

多クラス多車線の交通流モデル Multi-class and/or Multi-lane Traffic Flow Models

瀬尾 亨*
柳原 正 実**

ドライバーの異質性や複数の車線を考慮するように拡張された交通流モデルについて紹介する。これらのモデルはKWモデルを基礎としているが、ある意味で本質的な変更を加えていると言える。すなわち、元のKWモデルではボトルネックの位置や性質はある程度外生的に与えていたが、これらの多クラス・多車線モデルはその内生的な説明を試みるものと位置付けられる。例えば、ドライバー挙動と車線変更に関する自然な仮定に基づき、車線利用率の偏りや渋滞時容量低下現象を再現する例がある。また、これらのモデルは車線変更の要素を暗にまたは明示的に含み、より高度な交通制御に際して重要な要素が含まれていると言える。とは言い、今のところ多クラス・多車線モデルは完成の域には至っておらず、さまざまなモデルが提案されている段階である。本稿では、それらのうち代表的なアプローチについて解説する。

キーワード 交通流モデル 車線変更 車両異質性 ボトルネック容量低下

1. はじめに

本稿ではKWモデルの枠組みを拡張し、多車線道路や、挙動の異なる複数の車種すなわち多クラス性（注1）を明示的に考慮したモデルについて取り上げる。これらの要素を考慮すると、単一クラス単一車線を想定するオリジナルのKWモデルと比較し、実際の交通流により近い複雑な現象を表現できるため、より現実的な交通流の予測・制御に貢献し得ると期待できる。

モデルの特に重要な長所として、自明でないボトルネックの形成やその容量を予測し得る点がある。和田氏の稿で述べられたようにKWモデルはボトルネックに起因する渋滞を主に扱うが、ボトルネックの位置や容量はある程度外生的に与えざるを得なかった。そのため、いわゆる複雑な現

象、例えば渋滞時捌け容量低下（逆入型FD, capacity drop）現象などは「起きるもの」と与えられており、「なぜ起きるのか?」「どういう場合にどの程度容量が低下するのか?」「対策は?」といった疑問には回答できなかった。多クラス多車線モデルはこれらの疑問に対し、車線間・車両間の交通状態や挙動が不均一であることに基づき一定の回答を与える。

複数の車線を明示的に考慮することにより、車線変更の量や車線ごとの交通状態を直接記述する点も有用と言えるだろう。臨界状態においては走行車線に車線利用率が偏るといった現象も観測されていることから多車線モデルの重要性がわかる。多車線モデルでは車線変更が交通流を阻害する現象、キープレフトが守られず効率が低下する現象、車線数減少部や分合流部で車線利用率が大

* [正会員] 東京工業大学環境・社会理工学院研究員 (TEL: 03-5734-2575)

** [正会員] 首都大学東京都市環境科学研究科都市基盤環境学域助教 (TEL: 042-677-1111)

幅に偏る現象などを表現でき、対策の立案につながる。

車両挙動の異質性の考慮も重要性である。まず、車両ごとに属性（例：希望走行速度、目的地）が異なることが車線変更の主要な動機と考えられる。また、感知器で観測される流率密度関係のばらつきは車両の異質性によっても説明される。挙動の異なる車両がランダムに混在している場合、観測時間帯によって巨視的な交通状態がばらつくのは当然と言えよう。より系統的にばらつく現象、例えば交通状態が振動するヒステリシス現象を異質性によって説明する例もある。高速道路における大型トラックのような特に低速な車両によって引き起こされる渋滞は moving bottleneck という理論により記述できる。

このようにさまざまな利点のある多クラス多車線モデルだが、当然さまざまな追加要素を表現するためにモデルが複雑になる傾向にある。また、モデル化にもさまざまな動機やアプローチがあり、現時点では完成版と言えるものはないように思われる。以下では、その代表的なアプローチのうち、

- マクロな多クラスモデル
- 車線を離散化した多車線モデル
- ミクロ現象の記述に基づく多クラス多車線モデル

の3種について概説する。いずれも KW モデルの直接的な拡張である。大まかに言って、1点目の方がよりマクロなモデルであり、2点目、3点目はよりミクロな現象を明示的にモデル化するアプローチである。

2. 車両挙動の異質性の表現

最初に、KW モデルの枠組みで車両の異質性を表現する基本的な考え方を紹介する。

実際の車両間に異質性がある要素は多岐にわたる。その中で、KW モデルで最も簡潔に表現できる要素は各車両の車頭距離-速度関係としてのFD (s-v 関係) と考えられる。s-v 関係はある車頭距離または交通密度に対して車両がどの速度で走行するかを記述するものであり、これが積み重

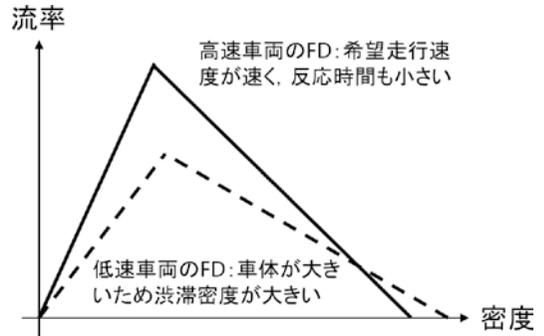


図-1 車両ごとFDによる異質性の表現

なって巨視的な流率密度関係となる（直前の瀬尾の稿も参考のこと）。そして、車両間の異質性は s-v 関係のパラメータ（例：希望走行速度、反応時間）が車両ごとに異なることにより表現される。この異質性はいわゆる discretionary な車線変更（注2）と密接に関係しており、多くのモデルがこの考え方を採用している。異質性のあるFDの例を図-1に示す。

他の異質性として、車両の経路および目的地も考えられる。これらはいわゆる mandatory な車線変更（注2）と密接な関係にあり、分合流部などで重要な要素となる。この異質性を表現するモデルも提案されている。

3. マクロな多クラスモデル

本アプローチでは多クラス性を明示的にモデル化する。一方、車線概念は明示的には登場しない。

3.1 車両走行挙動に異質性を持たせたモデル

まず、交通流理論を複数のクラスに拡張するにあたり、それぞれのクラスの交通状態量を定義する必要がある。クラス m の車両の流率と密度を q_m, k_m と表現する。ここで、全体の交通量 q と密度 k はすべてのクラスの合計として以下のように表現される。

$$q = \sum_m q_m, k = \sum_m k_m \dots\dots\dots (1)$$

ただし、クラス数は M としている。分合流がない区間では、クラスごとの交通流に対してそれ

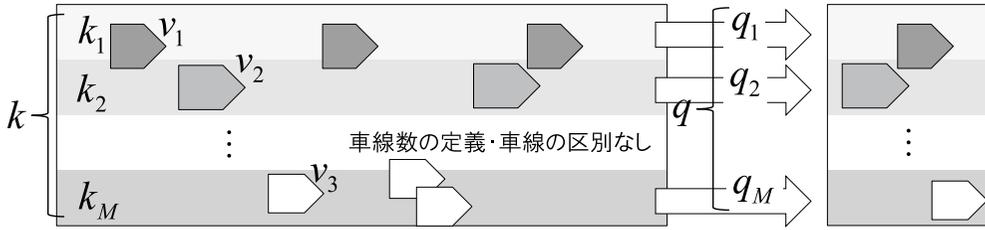


図-2 多クラス交通流モデル

ぞれ保存則が成り立つので、

$$\frac{\partial k_m(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q_m(x, t)}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

と言える。式 (2) の q_m を FD により決定すれば交通流モデルの完成である。ここまでは単一クラスの KW モデルの考え方と同様である。違うのは、FD による決定の仕方である。多クラスモデルでは FD を、

$$q_m = Q_m(k_1, k_2, \dots, k_M) \dots\dots\dots (3)$$

と定義する。この式の意味するところは、それぞれのクラスの色は自クラスの密度だけでなく他のクラスの密度の影響も受ける、ということである。関数 Q_m を適切に定義することで異質性のある車両同士の相互作用を表現することができる。例えば、希望走行速度と反応速度が異なるクラスを考え、渋滞時のヒステリシス現象を再現したモデル¹⁾や、クラスごとの密度 k_m の影響を評価するときに乗用車換算台数 (PCU) に基づき重み付けすることで普通車と大型車からなる多クラス交通流を表現するモデル²⁾³⁾など、さまざまな亜種が提案されている。

本アプローチに属するモデルの極めて特殊な例として、Jin⁴⁾ による unifiable モデルがある。これはある意味他の多クラスモデルとは逆の発想に基づいており、「交通流全体 (式 (1) の q, k) としての挙動は単一クラスの KW モデルに従うが、交通流を構成する個別の車両は多クラスからなり互いに追越し合っている」というものである。オリジナルの KW モデルにおいて、暗に・明に仮定されることの多い FIFO 原則は、実は必須ではなかったことを示しており興味深い。

本アプローチでは、車線の違いや車線数は考慮していない。ただし、あるクラスの車両が他のクラスの車両を追い越す現象が発生し得るため、複数車線に対するモデリングと解釈できる。ただし、追越し時にマイクロなスケールでどのような現象が起きているかは明確ではない (無理やり解釈するならば、図-2 のように各クラス専用の仮想的な車線がある道路にて、ある車線の走行速度の決定の際には他車線の密度にも影響を受ける交通流であり、不自然と言わざるを得ない)。つまり、単一クラスの KW モデルと異なり、等価なマイクロモデルは一般に存在しない。そのため、FD である Q_m は巨視的な経験則に過ぎず、マイクロの基礎付けが困難である。これは FD の合理的な選択が難しいことを意味する。一方、車線概念が登場しないことは、モデルの構造・取扱いが比較的簡潔であることにもつながっている。

3.2 目的地に異質性を持たせたモデル

分合流部や織り込み区間での mandatory な車線変更による影響の表現のみに特化し、より簡潔かつマイクロ的基礎付けのあるモデルも提案されている⁵⁾。本モデルは、車線変更の過程では 1 台の車両が 2 車線を占有する、すなわち見かけ上の大きさ (PCU に相当) が倍になるという単純な事実に基づき、単一クラス単一車線 KW モデルの FD を地点ごとの車線変更量に依存するよう変更したものである。保存則式で表現すると、

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial Q(k(1+\epsilon(t, x)))}{\partial x} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで $\epsilon(t, x) > 0$ は車線変更する車両の多さを意味しており、ドライバーの行動原理の仮定に応じて別途モデル化される。

本モデルは、その単純さにもかかわらず、分合流部周辺や車線数減少箇所における錯綜による効率低下をよく再現できたことが報告されている。

4. 車線を明示的に考慮したモデル

本アプローチでは多車線性を明示的にモデル化する。一方、多クラス性は必ずしも考慮されない。

4.1 多車線道路の保存則

オリジナルのKWモデルでは路線全体での車両の保存則を考えていた。本アプローチでは、より細かいレベルの保存則、すなわち車線ごとの車両の保存則を考える。位置 x 、時刻 t における車線 l での保存則を成り立たせるためには、「同一車線の上流から流入する車両」「同一車線の下流へ流出する車両」に加えて「他車線から流入する車両」「他車線へ流出する車両」を考慮に入れる必要がある。よって、図-3のように車線 l から車線 k への単位距離あたりの車線変更流率を Φ_{lk} とおくと、保存則は、

$$\frac{\partial k_l(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial q_l(x, t)}{\partial x} = \sum_k (\Phi_{kl} - \Phi_{lk}) \dots (5)$$

と表現できる。ただし、 A は車線数である。

ここで、和田氏の稿で述べられた Demand/Supply アプローチに従い、図-4のように単位区間あたりの車線 l から車線 k への車線変更需要を L_{lk} と定義し、車線 l の非車線変更需要を T_l と定義する。このとき、長さ Δx の区間の車線 l から下流に流れる需要を D_l 、車線 l への需要を TD_l とすると、

$$D_l = T_l + \sum_{k \neq l} \Delta x L_{lk} \dots (6)$$

$$TD_l = T_l + \sum_{k \neq l} \Delta x L_{kl} \dots (7)$$

という関係が成り立つ。車線変更流率 Φ_{lk} と流率 q_l は、この車線変更需要 L_{lk} と非車線変更需要 T_l に依存していると考えられる。言い換えると、実際に車線変更する車両数は、車線変更したい車両数と行先車線の余裕によって定まる。

このアプローチは単一クラス単一車線のCTM

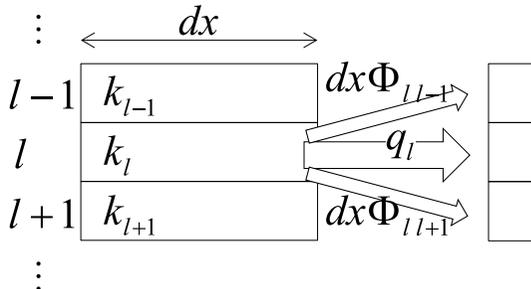


図-3 多車線モデル

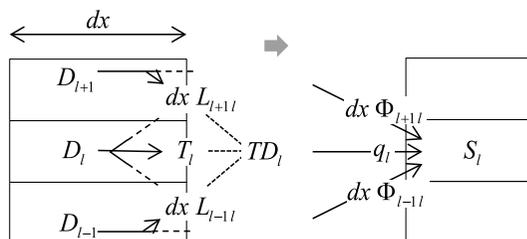


図-4 車線変更需要と車線変更流率

のように位置 x 、時刻 t をそれぞれ間隔 Δx 、 Δt で離散化することで数値的に計算できる。このとき、実現する車線変更流率は Incremental (IT) Transfer Principle⁶⁾ と呼ばれる原理により計算できる。本原理は、前が開いているのに車両が前進しないなどの物理的に不自然な挙動が発生しないことを保証する。また、数学的にはCTMの理論的基礎である Godunov 法と等価であるため、CTM 風のモデルの構築が容易である。詳細は省略するが、車線変更流率 Φ_{lk} と流率 q_l は、IT Principle に基づき車線変更需要 L_{lk} 、車線ごと需要 TD_l 、非車線変更需要 T_l から以下の式により算出される。

$$q_l = T_l \min(1, S_l / TD_l) \dots (8)$$

$$\Phi_{kl} = L_{kl} \min(1, S_l / TD_l) \dots (9)$$

ただし、 S_l は車線 l の下流の許容可能な交通量、すなわち供給を示す。供給 S_l は各車線のFDに基づいて算出される。したがって、車線ごとに異なる流率密度関係を定義することができ、その関係式は D_l と S_l に反映される。

このアプローチが表現する車線変更現象を決定

付ける重要なポイントは車線変更需要 L_{ik} のモデル化である。これはドライバーの車線変更挙動のモデル化と同義であり、さまざまな方法が提案されている。次の節で詳細に説明する。

4.2 車線変更需要のモデル化

Daganzo ら⁶⁾ は特定の車両は特定の車線しか走行できない状況を再現するモデルを構築した。例えば、High occupancy vehicle レーンや、分流部直上流部での mandatory な車線選択の表現を念頭に置いている。車線変更需要は、すべての車両が自分が利用可能な車線から最も速いものを選択するように、すなわち車線ごとの速度が均衡するようにモデル化されている。すなわち、discretionary な車線変更も考慮されている。

Laval ら⁷⁾ はドライバーがより速い車線に移ろうとする妥当な行動原理を考え、車線ごとの速度差が大きいほど速い車線への車線変更需要が大きくなると仮定し、速度差に比例した需要を用いるモデルを提案した。また、より現実的な仮定として、車線ごと速度は瞬時には均衡せずある程度の遅れがあると想定されている。ところで、ある車両が速度の遅い車線から速い車線に移動した場合、車線変更直後にはその車線本来の速度より顕著に低速なはずであり、その車線の後続車両に悪影響を及ぼすはずである。Laval ら⁷⁾ はこれが車線変更頻発箇所での交通流の効率性低下の原因であると考え、KW モデルに基づくマクロ交通流モデルの内部に有限加速度のマイクロモデルで記述される離散的な車両を挿入するハイブリッドな手法を提案した。

塩見ら⁸⁾ はより制御指向のモデルを提案している。本モデルでは、ある車線を走行することの認知コストという概念を用い、このコストに基づき車線選択率が均衡に向かうような需要を定義している。この車線の認知コストは、低速であるほどコストが高いことのほか、キープレフト原則などの交通法規や今後可能となるであろう動的課金も考慮して定式化されている。追越し車線の方が一般に高速である理由は、車線ごとにFDを与えることで表現している。他のモデルではあまり着目されていない実データからのキャリブレーション

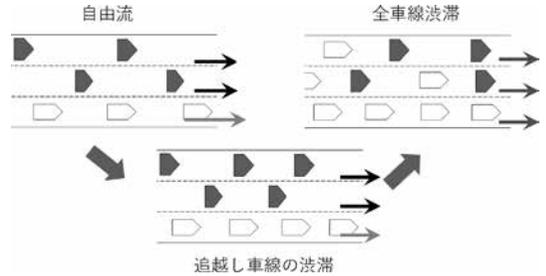


図-5 交通状態推移図

法も提案し、実際の交通流に見られる車線利用率の非効率な偏りを再現している。

多車線モデルの適用としては、Roncoli ら⁹⁾ は自動運転技術の適用を念頭に車線変更の最適化問題を構築している。

なお、これらのモデルでは車両ごとのFDはいずれも全車両同一であり、FDが異なるという意味での多クラス性は考慮されていない。

5. ミクロ現象の記述に基づく多クラス多車線モデル

このアプローチでは、「速い車両が遅い車両を追い越すために車線変更する」という素朴な事実を、多クラス性と多車線性を明示的に考慮してモデル化する。Daganzo¹⁰⁾ が単一クラス単一車線のKW モデルでは説明できない複雑な現象を説明するために提案した理論が代表的である。

Daganzo¹⁰⁾ のモデルはDaganzo ら⁶⁾ の多車線モデルの多クラス化拡張と位置付けることができる。すなわち、高速車両と低速車両が存在し、高速車両は追越し車線と走行車線を自由に選択できるが、低速車両は走行車線しか選択できないとされ、各車両は瞬時に自車に最適な(最も速い)車線を選択すると仮定されている。このとき、道路が自由流状態から渋滞に遷移する過程を図-5に示す。白は高速車両、灰色は低速車両である。最初は高速車両が自由に低速車両を追い越しているが、次第に追越し車線が混雑し、最終的に走行車線・追越し車線ともに渋滞する。

ここで、ドライバーの行動論的な仮定として、「高速車両のドライバーは自由流においては反応

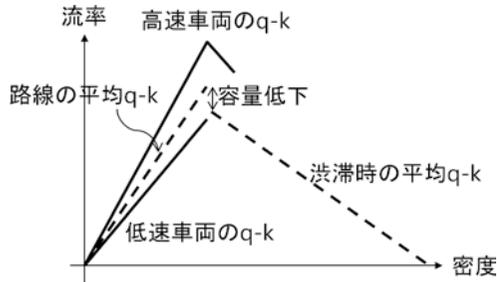


図-6 多クラス多車線モデルによる容量低下現象の説明

時間が小さいが、走行車線での渋滞に巻き込まれると『やる気を失い』反応時間が大きくなる」というものを導入する。その結果、複雑な現象、例えば渋滞時の容量低下現象・逆入型FD(図-6)などが生じることが理論的に説明された。なお、容量低下が起きる寸前は追越し車線のみが渋滞している状態であり、走行車線も渋滞すると容量低下が生じると説明される。

本モデルは車両固有の性質に着目した車線単位の制御などに有効と考えられる。また、近年は車両軌跡に代表されるマイクロなデータの利用可能性が急速に高まっているため、本アプローチを用いた当該データの活用へ向けた研究も期待される。

ただし、本モデルの知見はあくまで定性的なものであり、定量的な精度の検証はなされていない点には注意が必要である。そもそも本モデルを検証できる実データが当時は存在しなかったことも大きな理由であると考えられる。最新のデータを活用した研究が期待される。他の課題としては、効率的な数値計算法が提案されていない。ドライバーの反応時間に関する仮定も若干議論の余地があるだろう。

6. おわりに

本稿では、ドライバーの異質性や複数の車線を考慮する交通流モデルについて紹介した。昨今着目される自動運転機能や高齢ドライバーの表現や、コネクテッドカーを用いた車線単位の交通制御などに関して重要な役割を果たすと期待される。しかし、これらのモデルの再現性の検証やキャ

リブレーション法に関する知見は未だ十分とは言えず、今後の発展が待たれる。また、車線変更を扱う場合にはモデルが複雑化する傾向にあるため、対象とする現象、分析精度、利用できるデータ等に合った適切な粒度のモデルを利用する必要があるだろう。

脚 注

- (注1) 本稿では、クラスとは「同一の挙動を持った車両の集合」を指す。挙動とは所与のモデル変数(例：希望走行速度、目的地)を意味し、動的な状態(例：速度、現在地)とは区別する。ある交通流にて車両間の挙動・属性に異質性がある場合、それを多クラス交通流と呼ぶ。文献によってはクラスのことをcommodityやpopulationと呼んでいる場合もある。
- (注2) discretionaryな車線変更とは、旅行にとって必要不可欠ではない車線変更のことである。低速車両を追い越す挙動が代表例である。一方、mandatoryな車線変更とは、必要不可欠な車線変更であり、例えば分流部で目的地へ向かえる車線へ移動しなければならない場合がそれに当たる。

参 考 文 献

- 1) Wong, G. C. K. and Wong, S. C.; "A multi-class traffic flow model—an extension of LWR model with heterogeneous drivers", *Transp. Res. A*, Vol. 36, pp. 827~841, 2002
- 2) van Lint, J. W. C., Hoogendoorn, S. and Schreuder, M.; "Fastlane: New Multiclass First-Order Traffic Flow Model", *Transp. Res. Rec.*, Vol. 2088, pp. 177~187, 2008
- 3) Qian, Z. S., Li, J., Li, X., Zhang, H. M. and Wang, H.; "Modeling heterogeneous traffic flow: A pragmatic approach", *Transp. Res. B*, Vol. 99, pp. 183~204, 2017
- 4) Jin, W. -L.; "Unifiable multi-commodity kinematic wave model", *Proc. of ISTTT22*, pp. 137~156, 2017
- 5) Jin, W. -L.; "A kinematic wave theory of lane-changing traffic flow", *Transp. Res. B*, Vol. 44, pp. 1001~1021, 2010
- 6) Daganzo, C. F., Lin, W. -H. and Del Castillo, J. M.; "A simple physical principle for the simulation of freeways with special lanes and priority vehicles", *Transp. Res. B*, Vol. 31, pp. 103~125, 1997
- 7) Laval, J. A. and Daganzo, C. F.; "Lane-changing in traffic streams", *Transp. Res. B*, Vol. 40, pp. 251~264, 2006
- 8) 塩見康博, 谷口知己, 宇野伸宏; "車線交通量の均衡メカニズムを内生化した多車線交通流モデルの構築", *交通工学論文集*, Vol. 1, pp. 1~10, 2015
- 9) Roncoli, C., Papageorgiou, M. and Papamichail, I.; "Traffic flow optimisation in presence of vehicle automation and communication systems—Part II: Optimal control for multi-lane motorways", *Transp. Res. C*, Vol. 57, pp. 260~275, 2015
- 10) Daganzo, C. F.; "A behavioral theory of multi-lane traffic flow. Part I: Long homogeneous freeway sections", *Transp. Res. B*, Vol. 36, pp. 131~158, 2002