

車線交通量の均衡メカニズムを内生化した 単路部多車線交通流モデルの構築

谷口 知己¹・塩見 康博²・宇野 伸宏³・嶋本 寛⁴・中村 俊之⁵

¹非会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-2-438)

²正会員 立命館大学 理工学部 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

E-mail:shiomi@fc.ritsumei.ac.jp

³正会員 京都大学経営管理大学院 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-2-434)

E-mail:uno@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-2-434)

E-mail:shimamoto@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

⁵正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1-2-434)

E-mail:nakamura@trans.kuciv.kyoto-u.ac.jp

ATMにおける車線マネジメントとは、オンラインで収集される交通データに基づき時々刻々と変化する交通状況を把握し、ソフト的にボトルネックの交通容量を最大限に維持することを意図したものである。一方、現在の高速道路の管制の現場では、一定距離間隔・車線毎に設置された車両感知器から収集されるデータを一定時間・車線の区別なく集約した上で現況把握・将来予測への活用が検討されている。いわば、収集されたデータの解像度を落として交通状態把握を行っているに留まっており、ボトルネックでの車線利用率の平準化、分合流部での隘路現象、工事・事故に伴う車線閉塞の影響を適切に評価するには不十分であると考えられる。本研究では、収集されたデータの解像度を極力落とすことなく、かつ高速道路のネットワークレベルの交通状況をオンラインで把握するプラットフォームとして運用可能な、マクロ交通流理論に基づく多車線交通流モデルを構築する。

Key Words : *traffic flow model, Lane-Changing, Lane-flow distribution, Active traffic management*

1. はじめに

欧米諸国を中心に実務展開されつつある Active Transportation and Demand Management (以下, ATDM) は、交通状況のオンラインモニタリングとそれに応じたコントロールにより道路システムの効率化を図る取り組みである¹⁾。TDM 施策とボトルネック対策である Active Traffic management (以下, ATM) を包括化することで、交通需要を抑制しながら、ボトルネック容量の増大を図ることにより、高い渋滞緩和・抑制効果が期待されている。これを実現するためには、道路管理者側から運転者に対し、情報提供・走行規制・運転支援など、動的かつ能動的な、すなわち Active な介入を行うことが重要とされ、介入の段階としては mode choice, departure time/route choice, lane choice の 3 段階に分類される²⁾。それぞれは、交通需要・ネットワーク需要の低減、及びボトルネック容量の

増大に対応している。Lane choice に対応するボトルネック容量増大のための具体策としては、Adaptive ramp metering, Dynamic shoulder lane, Dynamic lane use control, Dynamic junction control, Dynamic speed limits などが挙げられ、適切な車線運用によるボトルネック容量の改善が意図されている。

一方、ATM では動的な施策の実施を可能とするため、適切な道路モニタリングシステム、及びオンラインでの施策評価・提案システムが前提とされている。例えば、我が国では首都高速道路で開発されている RISE や阪神高速道路における HEROINE などが、ネットワークレベルでのオンラインモニタリング・施策評価・提案を実現するシステムに該当する。しかしながら、これらのシミュレーションモデルでは交通流を車線別に表現することができないため、今後、我が国においても施策展開の可能性のある車線レベルでの交通運用策を評価することは

難しい。また、ATM 施策の評価以外でも、インシデント・工事時の車線規制、オフランプ渋滞の延伸による本線への影響、合流部のチャネルリゼーション、織り込み区間など、車線別の交通状況を的確に考慮する必要のある事象は数多く存在する。このような事象を評価する際には、現状では地点レベルでのミクロシミュレーションでの評価結果をマクロシミュレーションの入力とした事例³⁾や、ミクロシミュレーションとマクロシミュレーションを統合させた事例⁴⁾が挙げられる。しかしながら、動的に変化する交通状況に対し、ミクロモデルとマクロモデルを整合した形で内部パラメータを的確に調整するには限界があり、評価可能な事象や施策が大幅に制限されることとなる。今後、次世代 ITS の進展などにより車線マネジメントを含む多様な交通管制メニューが実施可能となった場合、高速道路のネットワークレベルの交通状況をオンラインで車線別に把握・予測し、車線レベルでの交通運用策も評価可能なプラットフォームシステムの必要性は少なくない。

そこで本研究では、高速道路ネットワークを対象として、マクロ交通流理論を拡張した多車線交通流モデルを構築する。具体的には、まずは高速道路の単路部を対象として、Mandatory でない車線変更（ランプからの流入・流出のためではない車線変更）の動機発生、及びその実施過程について考察し、マクロな枠組みで記述できるようモデル化を行う。この際、交通密度-車線利用率曲線に着目し、車線変更を車線利用率均衡へと向かうダイナミクスとして表現する。その上で、First order のマクロ交通流モデルにおいて車線変更を含むセル間の車両移動量を決定するルールとして用いられている IT principle⁵⁾を部分的に修正して適用し、車線変更を伴う交通流をモデル化する。構築したモデルを用い、2 車線・3 車線の単路部を想定した仮想的な環状ネットワークを対象に、車線利用率均衡状態の再現性について検証を行う。

本稿の構成は以下の通りである。第 1 章では研究の背景、目的、および研究のフレームワークを示した。続く第 2 章では、既往研究のレビューを通して高速道路単路部における車線変更動機の発生メカニズムとそのモデル化について考察を行う。第 3 章では、車線変更のダイナミクスから車線利用率均衡状態に至る過程をモデル化し、第 4 章において First order のマクロ交通流モデルに実装するアルゴリズムを提案する。第 5 章において、仮想道路区間を対象とした提案モデルの検証を行い、最後に第 6 章で結論と今後の課題を整理する。

2. 既往研究のレビュー

本研究は車線変更を考慮した多車線マクロ交通流モデルを構築するものである。従来、高速道路での車線変更

は、

- 実際の走行速度と、各車両に固有の値として持っていると思われる希望走行速度との比較し、現在の走行速度を改善できるか
- 車線変更先の車線に十分な大きさの車間が存在するか

という 2 点が判断基準となり、いずれも「可」となる場合に車線変更を実施する、というロジックに従ってモデル化されるケースが多い。いわば車線変更は、希望走行速度という車両特性のばらつきに起因する個別車両の判断の結果として生じるものと考えられるため、ミクロな視点での分析・モデル化が多くなされてきた⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾。

一方、メソスケール・マクロスケールで、車線変更挙動や車線変更を含む交通流をモデル化する研究も存在する。例えば、Shvestsov and Helbing¹⁰⁾、Hoogendoorn and Bovy¹¹⁾により Gas-kinetic モデルをベースとした多車線交通流モデルが提案されている。しかしながら、前者では車線変更確率を密度に対する関数として外生的に与えており、車線変更の動機が適切に考慮できない構造となっている。後者では、車線変更確率を離散選択モデルにより推定するアプローチを採用しているが、パラメータ数が増大となり、車両感知器などの定点観測データでは適切なキャリブレーションが困難であることが指摘される。Daganzo¹²⁾¹³⁾は、Kinematic Wave (KW) モデルにおいて、希望走行速度の低い車両 (Slugs) と希望走行速度の高い車両 (Rabbits) それぞれの Fundamental Diagram を考え、Slugs は走行車線のみを利用し、Rabbits は走行車線と追越車線を共に利用するとの仮定の下、実観測される多くの交通現象を説明可能な多車線交通流モデルの考え方を示している。しかしながら、この理論に基づく数値計算手法は未だ提案されていない。Laval and Daganzo¹⁴⁾は KW モデルの枠組みで多車線の交通流を数値計算する手法を提案し、車線変更による交通流への影響を表現する多車線交通流モデルを構築している。しかしながら、このアプローチでは車線変更車両を車線間の速度差のみに起因して確率的に発生させているため、単路部における交通量-車線利用率関係を適切に表現することができない。また、マクロな枠組みではあるものの車線変更車両は個別に発生させて Moving bottleneck として扱うマクロとミクロのハイブリッドなモデルとなっており、交通管制などオンラインでの適用可能性に疑問が残る。Tang et al.¹⁵⁾、および Jin¹⁶⁾ は車線変更車両による交通流の乱れを考慮したマクロスケールの交通流モデルを提案しているが、車線別に交通流を表現する枠組みとはなっていない。

以上の点より、本研究では車線変更動機の発生メカニズムを、効用理論をベースに記述することで、交通需要量と車線利用率の関係を適切に表現可能な多車線交通流モデルを構築する。具体的には、まず、実データに基づ

く車線変更挙動を解析した先行研究に基づいて車線変更動機の発生メカニズムを考察する。その結果に基づき、車両がそれぞれの車線を走行することによるコストを定義し、各車両が期待コストを最小化させるべく車線変更を行う枠組みを KW モデルに基づく多車線交通流モデルに導入する。これにより、各車線の期待コストが均衡に向かう過程として車線変更が表現されることを示す。

3. 車線変更と車線交通量均衡の考え方

(1) 車線変更と車線利用率に関する既往研究

本研究では、オン・オフランプなどの流入のない高速道路単路部における車線変更挙動、および車線利用率を検討の対象とする。単路部における各車線の利用率は、交通量レベルによって特徴的な傾向を持つことが国内・外を問わず報告されている¹⁷⁾¹⁸⁾。例えば、片側 2 車線区間では図-1 に示す通り交通量レベルの低い場合には走行車線 (lane 1) に利用が集中する一方、交通量レベルが増加するにつれて追越車線 (lane 2) の利用が卓越する傾向を示す。同様に、片側 3 車線区間においては、図-2 に示す通り交通量レベルの増大に伴って第 1 走行車線 (Outside lane) → 第 2 走行車線 (Center lane) → 追越車線 (Median lane) の順に車線利用が偏る傾向がある。

ここで、実観測データに基づく車線変更挙動を紐解くと、Victor et al.¹⁹⁾により、自由流時においては、走行車線から追越車線への車線変更についても、その逆の車線変更についても、元の車線の密度が同程度であれば、変更先車線の密度が増加するにつれ必ずしも単位交通量当りの車線変更回数は減少する訳ではないことが示されている。このことは、車線変更はギャップアクセプタンスのみでは説明が付かないことを示唆している。すなわち、変更先車線のアクセプタブルなギャップの割合によらず、追越車線の速度が走行車線より高い限りは、速度改善のために車線変更をする車両が存在し、また、高速道路では基本的には走行車線を利用するルール（キープレフト原則）があるため、追越車線から走行車線へと車線変更する車両が存在することを示唆していると考えられる。これと同様の傾向は、車線変更挙動に関する離散選択モデルの推定結果からも支持されている²⁰⁾。以下では、この傾向をマクロ交通流モデルに導入するための概念を詳説する。

(2) 車線交通量の均衡状態

本研究では、車線毎に Fundamental Diagram が定義され、単路区間 i (簡単のため、区間長を 1 とする) の車線 l における交通密度 k_l に応じて走行速度 v_l が式(1)の通りに決定されると仮定する。

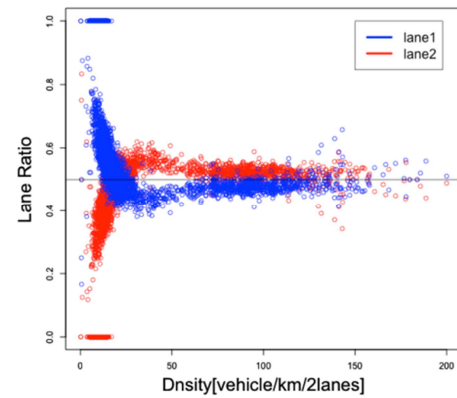


図-1 密度と車線利用率の関係 2 車線区間
(東北道下り線 93.2kp の車両感知器データより筆者作成)

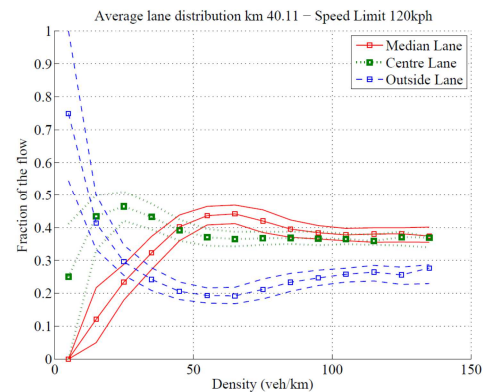


図-2 密度と車線利用率の関係 3 車線区間¹⁸⁾

$$v_{il} = f_{il}(k_{il}) \quad (1)$$

単路部において、各車両が走行する車線を選択する際には、自らの効用の最大化、あるいはコストの最小化を図ると考えられる。走行に関わるコストを規定する要因としては、先行研究の結果に基づいた考察より、

- ・ 走行速度の高い車線を選択することにより所要時間を短縮させようとする項
- ・ キープレフトの原則を遵守する項

が存在すると考えられる。前者は、走行車線から追越車線への車線変更を動機付けるものであり、後者は追越車線から走行車線への車線変更を動機付けるものである。このとき、時刻 t において、単路区間 i を走行する車両 n が車線 l を利用することによるコスト $c_{nil}(k_{ilt})$ は交通密度 k_{ilt} の関数として式(2)として表される。

$$c_{nil}(k_{ilt}) = \alpha_{nil}(k_{ilt}) + \beta_{nil}(k_{ilt}) \cdot \{f_{il}(k_{ilt})\}^{-1} + \varepsilon \quad (2)$$

ただし、 $\alpha_{nil}(k_{ilt})$ はキープレフト原則がある中で車線 l を走行することによるコストを表し、 $\beta_{nil}(k_{ilt})$ は速度の逆数、すなわち単位距離あたりの所要時間に関する係数を表す。いずれも交通密度の関数として表現しているのは、混雑度合いによってキープレフトの原則を遵守する程度が変化すること、及び旅行時間の増加に対する感度は混雑によって低減すると考えられることに由来している。 ε は

認知誤差やドライバーによる希望速度の差異を表す確率項である。

いま、確率項が平均0、分散パラメータ θ のワイブル分布に従うとし、車両によるコスト関数の差異を考慮しないものと仮定すると、各車両が車線 l を選択する確率は、

$$p_{il}(K_{it}) = \frac{\exp[-\theta \cdot c_{il}(k_{ilt})]}{\sum_k \exp[-\theta \cdot c_{ik}(k_{ikt})]} \quad (3)$$

と記述される。ただし、 K_{it} は全車線を合計した交通密度であり、

$$K_{it} = \sum_l k_{ilt} \quad (4)$$

で与えられる。車線交通量が均衡するという事は、車線を変更する動機がないと認識している状態、あるいは何らかのきっかけで車線を変更する車両が存在したとしても、それを埋め合わせる形で別の車両が車線を変更し、もとの車線利用率に安定する平衡状態にあると考えられる。すなわち、車線交通量が均衡している状況では、式(5)が満たされることとなる。

$$p_{il}^*(K_{it}) = \frac{\exp[-\theta \cdot c_{il}(k_{ilt}^*)]}{\sum_k \exp[-\theta \cdot c_{ik}(k_{ikt}^*)]} \quad (5)$$

$$= \frac{k_{ilt}^*}{K_{it}}$$

ここで、*は均衡状態を表す符号である。

(3) 車線変更と車線交通量均衡状態の関係性

式(5)で表される車線交通量の均衡状態は、ネットワークの確率的利用者均衡の概念²⁰⁾を援用し、かつ、式(2)のコスト関数を密度に対する単調増加関数と仮定すると、式(6)の最適化問題と等価であることがわかる。ただし、簡単のため、式中で特定の区間・時刻を表す添え字 i, t は省略している。

$$\min Z(\mathbf{k}) = \sum_i \int_0^{k_i} c_i(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta} \sum_i k_i \ln \frac{k_i}{K} \quad (6)$$

subject to

$$K = \sum_i k_i$$

$$k_i \geq 0$$

この問題を解くためには逐次平均法の考え方を援用²⁰⁾できる。すなわち、ある時刻 t における車線交通量ベクトルを $\mathbf{x}_t$ とし、その時の各車線を利用するコストを所与とした場合での車線交通量は以下の最適化問題の解 $\mathbf{y}$ として記述される。

$$\min Z(\mathbf{y}) = \sum_i y_i c_i(x_{it}) + \frac{1}{\theta} \sum_i y_i \ln \frac{y_i}{Y} \quad (7)$$

subject to

$$Y = \sum_i y_i$$

$$y_i \geq 0$$

この問題の最適解はKKT条件を導くことにより容易に式(8)として得ることができる。

$$y_i^* = Y \cdot \frac{\exp[-\theta \cdot c_i(x_{it})]}{\sum_k \exp[-\theta \cdot c_k(x_{tk})]} \quad (8)$$

これは、現状の各車線のコストを比較した上で、個別の車両が次に進行する車線を選択する確率として式(7)の問題の最適解が得られることを意味している。さらに、車線交通量ベクトルが $\mathbf{x}_t$ から $\mathbf{y}^*$ へ向かう方向へ車線変更が生じることで、式(6)の解を改善させることは逐次平均法の性質として明らかとなっている。

これらの事実は、各車線を利用するコストを密度に対する単調増加関数として定義することで、各車両が走行に関わるコストを改善する方向に車線変更を繰り返す中で、全体としては車線交通量の均衡状態へと向かう現象を表現することが可能であることを示している。言い換えると、多車線交通流モデルでは、車線交通量が均衡状態へと向かうダイナミクスとして車線変更が記述されることとなる。

しかしながら、

- ・ギャップアクセプタンスの関係で、車線変更の動機を持つすべての車両が車線変更を実行可能であるとは限らないこと、
- ・交通流を離散化して数値計算する際に、1つのタイムステップで、複数の車線にまたがる車線変更を実施することは難しいこと、

など、確率的利用者均衡における収束過程とは異なる点に注意が必要である。

次章では、この点を考慮しながら、車線交通量均衡に至る車線変更のダイナミクスを多車線交通流モデルに実装する方法について述べる。

4. 多車線交通流モデルの構築

(1) 多車線LWRモデルの枠組み

本研究では、Laval and Daganzo¹⁴⁾で提案された多車線LWRモデルの近似解法を援用し、上述の車線変更ダイナミクスを実装する。多車線LWRモデルでは交通量保存則は式(9)の通りに記述される。

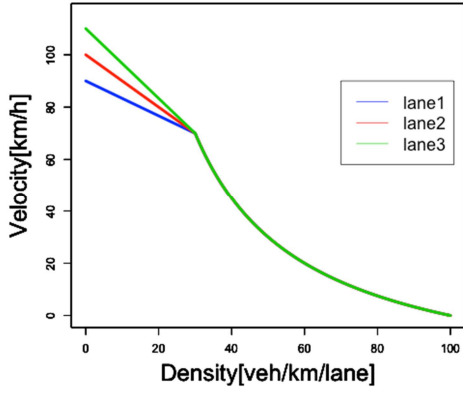


図-3 本研究で想定する Fundamental Diagram
($v_{f1}=90$ [km/h], $v_{f2}=100$ [km/h], $v_{f3}=110$ [km/h], $v_{cl}=v_{c2}=v_{c3}=70$ [km/h],
 $k_{cl}=k_{c2}=k_{c3}=30$ [veh/km], $k_{fl}=k_{f2}=k_{f3}=100$ [veh/km]と設定)

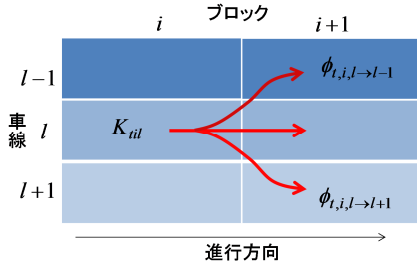


図-4 多車線 LWR モデルのイメージ

$$\frac{\partial K_l(t, x)}{\partial t} + \frac{\partial Q_l(t, x)}{\partial x} = \phi_l, l=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

ただし、 $K(t, x)$, $Q(t, x)$ は、時刻 t 、地点 x 、車線 l における交通密度と交通流率をそれぞれ表し、式中の非斉次項 ϕ が車線間での車両の移動による収支を表現している。すなわち、微少区間において微少時間の間に車線 l から車線 l' へ車線変更する車両台数を $\phi_{l \rightarrow l'}$ と表したとき、式(9)の右辺は、

$$\phi_l = \sum_{l' \neq l} \phi_{l' \rightarrow l} - \sum_{l' \neq l} \phi_{l \rightarrow l'} \quad (10)$$

と記述され、車線 l に入ってくる台数（第1項）と車線 l から出ていく台数（第2項）の差として与えられる。この概念を図-4に示す。

一方、本研究ではFundamental Diagramは車線別に定義する。車線変更挙動は自由流時の車線間の速度差などにも起因すると考えられることから、交通密度の増加に対して走行速度が単調減少の関係を持つvan Lint et al.²⁰⁾によって提案された以下のKV関係式を用いる。

$$V_l(t, x) = f_l(K_l) = \begin{cases} v_{fl} - K_l \cdot \frac{v_{fl} - v_{cl}}{k_{cl}} & \text{if } 0 \leq K_l \leq k_{cl} \\ \frac{v_{cl} \cdot k_{cl}}{K_l} \cdot \left(1 - \frac{K_l - k_{cl}}{k_{fl} - k_{cl}}\right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

ただし、 v_{fl} は車線 l の自由流速度、 k_{cl} は車線 l の臨界密度、

v_{cl} は臨界密度に対応する走行速度、 k_{fl} は車線 l の限界密度をそれぞれ表す。このKV関係の一例を図-3に示す。これより明らかなように、自由流領域では走行速度は密度に対して線形に低下し、渋滞流領域では密度に対して2次曲線で減少する（すなわち、密度に対して交通流率が線形に減少する）形をとる。また、本研究では渋滞流領域では車線によらず同一形となるようなKV関係を想定する。

(2) 離散化による数値計算方法

式(9)の交通量保存則を満たす交通流変動を計算するに当たり、Godunov法を適用する。このとき、式(9)は式(10)のように書き換えが可能となる¹⁴⁾。

$$\frac{K_{t+1,il} - K_{til}}{\Delta t} + \frac{Q_{til} - Q_{t,i-1,l}}{\Delta x} = \sum_{l' \neq l} \phi_{ti,l' \rightarrow l} - \sum_{l' \neq l} \phi_{ti,l \rightarrow l'} \quad (10)$$

ただし、添え字 t はタイムステップを、添え字 i はブロックIDを表している。また、CFL条件により、タイムステップ幅 Δt とブロック長 Δx の関係は以下の通り設定する。

$$\Delta x \geq \max_{\forall l} (v_{fl}) \cdot \Delta t \quad (11)$$

通常の単路部1車線区間を想定した場合、進行方向のブロック間移動量 A_{ti} は上流側ブロックからの流出可能量 S_{ti} と下流側ブロックでの受け入れ可能量 $R_{t,i+1}$ との関係で、

$$A_{ti} = \min(S_{ti}, R_{t,i+1}, (k_{Ji+1} - K_{t,i+1}) \cdot \Delta x) \quad \text{where} \quad (12)$$

$$S_{ti} = \begin{cases} K_{ti} \cdot V_{ti} \cdot \Delta t & \text{if } 0 \leq K_{ti} \leq k_{ci} \\ k_{ci} \cdot v_{ci} \cdot \Delta t & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$R_{t,i+1} = \begin{cases} k_{ci+1} \cdot v_{ci+1} \cdot \Delta t & \text{if } 0 \leq K_{t,i+1} \leq k_{ci+1} \\ K_{t,i+1} \cdot V_{t,i+1} \cdot \Delta t & \text{otherwise} \end{cases}$$

と書ける。ただし、 A_{ti} の右辺第3項は下流側ブロックの余裕台数を表している。本研究では、上流側ブロックからの流出可能量に基づいて車線維持希望交通量と車線変更希望交通量を流出先車線毎に集計し、それを下流側ブロックの受け入れ可能量により調整するアプローチ(IT principle¹⁴⁾)を採用する。

(a) 車線変更希望台数算出

本モデルでは、前章で述べたように、各車線の交通状態に基づいたコストを算出し、そのコストを改善する方向に車両は車線変更を行い、それを繰り返す中で、車線交通量が均衡状態へ向かう仕組みを採用している。具体的には、まず、前述したコスト関数に基づいたロジット型選択確率（式(13)）に基づいて現在存在するブロックの交通密度を参照点として、各ドライバーはコストの改

善が可能な車線へと車線変更を動機づけられるとした。

$$p_{i,l \rightarrow l'} = \frac{\exp[-\theta \cdot c_{il'}(K_{iil'})]}{\sum_l \exp[-\theta \cdot c_{il}(K_{iil})]} \quad (13)$$

この確率に従って車線変更が行われるとして、当該車線からの流出可能台数 S_{iil} に車線変更確率を掛けることにより、車線 l から車線 l' への車線変更希望台数 $L_{iil \rightarrow l'}$ 、及び車線維持希望台数 M_{iil} がそれぞれ式(14)、(15)として求められる。

$$L_{iil \rightarrow l'} = \frac{1}{\tau_{iil}} \cdot S_{iil} \cdot p_{iil \rightarrow l'} \quad (14)$$

$$M_{iil} = S_{iil} - \sum_{l' \in \Omega_l} L_{iil \rightarrow l'} \quad (15)$$

ここで、 τ_{iil} は車線変更希望台数を制限するパラメータで1以上の値をとる。これは、式(13)で算出される車線変更希望車両が、1タイムステップで隣接車線に車線変更可能なギャップを見つけて車線変更が完了できるとは限らないことを考慮するために導入したパラメータである。交通流モデルとしては、「車線変更希望台数が全て車線変更を完了できるスキャン数」と解釈できる。また、車線変更を車線交通量均衡へのダイナミクスと考えた場合には、このパラメータは解を改善するステップ幅を決定するパラメータであると解釈される。 τ は交通状態に依存して変動する値であると考えられ、オンラインで収集されるデータに基づいてフィードバック推定し、常時更新することにより、シミュレーションの再現性が期待される。 Ω_l は現在存在する車線 l から1タイムステップで車線変更可能な車線の集合を表し、タイムステップ幅の設定に依存することが想定される。本研究では隣接車線への車線変更のみを認めるように設定する。

(b) 車線変更希望台数算出

上述で構築した車線変更モデルより算出される車線変更希望台数と車線維持希望台数を用い、下流側ブロックへ流入する車両台数の調整を行う。車線毎に車線変更希望台数と車線維持希望台数を算出すると、次スキャンにおける各下流側ブロック車線 l への流入希望台数 $H_{t,i+1,l}$ が式(16)で算出できる。

$$H_{t,i+1,l} = M_{iil} + \sum_{l' \in \Omega_l} LC_{iil' \rightarrow l} \quad (16)$$

この流入希望台数分すべてが下流側車線 l のブロックに流入できる訳ではない。実現象において、現在のブロックは自由流であっても、隣接車線のブロックや下流側のブロックが渋滞流あるいはそれに近い密度であれば車線変更ができない場合もある。そのため、流入を希望する交通量が次スキャンに流入できるかどうかは隣接ブロックとその下流側のブロックの状況に依

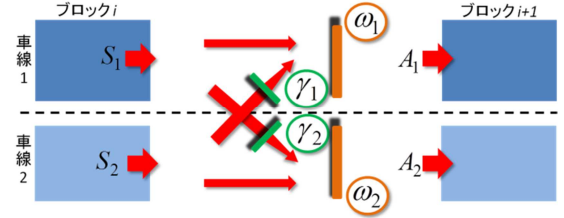


図-5 車線変更台数の調整過程

存すると考えられる。すなわち、隣接ブロックに十分な空き容量が無ければ車線変更を完了することはできず、また、車線変更ができたとしても容量制約のために下流側ブロックに流入できないケースが想定される。そこでこれらの理由による流入可能量の調整方法を明確化する必要がある。

まず前者の調整は、区間 $i+1$ 、車線 l のブロックへの流入希望台数 $H_{t,i+1,l}$ と、当該ブロックの受け入れ可能台数 $R_{t,i+1,l}$ の比率に基づいて行う。すなわち、 $H_{t,i+1,l} > R_{t,i+1,l}$ となる場合、流入を希望するすべての車両を当該ブロックで受け入れることができないため、流入台数を制限する必要性が生じる。そこで、まずは、式(16)中の右边第二項、すなわち隣接車線から車線変更してくる車両台数に対してのみ、式(17)の通り制限を掛ける。

$$H'_{t,i+1,l} = M_{iil} + \gamma_{iil} \cdot \sum_{l' \in \Omega_l} LC_{iil' \rightarrow l} \quad (17)$$

where

$$\gamma_{iil} = \min \left(1, \frac{R_{t,i+1,l}}{H_{t,i+1,l}} \right)$$

これは、実際の交通流において、基本的には車線を維持して直進してくる車両が優先されると考えられるためである。

この時点においても、流入希望台数 $H'_{t,i+1,l}$ は下流側ブロックの受け入れ可能台数 $R_{t,i+1,l}$ を上回るため、進行方向への車両の移動量を制限する係数 ω_{iil} を式(18)の通り定義する。

$$\omega_{iil} = \min \left(1, \frac{R_{t,i+1,l}}{H'_{t,i+1,l}} \right) \quad (18)$$

以上より、本稿で提案する多車線交通流モデルでのタイムステップ毎の進行方向への移動量 Q_{iil} 、及び車線間での移動量 $\phi_{iil' \rightarrow l}$ が式(19)、(20)により決定される。また、このプロセスを概念化したものを図-5に示す。

$$Q_{iil} = \omega_{iil} \cdot M_{iil} \quad (19)$$

$$\phi_{iil' \rightarrow l} = \omega_{iil} \cdot \gamma_{iil} \cdot LC_{iil' \rightarrow l} \quad (20)$$

5. 仮想単路区間におけるモデル検証

最後に、ここまでで構築した多車線交通流モデルを検証する。本研究では、仮想的な円形道路を用いて、車線利用が均衡へと向かう過程と、交通量レベルと車線利用率の関係を表現できることを検証する。

(1) コスト関数の設定

各車線を走行することによる移動コストは、1) キープレフト原則に関するコストと、2) 旅行時間の増加に対するコストにより構成され、式(2)で定義した。

ここで、前者の 1) に関して考えると、例えば自分自身以外に車両が存在しない交通量の少ない場合などは、多くのドライバーが左側の走行車線を選択する一方、交通密度が大きくなるほどに、キープレフトを順守する気持ちは弱くなり、さらに、渋滞状態に陥った際には全車線が混雑しているためキープレフトを遵守するインセンティブは全く無くなることが考えられる。また、このコストは、キープレフトを遵守して走行車線を走行している場合には 0、第 2 走行車線、追越車線を走行する場合には正の値をとると考えられる。そこで、式(2)右辺の第 1 項は以下の通り定義した。

$$\alpha_{ilt}(k_{ilt}) = \begin{cases} a_1 & \text{if } l=1 \\ a_l \cdot (k_{cl} - k_{ilt}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

ただし、 α_l は車線に固有の定数である。

さらに、大半のドライバーは旅行時間を短縮したいと思っているため、車線間で速度差がある場合は速度が大きい車線を選ぶ車両が多くなると考えられる。そのため、旅行時間の短い、すなわち走行速度が大きい車線のコストは低くなるはずである。そこで、上述 2) の旅行時間に関するコスト、言い換えると混雑に対するコストを導入する。

式(2)中の $b_{il}(k_{il})$ は混雑度、あるいは旅行時間の1単位文の増加に対する感度を表すものである。自由流時においては、前方車両に追い付いたら車線変更をして希望速度を維持しようとすることから、走行速度の低下に対する感度は高いと考えられる。一方、渋滞流中では、常に前方車両に追従し、低速度での走行を強いられているため、速度の低下、あるいは混雑度の増加に対する感度は、自由流時と比べて鈍くなることが考えられる。すなわち、このパラメータも密度の増加に伴って漸減することが予想される。また、この感度は追越車線より走行車線より高くなると考えられる。従って、 $\beta_{il}(k_{il})$ を式(22)の通り定義した。

$$\beta_{ilt}(k_{ilt}) = \begin{cases} b_1 & \text{if } l=1 \\ b_1 - b_l \cdot (k_{jl} - k_{ilt}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

表-1 コスト関数パラメータ 2車線区間

a_1	a_2	b_1	b_2
0	1.0	2.0	4.0

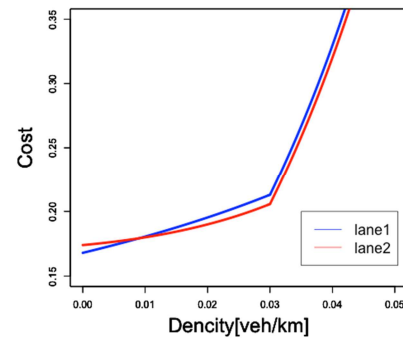


図-6 コスト関数の例 2車線区間

表-2 コスト関数パラメータ 3車線区間

a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3
0	1.13	2.1	7.3	5.0	2.0

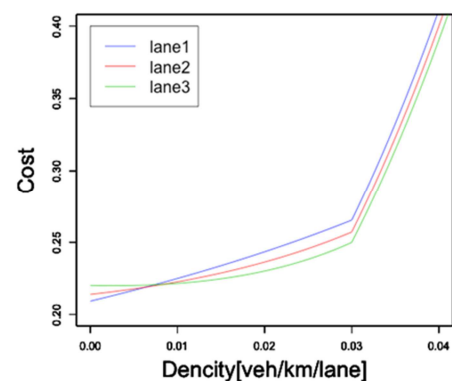


図-7 コスト関数の例 3車線区間

表-3 ブロック密度法設定値
車線利用率算出シミュレーション

スキャン インターバル	ブロック数	ブロック長	分散パラメータ
10 [sec]	20	277.8 [m]	1000

ただし、 β_l は車線に固有の定数である。2車線区間を想定した場合のパラメータセット（表-1）、及び車線別の密度-コスト関係（図-6）、及び3車線区間を想定した場合のパラメータセット（表-2）、及び車線別の密度-コスト関係（表-7）をそれぞれ示す。

(2) 車線利用率均衡過程と均衡状態の確認

無限に続く単路部区間を疑似した仮想円形道路において2車線区間の交通流をシミュレートし、モデルの検証を行う。ここでは、各ドライバーがコストを改善するために車線変更を行った結果、車線利用が均衡状態に収束することを表現できるかどうかを検証する。均衡に向かう過程を確認するため、式(14)の τ は、スキャン回数とと

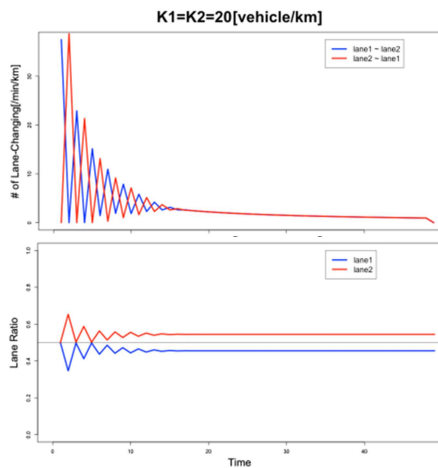


図-8 車線利用均衡過程 2車線区間

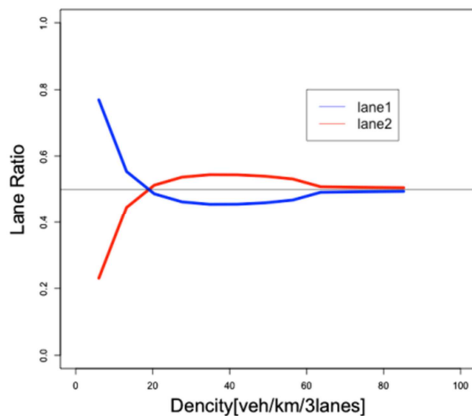


図-9 車線利用率算出結果 2車線区間

もに増加するよう設定する。その他の設定値は表-3の値を用いて検証を行う。

初期状態として各車線のブロックに20[vehicle/km]の車両を存在させ、シミュレーションを行った結果を図-8に示す。上の図は車線変更台数の時間変化を表しており、下の図は車線利用率の変化を表している。この結果から、車線変更が発生し、それが時間の経過とともに定常状態、すなわち車線1から車線2への車線変更量と車線2から車線1への車線変更量が等しくなる状態に至り、最終的に車線利用率が一定値へ収束していく過程が表現できていることがわかる。

次に、これを0.005[vehicle/km]間隔で初期密度を変化させ、それぞれ収束点を算出し、交通密度と車線利用率の関係を描画しものを図-9に示す。この結果より、密度が低い時は車線利用が左側の車線である第1車線に集まり、密度が高くなってくると自由走行速度が大きい第2車線に集まり、渋滞流に陥ると車線の区別がなくなっている様子が確認でき、図-11に示した実現象における車線利用と同様の傾向を示している。

同様に、3車線区間でもシミュレーションを行った結果を図-10、図-11に示す。この結果も2車線区間と同様

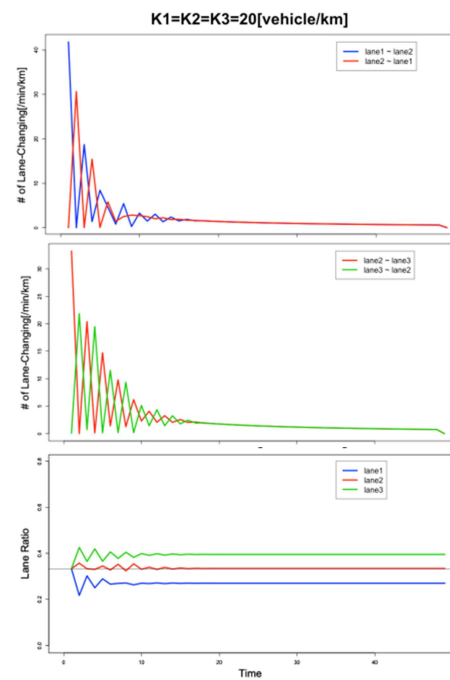


図-10 3車線区間における車線利用均衡過程

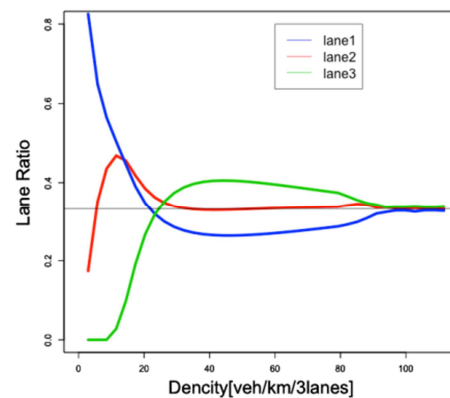


図-11 3車線区間における車線利用率算出結果

に、車線変更が発生し、それにより車線利用率が均衡状態へと収束していく過程が表現できていることがわかる。また、3車線区間においては、密度が低い時は車線利用が第1車線・第2車線に集まり、密度が高くなるに従って第3車線に利用が集まり第1車線と第2車線の間にも利用率の差が顕在化することがわかる。そして、最終的には2車線区間と同様に、車線の区別がなくなっている。この様子は、図2に示した実現象における車線利用を的確に表現しているといえる。

これより、2車線区間においても3車線区間においても、本研究で構築した多車線交通流モデルは車線利用が均衡する過程を表現できていると考えられる。つまり、各ドライバーに、自ら走行している車線と隣接車線の交通状況を鑑みて走行コストを改善する方向に車線変更を行う、という動機を持たせることで車線利用が均衡状態に向かうことが表現されていることが示された。同時に、この

方法は実現象における車線利用の均衡状態を適切に表現できている可能性が高いと考えられる。

6. おわりに

本研究で構築したモデルは、マクロ交通流でありながら、車線変更を考慮し、車線利用を表現できることを目指した。この実現の土台となるメカニズムは、交通需要に対して車線利用率は均衡状態を持ち、その均衡へと向かう過程が車線変更であるという考え方である。この考え方により、各ドライバーがコストを改善するために車線変更を行い、その結果車線利用は均衡するとして、車線変更をモデリングした。本研究では、このメカニズムを用いて、交通流を車線別に表現可能にする高いポテンシャルを持った多車線交通流モデルを構築した。

本研究で構築したモデルは、車線別に交通流を表現するモデルとして実用化することを念頭においた構造をとっている。そのため、多くのパラメータは車両感知器などで収集されるデータを用いてキャリブレーション可能であると考えられる。また、車線変更のダイナミクスを表し、均衡点への収束速度を調整するパラメータである α については、フィードバック型の交通状態推定などを適用し、オンラインで更新していくことにより、本モデルによる状態推定の再現性を高めることが可能となる。

一方、本研究ではタイムステップ毎に車線変更車両台数を算出しているが、タイムステップ幅 Δt が大きくなると、車線間での相互作用が生じる可能性がある。例えば、追越車線から走行車線への車線変更が発生すると、追越車線には比較的大きなギャップが形成されるため、それを埋め合わせる形で走行車線から追越車線への車線変更が発生することは容易に考えられる。今後はそのような状況での妥当な計算手法を明らかにしたい。さらに、今後の研究の展望として、

- ・ 車線変更による交通流への影響の考慮、
 - ・ 車種による車線変更挙動の差異の考慮
 - ・ オンランプ・オフランプ、及び分合流など、Mandatoryな車線変更が発生する区間への適用、
 - ・ フィードバック型交通状態推定手法の適用による車線交通流状態の推定、
- などに取り組む予定である。

参考文献

- 1) Highway Capacity Manual 2010: Transportation Research Board of the National Academies, Washington D.C., 2010.
- 2) Kuhn, B., Gopalrishina, D., and Schreffier, E.: The Active Transportation and Demand Management Program (ATDM): Lessons Learned,

FHWA-HOP-13-018, US DOT FHWA, 2013.

- 3) 洪性俊, 田中伸治, 桑原雅夫: 首都高速道路の合流部における動的変換チャネリゼーション導入効果の評価手法に関する研究. 生産研究, Vol.62, No.2, pp.158-163.
- 4) 岡上政史, 奥嶋政嗣: 交通障害発生時に対応した都市高速道路単路交通流シミュレーションモデルの構築, 第30回交通工学研究発表会論文集, pp.13-16, 2010.
- 5) Gipps, P. G.: A model for the structure of lane-changing decisions, Transportation. Research Part B 20 (5), pp.403-414, 1986.
- 6) Kita, H.: A merging-giveway interaction model of cars in a merging section: a game theoretic analysis, Transportation Research Part. A, 33(3), pp.305-312, 1999.
- 7) Salvucci, D. D., Liu, A.: The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior, Transportation. Research Part F, 5(2), pp.123-132, 2002.
- 8) Webster, N. A., Suzuki, T., Kuwahara, M.: Driver Model for Traffic Simulation with Tactical Lane Changing Behavior, Seisan-Kenkyu, Vol.59, No.3, pp.42-45, 2007.
- 9) Toledo, T., Koutsopoulos, H. N., Ben-Akiva, M.: Estimation of an Integrated Driving Behavior Model, Transportation. Research Part C., 17(4), pp.365-380, 2009.
- 10) Shvestsov, V. and Helbing, D.: Macroscopic dynamics of multilane traffic, Physical Review E, Vol. 59, No. 6, pp. 6328-6338, 1999.
- 11) Hoogendoorn, S. P. and Bovy, P.: Platoon-based multiclass modeling of multilane traffic flow, Networks and Spatial Economics, Vol. 1, pp. 137-166, 2001.
- 12) Daganzo, C.F.: A behavioral theory of multi-lane traffic flow. Part I: Long homogeneous freeway sections, Transportation Research Part B 36, pp.131-158, 2002.
- 13) Daganzo, C.F.: A behavioral theory of multi-lane traffic flow. Part II: Merges and the onset of congestion, Transportation Research Part B, vol. 36 (2), pp. 159-169, 2002
- 14) Laval, J. and Daganzo, C.F.: Lane-changing in traffic streams, Transportation Research Part B, Vol.40, pp.251-264, 2006.
- 15) Tang, T.Q., Wong, S.C., Huang, H.J. and Zhang, P. Macroscopic modeling of lane-changing for two-lane traffic flow. Journal of Advanced Transportation 43(3), pp.245-273, 2009.
- 16) Jin, W.L.: A kinematic wave theory of lane-changing traffic flow. Transportation Research Part B 44, pp. 1001-1021, 2010.
- 17) 大口敬, 桑原雅夫, 赤羽弘和, 渡辺亨: ボトルネック上流における車線利用率の矯正効果と不可車線設置形態, 交通工学, Vol.36, No.36, pp.59-69, 2001.
- 18) Knoop, V.L., Duret, A., Buisson, C. and van Arem, B.: Lane distribution of traffic near merging zones influence of variable speed limits, Proceedings of the IEEE conference on Intelligent Transport Solutions, 2010.
- 19) 小川喬之, 塩見康博, 宇野伸宏, 嶋本寛: 車線変更を考慮した車両マッチング手法に基づく旅行時間計測, 第 11 回 ITS シンポジウム Peer-Review Proceedings, pp. 7 - 12, 2012.
- 20) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析ー最新の理論と解放ー, 丸善(株), 1999.
- 21) Van Lint, J. W. C., Hoogendoorn, S. P., Schreuder, M, 'Fastlane - A New Multi-Class First Order Traffic Flow Model', Transportation Research Board, 13-17, 2008

MULTI-LANE FIRST ORDER TRAFFIC FLOW MODEL
WITH ENDOGENOUS REPRESENTATION OF LANE FLOW DISTRIBUTION

Tomoki TANIGUCHI, Yasuhiro SHIOMI, Nobuhiro UNO, Hiroshi SHIMAMOTO and
Toshiyuki NAKAMURA