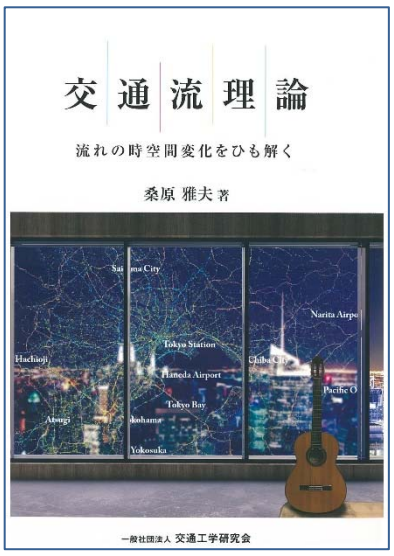
交通流理論

-流れの時空間変化をひも解く-



桑原 雅夫 著　交通工学研究会 発行　丸善出版 発売
ISBN978-4-905990-91-8 令和 2 年 3 月発行 A5 版 266 頁
本体価格 5,000 円+税　会員価格 4,500 円+税

本書は、交通工学に関する比較的新しい理論を一冊にまとめたものである。とくに、交通の流れは時間的に変化するので、全体を通して「時間」という概念を導入した理論について解説を行っている。渋滞という交通現象を論理的に解析するためには「時間」概念が必要であるだけでなく、そこから派生する情報提供、トリップの時刻選択、混雑課金、需要の時間分散など、施策や制御にも時間的にダイナミックな解析は有用な知見を与えてくれる。交通工学に関する新しい理論は多数の研究論文に散在しており、それらを学ぼうとするとかなりの文献に目を通さざるを得ない。

本書は「時間」という概念を大切にしながら、交通流の主要な解析手法を一冊にまとめたもので、初めて交通工学を勉強する学生や実務者も読み進められるように、図表や例題を使って、主要な理論を分かりやすく解説している。

目 次

まえがき
第 1 章 交通流解析の基礎
1.1 タイム・スペースダイアグラム
1.2 交通流率、交通密度、速度の関係
例題 1.1、例題 1.2、例題 1.3
1.3 交通流率-交通密度-速度の巨視的な関係
Column:超音波式車両感知器の仕組み
Column:Fundamental Diagram の渋滞側が観測される理由
付録 1.1:空間平均速度 v と時間平均速度 v_t の関係
第 2 章 時空間に変化する交通流解析
2.1 3 次元空間における交通流の表現
2.2 時間と空間に依存した諸量
2.3 移動観測者(Moving Observer)
2.4 交通量保存則
Column:累積高さを用いた交通量保存則
2.5 交通状態の領域境界
Column:移動観測者を用いた領域境界の速度
2.6 LWR モデル
例題:ボトルネック周辺の Wave 速度
例題:信号交差点における停止波と発進波
例題:衝撃波速度を利用した交通需要の推計
例題:渋滞区間長の推定
Column:交通密度が変化しない軌跡はあるか？
2.7 累積高さの最小包絡線(Lower Envelop)原理
2.8 おわりに
第 3 章 Variational Theory
3.1 相対容量(Relative Capacity)
3.2 累積高さ P の評価
3.3 均質で線形の Fundamental Diagram を持つ場合の効率的計算方法
例題:車両感知器とプローブデータを利用した軌跡推定
3.4 適用例
3.5 まとめ
第 4 章 決定論的な待ち行列理論
4.1 流入率、流出率と累積曲線
4.2 First In First Out (FIFO)サービス
Column:A(t)の傾きの非負条件
4.3 Point Queue コンセプト
Column:累積曲線による総旅行時間と遅れ時間の評価
Column:FIFO の妥当性
4.4 待ち行列の図解表現
4.5 Physical Queue
例題:Physical Queue の延伸
例題:Point Queue と Physical Queue の比較
第 5 章 追従モデル
5.1 Gazis-Herman-Rothery (GHR)モデル
5.2 Linear Car Following モデル
5.3 Simplified Car Following モデル
Column:衝撃波速度の Newell の四角形からの導出
5.4 追従モデルと巨視的な交通状態との関係
第 6 章 静的ネットワーク解析
6.1 ネットワークと交通需要
6.2 リンク交通量と交通量保存則
6.3 リンク費用関数
6.4 経路選択基準
6.5 利用者均衡配分(UE)
Column:Braess のパラドックス
6.6 システム最適配分(SO)
6.7 定式化
第 7 章 動的ネットワーク解析
7.1 ネットワークと主要な変数
7.2 制約条件
7.3 リンク旅行時間
7.4 経路選択基準
7.5 多起点多終点 OD の DUO 配分(Point Queue)
例題:高速と一般街路が並行するネットワークへの適用
7.6 1 起点多終点 OD の DUE 配分(Point Queue)
Column:Flow-independent なリンクコストの場合の DUE 配分
例題:単一起点の DUE 問題
7.7 Physical Queue による動的交通量配分
例題:Physical Queue による DUO 配分
7.8 残された研究課題
付録 A:One-to-Many OD の DUE 問題における ∇ τ η
第 8 章 出発時刻選択問題
8.1 単一ボトルネックにおける出発時刻選択(利用者の異質性なし)
Column:スケジュール費用と待ち時間費用の計測値
例題:希望到着時刻が一定の場合(単一ボトルネック問題)
例題:希望到着時刻が分布する場合(単一ボトルネック問題)
Column:需要の時間平滑化施策に関する政策
Column:需要の時間平滑化の潜在効果
8.2 分析の拡張
8.3 まとめ
付録:解の存在と唯一性の証明(希望到着時刻に着目した証明)
第 9 章 動的な限界費用
9.1 静的な限界費用
9.2 ボトルネック現象
9.3 動的な枠組みへの拡張
例題:単一ボトルネックにおける需給バランス
Column:社会費用の考慮
9.4 出発時刻選択を考慮した需要
9.5 まとめ　付録

書籍の発行につきましては下記サイトにてご案内いたします
発行 交通工学研究会 http://www.jste.or.jp/
発売 丸善出版 https://www.maruzen-publishing.co.jp/

交通流理論

流れの時空間変化をひも解く

桑原 雅夫 著

一般社団法人 交通工学研究会

まえがき

本書は，これまでの交通工学に関する研究と教育の中で，重要と思われる比較的新しい理論を一冊にまとめたものである．とくに，交通の流れは時間的に変化するので，全体を通して「時間」という概念を導入した理論について解説を行った．渋滞という交通現象を論理的に解析するためには「時間」概念が必要であるだけでなく，そこから派生する情報提供，トリップの時刻選択，混雑課金，需要の時間分散など，施策や制御にも時間的にダイナミックな解析は有用な知見を与えてくれる．

交通工学といっても守備範囲はかなり広く，学生諸君を見ていると，自分の研究に関連のある事柄については，研究論文などを読んで深く学ぶ機会が多いが，それ以外の事柄については知識が十分でないことも少なくない．また，長年の交通系コンサルの実務者との交流を通して，若手から中堅実務者の高い勉学意欲を知ることができた．彼らは，日常の業務がきわめて多忙で，意欲はあっても十分な自己研鑽の時間が取れないのが実情である．交通工学に関する教科書も多数出版されているが，技術者，研究者が知っておくべき比較的新しい理論を一冊にまとめた本は少なく，理論の多くは多数の研究論文に散在しており，それらを学ぼうとするとかなりの文献に目を通さざるを得ない．このような背景から，交通工学の主要な理論を一冊にわかりやすく取りまとめることで，彼らのニーズに応えることができると考えた．執筆にあたっては，初めて交通工学を勉強する学生や実務者も読み進められるように，図表や例題を使って分かりやすく解説することを心掛けた．

第 1 章から第 3 章までは，交通流に関する基本的事項を解説した後，実務にも有用であろう最近の解析手法を紹介している．タイム・スペースダイアグラムと累積図を統合した時間，位置，累積高さという 3 次元空間における交通流

の表現は，交通流率，交通密度，速度という従来の 3 指標に，累積高さを加えた解析を行うもので，諸外国の研究論文や教科書では目にするものの，我が国の教科書には，それほど取り上げられていない内容であろう．この累積高さを用いた考え方は，後に続く待ち行列理論や動的なネットワーク理論，出発時刻選択問題などにも援用されるもので，特に丁寧な説明を心掛けた．

第 4 章では，決定論的な待ち行列理論の解説を行っている．待ち行列モデルは，システムへの IN と OUT によってシステム状態が決まるものであるが，本書では IN と OUT が確率的に変動しない決定論的な待ち行列システムを対象としている．その理由は，確率的な待ち行列モデルについては，すでに多くの解説書があること，ボトルネックにおける大きな渋滞の解析は，決定論的な取り扱いで十分なことが多いことである．まず，取り扱いが簡単な Point Queue について，累積図の描き方と読み方を，いくつかの事例を通して解説した．次に，渋滞の延伸が考慮できる Physical Queue を取り上げ，第 2 章の交通流理論を用いた累積図の描き方などを紹介している．

第 5 章では，車の進行方向の動きを微視的に記述する追従モデルを簡潔に紹介した．追従モデルは，道路条件や交通条件によってさまざまなモデルが提案されているが，本書では標準的なモデルについて，モデルの構造や追従挙動の安定性などについて紹介している．追従モデルは，交通シミュレーションなどに多用されているだけでなく，様々な交通マネジメントの設計・評価や，最近では自動走行システムの開発などにも使われており，モデルの定性的な特性を理解しておくことは重要であろう．

第 6 章と第 7 章は，面的に広がるネットワーク上の交通解析について解説している．まず第 6 章では，従来の静的な交通量配分について，基本的事項のみを解説し，第 7 章の動的な解析へのつなぎを行っている．より詳細な静的な交通量配分については，多数の解説書があるので，そちらを参照されたい．第 7 章では，筆者らが長年研究を行ってきた，時間軸を追加した動的な交通量配分について解説している．動的な交通量配分に関する研究論文はかなり発表され

ているが，本書ではその中から理論的に正しく整理されている内容について解説を行った．なお最近では，解の安定性，存在性，唯一性などに関する理論的な研究論文も発表されているので，本書で基本を理解した方は，最新の研究論文に進んでいただければと思う．

第 8 章は出発時刻選択，第 9 章は動的な限界費用に関する解析手法について紹介している．どちらも，筆者の 2000 年代以降の研究に基づいた内容であり，時々刻々と変化する交通（渋滞）状況を対象とした解析手法である．これからの動的な流入制御，混雑課金，情報提供，需要調整の在り方に深く関係する内容であるので，ぜひ一読いただきたい．

定年の年に際し，以上のような目的と内容で，自分の専門分野である交通工学の理論について，これまで大学で講義してきた内容を再整理して本書をとりまとめた．当初は，講義ノートを整理すれば比較的簡単に完成すると思っていたのであるが，書き始めてみると理論的な理解があいまいであったり，表現の不統一などが数多く見つかり，本書の執筆の機会を得てこれらを整理できたことは，自分にとっても大変ありがたいことであった．

本書の出版に当たっては，吉井稔雄氏（愛媛大），堀口良太氏（(株)ITL），和田健太郎氏（筑波大）から貴重なコメントを数多くいただいた．また，赤松隆氏（東北大）との日常的な煙の中の雑談からも有用な知見を得た．さらに，川崎洋輔氏（東北大），梅田祥吾氏（東北大），（一社）交通工学研究会，丸善プラネット(株)には，本書の出版編集に多大なご協力をいただいた．皆さまに深く感謝するものである．

令和 2 年（2020 年）1 月

桑　原　雅　夫

目　　次

まえがき …… iii

第 1 章　交通流解析の基礎 …… 1
1.1　タイム・スペースダイアグラム …… 1
1.2　交通流率，交通密度，速度の関係 …… 3
＜例題 1.1 ＞ …… 6
＜例題 1.2 ＞ …… 6
＜例題 1.3 ＞ …… 7
1.3　交通流率－交通密度－速度の巨視的な関係 …… 8
Column：超音波式車両感知器の仕組み …… 10
Column：Fundamental Diagram の渋滞側が観測される理由 …… 14
付録 1.1：空間平均速度 v と時間平均速度 v_t の関係 …… 15
演習問題 …… 16
参考文献 …… 17

第 2 章　時空間に変化する交通流解析 …… 19
2.1　3 次元空間における交通流の表現 …… 20
2.2　時間と空間に依存した諸量 …… 22
2.3　移動観測者（Moving Observer） …… 23
2.4　交通量保存則 …… 26
Column：累積高さを用いた交通量保存則 …… 27
2.5　交通状態の領域境界 …… 27
Column：移動観測者を用いた領域境界の速度 …… 29
2.6　LWR モデル …… 29
＜例題：ボトルネック周辺の Wave 速度＞ …… 31
＜例題：信号交差点における停止波と発進波＞ …… 34
＜例題：衝撃波速度を利用した交通需要の推計＞ …… 36

＜例題：渋滞区間長の推定＞ …… 37
Column：交通密度が変化しない軌跡はあるか？ …… 45
2.7　累積高さの最小包絡線（Lower Envelop）原理 …… 46
2.8　お わ り に …… 51
演習問題 …… 53
参考文献 …… 55

第 3 章　Variational Theory …… 57
3.1　相対容量（Relative Capacity） …… 57
3.2　累積高さ P の評価 …… 59
3.3　均質で線形の Fundamental Diagram を持つ場合の効率的計算方法 …… 61
＜例題：車両感知器とプローブデータを利用した軌跡推定＞ …… 64
3.4　適 用 例 …… 66
3.5　ま と め …… 67
参考文献 …… 68

第 4 章　決定論的な待ち行列理論 …… 69
4.1　流入率，流出率と累積曲線 …… 70
4.2　First In First Out（FIFO）サービス …… 72
Column：$A(t)$ の傾きの非負条件 …… 73
4.3　Point Queue コンセプト …… 73
Column：累積曲線による総旅行時間と遅れ時間の評価 …… 75
Column：FIFO の妥当性 …… 77
4.4　待ち行列の図解表現 …… 78
4.5　Physical Queue …… 91
＜例題：Physical Queue の延伸＞ …… 96
＜例題：Point Queue と Physical Queue の比較＞ …… 97
演習問題 …… 101
参考文献 …… 103

第5章　追従モデル …… 105
5.1　Gazis-Herman-Rothery（GHR）モデル …… 105
5.2　Linear Car Following モデル …… 107
5.3　Simplified Car Following モデル …… 108
Column：衝撃波速度の Newell の四角形からの導出 …… 112
5.4　追従モデルと巨視的な交通状態との関係 …… 113
参考文献 …… 114

第6章　静的ネットワーク解析 …… 117
6.1　ネットワークと交通需要 …… 117
6.2　リンク交通量と交通量保存則 …… 118
6.3　リンク費用関数 …… 118
6.4　経路選択基準 …… 120
6.5　利用者均衡配分（UE） …… 121
Column：Braess のパラドックス …… 124
6.6　システム最適配分（SO） …… 125
6.7　定 式 化 …… 126
演習問題 …… 131
参考文献 …… 132

第7章　動的ネットワーク解析 …… 133
7.1　ネットワークと主要な変数 …… 135
7.2　制 約 条 件 …… 136
7.3　リンク旅行時間 …… 138
7.4　経路選択基準 …… 139
7.5　多起点多終点 OD の DUO 配分（Point Queue） …… 140
＜例題：高速と一般街路が並行するネットワークへの適用＞ …… 145
7.6　1起点多終点 OD の DUE 配分（Point Queue） …… 147
Column：Flow-independent なリンクコストの場合の DUE 配分 …… 155
＜例題：単一起点の DUE 問題＞ …… 162
7.7　Physical Queue による動的交通量配分 …… 165

＜例題：Physical Queue による DUO 配分＞ …… 175
7.8　残された研究課題 …… 181
付録 A：One-to-Many OD の DUE 問題における $\nabla_\tau \boldsymbol{\eta}$ …… 183
演習問題 …… 185
参考文献 …… 186

第 8 章　出発時刻選択問題 …… 189
8.1　単一ボトルネックにおける出発時刻選択（利用者の異質性なし） …… 190
Column：スケジュール費用と待ち時間費用の計測値 …… 198
＜例題：希望到着時刻が一定の場合（単一ボトルネック問題）＞ …… 198
＜例題：希望到着時刻が分布する場合（単一ボトルネック問題）＞ …… 202
Column：需要の時間平滑化施策に関する政策 …… 209
Column：需要の時間平滑化の潜在効果 …… 210
8.2　分析の拡張 …… 211
8.3　ま と め …… 222
付録：解の存在と唯一性の証明（希望到着時刻に着目した証明） …… 224
参考文献 …… 225

第 9 章　動的な限界費用 …… 227
9.1　静的な限界費用 …… 228
9.2　ボトルネック現象 …… 229
9.3　動的な枠組みへの拡張 …… 231
＜例題：単一ボトルネックにおける需給バランス＞ …… 235
Column：社会費用の考慮 …… 237
9.4　出発時刻選択を考慮した需要 …… 237
9.5　ま と め …… 246
付　　録 …… 249
参考文献 …… 249

索　　引 …… 251

第 1 章

交通流解析の基礎

本章では，交通の流れをわかりやすく記述するタイム・スペースダイアグラムを用いて，交通流の 3 つの巨視的な諸量である交通流率，交通密度，速度を定義するとともに，3 つの諸量間の経験的な関係を表す Fundamental Diagram について解説を行う．さらに，タイム・スペースダイアグラムとともに交通流解析でよく使われる累積図を紹介し，タイム・スペースダイアグラムと累積図の関係を，時間－空間－累積高さという 3 次元空間で解説する．この 3 次元空間における交通流の表現は，次章からの交通流解析において，数多く利用されるものである．

1.1 タイム・スペースダイアグラム

ある車両 i が道路を移動しているとき，その車両の先頭位置の移動軌跡は次のように位置 $x_i(t)$ あるいは時刻 $t_i(x)$ の関数として表すことができる．

$x_i(t)$＝車両 i の時刻 t における位置
$t_i(x)$＝車両 i の位置 x における時刻

タイム・スペースダイアグラムは，横軸に時間，縦軸に距離をとり，そこに車両の走行軌跡 $x_i(t)$ あるいは $t_i(x)$ を表した図である．図 1.1(a) はその例で