを実施するには、現在実現している／将来実現するであろう交通流の特性を予測する必要がある。本節では、交通を観測または予測するための技術について紹介する。

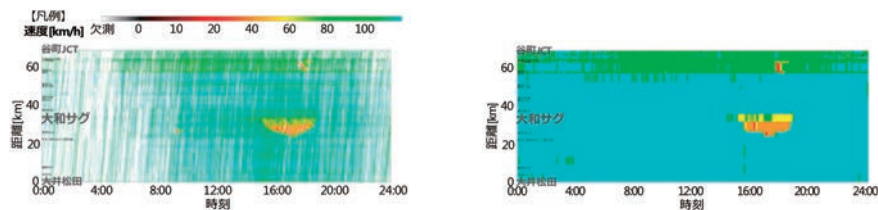
5.5.1 観測技術

交通観測は、かつては調査員の目視による観測が主流であったが、デジタル化の進展に伴い、観測の自動化技術が年々発展してきている。車両感知器は、道路の直上または地下埋設したセンサーを用いて車両の存在を検出し、交通量や地点通過速度などを計測することができる。これを活用して、高速道路の混雑情報等の提供や、感知式の信号制御などが行われている。近年では、カメラ映像から画像処理により車両検出する感知器も増加している。画像処理型は複数の車線を一度に観測できたり、開発途上国などの車線に従わない交通や歩行者の観測も可能、といった利点がある一方、大型車に隠れた車両を見落とすなど、とくに交通量が多いときの計測精度に課題がある。歩行者占有空間ではプライバシー保護の観点から、カメラではなくレーザーセンサーのように個人を特定できない観測手法が好まれる。

一方で、車両感知器やセンサーの設置箇所には限りがあり、必ずしもボトルネック地点の交通状態を観測できているとは限らないことや、幹線道路以外の道路交通状況の実態がわからないことなどが課題である。また、渋滞や事故の対策においては、速度低下や急減速、急加速などの生じる地点や条件を特定することが重要であるが、こうした時間・空間的変動の実態を把握するには、車両感知器に代表されるような定点観測では限界がある。これに対して、近年、情報通信技術の進展により、車両に搭載されたカーナビや人々が持ち歩くスマートフォンにより、その車両／人が経験した交通状態を時々刻々と計測・モニタリングできる「プローブ」技術が確立されつつある。たとえば日本では、「ETC2.0」^[21]と呼ばれる車載器と路側アンテナによる路車間通信を活用したプローブデータの収集が全国的に行われて、渋滞区間や急減速等の発生箇所の把握および道路管理等に用いられている。ただし、プローブデータは基本的にサンプルであり、全体の量的な特徴を知ることは難しい。

5.5.2 予測技術

定点観測により全量を把握する車両感知器データと、サンプルではあるがより詳細な交通状態を収集できるプローブデータ（たとえば図 5.15）^[22]を融合し、5.1 節に示した交通流理論を援用して交通の全体像を描く技術も開発されている^[23, 24]。また、こうした大量のデータを蓄積し、最新のデータマイニング技術を援用することで、交通の実態の全体像に関する知見が飛躍的に増えることが期待されている。こうした蓄積情報による知見をベースにしつつ、センサーやプローブ情報をリアルタイムに利用し、理論に基づく交通シミュレーションを適用して現状の交通状況を正確に



(a) ETC2.0 プローブ情報による速度コンター図

(b) トラカンによる速度コンター図

図 5.15 プローブデータと車両感知器データによる速度コンター図^[22]

推定・把握する（“Now”-cast）技術を確立^[25, 26]し、さらに、デジタルツイン上で施策の効果をリアルタイムで予測しながら、交通情報提供や経路誘導のほか、ランプメータリングなどの ATM の実施を行う交通マネジメント技術を確立することで、日々の交通渋滞を最小限に軽減できるものと期待される。このようなデジタルツインが構築できれば、交通事故の発生を周囲の自動車等から得られるセンサー情報等をもとにいち早く検知し、救急車等の配備や事故処理に伴う車線規制、迂回誘導といった交通マネジメントを迅速に実施することも可能となり、事故に起因する渋滞やさらなる事故などの影響を最小限にとどめることも可能と考えられる。さらには、悪天候時や大規模なイベント開催時、そのほかの予測困難なインシデント等に対する迅速な対応策の計画・立案と実行にも大きく役立つものと期待される。

参考文献

- [1] 越正毅, 「高速道路トンネルの交通現象」, *IATSS Review*, 10 (1), pp. 32-38, 1984.
- [2] 越正毅, 「高速道路のボトルネック容量」, 『土木学会論文集』, 371/IV-5, pp. 1-7, 1986.
- [3] Lighthill, M. J. and Whitham, G. B., On Kinematic Waves “II. A Theory of Traffic Flow on Long Crowded Roads”. *Proceedings of the Royal Society of London. Series a. mathematical and physical sciences*, 229 (1178), pp. 317-345, 1955.
- [4] 越正毅, 赤羽弘和, 「渋滞の研究」, 『道路交通経済』, 45, pp. 64-69, 1988.
- [5] 越正毅, 桑原雅夫, 赤羽弘和, 「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』, 458/IV-18, pp. 65-71, 1993.
- [6] Geroliminis, N. and Daganzo, C. F., “Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings”. *Transportation Research Part B: Methodological*, 42 (9), pp. 759-770, 2008.
- [7] World Health Organization, “Global Status Report on Road Safety 2018”. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241565684>
- [8] 兵頭知, 吉井稔雄, 「センサス道路における時間帯交通量別交通事故リスク分析」, 『土木学会論文集 D3 (土木計画学)』, 72 (5), I_1283-I_1291, 2016.
- [9] Roger, P. R., Elena, S. P., *The Highway Capacity Manual: A Conceptual and Research History Volume 1:*

- Uninterrupted Flow*, Springer, 2014.
- [10] Oguchi, T., “Redesign of Transport Systems on Highways, Streets and Avenues”, *IATSS Research*, 32 (1), pp. 6–13, 2008.
 - [11] 一般社団法人交通工学研究会著, 『機能階層型道路ネットワーク計画のためのガイドライン (案)』, 2018. <https://www.jste.or.jp/Activity/h27-29.pdf>
 - [12] Transportation Research Board of the National Academies (TRB), *Access Management Manual, Second Edition*, TRB, 2014.
 - [13] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, *Alternative Intersections / Interchanges : Informational Report*, 2010.
 - [14] 犬飼望, 田中伸治, 中村文彦, 有吉亮, 三浦詩乃, 小根山裕之, 柳原正実, 「平面交差部における Alternative Intersections の日本への適用に関する研究」, 『土木学会論文集 D3 (土木計画学)』, 74 (5), pp. I_1327–I_1338, 2018.
 - [15] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, “About Active Transportation and Demand Management (ATDM) - Overview”. <https://ops.fhwa.dot.gov/atdm/about/overview.htm>
 - [16] Texas A&M Transportation Institute, “Dynamic Merge Control”. <https://policy.tti.tamu.edu/strategy/dynamic-merge-control/>
 - [17] 首都高速道路株式会社, 「視線誘導標設置及び速度誘導システム (エスコートライト)」, 首都高の技術. <https://www.shutoko.jp/ss/tech-shutoko/use/escortlight.html>
 - [18] 鎌田恭典, 渡部聡, 安斎潤哉, 柴田健一, 「渋滞対策を目的とした自発光ベースメーカーの開発と運用について」, 『交通工学研究発表会論文集』, 33, pp. 181–184, 2013.
 - [19] 一般社団法人交通工学研究会, 『改訂 生活道路のゾーン対策マニュアル』, 2017.
 - [20] 小嶋文, 「国内外におけるシェアードスペースの取り組み」, *IATSS Review*, 46 (3), pp. 203–210, 2022.
 - [21] 一般財団法人 ITS サービス高度化機構 (ITS-TEA), 「ETC2.0 について」, 『ETC 総合情報ポータルサイト』, <https://www.go-etc.jp/etc2/>
 - [22] 後藤梓, 松田奈緒子, 山田康右, 堀口良太, 吉田秀範, 榊真, 「ETC2.0 プローブ情報を活用した環状道路ネットワーク交通状態把握手法によるケーススタディ」, 『交通工学研究発表会論文集』, 37, pp. 409–416, 2017.
 - [23] Mehran, B., Kuwahara, M., 「プローブ, 車両通過時刻, 信号制御データの融合による一般街路上の車両軌跡推定」, 『交通工学』, 46 (1), pp. 77–89, 2011.
 - [24] Mehran, B., Kuwahara, M., Naznin, F., “Implementing Kinematic Wave Theory to Reconstruct Vehicle Trajectories for Fixed and Probe Sensor Data”, *Transportation Research Part C*, 22, pp. 144–163, 2012.
 - [25] Hanabusa, H., Kobayashi, M., Koide, K., Horiguchi, R., Oguchi, T., “Development of the Nowcast Traffic Simulation System for Road Traffic in Urban Area”, *Proceedings of 20th World Congress on ITS*, 2013.
 - [26] 大口敬, 力石真, 飯島譲久, 岡英紀, 堀口良太, 田名部淳, 毛利雄一, 「首都圏 3 環状高速道路における交通マネジメント評価シミュレーションの開発」, 『土木学会論文集 D3 (土木計画学)』, 74 (5), pp. I_1255–I_1263, 2018.

