

# 1章 序章

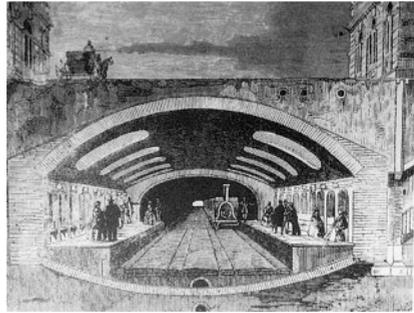
## 1.1 交通工学・交通計画の役割と本書の狙い

### 1.1.1 わが国の交通の過去と現在

明治5年8月、ロンドンに到着した岩倉使節団は、高架橋や地下を鉄道が走り回っている都市の姿に驚愕します。



岩倉使節団



ロンドンの地下鉄<sup>1)</sup>

写真 1.1

すでにアメリカで、開通したばかりの大陸横断鉄道に乗り、国の経済を支えるインフラとしての都市間鉄道の重要性を痛感していた岩倉たちは、都市交通手段としての鉄道の可能性にも気づいたこととなります。ご存知のように、岩倉使節団には、団長岩倉具視をはじめ、大久保利通、木戸孝允、伊藤博文など、その後の日本の礎を担ったトップリーダーたちが参加していましたので、この瞬間に、鉄道国家に向かう明治政府の方向性が決まったといっても過言ではありません。

そして、この決断が、現在に至るまでの日本の交通事情を大きく決定付けた

ともいえるのです。つまり、明治以降、都市間および都市内交通手段としての鉄道は大きな発展を遂げ、現在でも、新幹線はもちろん、東京など大都市における鉄道網は、世界に冠たる水準を保っています。しかしその一方で、道路については、多くの人々の長年の努力にもかかわらず、まだまだ世界の水準には程遠いといわなければなりません。都市環状道路の未整備、幹線道路の未完成、危険な生活道路など、解決すべき課題は数多く残っているのです。

鉄道については、明治政府は明治維新からわずか5年後の明治5年（1872年）に、新橋・横浜間に最初の鉄道を開業させ、人類史上の奇跡のひとつとも言われました。その後も、明治22年（1889年）に東海道本線が新橋・神戸間の全線で開通するなど、各地で鉄道建設が精力的に進められました。また、当初は馬車鉄道が、また20世紀初頭からは路面電車が普及し、都市内交通の担い手としての鉄道の整備も進められました。さらに、明治37年（1904年）には国鉄としては初めての電車運転の開始、昭和2年（1927年）には初の地下鉄開業（浅草・上野間）など、技術の進展や社会のニーズによる著しい発展を遂げてきました。

一方、道路については、明治10年（1877年）に完成した銀座煉瓦街計画の一環として整備された広幅員（15間、27.27m）の銀座通りといったごく一部の例外を除き、体系的な整備がきわめて遅れてしまいました。明治21年（1888年）になって、ようやくわが国初の都市計画法制度というべき東京市区改正条例が制定され、道路や橋梁などを計画・建設する制度が整いましたが、予算制約のため、事業はなかなか進みませんでした。

大正8年（1919年）になって、後藤新平らの尽力により、ようやく全国的な法制度が確立しました。すなわち、この年には、都市計画法、市街地建築物法（建築基準法）、そして道路法という非常に重要な法律が3つ成立し、その後のわが国の都市計画や道路建設の法的基盤となっていくのです。

その後、大正12年（1923年）に関東地方を襲った関東大震災の後に実施された帝都復興事業によって東京都心部の道路網が作られるなど、東京は徐々に近代国家の首都としての基盤を整えていきました。

しかし、放射方向の道路の整備に比べて環状道路の整備が著しく遅れ、現在もなお整備が完了していないことなど、世界の他の首都に比べて見劣りする状態が改善されていません。ましてや、東京以外の都市や都市間道路の整備については、第2次大戦後の復興事業の中でもなかなか整備が進まない状況が続きました。

ここで、少しだけ歴史のIfにお付き合いください。もし、明治維新があと50年遅かったら、現在の日本はどのような社会になっていたでしょうか。

実際の明治維新は、1868年です。スチーブンソンが蒸気機関車「ロコモーション号」を開発したのが1825年でした。ロンドンに地下鉄が開通したのが1863年、アメリカ大陸横断鉄道が開通したのが、さきほど述べたように1869年ですから、欧米で、交通の主役が、馬車から鉄道に大きく変わりつつあった、まさにその時期に当たるわけです。その50年後というと1918年ということになります。実は、この50年の間に交通の世界で、ふたつの大革命が起こります。1886



写真 1.2 T型フォード<sup>2)</sup>

フォードは、A型から試作をはじめ、T型まできてようやく成功しました。1908年に販売を開始し、1914年に大量生産を開始しました。

年のダイムラーによるガソリン自動車の発明、そして、それに勝るとも劣らないのが、フォードによる1914年のベルトコンベアによる自動車の大量生産方式の発明です。特に、自動車の大量生産方式の確立で廉価な自動車が大量に市場に出回るようになり、それまでお金持ちのいわば道楽の手段であった自動車が、一気に交通の主役に躍り出ることになります。フォードは、1908年に販売を開始した「T型フォード」を、この方式で大量生産し、1927年までにアメリカで1,500万台も販売したということです。他の自動車メーカーも追随し、1929年にはアメリカの総生産台数が年間500万台を超えるにいたりました。これに伴い、アメリカでは道路整備が急速に進むこととなりました。

もし、岩倉使節団が50年遅くアメリカを訪れていたとしたら、使節団は、まさにそのような国家の姿勢や都市の姿に直面したはずです。そのとき政府の方針はどのように変わっていたのでしょうか。おそらく、「交通の主役は自動車、そして道路整備」となったのではないのでしょうか？そして、1920年代以降のアメリカのように、道路網の急速な整備が行われたのではないのでしょうか。

実際の歴史は、そうはなりません。主要都市のほとんどが空襲で消失した第2次世界大戦後に計画された戦災復興計画も、資金難などのために思うように進みませんでした。結果として、例えば、昭和31年（1956年）に来日した有名なワトキンス調査団が、「日本の道路事情は信じがたいほどひどい」と断ずるほど、日本の道路整備は遅れをとりました。実際、国道1号でさえ、雨でぬかるんで自動車が走れないような状態だったのです。



雨でぬかるんだ国道1号



制御不能の交差点

写真 1.3 ワトキンスレポートに掲載された「日本の道路事情」<sup>3)</sup>

## 1.1 交通工学・交通計画の役割と本書の狙い

ワトキンスレポートの前後から、道路整備特定財源や道路整備五カ年計画の制定など、道路整備のための法的・財政的整備が行われた結果、わが国の道路整備はようやく進んでいきました。

ただ、車社会を前提としないまま高密度市街地がすでに形成されていたわが国に、あらたに道路網を整備するのは容易なことではなく、現在でも、まさに「道半ば」の状態にあるわけです。

さらに、最近では、環境問題やバリアフリー、さらにまちづくりへの寄与など、交通に求められる機能が複雑かつ多様になってきています。歩行者や自転車のための空間作りなどはその典型といえます。

### 1.1.2 本書の狙い

こうした過去と現状、そして未来への課題を多く抱えているわが国において交通にたずさわる人々、また、交通についてこれから学ぼうとする学生たちの入門書となることを念願しつつ、本書はつくられました。そのうえで、いくつかの狙いをもって構成しています。

特に、交通にかかわる学問分野である「交通工学」、「交通計画」、そして「都市計画」のそれぞれについて取り上げるとともに、それらの関係を明確にすることを心がけました。

「交通工学」は、主に自動車を対象としてその交通現象を物理学等に基づいて記述するとともに、交通の流れを安全で円滑に制御するための手法について検討するものです。道路の形状、交差点の形、信号、交通規制など、日常生活にきわめて身近な交通対策が、「交通工学」の成果に基づいて検討されているのです。

「交通計画」は、将来の状況を予想しながら、長い目で見て必要な交通整備について考える分野です。交通需要予測という手法を基盤に置きながら、都市の将来のあり方にふさわしい交通のあり方を考えていきます。本書で主に取上げる道路計画のほか、駐車場計画、バスやLRTなどの公共交通計画、歩行者や自転車のための計画など、交通にかかわる各分野を総合的に扱う総合交通計画を考えることが大切です。なお、最近では、交通計画においても比較的短期

の施策を扱うなど、交通工学との区があいまいになりつつあります。特に、まちづくりという新しい舞台が登場して以来、「工学」とも「計画」とも言いがたい取り組みが求められるようになり、「交通まちづくり」という言葉が生まれました。詳しくは第6章をお読みください。

「都市計画」は「交通計画」と深い関係を持っています。もちろん、土地利用計画、公園緑地計画などの都市計画の個別分野のひとつとしての交通計画という意味が大きいのですが、法制度上は、交通計画の中の道路計画は、都市計画として位置づけられることによって、はじめて法的な計画となるのです。この点については、第4章に詳しく記載しました。「都市計画」と「交通工学」の関係は、これまではあまり明確ではありませんでしたが、今後、都市計画道路の見直しが本格化する中で、関係がさらに深まるものと思われます（詳細は、4.3.5「都市計画道路の見直し」をご覧ください）。

本書の構成について確認しておきます。まず2章では、「交通の流れを円滑にする」と題していわゆる交通工学の分野に関して最低限必要な知識を記述しました。一見複雑な数式や図が多数登場しますが、ゆっくり読めば必ず理解できるはずです。入門編とはいえ、第2章の内容を理解できれば、「交通工学」の必要な知識はかなり習得したといってもよい内容になっています。

第3章「将来の交通需要を予測して計画を立てる」は、「交通計画」の分野に関する入門的な内容であり、計画策定手順、交通調査、交通需要予測という交通計画の基本中の基本が述べられています。この章も、「交通計画」を習得するための基本は、ほぼ網羅しています。

第4章「将来予測に基づいて道路を計画し設計する」では、まず、第3章で述べた将来需要予測の結果に基づいて、それを、「都市計画」の一部である都市計画道路として法律的に位置づけるまでのプロセスについて述べます。「交通工学」と「交通計画」の両方で用いられる「交通容量」の概念を理解するとともに、交通と都市計画の関係についても言及します。続いて、計画された道路の具体的な設計について、基本的な内容を述べるとともに、今後の道路設計の目指すべき方向についても言及します。

第5章は「道路交通を安全にする」です。「円滑」と並んで交通整備の最も重要な目標である「安全」を実現するための理論や技術について、最新の事例にも言及しながら記述しています。

第2章から第5章は、それぞれの分野の基本的な内容を記述しています。ただ、各章の最後に、「これからの時代」の方向性について、応用的な内容を含めて展望を述べています。

最後の第6章は、「まちづくりへの貢献」です。特に最近の動きとして、交通整備の新しい目標としてクローズアップされているまちづくりへの寄与について記述しています。人間重視、歩行者・自転車重視、住民参加、といったキーワードも同時に語られることとなります。

本書は、全体を通読して頂くことを最もお勧めしますが、場合によっては、「交通工学のみ」、「交通計画のみ」を学習したい人は、章を選んで読んで頂いてもよいかもしれません。

さて、本書は、「交通工学」、「交通計画」、そして「都市計画」の3つの分野の関係性を重視した点に特色があるのですが、一方、それによって、ややもすると複雑な読み物になってしまうことを警戒しなければなりません。そこで、できるだけストーリー性のある文章を心がけたつもりです（交通の教科書としてはおそらく例がない『ですます』で文章を書いたのも、その狙いによるものです）。

すでに、「交通工学」、「交通計画」、そして「都市計画」の各分野に関して、非常に優れた教科書がわが国でも多く出版されています。ですから、それぞれの分野を深く学ぶ際には、ぜひそれらをしっかり勉強して頂くことが欠かせません。本書は、それらの専門書を学ぶ前に、どうしても頭に入れておくべき入門的な内容を記述するとともに、分野相互の関係がわかるように配慮したつもりです。また、分野と分野の間の学際分野の新しい役割についても、できる限り取上げることになりました。

また、学問的興味だけでなく、実務的な適用にも言及するように心がけました。そのため、事例をできるだけ多く紹介することになりました。それにより、

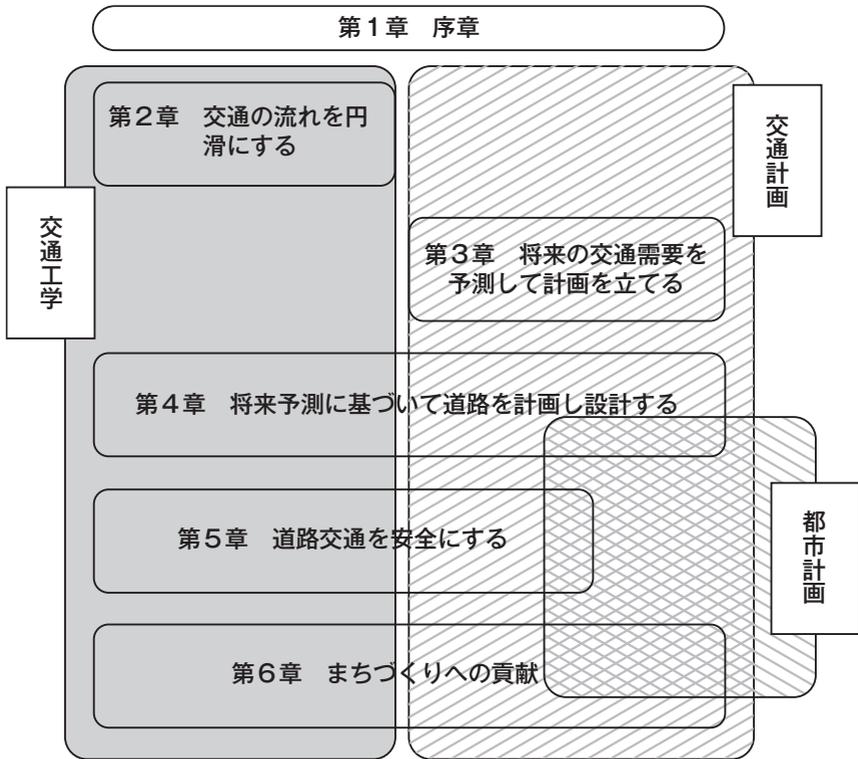


図 1.1 本書の構成

交通を学ぶ意義や意味を理解しやすくしたつもりです。

## 1.2 わが国の交通

わが国の交通実態や交通インフラの整備状況，近年の社会経済動向を踏まえた最近の話題について概観してみましょう。

高速道路の整備は計画路線延長（14,000km）のうち，11,998km（2020年4月1日現在）と86%まで整備が進んでおり，また，鉄道ネットワークは世界的に見ても高密度に整備されています。国土面積あたりの営業キロは，5.3km/百km<sup>2</sup>

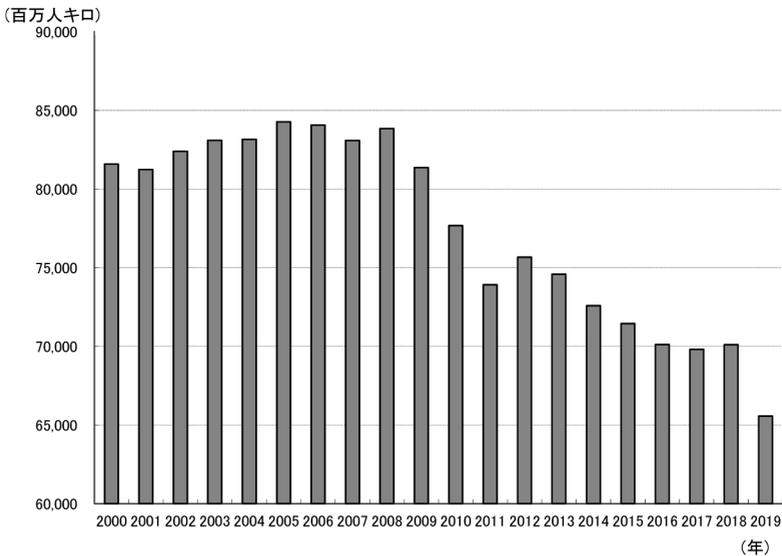
## 1.2 わが国の交通

であり、EU (5.2km/百km<sup>2</sup>)と同程度であり、アメリカ合衆国 (0.4km/百km<sup>2</sup>)の約13倍です。東京や大阪など大都市では接続する複数の鉄道事業者間で相互直通運転を行っており、ネットワークを活かす取り組みも行われています。

高度成長期から近年までは、増え続ける大量の交通需要をいかに捌くかという観点から施設整備、すなわち施設量や輸送量の拡大に主眼をおいてきました。しかし、近年の交通需要の動向を見ると、自家用車の交通量は減少傾向を示しています(図1.2)。なお、このデータは自動車登録情報から抽出した自動車の移動距離(百万人km)とその時の乗車人数(人)をアンケートで調査した結果を用いています。

このように交通需要が横ばいから減少に推移する状況では施設の量的な拡大をしてもその効果を上げることが難しくなっています。そのため、社会基盤の質的充実に力点が置かれる時代へと変化しています。

このように交通需要が減少傾向にある状況では施設の量的な拡大をしてもそ



※2010年10月より、調査方法および集計方法が変更されたことから2010年9月以前の数値とは単純には比較できないため、大まかな傾向として捉える必要がある。  
※2010年度及び2011年度の数値には、2011年3月及び4月の北海道運輸局および東北運輸局の乗用車の数値を含まない。

図1.2 自家用乗用車の総走行距離の推移<sup>4)</sup>

の効果を上げることが難しくなってきました。そのため、社会基盤の質的充実に力点が置かれる時代へと変化しています。

### 人口減少・高齢社会の到来と交通

わが国の人口は、戦後一貫して増加してきました。しかし、昨今は医療技術の進展などによって平均寿命が上昇し、高齢化率が2020年で28.7%まで増加しています。2065年には、38.4%に達すると言われていています。また、女性の社会進出や晩婚化などによる出生率の低下によって、少子化が進展しています。

そのため、わが国の人口は、国勢調査によると2010年の約1億2,806万人をピークに人口減少が始まっています（図1.3）。2065年には、2020年から約3,807万人減少し、約8,800万人になると予想されています。

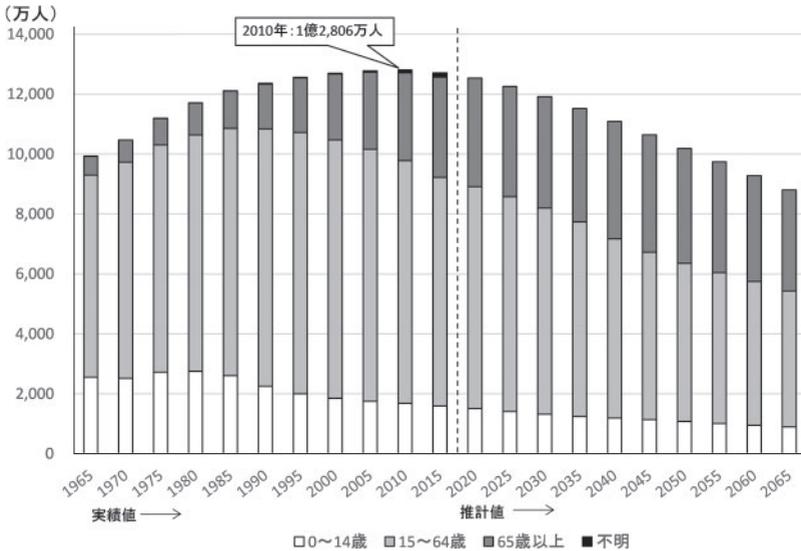
65歳以上の高齢者は、三大都市圏を構成する東京都区部、中核市・特例市をはじめとした多くの都市において2040年まで増加していくと予想されています。一方で、人口5万人未満の市区町村では、65歳未満の人口の減少とともに、65歳以上の人口もすでに維持又は減少しており、今後は、急激な人口減少に直面することが予想されています。

また、世帯総数はこれまで増加が続いていますが、人口減少により、2025年前後をピークに減少に転じると予想されています。一方で65歳以上の方を世帯主とする世帯は、2025年以降も増加し、その中でも単独世帯の増加率が高く、2020年の672万世帯から2040年には896万世帯と33.4%増加すると予想されています。

高齢社会の進展は地域のモビリティ問題の顕在化をもたらしました。高齢社会の進展によって活発に活動する高齢者が増える一方で、運動能力の低下によって、自動車の運転に不安を持つ高齢者も増えています。自主的に免許を返納する65歳以上の高齢者は、2020年度では年間約53万人となっており、75歳以上の運転者の返納が約30万人と全体の54%を占めています。

2015年に実施された全国都市交通特性調査を見ると、70代の高齢者が20代の若者よりも移動回数が多く、外出率（居住人口に対する外出した人数の割合）も平日は同程度、休日は全年齢の平均を上回る結果が報告されています。特に

## 1.2 わが国の交通



※1970年以前は沖縄県を含まない。

※2020年までは総務省統計局「国勢調査」、推計値は国立社会保障・人口問題研究所「日本の将来推計人口」（2017年推計）の出生中位（死亡中位）推計。

図 1.3 わが国の人口の変化

自動車を使った私的な活動が増えています。一方で、高齢者は自動車や公共交通などの交通手段の利用可能性、すなわちモビリティの差が外出機会に与える影響が大きくなっています。郊外部などでは、モビリティの水準が低い高齢者が自動車での送迎に依存する傾向や外出率が低下する傾向が見られ、元気で自動車を運転できる高齢者との活動格差が生じています。買物に行きにくい高齢者（買物難民）も問題になっています。そのため、こうした移動制約者が自らの意志で自由に移動できるようにモビリティを確保することが課題となっています。

### 低密な市街地と交通

わが国の人口は、戦後の高度経済成長期に急激に成長し、拡大する工業地帯を抱える大都市部へ集中しました。急激な都市化の進展です。その結果、今や人々の居住地は、国土の4分の1に値する都市計画区域に9割の人が住んでお

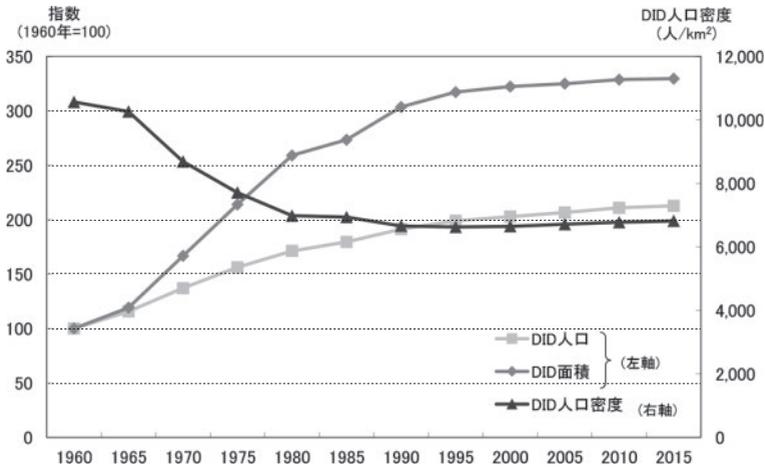


図 1.4 人口集中地区 DID の人口、面積、人口密度の推移<sup>5)</sup>

り、そのうち優先的、計画的に市街化を図る市街化区域には7割の人が住んでいる都市型社会となっています。

一方、人口やその受け皿である市街地の人口密度の変遷に着目すると、人口集中地区 (DID)<sup>\*</sup>の人口密度が1960年代後半から1990年代にかけて急激に減少し、その後は横ばいで推移しています (図1.4)。すなわち、低密な市街地が急激に拡大し、そのままの状態まで現在に至っていることが窺えます。現状は低密な市街地の拡大は進んでいないようにも見受けられますが、市街化区域の人口密度は、61.4人/ha (2015年) から、41.9人/ha (2055年) という、DIDの最低水準密度まで低下すると予測されています。

昭和時代から平成時代のはじめにかけての低密な市街地の拡大は、大型商業施設の郊外立地とそれに伴う中心市街地の空洞化をもたらす要因のひとつとなりました。こうした市街地の変化と相まって自動車利用を前提としたライフスタイルが特に地方部において浸透してきています。2015年全国都市交通特性調査の結果から全体のトリップ<sup>\*\*</sup>に対する各交通手段を利用したトリップの割

<sup>\*</sup> 人口集中地区。Densely Inhabited District。人口密度が4,000人/km<sup>2</sup>以上の地区が隣接して人口が5,000人以上となる地区。

## 1.2 わが国の交通

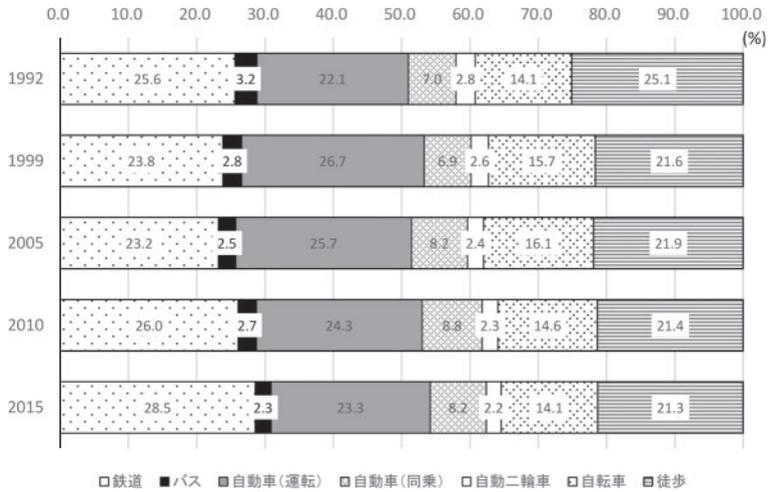


図 1.5 三大都市圏平日の代表交通手段分担率の推移<sup>6)</sup>

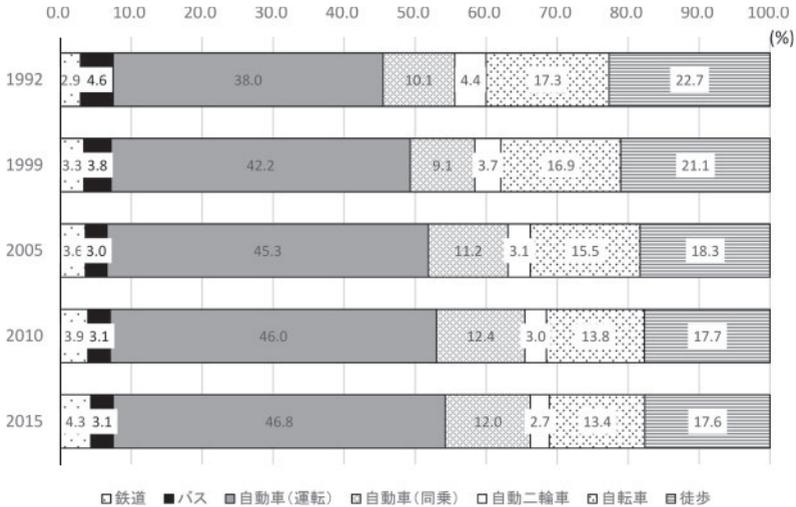


図 1.6 地方都市圏平日の都市規模別代表交通手段分担率の比較<sup>6)</sup>

合（交通手段分担率）を見ると、地方都市圏の自動車分担率は三大都市圏の自動車分担率と比べて25ポイント以上も高くなっています（図1.5, 1.6）。その一方で、徒歩での移動や公共交通での移動が減少しています。また、2000年以降のバスの輸送人員は、三大都市圏がほぼ横ばいであるにもかかわらず、それ以外の地域では2017年では25%も減少しており、地方における公共交通の衰退が課題となっています。

### 自動車社会の影響

自動車利用を前提とした生活の浸透は、二酸化炭素の排出量の増加をもたらしました。温室効果ガスの大部分を占める二酸化炭素排出量の2割は、運輸部門からであり、運輸部門のうち、約86%は自動車から排出されたものです。運輸部門の二酸化炭素排出量は、2000年代初めにかけて増加しました（図1.7）。その後、横ばいから減少傾向となっているものの、自動車の地球環境に与える影響は依然として大きいため、過度に自動車に依存しなくとも市民生活や経済活動が営めるようにすることが課題となっています。

最近では自動車利用と健康問題の関係も着目されるようになってきました。自動車利用の増加は、歩行機会の減少をもたらし、身体能力の低下や肥満をはじめとした生活習慣病の要因となり、医療費の増大をもたらす可能性が指摘されています。また、中心市街地に自動車で来た場合と公共交通で来た場合を比べると、自動車の方が街なかの立ち寄り箇所数や消費金額が少ないという調査結果もあり、街なかの回遊や賑わい、商業への影響も指摘されています。

### 都市型社会と人口減少と交通

大部分の人口が都市に住む都市型社会において人口減少が進むと、市街地の低密度化も進む恐れがあります。歯抜けの市街地の拡大です。都市のスポンジ化とも呼ばれています。そのような地域でも高齢者や児童・生徒など移動制約者にとって、健康で快適で安心して生活できる環境を支える公共交通のサービスが必要です。しかし、財政制約の厳しいこの時代において、鉄道やバス等の

---

※※ 人または、車両がある目的を持ってある場所（出発地）からある場所（到着地）へ移動すること。

## 1.2 わが国の交通

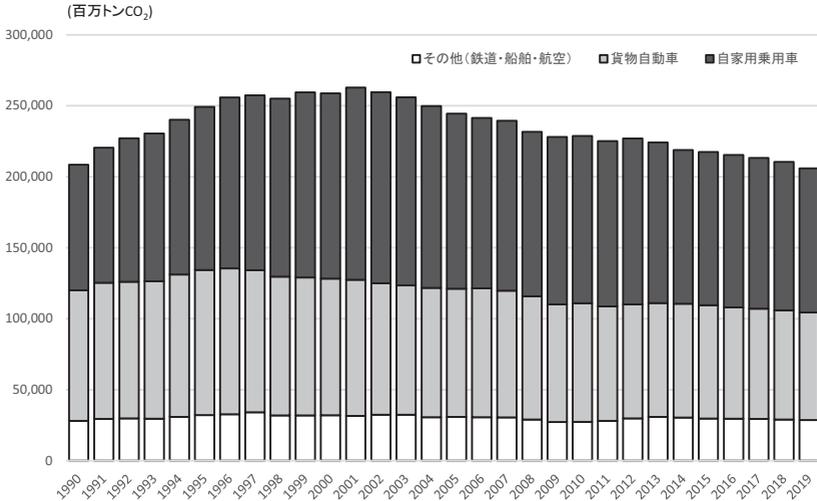


図 1.7 日本における運輸部門のCO<sub>2</sub>排出量の推移<sup>7)</sup>

公共交通サービスを需要が少ない地域で提供することは難しいため、交通サービス水準の地域間格差が拡大することが危惧されます。一般的に人口密度の低いエリアほど公共交通の輸送の効率は悪くなることから、今後のまちづくりを進めるにあたっては、公共交通を中心として、生活関連機能が立地するコンパクトな市街地を形成していくことが重要です。

コンパクトなまちづくりが進むことで、居住地と移動の目的地が近接し、徒歩や公共交通を利用して日常生活を営む市民が増加、高齢者の外出率も増加し、歩行量も増えるため、医療費の削減も期待できます。過度な自動車利用も抑制されるため、環境負荷の低減効果も期待できます。また、中心市街地の活性化や都市経営の改善も期待できます。

2014年には都市計画法を中心とした従来の土地利用規制に加えて、居住機能や都市機能の誘導により都市をコントロールする新たな仕組み、立地適正化計画制度が創設されました。行政と住民や民間事業者が一体となったコンパクトなまちづくりが進められるようになってきています。

**参考・引用文献**

- 1) 日本放送協会：人間は何をつくってきたか1，NHK 出版，1980年
- 2) Flink, James J.: The automobile age. The MIT press, 1988
- 3) ワトキンス・レポート45周年記念委員会編：ワトキンス調査団 名古屋・神戸高速道路調査報告書，勁草書房，2001年
- 4) 国土交通省：自動車輸送統計
- 5) 国勢調査
- 6) 国土交通省：都市における人の動きとその変化～平成27年全国都市交通特性調査集計結果より～，2015年
- 7) (独) 国立環境研究所：温室効果ガスインベントリオフィス・データベース

## 2章 交通の流れを円滑にする

本章では、交通の流れの特徴とこれを円滑に保つための基本となる考え方を説明します。まず2.1節で交通の流れ、特に自動車の交通の流れに着目して、これを科学的に解析する方法と、交通流のよく知られている特性について説明します。次に2.2節で、誰にでも馴染みの深い「交通渋滞」とは科学的にどのような状態を指すのか明らかにします。これを踏まえて2.3節では交通渋滞を減らす、無くす方法を紹介します。2.4節は、円滑・安全の両面で重要な交差点を対象として、その制御手法を紹介します。最後に2.5節で、円滑な交通の流れを実現するための将来技術について考えてみましょう。

### 2.1 交通現象の捉え方

自動車でも自転車でも歩行者でも、道路上の交通を一種の「流れ」として捉えることができます。交通の流れも水の流れ、空気の流れ、インターネットの情報の流れなどとよく似た特性を持ちます。一方で交通の流れに特徴的なことは、その流れを構成する自動車の大きさは水や空気の粒子よりも無視できない大きさを有するとともに、これが「(意思を持った)人の動き」であることです。従って「現象の捉え方」の基本はほかの流れと同じですが、そこで見られる現象には交通特有の特徴が現れます。ここでは自動車交通流に焦点をあてて、こうした一般性と特殊性を考えていきます。

### 2.1.1 基本特性を表す変数

#### (1) 時間距離図

道路上の自動車の流れも、川を流れる水と同じく、流れの源流方向を上流、流れ下った先の方向を下流と呼び、自動車も上流から下流へ流れるものと考えます。この流れを1台1台の車の動きに着目したときに、交通流を記述するために重要ないくつかの特徴量（変数）があります。図2.1はこうした特徴を示すために、横軸に時間、縦軸に距離をとって、1台1台の車両の動きを1本1本の（時空間上の）軌跡として表したもので、交通流を表現する最も基本的な図となります。これを時間距離図（Time-Space Diagram）といいます。

図の左側の道路上に3台の車が描かれていますが、これは時間軸上の時刻  $t$  における3台の車の位置です。この図のように車の位置を表すのに車の先端（バンパなど）の位置で代表させることが多いですが、必ずそうしなければならないわけではありません。時刻  $t$  における  $i$  番目の車とそのひとつ前の車 ( $i-1$  番目) の後端（車尾ともいいます）までの距離、すなわち車間距離は図に  $s_{pi}$  として示されています。これに前の車 ( $i-1$  番目) の車長  $l_{i-1}$  を加えたものを車頭距離  $s_i$  といいます。

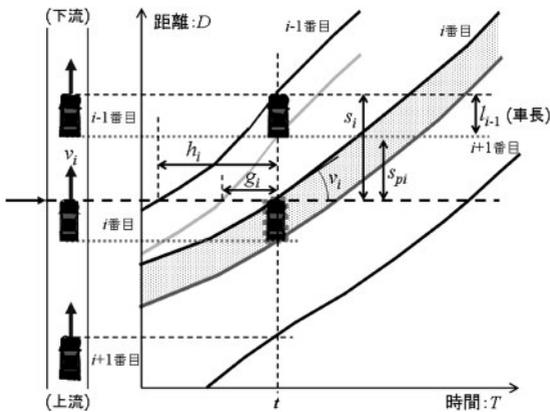


図 2.1 ミクロナ時間距離図

## 2.1 交通現象の捉え方

一方、図の左端中ほどに右向き矢印が描かれています。これは道路上のある地点を意味し、 $i$  番目の車は時刻  $t$  にこの矢印の地点にいます。 $(i-1)$  番目の車がこの矢印の地点を通過してから  $i$  番目の車が到達するまでの時間  $h_i$  を車頭時間 (Headway) といいます。また、前方車の後端がある地点を通過してから自車の先端がそこを通過するまでの時間を車間時間  $g_i$  といいます。

時間距離図が有用であるひとつの理由は、各車両の時空間軌跡の傾きがその車両の速度  $v_i$  になることです。従ってこの図を使えば、時々刻々と、あるいは道路上の場所に依じて、各車を取る速度  $v_i$  が時空間上でどのように変化するか図示できます。速度  $v_i$  と同じように、車頭時間  $h_i$ 、車間時間  $g_i$ 、車頭距離  $s_i$ 、車間距離  $s_{pi}$  も、図から時空間的に変化していく様子が読み取れます。

川の流れて水粒子一粒一粒の動きを考えることはまずありません。交通流では個々の動きをある程度注目しますが、やはり流れ全体の大まかな特徴で捉えることも多くあります。ある地点 (断面) を一定の計測時間  $T$  の間に通過した車両数  $N$  を用いて計算される交通流率  $Q (=N/T)$  と、ある時刻に一定の

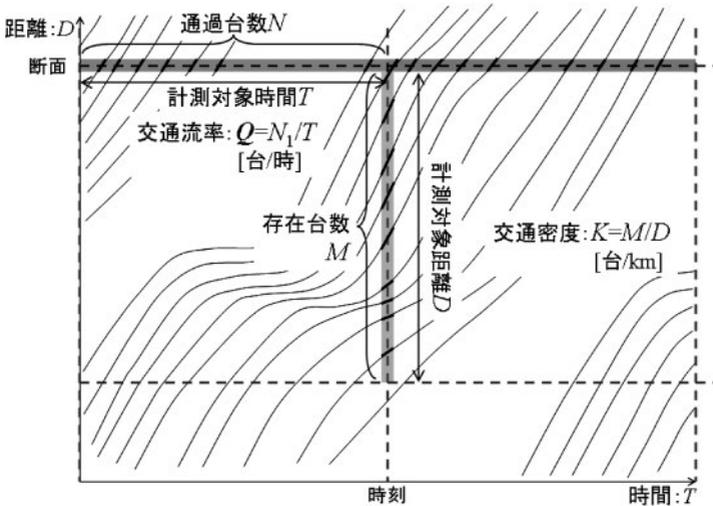


図 2.2 マクロな時間距離図

計測距離  $D$  の中に存在していた車両数  $M$  を用いて計算される交通密度  $K$  ( $=M/D$ ) は、こうした特徴を表す重要な指標 (変数) です (図2.2参照)。ここで  $N$  台の各車の車頭時間  $h_i$  の平均値を取ると交通流率の逆数になります。また  $M$  台の各車の車頭距離  $s_i$  の平均値を取ると交通密度の逆数になります。このように2つの時間距離図 (図2.1・図2.2) で、時間軸上でみた車頭時間と交通流率の関係は、空間軸上でみた車頭距離と交通密度の関係と対称関係にあります。

(2) 流れの速度と流量保存則

連続的に次々と流れている水の流れ、空気の流れ、情報の流れ、そして交通の流れ。これらに共通で普遍的な物理法則が「流量保存則」で、物理学の基礎的な法則である「質量保存則」に相当するものです。この法則は、モノ (流れ) は幽霊のようにふいに消えたり突如ワープしてきて増えたりはしない、ということの意味します。これを交通流について表すと図2.3のようになります。

途切れない車の流れを1kmごとの箱に車を入れて考えると、この箱の中の車両数は交通密度  $K$  と等しくなります。仮にここで  $K=20$  [台/km] とします。自動車の速度は1台でみても時々刻々と変動しますし、車によって速度は違いますが、大雑把にみれば1kmの箱が平均的な速度  $V$  で流れているとみなすことができます。これも仮に  $V=80$  [km/時] としましょう。これをある断面で1時間観測して、ここを通過した車両数を観測すると何台になるでしょう

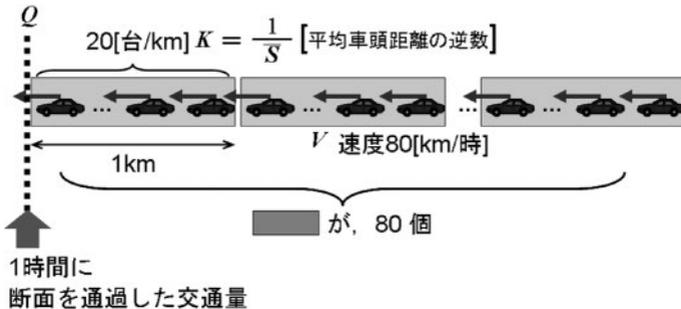


図 2.3 流量保存則

か。

長さ1kmの箱が時速80kmで移動するので、1時間にこの断面を通過した箱の数は80個です。1箱に20台の車が詰まっている箱が80個通過したので、通過した車両数は $20 \times 80 = 1,600$ 台となります。交通流率とは単位時間当たりの通過車両数ですので、交通流率は1,600 [台/時] となります。つまり、一般に「交通流率 = 交通密度 × 速度」の関係が成立するのです。これを流量保存則といいます。交通流率  $Q$ 、交通密度  $K$ 、速度  $V$  を用いて式で表すと次のようになります。

$$Q = KV \quad (2.1)$$

この法則は交通流に限らず、全ての流れを支配する基礎的な性質なのです。

ところで、ここで考えている「流れの平均的な速度」とはどのような速度でしょうか。図2.4の時間距離図を見てください。ここで交通流率と同じようにある断面を一定時間を通じて各車の速度  $v_i$  をその台数  $N$  で平均したものを（正確には相加平均あるいは算術平均という）を時間平均速度  $v_t$ 、交通密度と

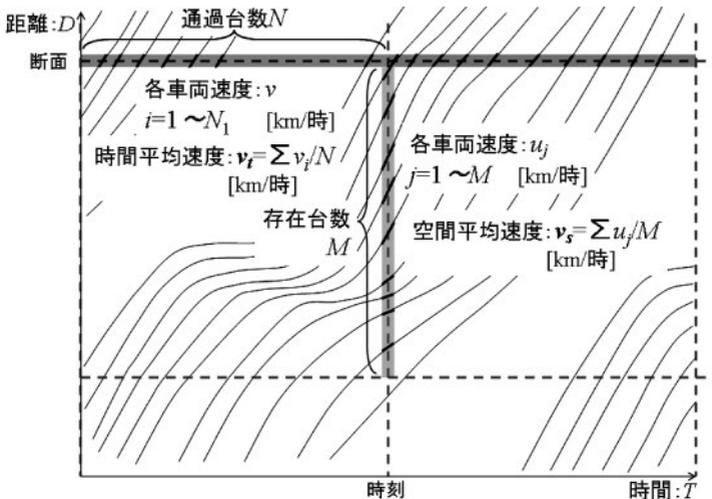


図 2.4 時間平均速度と空間平均速度

同じようにある時刻に一定距離の中に存在した各車の速度  $v_i$  をその台数  $M$  で算術平均したものを空間平均速度  $v_s$  といいます。

$$v_t = \sum_{i=1}^N v_i / N, \quad v_s = \sum_{j=1}^M v_j / M \quad (2.2)$$

では式 (2.1) を満たす速度  $V$  は時間平均速度  $v_t$  なのか、空間平均速度  $v_s$  なのか？結論は  $V = v_s$  です。つまり式 (2.1) は、正確には式 (2.3) のようになります。

$$Q = K v_s \quad (2.3)$$

式 (2.3) が成立することも純粋に物理的な特性（流量保存則）です。

一方、工学的に重要な問題として、観測上の問題があります。空間平均速度を知るには空間的に広がる範囲に存在する車の速度を瞬時に把握しなければなりません。これは高い上空から同時に複数車両の速度を計測でもしない限り不可能です。一方、ある断面で次々と通過する車の速度を計測することは比較的容易です。そこで、ある断面で通過した  $N$  台の各車の速度  $v_i$  を用いて空間平均速度を計算できれば助かります。実はこれは調和平均という平均的な代表値を計算すれば求められることがわかっています。調和平均とは「逆数の算術平均の逆数」です。式で書くと次のようになります。

$$v_s = 1 / \left( \sum_{i=1}^N (1/v_i) / N \right) \quad (2.4)$$

地点観測された各速度を調和平均すれば空間平均速度と同じ意味を持ちます。では式 (2.3) を満たす速度はなぜ空間平均速度でなければならないのでしょうか？

ここで図2.5のような例を考えてみましょう。自宅からインターまで10kmを行くのに平均速度が20 [km/時]、高速道路を60km乗ってその間の平均速度が90 [km/時]、高速道路を降りて目的地まで15kmに行く平均速度が45 [km/時] の場合、自宅から目的地までの平均速度はいくらでしょうか？この場合、自宅からインターまで  $10 \div 20 = 0.5$  時間 = 30分、高速道路は  $60 \div 90 = 2/3$  時間 = 40分、高

## 2.1 交通現象の捉え方

速を降りてから目的地まで  $15 \div 45 = 1/3$  時間 = 20分 で、合計の所要時間は90分 = 1時間半かけて、自宅から目的地までの  $10 + 60 + 15 = 85$ km を走っています。従って全体の平均速度は  $85\text{km} \div 1.5\text{時間} \div 56.7$  [km/時] となります。これは、実は10, 60, 15km という距離で重み付けされた速度の逆数  $1/20, 1/90, 1/45$  [時/km] の平均の逆数 (すなわち、重み付け調和平均) になっています。

$$\frac{1}{\left(\frac{10/20+60/90+15/45}{10+60+15}\right)} = 56.7 \text{ [km/時]}$$

これは、確かに図2.5に示す状況下における全体の平均旅行速度です。ちなみに、もしも単純に速度を重み付け平均すると次のようになります。

$$\frac{10 \times 20 + 60 \times 90 + 15 \times 45}{10 + 60 + 15} = 73.8 \text{ [km/時]}$$

この計算値は、実際の平均速度  $56.7$  [km/時] よりもかなり高い値ですし、この値は、単に計算された、という以外の何者でもない数値なのです！

この例では1台の3つの区間の平均速度から全区間の平均速度を求める計算を考えましたが、これを3つの区間の流れの平均速度と全区間の流れの平

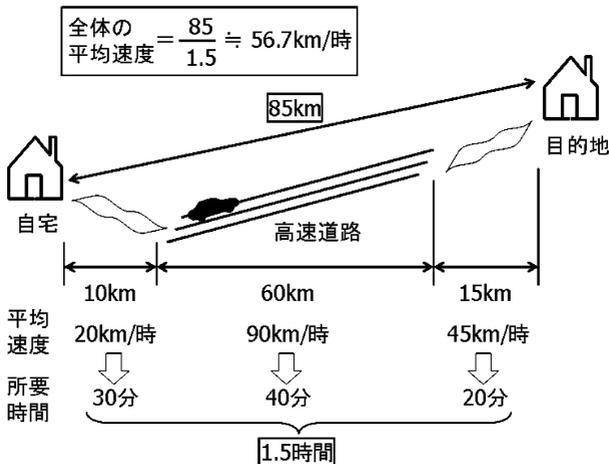


図 2.5 全体の平均速度の計算法

均速度と考えても同じことです。さらに、3台の各車両の平均速度から3台全体の平均、3つの車線の各車線の平均速度から3車線全体の平均、などを考える場合でも同じことです。つまりいずれにせよ、流れ全体の平均速度は空間平均速度（または個別速度値の調和平均操作）で考えなければいけないのです。

### 2.1.2 交通量，速度，交通密度

自動車交通流の観測では、地点（断面）での通過台数を計測する一定時間  $T$  として様々なものが用いられます。交通計画では  $T=1$  日や1ヶ月、1年といった比較的長い期間を対象としますが、交通渋滞解析や交通信号制御設計などでは、 $T=1$  時間、15分、5分、1分といった短い時間を対象とします。ここで1時間、あるいはそれより短い時間で計測された通過台数を1時間当たり台数で表したものを慣例的に交通流率 [台/時] と呼んでいます。ただし1時間の通過台数 [台] は、そのまま交通流率 [台/時] と値が一致するので、しばしば正確には交通流率と呼ぶべきものを交通量と表現することがあります。ここでは以下では、特に誤解が生じるおそれがない場合には「交通流率」を「交通量」と表現し、特別に単位時間当たりの通過台数であることを強調する必要がある場合のみ「交通流率」と呼ぶ慣例に従って表記することにします。

#### (1) 自動車交通流に特有の特性

交通量（交通流率）と交通密度と平均速度（空間平均速度）の3者には、流量保存則を意味する式 (2.3) が成立することがわかりました。一方、私たちは通常経験する交通の流れから次の事実を容易に認めることができます。

- ・ 限りなく交通が少ない状態（つまり、交通密度  $K \approx 0$ ）では、各車両は自由に自分の好きな速度（自由走行速度、その平均を  $v_f$  とします）で走行できるので、このときの平均速度は、交通が増えてきてほかの車両に邪魔されて自由に走れない場合の平均速度よりも高い（つまり、 $v_f$  は平均速度の最大値）。
- ・ 交通が増えれば（ここでは交通密度の増大）、平均速度は減少する。
- ・ 交通密度が最も高い状態では、車両はにっちもさっちも動けず、平均速度はゼロとなる ( $v_s = 0$ )。この交通密度の最大値のことを飽和密度  $K_j$  とい

う。

つまり、平均速度  $v_s$  と交通密度  $K$  の間には単調減少の関係があり、その境界条件は、1) 平均速度の最大値は  $v_s = v_f$  でこのとき交通密度  $K = 0$ 、2) 交通密度の最大値は  $K = K_j$  でこのとき平均速度  $v_s = 0$ 、の2つです。このことと式 (2.3) を用いると、平均速度  $v_s$  と交通密度  $K$ 、平均速度  $v_s$  と交通量  $Q$ 、交通密度  $K$  と交通量  $Q$  の関係が図2.6のような関係となることが数学的に導かれます。これを  $QVK$  関係の基本図 (Fundamental Diagram) と呼びます。

ここで注目すべき点は、 $Qv_s$  関係と  $QK$  関係において、交通量に最大値  $Q_c$  (極大値) が存在することです。これが「交通量の最大値 = 交通容量」が存在すること (すべきこと) を支持する理論的な根拠となっています。またこのことから  $0 < Q < Q_c$  の範囲の交通量  $Q$  において、同じ  $Q$  に対して  $v_s$  や  $K$  は一意には決まらず、 $Q_c$  に対応する平均速度  $v_s = v_c$ 、交通密度  $K = K_c$  を境に、これより大きい値と小さい値の2つを持つことが分かります。また  $Qv_s$  関係の縦軸からの傾きが交通密度  $K$  に、 $QK$  関係の傾きが平均速度  $v_s$  になることが分かります。

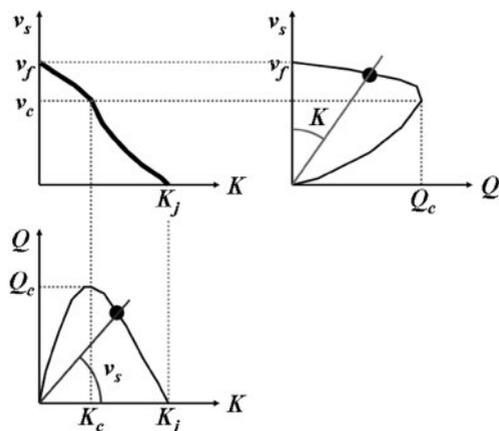
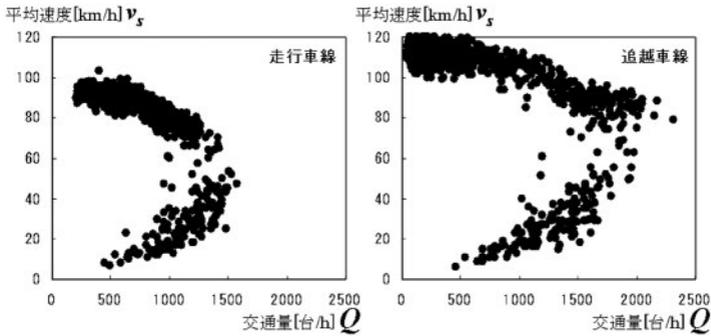


図 2.6  $QVK$  関係基本図

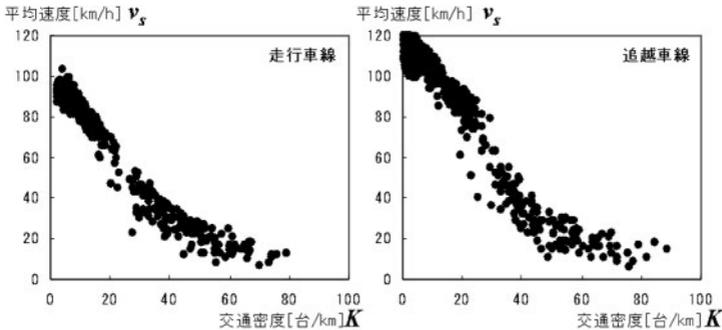
(2) 自動車交通流特性の実際

では図2.6のような理論予測に現実には合致しているのでしょうか？

図2.7は、車両感知器と呼ばれるセンサを利用して計測された交通量  $Q$ （正しくは5分間交通流率、つまり5分間通過台数を1時間当りに換算したもの）と、計測された各車両の速度の調和平均で得られた平均速度  $v_s$ 、およびこの2者の計測に式(2.3)を当てはめて計算された交通密度  $K$  との関係を示した例です。



a)  $Q-v_s$



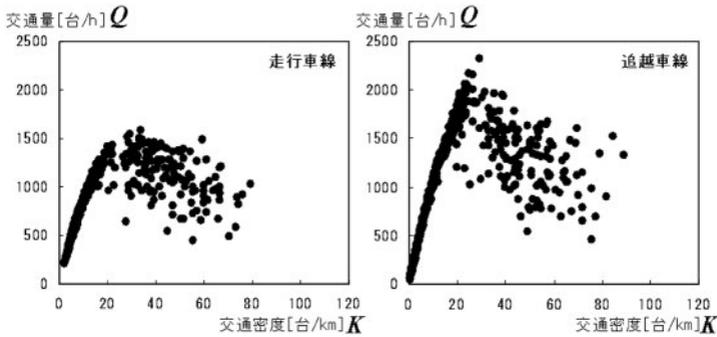
b)  $K-v_s$

中央道下り 40.45kp(1999年 8/21, 8/28, 9/18, 9/19の4日分サンプル)

図 2.7 (その1) QVK 関係の実態例

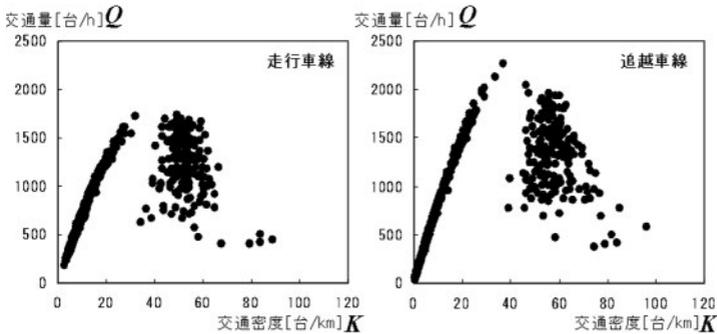
## 2.1 交通現象の捉え方

車両感知器による交通量計測技術は3.2.2節でも紹介されていますが、現在多いのはループコイルや超音波センサにより、そのセンサ位置に車両が存在することを検知するものです。これを各車線に配置し、さらに各車線上の上下流2箇所ずつ（例えば日本の都市間高速道路では上下流のセンサを5.5m離しています）設置し、この上下流のセンサ間の距離を通過時間差で除すことで、各車両速度を計測することができます。



c)  $Q$ - $K$  その 1

中央道下り 40.45kp(1999年 8/21, 8/28, 9/18, 9/19の4日分サンプル)



d)  $Q$ - $K$  その 2

中央道下り 26.20kp(1999年 8/21, 8/28, 9/18, 9/19の4日分サンプル)

図 2.7 (その 2) QVK 関係の実態例

図2.6に示した理論的な関係は、図2.7の実測値からもある程度読み取れます。a)とb)からは走行車線よりも追越車線のほうが $v_f$ が高く $Q_c$ も大きいこと、c)とd)からは $K_c$ より小さい交通密度では $QK$ の相関はとても強く、 $K_c$ より大きい交通密度では両者の相関がかなり低い傾向があることがわかります。またc)とd)では観測しているセンサの位置が違うのですが、 $K_c$ 付近の様子が異なっていることがわかります。d)では $Q_c$ 、 $K_c$ 付近に実測値がほとんど得られていないため、 $Q_c$ 、 $K_c$ を実測から知ることが困難になります。

### 2.1.3 待ち行列と遅れ

#### (1) 交通量累積図

流れ一般を扱う上で最も基礎的で重要なグラフは図2.1などの時間距離図です。さらに、自動車交通流の特性を表す場合には図2.6などの $QVK$ 関係基本図も重要です。もうひとつ、特に交通の円滑さ、逆にいえば「滞っている度合い」を評価するための理論的枠組みで大変有効な図式表現手段が、次の図2.8に示す交通量累積図（Cumulative Volume Diagram）です。

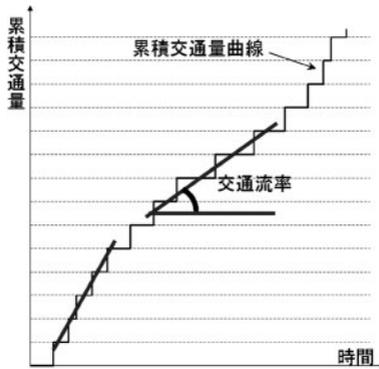


図 2.8 交通量累積図

図2.8は概念的にはきわめて簡単です。道路上のある場所で次々と通過した車を観測して、横軸に経過時間、縦軸にのべ通過台数（累積交通量）を取り、1台通過するごとに通過した時刻を横軸にとり、縦軸の台数を1台増加させながらプロットしていくのです。従って図2.8のように1台ずつ高さが階段状に

## 2.1 交通現象の捉え方

増えるグラフが作成されます。これを交通量累積図といいます。これは正確には階段状のグラフですが、交通流を考えるとときには何十台、何百台、何千台という交通量を対象としますので、これを近似的に滑らかな曲線と考えると、累積交通量曲線と呼んでいます。これを滑らかな（微分可能な）曲線と考えると、その傾きはその瞬間における交通流率を意味します。つまり、図2.2における一定の計測時間  $T$  を無限小にして交通流率を考えれば、時間的に連続的にいつでも定義できることになります。現実には車両が通れば1台、通らなければ0台ですから、（累積）交通量も交通流率も時間的に連続な変数ではありませんが、理論的な理想化のためにこのようなことをするのであります。

### (2) 待ち行列の変動解析

道路上の2点（A点とA'点）における累積交通量曲線を同じ交通量累積図上に重ねて描くと、同じ  $n$  台目がA点を通過した時間とA'点を通過した時間の差（2つの曲線の横方向のずれ）は、2点間の所要時間（旅行時間）になります。しかしこうした手法で旅行時間を求めるには、FIFO条件が必要です。

FIFO（First-In First-Out）条件とは、ある観測断面で見ている、そこに最初に到着したものがそこから最初に流出すること、すなわち追い越しが生じない条件を意味します。この条件が成立しないと旅行時間の図示に混乱が生じることを示したものが図2.9です。図では、時間距離図上で5台の車の軌跡が描かれ、観測断面AとA'における累積交通量図が描かれています。AとA'の交通量累積図を重ね書きすると、A点で4台目に通過した車がA'点では1台追い抜いて3台目になるため、2つの曲線の横方向のずれでは各車の旅行時間を正しく表現できないことがわかります。

現実の道路では追い越しが発生することもあるので、厳密にはFIFO条件は成立するとは限りませんが、特別に追い越しが多発する区間を除けば、ほぼ成立すると考えてよいでしょう。そこでこのFIFO条件を仮定できると考えるのです。ちなみに道路交通ではFIFO条件を仮定できますが、エレベータでは後に乗った人が先に出ますのでFILO（First-In Last-Out）条件が仮定されま

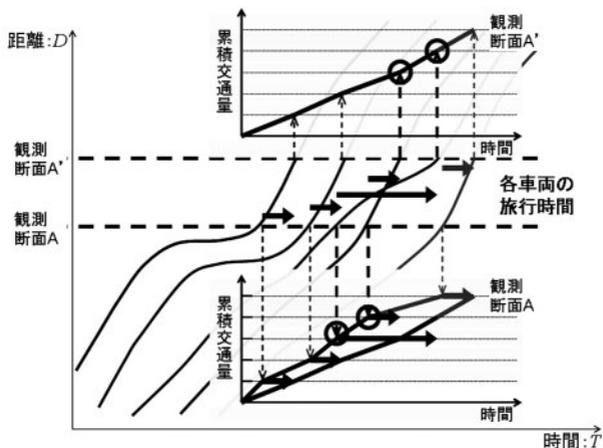


図 2.9 FIFO 条件と旅行時間

また、累積交通量曲線は行列の延伸・解消の解析に利用できます。ここで現実には車両の行列は次々と後ろに並びますので、行列に物理的な長さが生じます（物理待ち行列）。しかし基礎理論においてはこれを単純化して考え、仮想的に長さのない行列（点待ち行列）あるいは1台目の車の上に縦積みされた行列（縦積み行列）として取り扱います。

物理待ち行列と点待ち行列の違いを信号待ち車両の列の場合で模式的に示したものが図2.10です。こうした行列の問題を扱う場合は、図2.9のような2点での車両通過の交通量累積図ではなく、点待ち行列を考える地点を対象として、この地点に仮想的に各車が到着した時間で描いた累積交通量曲線を到着曲線、FIFO条件に則って行列から順番に発進していくときに、仮想的に各車がこの地点を出発した時間で描いた累積交通量曲線を流出曲線といいます。

図では赤信号中（図中のR）に8台の車両が停止線の上流側に物理待ち行列を形成し、信号が青に変わった後（図中のG）に順番に発進していく様子を時間距離図に示しています。点待ち行列を考える場合には、到着車両を現実の位置で停止せずにそのまま停止線まで仮想的に進入させて停止位置に到着した時間で到着曲線を描きます。流出曲線も本来の停止位置ではなく発進した車両が