

高速道路における車線変更モデル に関する研究レビュー

岩崎真純¹・野中康弘²

¹ 学正会員 芝浦工業大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 (〒135-8548 東京都江東区豊洲 3-7-5)

E-mail:me16012@shibaura-it.ac.jp

² 正会員 株式会社道路計画 (〒東京都豊島区東池袋 2 丁目 13-14 マルヤス機械ビル)

E-mail:y_nonaka@doro.co.jp

都市間高速道路の交通容量上のボトルネックは、車線数減少部や合流部、織り込み区間など物理的に処理能力が低下する箇所のほか、サグや上り坂、トンネル入口といった単路部にも多数みられ、交通集中渋滞の発生要因として、重交通状態における追越車線への交通量偏重が大きく影響していることが指摘されている。しかしながら、追越車線への交通量偏重のメカニズムを明確に記述できるモデルは現状において存在しないものとの認識のもとで車線変更挙動に焦点をあて、これまでに提案されてきた車線変更モデルをレビューし、現状における車線変更挙動に関する知見を整理する。

Key Words: Lane Changing Model, Mandatory Lane Changing, Discretionary Lane Changing,

1. はじめに

都市間高速道路の交通容量上のボトルネックは、車線数減少部や合流部、織り込み区間など物理的に処理能力が低下する箇所のほか、サグや上り坂、トンネル入口といった単路部にも多数みられる。単路部における交通集中渋滞は、その構造的な要因もさることながら、ドライバ特性に拠るところの運転挙動にも大きく影響を受けるため、渋滞発生のメカニズムを解釈することが相対的に難しい。ただし、単路部ボトルネックでの渋滞発生の共通点として、追越車線へ交通の偏重が大きく影響していることは論を待たないであろう。

単路部の渋滞発生メカニズムは、越ら¹⁾によって解き明かされており、片側 2 車線区間では交通需要が増加するにつれて追越車線に交通量が偏ると、追越車線に大きな車群が形成される。その大きな車群がサグやトンネルにさしかかると、車群中で減速波が生じ、最終的に全車線に渋滞が波及するというものである。この視点からの調査事例はその後多数報告³⁾されており、片側 3 車線区間も含めて同様の渋滞現象が全国各地で確認されている。しかしながら、追越車線への交通量偏重のメカニズムを明確に記述できるモデルは存在しないものとの認識する。

高速道路における走行挙動は一般に、交通量の極めて

少ない自由走行状態であれば、希望速度をもって走行車線(最左車線)を走行する。そして、徐々に交通量が増加してくると拘束流となり、走行速度が希望速度を満たす範囲にある車両は追従状態に入り、満たさない車両は追越行動すなわち車線変更行動をとる。このうち、追従挙動のモデル化は長きにわたって広く研究されてきており、大口⁷⁾によって、それらの知見は体系的に整理され、各モデルの性能も比較検証されている。一方で、車線変更挙動に関する研究の遅れが指摘されている⁹⁾。

そこで本研究では、研究の遅れが指摘されている車線変更挙動に焦点をあて、これまでに提案されてきた車線変更モデルをレビューし、現状における車線変更挙動に関する知見を整理する。

2. 本研究の動機づけと目的意識

高速道路の片側 2 車線区間における典型的な交通量階層別車線利用率を図-1 に示す。図-1 は車両感知器データから渋滞中の時間帯のサンプルを除いて、15 分間フローレートごとの交通量階層別に車線利用率を描画したものである。これより、交通量が増加するにしたがって追越車線の車線利用率が高まり、重交通状態では約 6 割の交通量が追越車線に偏重する。しかし一方で、各交通

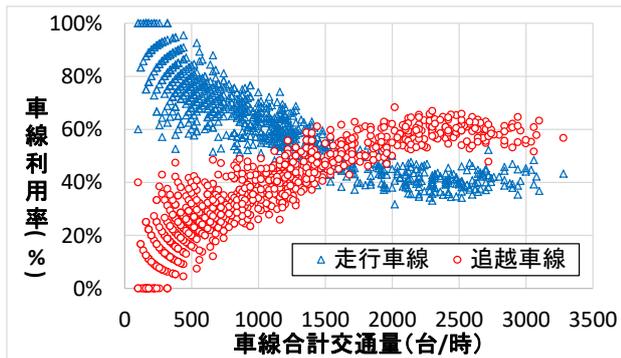


図-1 交通量別車線利用率¹⁰⁾

量階層における車線利用率の分散が大きいことも確認できる。

重交通量状態に着目すると、約 7 割の交通量が追越車線を利用する場合もあれば、走行車線と均衡している場合もある。この現象が各ドライバーの運転特性に基づく、単なる確率的現象なのか、ある集計単位時間帯の交通流特性から生起する現象であるかは不明である。

中村ら¹¹⁾は、片側 2 車線区間を対象に車両感知器のパルスデータを用いて、重交通量時の追越車線へ交通量偏重現象を分析している。ここでは、a)走行車線を極端に遅い速度で走行する車両が存在すると、追越行動を起こす車両は当然増加するという仮説のもと、これを Moving Bottleneck 現象¹²⁾として捉え、このような場合に追越車線への偏重が高まる、b)走行車線を低速走行する車両に対して、それを追い越す少しだけ希望速度の高い車両が追越車線へと侵入すると、これらが両車線を塞ぎながら並走することで大きな車群を形成させるという仮説のもと、これを Elephant Racing 現象¹³⁾として捉え、このような場合に車線利用率が均衡する、といった両面の仮説からアプローチし、車線利用率の分散の説明を試みている。

しかし、車両感知器のパルスデータによる分析は、個々の車両データを扱っているものの単断面における現象を捉えたにすぎず、空間分解能において課題が残る。本来、車線変更挙動は進行方向に十分な距離を持つ時空間的に連続するデータで分析すべきであるが、このようなデータを取得することは極めて困難である。近年普及が目覚ましいプローブデータの活用も期待されるが、全車両を捉えるにはまだしばらく時間がかかりそうであるし、車両の走行車線を特定する位置情報精度が得られるかも懐疑的である。このようにデータオリエンテッドに車線変更挙動を捉えるのは今後も難しそうであり、追越車線への交通量偏重のメカニズム解明に向けた分析を、車両挙動を扱うミクロモデルからのアプローチに期待する所以である。

前述のとおり、高速道路の単路部における車両挙動は、

希望速度に拠るところの単独走行と追従挙動、車線変更挙動で構成される。車線変更挙動はさらに、a)追越挙動、b)車線復帰挙動、c)避譲挙動に分解される。しかし、追従挙動モデルの完成度が高い反面、現状の車線変更挙動モデルとの組合せでは、追越車線への交通量偏重のメカニズムを再現できないのではないかとの問題意識を持っている。高速道路の単路部における渋滞発生メカニズムを解明するには、これに大きく影響する追越車線への交通量偏重を再現可能な精緻な車線変更モデルが必要となる。本研究では、これまでに提案されてきた車線変更モデルをレビューし、現状における車両変更挙動研究の深度を探るとともに、追越挙動、車線復帰挙動、避譲挙動が精緻に再現されるモデル構築に向けた視点から、既往研究の考察を試みる。

3. 車線変更モデル研究の系譜

(1) 車線変更モデル研究の黎明期

車両の車線変更行動に関する研究は Gipps¹⁴⁾に端を発する。都市の街路において、ドライバが「希望速度を維持できているか」「意図した車線を走行しているか」を考え、車線変更の“可能性”“必要性”“望ましさ”を考慮した Gap Acceptance Model (以下、Gipps モデル)を構築している。具体的には、衝突の危険性を考慮した車線変更、障害物の存在、トランジットレーンなどの専用レーンの存在、ドライバの意図した車線変更、大型車両の存在、速度の 6 つの要因によって Gipps モデルは構成されている。

ドライバの車線変更の動機付けとして、走行中の車線に駐車車両などの障害物が存在することや、先行車が大型車の場合に見通しの悪さなどが要因として挙げられる。よく利用する道路を走行するドライバは、既知の障害物をあらかじめ避けようとし、車線変更を行う。また、自分が曲がる交差点が近づくにつれ、その車線に車線変更する意思が強くなる。車線変更の意思決定に最終的に影響を与える要因は、自車の走行している車線が自分の希望速度で走行可能かどうかであり、先行車が大型車などの低速車の場合、車線変更する傾向にあり、先行車の前に空いた大きなギャップを目指し車線変更する。

車線変更の意思決定がされた後、一般的にドライバは車線変更を試みる前に他車との衝突の危険性を確かめ、満足のいかないギャップの場合は車線変更を行わない。さらに、ドライバは隣接車線のギャップ後方車が速すぎないか、ギャップ前方車両が遅すぎないかを確かめ、車線変更の行動決定に移る。

(2) 車線変更モデル研究の展開期

Gipps モデルの登場以後、この概念、すなわち車線変更挙動を gap の選択問題とした車線変更モデルが、国内外問わず数多く登場することになる。

高速道路の単路部、織り込み区間、合流部など様々な適用シーン(道路構造)において車線変更モデルが構築されている。ここでは、それらのうち主だったものについて、適用シーン(道路構造)に区分して以下に整理する。

a) 高速道路単路部への展開

Yang et al.¹⁵⁾は、Gipps モデルを交通ミクロシミュレーションを用いて高速道路へと拡張している。具体的には、車線変更の意思決定を行い、目的車線を選択後、好ましいギャップを確かめ車線変更を行う。その際に、ドライバーの希望速度や交通状況、すなわち隣接車線の走行速度と希望速度の関係をもって車線選択行動を選択するといったモデル構造としている。推定結果として、パラメータの有意性は確保できていないが、車線選択確率の再現性は良好であった。

Webster et al.¹⁶⁾は Gipps モデルを“安全なギャップに車線変更できるかを確認する”“車線変更することによる効用を確認する”といった2段階の戦術モデルにすることで、従来モデルより良好な結果を得ている。これらはいずれも単路部における車線変更挙動を扱ったものである。

b) 織り込み区間への展開

Gipps モデルの概念を用いた車線変更モデルは合流部や織り込み区間でも多く提案されている。中村ら^{17) -18)}は、Gipps モデルをベースに、織り込み区間の交通流シミュレーションを構築している。合流ギャップ、前後車両との車頭距離の相対変化、速度差を変数に用いた結果、織り込み車両の挙動を説明するには、織り込み車両間の相対的な位置関係、速度差、およびそれらの変化を総合的に考慮しなければならないことを指摘している。

松本ら¹⁹⁾は、織り込み車両と避走車両を加味した非織り込み車による車線変更挙動による本線の車線利用率を考察している。

c) 合流部への展開

合流部では、合流地点のギャップ選択問題としてのモデルが数多く提案されている。Sun et al.²⁰⁾は、Gipps モデルをベースに、合流部における実績データから probit モデルを構築し、個々のドライバーの選択行動として合流挙動を再現している。説明力のある lead gap, lag gap, front gap, 大型車ダミー、合流先までの残存距離を変数とすることで、良好な結果を得ている。パラメータ推定の結果から、ドライバーは lead gap より lag gap を重視し、かつ合流部においては残存距離が最も重要な要因であること

を示唆している。

清水ら²¹⁾は合流部においてビデオデータと走行実験を組合せて、ドライバーの運転操作と車両の挙動の関係を分析し、同一のドライバーが同一の走行環境に遭遇してもその判断行動にバラツキが生じる可能性を示唆している。

内山^{22) -23)}は、高速道路の工事時におけるドライバーの合流挙動について、合流先のギャップに着目して「合流を見送る」「合流を開始する」の二項選択問題とした binaly logit モデルを構築している。

渡辺ら²⁴⁾は直近ギャップと一つ先の追越ギャップのギャップ選択モデルと、選択したギャップごとの合流車と本車線の加減速挙動を表現した加減速度推定モデルを構築している。ギャップ選択を行う際にギャップ長や合流車と本線車線の車頭距離相対変化率に影響を受けることを明らかにした。Choundhury et al.²⁵⁾は、隠れマルコフモデルを用いて、潜在的に車線変更要求が推定可能なギャップ選択結果を持つモデルを構築している。

(3) 車線変更モデル分類の視点や新たな指摘

Gipps モデルの登場以後、様々なモデルが構築される一方で、車線変更挙動の性質上の違いによる分類に関する指摘や、モデル構築シーンの混乱に対する指摘、新たな視点の導入・アプローチも見られるようになる。

a) 車線変更挙動の強制性と任意性に関する指摘

車線変更挙動は、道路構造などの状況により異なる一方で、車線変更挙動の強制性と任意性の観点からの違いに関する指摘もある。Ahemed et al.²⁶⁾、Ahemed²⁷⁾は、車線変更挙動を強制的な車線変更挙動である MLC (Mandatory Lane Changing) と任意的な車線変更挙動である DLC (Discretionary Lane Changing) で構成されると述べている。MLC は、合流車線から高速道路本線への残存距離などに依存した車線変更挙動である。一方、DLC は、ドライバーが自身の走行環境に満足しているかを考え、自分の希望速度が維持できない状況や前方に大型車が走行している環境下での車線変更挙動である。

b) モデル構築シーンの混乱に関する指摘

単路部といったドライバー間の挙動のみが相互に関係し合った状況下での車線変更は任意的(DLC)に行われる。その過程で、ドライバーの車線変更の意思決定である LCD (Lane Changing Decision) が行われ、車線変更意思決定後、安全なギャップを判断し、車線変更行動である LCI (Lane Changing's Impact) が実行される。しかし、Zheng⁹⁾は LCD と LCI の過程を同様に記述されたモデルが多く提案されていることを指摘している。

c) 相互作用を考慮することへの指摘と適用例

Gipps モデルをベースとしながらも、車線変更挙動は、

道路構造の違いに加えて、車両間の相互作用に影響を受けることで異なった挙動を示すとされる指摘がなされた。単路部における車線変更挙動は、ドライバ間の相互作用を加味したモデルが提案されている。

羽藤ら²⁸⁾は、目的とする出路に対して、より上流側で行われる「戦略的な意思決定」と直近の車両挙動に影響を受ける「戦術的な意思決定」の相互が走行軌跡上で関連しあって成り立っていると考え、車線変更挙動を右車線変更、左車線変更行動を自由流時と混雑時に分け、車線変更モデルを構築している。

伊藤ら²⁹⁾は、車線変更に伴う周囲の車両との相互作用とドライバの動学的な意思決定に着目し、意思決定者の効用関数に Bellman 最適性原理を用いて他車の選択行動や将来効用が内生されたモデルを構築している。そのため、車線変更モデルと車線変更受入モデルに関して、構造推定を用いて入れ子構造モデルのパラメータ推定を行った結果、車線変更を企図する前方車両に関しては、動学的な意思決定を加味したことで、静学的なモデルでは従来明らかにされなかったパラメータに対するバイアスを示した。

庄司ら³⁰⁾は、ドライバは、自身の前方の離散選択肢空間から効用最大化理論に基づいて次期の移動先を選択すると仮定した二次元挙動モデルとドライバ間の相互作用を表現するために、他車の選択結果の期待値を生内化した入れ子型の相互作用モデルを統合している。モデルに角度変化を好む性質や嫌う性質を変数に組み込み、相互作用を考慮した車両挙動表現に適切なものであることを示した。Nakata et al.³¹⁾が合流部における割込み流れには囚人のジレンマの構造が存在していることを明らかにし、莖田ら³²⁾は、単路部での検討を行った。具体的には、車線変更をせず走行する協調戦略と車線変更を行う裏切り戦略を依存させたモデルを構築している。

合流挙動においても、他車両との相互作用を考慮したモデルとして、Kita³³⁾は、ゲーム理論を用いて、合流車線を走行する合流車と走行車線を走行する車両間での非協力2人ゲームを構築している。

柳原ら³⁴⁾は、ギャップ選択時の車両の相互作用の特性について車線ごとの状況の違いも考慮し、合流時に車両は自らが合流すべき車間を選択する「合流ギャップ選択モデル」を構築している。

4. モデルのロジックの視点からの整理

(1) Gipps モデルベースの車線変更モデル

Gipps モデルは、先述した6つの要因により構成され

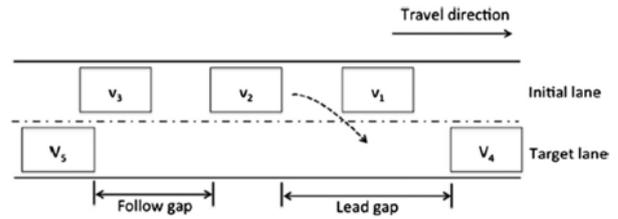


図-2 Gippsモデルにおけるギャップ探索

ており、車線変更するまでの距離に依存してドライバが希望速度を維持することが可能かどうか判断し、車線変更の意思決定が行われる。Gipps モデルは、Gipps³⁵⁾が構築した追従モデルをベースにしており、追従車両の速度が以下の式(1)で表される。

$$v_n(t+T) = b_n T + \left\{ b_n^2 T^2 - b_n \left[2(X_{n-1}(t) - s_{n-1} - X_n(t)) - v_n(t)T - \frac{v_{n-1}(t)^2}{\hat{b}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

ここで、

$v_n(t+T)$: 時間 $t+T$ のときの先行車 $n-1$ に関する車両 n の最大安全速度、 b_n : ドライバ n が保証可能な制御距離、 X_n : 時間 T の車両 n の走行位置、 s_{n-1} : 車両 $n-1$ の車長、

Yang et al.¹⁵⁾は、Gipps モデルを高速道路における4段階構造(車線変更の意思決定、目的車線の選択、ギャップ探索、車線変更の実行)の車線変更意思決定モデルに拡張している。gap acceptance のアルゴリズムは図-2に示すように、隣接車線(target lane)の前方ラグ(lead gap)と後方ラグ(follow gap)を探索し、車線変更を実行する。

Gipps モデルと Yang et al.¹⁵⁾の改良モデルは、十分なギャップが存在するときのみ車線変更が実行されるモデルであり、時々刻々と変化する周辺車両との相互作用を記述できない課題がある。そこで Hidas^{37) 38)}は、車線変更車と車線変更先を走行する車線変更受入車間の相互作用を考慮したシミュレーションを構築した。車線変更受入車は、相手が強引に車線変更(foced LC)する場合に減速するケースと車線変更車のために前方に十分なスペースを作る(cooperative LC)とに区別したモデルを構築している。Kesting et al.³⁹⁾は、MOBILを用いて加速度ベースのモデルへと改良し、車線変更の意思決定を容易に記述可能なモデルを構築している。

(2) 効用理論ベースの車線変更モデル

Ahmed et al.²⁶⁾, Ahmed²⁷⁾, Toledo^{40) 41)}, Toledo et al.⁴²⁾や Ben-Akiva et al.^{43) 44)}は、ドライバの効用を加味した段階的な車線変更モデルを構築している。

Ahmed et al.²⁶⁾, Ahmed²⁷⁾が提案した車線変更意思決定モデルは、以前の走行経験に車線選択が依存するドライバの異質性を加味している。時間 t のときのドライバ n の効用は以下の式(2)のようになる。

強制性と任意性

Ahemed(1999)
Toledo(2003)
Ben-Akiva(2006,2009)

Gap acceptance

Gipps(1986)
Yang(1993)
Webster(2007)

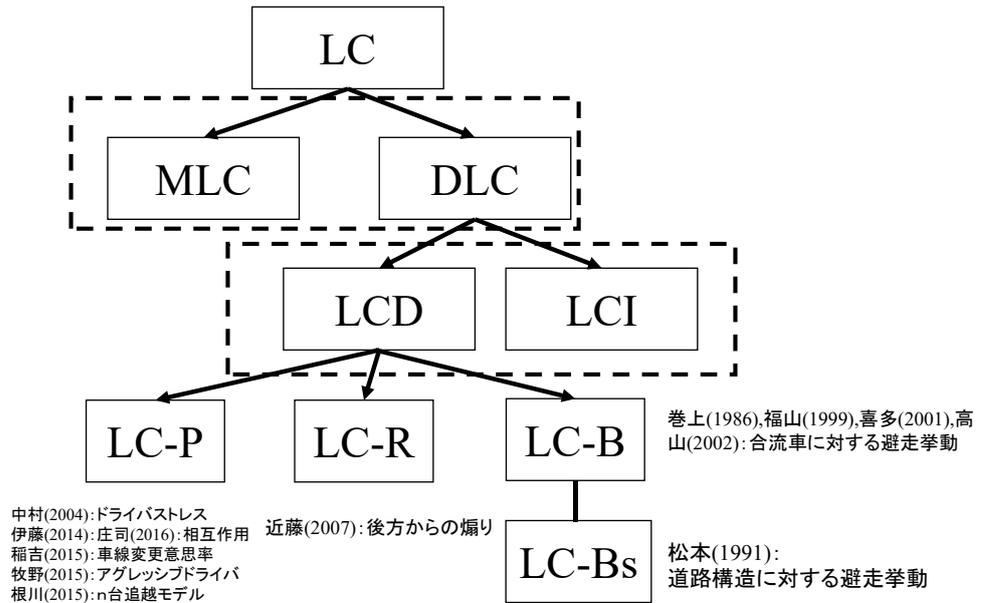


図-3 車線変更モデルの概観図

$$U_{in} = \gamma^T X_{in} + v_n + \varepsilon_{in} \quad (2)$$

ここで、

U_{in} : 時間 t のときのドライバ n の効用, X_{in} : 説明変数, γ : 未知パラメータ, v_n : 個人特有のランダム効用, ε_{in} : 誤差項

当該モデルは、自車と隣接車線後方車両との関係により強制的に車線変更の意思決定が行われるモデルである。一方、Toledo⁴⁰⁻⁴¹⁾, Toledo et al.⁴²⁾ や Ben-Akiva et al.^{43) 44)} は、車線変更挙動の強制性と任意性をを統合したモデルを提案している。数多くある車線変更機会の中でドライバにとって一番好ましい状況を Gipps モデルを用いて選択するモデル構造である。時間 t のときにドライバ n が最も好ましい状況 i を選択する効用は以下の式(3)になる。

$$U_{int}^C = \beta_i^{C^T} X_{int}^C + \alpha_i^C v_n + \varepsilon_{int}^C \quad (3)$$

ここで、

U_{int}^C : 時間 t のときのドライバ n が最も好ましい状況 i を選択する効用, X_{int}^C : 説明変数, β_i : パラメータ, v_n : 個人特有の変数, α_i : v_n のパラメータ, ε_{int} : 個人特有のランダム効用

(3)車線変更を考慮した交通流モデル

これまで取り扱ってきたモデルはドライバの車線変更挙動をミクロに表現するモデルである。一方で、ドライバの車線変更挙動をマクロに取り扱った交通流モデルが多く提案されている。^{45) 46)} 塩見ら^{47) 48)} は、各ドライバが自らの効用を最大化するべく、車線変更の意思決定

が記述可能な交通流モデルを構築している。走行に関するコストとして右車線変更要因に「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る項」と左車線変更要因として「キープレフトを遵守する項」を用いている。ここで、車線 l における交通密度 k_l に応じた速度と、車線 l を利用することによるコスト c_l はそれぞれ以下の式(4)(5)で表される。

$$v_l = f_l(k_l) \quad (4)$$

$$c_l(k_l) = \alpha_l + \beta_l \{f_l(k_l)\}^{-1} + \varepsilon \quad (5)$$

車線変更の動機付けとして、ドライバはコストの改善が可能な車線へ車線変更する選択確率をロジットモデルにより以下の式(6)で算出している。

$$P_{ii,l \rightarrow i'} = \frac{\exp[-\theta \cdot c_{il}(k_{ii,l})]}{\sum_l \exp[-\theta \cdot c_{il}(k_{ii,l})]} \quad (6)$$

(4)車線変更モデルの概観図

これまでに提案された車線変更モデル全体の概観を樹形化したものを図-3 に示す。Gipps¹⁴⁾が車線変更モデルの礎を築き(1986年), Yang et al.¹⁵⁾によって、高速道路の車線変更モデルへと拡張した(1996年)。さらに Ahemed et al.²⁶⁾²⁷⁾によって車線変更挙動は、道路構造などの状況により異なる一方で、車線変更挙動の強制性(MLC)と任意性(DLC)の観点からの違いに関する指摘がなされた。(1999年)本研究では単路部の車線変更モデルに着目した樹形図を作成したため、DLC からのみ枝分かれされた

構造となっている。DLC 状況下での車線変更意思決定 (LCD) と車線変更行動決定 (LCI) のアプローチが多く提案されている。近年の車線変更モデルにおいても Gipps モデルの *gap acceptance* による車線変更の意思決定と行動決定の概念が用いられている。さらに車線変更挙動は、LC-R(追越挙動)、LC-L(復帰挙動)、LC-B(避譲挙動) に細分化される。また、LC-B から LC-Bs (道路構造そのものに対する避譲挙動) が派生する構造とした。

LC-P は、Gipps モデルをベースに自車の走行環境を改善するべく車線変更の意思決定がされるモデルが構築されている。一方で、LC-L を記述したモデルは少なく、追越後、希望速度を満すことが復帰の動機づけとなるモデル構造である。

LC-B は本線を走行するドライバーと合流車による相互作用を考慮し、本線車の避譲挙動を加味したモデルが提案されている。一方で、LC-Bs のような織り込み区間や合流部といった道路構造に対する避譲挙動を記述したモデルは少ないと認識する。

5. ドライバ挙動の視点からの整理

先述したが、ドライバーの車線変更挙動は、走行環境を変えるための「車線変更意思決定」と、実際に車線変更の実施判断にあたる「車線変更行動決定」、さらに「復帰挙動」「避譲挙動」から形成される。

(1) 車線変更意思決定モデル

各ドライバーは希望速度を持ち、自らの走行環境を変えるべく、車線変更を行う。その際の車線変更の意思決定アプローチが多く提案されている。

中村ら⁴⁹⁾は、車線変更の動機付けとして、ドライバーストレスを内生化した車線変更希望モデルを構築している。具体的には、速度、車間距離、勾配、大型車などのデータを用いて、車線変更希望の有無を非集計二項ロジットモデルにより推定している。花房ら⁵⁰⁾は、自車の速度と前方車両の速度を比較し、一定の速度を下回ったときに車線変更が要求されるモデルを構築している。加納ら⁵¹⁾はマイクロ交通シミュレータ KAKUMO 上に車線変更挙動を含む運転行動モデルを構築している。「目的経路に繋がる車線への移動」「前方車両の速度と自車の希望速度の比較」のいずれかの条件が満たされたとき車線変更要求がなされる。しかし、当該モデルは比較的空いた道路状況であっても前方の低速車に追従するという課題がある。そこで、近藤ら^{52)・53)}は、加納ら⁵¹⁾のモデルを「自由走行時からの車線変更」と「追従走行時か

らの車線変更」に区別したモデルを構築している。具体的には自由走行時は車線前方車両との TTC が閾値を下回ると車線変更要求が発生し、追従走行時は自車と隣接車線前方車両の TTC が閾値を下回ると車線変更要求が発生するモデル構造である。遠藤ら^{54)・55)}は、セルオートマトンを用いて交通流シミュレーションを行っている。ドライバーは希望速度を維持しようとし、前方車両との相対的な関係により減速しなければならない、かつ車線変更をすることで減速をしなくて済む場合に車線変更の可能性を検討するモデル構造である。牧野ら⁵⁶⁾は、渋滞対策として、希望速度が高く小さいギャップに割り込むアグレッシブドライバーに着目し、マイクロ交通流シミュレーションを行っている。ドライバーの車線変更希望の判断は、走行中の車線の前方との距離が閾値未満の場合に発生し、所定の確率で車線変更を受諾・実行するモデル構造となっている。稲吉ら^{57)・58)}は、車線変更の意志を有するに至る確率を「車線変更意志率」と定義づけ、車線変更意思率を変動させることによる交通状態を分析している。

吉川ら^{59)・60)}や根川ら⁶¹⁾は付加車線設置区間における追越挙動モデルを構築し、追越の可否判定については、自車の希望速度と前方車両の速度との相対速度と付加車線設置区間に一定以上の残存距離があり、かつ隣接車線後方車両との車頭時間が一定以上保たれているとき、追越可能と判断する。また、DS 実験等の被験者にプロトコル法を用いて、運転行動の意思決定過程を分析する研究も行われている。^{62)・63)}

これらのすべてのモデルが、前方を走行する車両との相対的な速度や車間距離により車線変更の意思決定が行われる。

(2) 車線変更行動決定モデル

車線変更意思決定後、実際にドライバーが車線変更可能なギャップを探索し、車線変更の行動決定を行う。

中村ら⁴⁹⁾は、車線変更を希望した後に隣接車線のギャップを探索し、隣接車線前方・後方車両と自車との車頭距離相対変化率(1/TTC)の和が最小となるようなギャップ選択モデルを提案している。花房ら⁵⁰⁾は、車線変更の要求後、周辺車両とのギャップを確認し、隣接車線に移動していくまでの3秒間の位置関係を予測し、車線変更の可否が判断される。加納ら⁵¹⁾は、「隣接車線前方・後方に車両が存在しない」または、「隣接車線に現在および一定時間後に許容距離以上の場合」車線変更判断がなされるモデル構造である。一方、近藤ら^{52)・53)}は、加納ら⁵¹⁾のモデルに自車の前方車両と隣接車線前方車両の速度差を加味したモデルへ改良している。

牧野ら⁵⁶⁾は、「目標車線前方車との速度差が閾値以上」「目標車線の干渉範囲に車両が存在しない」「目的車線の前方・後方ギャップがいずれも閾値以上」「目的車線の前方・後方 TTC がいずれも閾値以上または負値」のすべての条件が成立する場合に車線変更が可能であると判定し実行する。

(3) 復帰挙動モデルと避譲挙動モデル

右車線に車線変更後の復帰挙動を加味したモデルも存在する。

中村ら⁴⁹⁾は、第 2 走行車線・追越車線を走行中のドライバーが希望速度を満たしている場合、隣接車線のギャップを探索し、車線変更可能なギャップに車線変更を行うモデル構造となっている。牧野ら⁵⁶⁾の復帰希望判定は希望速度で走行し、かつ前方車間距離が閾値以上の場合発生し、車線変更の実行は右車線変更同様のロジックで行われる。しかし、これらのモデルは希望速度を満たすことが左車線への復帰の動機付けとなっており、実際の追越車線を走行し続けるドライバーを表現できていない課題が残る。

一方で、復帰挙動を表現するにあたり、後続の高速走行車からの煽りにより避譲挙動を表現したモデルも提案されている。近藤ら^{52) 53)}は、後続車との TTC が閾値を下回ることによって車線変更要求が発生するモデル構造となっている。

また、避譲挙動に関する研究は、合流部における合流車に対する避譲挙動が提案されている^{66) 70)}。

清水ら⁶⁶⁾は、合流車と本車線走行車の相互作用を考慮した速度調整とギャップ選択行動を統合したモデルを構築している。本車線走行車の避走決定は、合流車への遭遇状況を調べ、事前に車線変更を行うか判断する。車線変更を希望する場合は右車線への流入の可否判断を行い、可能な場合、車線変更を開始するモデル構造である。その後、前方に合流車の存在を確認した場合、同様のロジックで回避するために車線変更を行う。

6. まとめ

本研究では、高速道路での渋滞対策に必要な不可欠なドライバーの車線変更挙動を把握するために、これまでに提案された車線変更モデルをレビューした。

車線変更の意思決定モデルと行動決定モデルは多くのアプローチがされており、右車線への車線変更の動機付けが明らかになっている。一方、左車線への復帰挙動は右車線への車線変更同様のロジックで記述されたモデル

が多く、課題が残る。また、道路構造による避譲挙動に関しては提案されたモデルが少ない。一般に避譲挙動は「合流車に対しての避譲挙動」「後続の高速走行車両への避譲挙動」の 2 つに分類される。

一方で、立証はされていないが、合流先における追越車線への偏重は合流車が少ない状況下でも生じてしまうと考えられる。これは、合流部という道路構造そのものが抵抗になっている可能性が高い。すなわち、合流車が存在しなくても、走行車線を空ける挙動が生じている可能性が高く、この挙動を記述したモデルが追越車線の利用率偏重解明のために必要であると考えられる。

また、左車線への復帰の鈍化をミクロ的に表現できるモデルの構築と既存モデルの性能評価が今後の課題である。

参考文献

- 1) 越正毅, 高速道路のボトルネック容量, 土木学会論文集, No.371, IV-5, pp.1-7, 1986
- 2) 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, No.458, IV-18, pp.65-71, 1993
- 3) 大口敬, 桑原雅夫, 赤羽弘和, 渡邊亨, ボトルネック上流における車線利用率の矯正効果と付加車線設置形態, 第 9 回 ITS シンポジウム, 2010
- 4) 鈴木一史, 山田康右, 堀口良太, 岩武宏一, 高速道路サグ部渋滞対策に資する ACC の将来性能と渋滞緩和策, 交通工学論文集, Vol.1, No.2, pp.60-67, 2015
- 5) 原田秀一, 深瀬正之, 前島一幸, Jian Xing, 瀬古賢司, 高速道路での車線利用率平準化による渋滞対策に関する研究, 交通工学, Vol.42, No.5, pp.74-79, 2007
- 6) Jian Xing, 鶴元史, 石田貴志, 村松栄嗣, 片側 3 車線区間における LED 標識を用いた車線利用率平準化渋滞対策効果の検証, 交通工学論文集, No.31, pp.167-171, 2011
- 7) 大口敬, 高速道路単路部渋滞解析-追従挙動モデルの整理と今後の展望-, 土木学会論文集, No.660, IV-49, pp.39-51, 2000
- 8) 大口敬, 小沼良一, 勾配影響を考慮した追従挙動モデルの比較分析, 土木計画研究・講演集, CD-ROM, No.34, 2006
- 9) Zuduo Zheng, Recent developments and research needs in modeling lane changing, Transportation Research PartB, 60, pp.16-32, 2014
- 10) 山口恭平, 清田裕太郎, 野中康弘, 岩倉成志, ビデオ観測データに基づく高速道路単路部の車線利用率偏在要因の考察, 第 70 回年次学術講演会講演集 No.4, pp.117-118, 2015
- 11) 中村圭佑, 高屋雄太, 清田裕太郎, 石田貴志, 野中康弘, 高速道路の車線利用特性に関する微視的考察 土木計画学研究・講演集, (CD-ROM), Vol.50, 2014

- 12) Carlos F.Daganzo, Jorge A.Laval, Moving bottlenecks: A numerical method that converges in flows, *Transportation Research Part B* 39, pp.855-863, 2005
- 13) Boris S Kerner, Sergey L Klenov, A theory of traffic congestion moving bottlenecks, *Journal of Physics A, Mathematical and Theoretical*, Vol.43, No.42
- 14) P.G.Gipps, A Model for the structure of lane-changing decisions, *Transportation Research Part B*, Vol.20B, No.5, pp.403-414, 1986
- 15) Yang.Q, Koutsopoulos.H.N, Microscopic traffic management system, *Transportation Research Part C*, Vol.4, 1993
- 16) Webster,N,Suzuki T,Kuwahara M,Driver Model for Traffic Simulation,with Tactical Lane Changing Behavior, *SEISAN-KENKYU*, Vol.59, NO.3, pp.42-45, 2007
- 17) 中村英樹, 桑原雅夫, 鈴木隆, 越正毅, 赤羽弘和, 首都高速道路織り込み区間での交通流観測と運転挙動解析, *土木計画学研究・講演集*, No.12, 1989
- 18) 中村英樹, 桑原雅夫, 越正毅, 織り込み区間の交通容量算出シミュレーションモデル, *土木学会論文集*, Vol.1991 No.440, pp.51-59
- 19) 松本健二郎, 高橋秀喜, 井上淳一, 辻光弘, 織り込み区間長評価のための交通シミュレーションモデルの開発, *土木学会論文集*, No.440, pp.61-69, 1991
- 20) Sun You Hwang, Chang Ho Park, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.5, pp.1641-1656, 2005
- 21) 清水哲夫, 山田敏之, 走行実験データに基づく都市高速道路合流部の運転挙動に関する分析, 第 55 回年次学術講演会, IV-15, pp.1-2, 2000
- 22) 内山久雄, 高速道路における工事時の自動車車両のミクロ的な合流挙動特性解析, *土木学会論文集*, No.542,IV-32, pp.79-87, 1996
- 23) 内山久雄, 高速道路における工事時の合流意思決定プロセスのモデル化, *土木学会論文集* No.652, pp.29-37, 1999
- 24) 渡辺将光, 中村英樹, ビデオ画像を用いた都市合流部における合流挙動に関する分析, *土木計画学研究・講演集*, No.32, pp.4, 2005
- 25) Choundhury,C.F, Ben-Akiva,M, Abou-Zeid,M, Dynamic Latent Plan Models, *Journal of Choice Modeling*, Vol.3, No.3, 2010
- 26) Ahmed K.I, Ben-Akiva,M.E, Koutsopoulos,H.N, Mishalani,R.G, Models of freeway lane changing and gap acceptance behavior, *Proceedings of the 13th International symposium on the Theory of Traffic Flow and Transportation*, pp.501-515
- 27) Ahmed K.I, Modeling Driver's Acceleration and Lane Changing Behavior, *PhD Dissertation*, Department of Civil and Environmental Engineering, MIT, 1999
- 28) 羽藤英二, 横田幸哉, 中西雅一, 北澤俊彦, 車線変更行動のモデル化と反応の非対称の関する考察, *交通工学研究発表会報告集* 27, pp.129-132, 2007
- 29) 伊藤篤, 柳沼秀樹, 羽藤英二, 相互作用項を考慮した動学的車線変更モデルの構造推定, 第 34 回交通工学研究発表会報告集, pp.615-620, 2014
- 30) 庄司推, 北澤俊彦, 柳沼秀樹, ドライバ間の相互作用を考慮した車両挙動モデルの構築, 第 53 回土木計画学発表会・講演集, CD-ROM, 46-02, 2016
- 31) Nakata.M, Yamaguchi.A, Tanimoto.J, Hagishima.A, Dilemma game structure hidden in traffic flow at a bottleneck due to a 2 into 1 lane junction, *Physica A*,389, 2010
- 32) 莖田慎司, 谷本潤, 萩島理, 車線変更が交通流にもたらすジレンマ構造の解析, *The Mathematical Society of Traffic Flow*, Vol.17, 2011
- 33) Kita.H. A merging-giveway interaction model of cars in a merging section:a game theoretic analysis,*transportation Research Part A* 33, pp.305-312, 1999
- 34) 柳原正実, 宇野伸広, 塩見康博, 倉内文孝, 画像データを活用した都市高速合流部における合流ギャップ選択モデル, *土木計画研究・論文集*, Vol.27, No.3, 2010
- 35) Gipps,p.G, A Behavioural Car- Following Model for Computer Simulation, *Transportation Research*, Vol.15B, No.2, pp.105-111, 1981
- 36) Hidas,P, Modeling lane changing and merging in microscopic traffic simulation, *Transportation Research Part C* 13, pp.37-62, 2002
- 37) Hidas,P, Modeling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving, *Transportation Research Part C* 13(1), pp.37-62
- 38) Lee.G, Modeling gap acceptance at freeway merges, Department of Civil and Environmental Engineering, MIT, 2006
- 39) Kesting,A, Treiber,M, Helbing,D, General lane-changing model MOBIL for car-following models, *Transportation Research Record-Journal of the Transportation Research Board*,1999, pp.86-94, 2007
- 40) Toledo,T, Integrated Driving Behavior Modeling, MIT, 2003
- 41) Toledo.T, Driving Behavior:Models and Challenges, *Transport Reviews*, in Press, 2006
- 42) Toledo,T, Ben-Akiva,M, Koutsopoulos.H.N, Modeling Integrated Lane-changing Behavior, *Transportation Research Record*, 1857, pp.30-38
- 43) Ben Akiva,M.E, Choundhury.C.F, Toledo.T, Lane changing models, *Proceedings of the International Symposium of Transport Simulation*, 2006

- 44) Ben Akiva, M.E, Choundhury.C.F, Toledo.T, Integrated Lane Changing Models, Transport Simulation:Beyond Traditional Approaches, 2009
- 45) Daganzo,C.F, A behavioral theory of multi-lane traffic flow, Transportation Research PartB,36,(2), pp.159-169, 2002
- 46) Laval,J, Daganzo,C.F, Lane-changing in traffic streams, Transportation Research, PartB, 40,(3), pp.251-264, 2006
- 47) 塩見康博, 小園達也, 車線交通量の均衡状態を仮定した高速道路サグ部の車線利用特性の分析, 交通工学論文集, Vol.1, No.2, pp.158-164, 2015
- 48) 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, No.3, pp.1-10, 2015
- 49) 中村英樹, 鈴木弘司, 劉俊晟, ドライバーストレスの間接計測に基づく高速道路単路部におけるサービス水準の評価, 土木学会論文集, No.772/IV-65, pp.11-21, 2004
- 50) 花房比佐友, 堀口良太, 桑原雅夫, 田中伸治, 牧野浩志, 大内浩之, 高速道路サグ部における AHS 円滑化サービス評価用交通シミュレータの開発, 第 4 回 ITS シンポジウム, 2005
- 51) 加納誠, 白石智良, 丸岡勝幸, 石川裕記, 見持圭一, 山本隆嗣, 酒井繭美, 辻求, 桑原雅夫, ドライバー挙動モデルの開発, 第 4 回 ITS シンポジウム, pp.251-256, 2005
- 52) 近藤啓介, 鈴木高宏, 桑原雅夫, 他車両との相互作用を取り入れた横方向運転行動モデルの同定, 第 5 回 ITS シンポジウム, 2006
- 53) 近藤啓介, 鈴木高宏, ミクロ・マクロ両視点からの高速道における車線変更モデルの同定, 生産研究, Vol.59, No.3, pp.205-209, 2007
- 54) 遠藤紀彬, 中山晶一郎, 高山純一, セルラーオートマトンによる車線変更挙動を考慮した多車線高速道路の交通流シミュレーション, 第 42 回土木計画学研究, CD-ROM, 2010
- 55) 遠藤紀彬, 中山晶一郎, 高山純一, セルオートマトンを利用したミクロ交通シミュレーションによる車線変更挙動解析, 土木計画学研究・講演集 Vol.44, P.18, 2011
- 56) 牧野浩志, 鈴木一史, 鹿野島秀行, 山田康右, 堀口良太, 車線変更行動に着目したサグ部渋滞発生要因に関する一考察, 土木学会論文集 D3, Vol.71, No.5, pp.1001-1009, 2015
- 57) 稲吉龍一, 能登屋駿人, 都市間高速道路における車線変更モデルの開発と適用, 2013
- 58) 稲吉龍一, 武藤憲弘, 能登屋駿人, 赤羽弘和, 車両の走行軌跡の精密観測に基づくサグ渋滞対策の検討, 交通工学論文集, Vol.1, No.2, pp.32-39, 2015
- 59) 吉川良一, 長浜和実, 寒河江克彦, 吉井稔雄, 北村隆一, 暫定 2 車線区間のボトルネック上流の付加車線設置による渋滞軽減効果の検討, 第 30 回土木計画学研究発表会, 2004
- 60) 吉川良一, 塩見康博, 吉井稔雄, 北村隆一, 暫定 2 車線高速道路のボトルネック交通容量に関する研究, 交通工学研究発表会論文集, Vol.43, No.5, 2008
- 61) 根川拓, 佐野可寸志, 西内裕晶, 暫定 2 車線高速道路付加車線内における追越挙動のモデル化, 交通工学論文集, Vol.1, No.4, pp.24-30, 2015
- 62) 吉川聡一, 高木修, プロトコル法による運転行動の意思決定過程の研究, 社会心理学研究, Vol.14, No.1, pp.31-42
- 63) 飯田克弘, 池田武司, 河井健, 森康男, 山岸将人, プロトコル法を用いた運転者挙動結果に基づくサグ部の道路構造改善方針の検討, 土木計画学研究・論文集, Vol.18, No.5, 2001
- 64) 洪性俊, 山邊茂之, 李曙光, 大口敬, ドライビングシミュレータを利用した車線閉鎖時における車線変更挙動の分析, 生産研究, Vol.65, No.2, pp.241-245, 2013
- 65) 柳原正実, 宇野伸宏, 中村俊之, 嶋本寛, 山崎浩気, ドライビングシミュレータ走行被験者に尋ねた運転意図と車両挙動との関係に関する基礎分析, 土木計画学研究・講演集, CD-ROM, No.48, 2013
- 66) 清水哲夫, 屋井鉄雄, 三室徹, AHS の対応行動を考慮した都市高速道路合流部の運用評価分析システムの開発とその適用, 土木学会論文集, No.758, IV-63, pp.11-21, 2004
- 67) 高山純一, 中山晶一郎, 宇野伸宏, 飯田恭敬, 玉元将裕, 住友拓哉, 一般道路合流部の交通錯綜における避讓挙動解析, 土木計画学研究・論文集, Vol.19, No.4, 2002
- 68) 喜多秀行, 幸坂謙之介, 福山敬, 流入・避讓行動の相互依存性を考慮した高速道路流入部のマクロ走行特性推計法, 土木計画学研究・論文集, Vol.18, No.5, 2001
- 69) 福山敬, 喜多秀行, 高木英史, 高速道路流入部における先行避讓に関する一考察, 土木学会中国支部第 51 回研究発表会, 1999
- 70) 卷上安爾, 安達靖夫, 末田元二, 高速道路に伴う合流部の合流車線延長について, 土木学会論文集, 第 371 号, IV-5, pp.133-142, 1986