

高速道路の車線選択モデルへの 再帰型逐次選択モデルの適用可能性

岩崎 真純¹・本山 莉紗子²・岩倉 成志³・野中 康弘⁴

¹学生会員 芝浦工業大学大学院 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非会員 芝浦工業大学 工学部土木工学科 (〒135-8548 東京都江東区豊洲3-7-5)
E-mail:AH13078@shibaura-it.ac.jp

³正会員 芝浦工業大学教授 (〒135-8584 東京都江東区3-7-5)
E-mail:iwakura@sic.shibaura-it.ac.jp

⁴正会員 株式会社道路計画 (〒170-0013 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

都市間高速道路における片側3車線区間の交通集中渋滞は、単路部で発生することが多い。交通需要が増加すると、追越車線に交通量が偏ることで大きな車群形成が形成され、そこから減速波が生じて、最終的には全車線に交通集中渋滞が波及する。追越車線利用偏重解明のために筆者は車線変更モデルを構築し、車線変更挙動の把握を進めてきた。しかし、時々刻々と変化する交通状況を表現するまでには至っていない。そこで、Fosgerauが提案するリンクベースのRecursive Logit modelを車線選択モデルに適用し、逐次選択モデルの可能性を検討した。

Key Words : *Three-Lane Highway, Lane changing model, Recursive Logit model, Route choice model*

1. はじめに

都市間高速道路の片側3車線区間単路部において、渋滞発生直前の車線利用率は一般に、追越車線に偏重する。この結果、第1・第2走行車線の交通量が交通容量に対してまだ余裕があるにもかかわらず、追越車線の大きな車群中で減速波が生じ、最終的に全車線に交通集中渋滞が波及することが知られている。一方で、車線合計の交通量レベルが同じであっても、追越車線利用率が大きな分散を呈することもある。すなわち、いかなる交通状態のときに追越車線が選択され、追越車線利用率の偏重が助長されるかは、十分に解明されていない。

筆者ら¹⁾は、車群形成を緩和する対策立案を念頭に、追越車線利用偏重の原因解明に向けた車線変更モデルを検討した。具体的には、車線変更を「行う」「行わない」の行動を右車線変更と左車線変更に分けて、二項ロジットモデルを構築した。しかし、当該モデルは車線変更時の周辺車両の状況のみを考慮したモデル構造となっていることから、時々刻々と変化する数秒先の道路状況の影響が考慮されない課題がある。

そこで本論では、数秒先の道路状況も含めたドライバーの意思決定モデルとして、Fosgerau²⁾が提案する

Recursive Logit model (以下、RLモデルとする)の適用を試みる。高速道路の各車線上に配置したノードごとに逐次選択を繰り返すモデルとすることで、経路選択行動に見立てて車線選択行動を記述する。走行区間の車線ごとに数十メートルおきのノードと、ノード間の接続リンクを配置した場合、たかが1km区間であってもノード数によって級数的に経路集合が増加する。このような課題に対して、RLモデルは選択肢集合を列挙することなく、選択された経路情報とリンクのLOS情報のみでモデルを構築するため、計算負荷を大幅に軽減することができる。

本論は、検討の端緒についてのものでしかないが、東名高速道路単路部の詳細な車線変更行動データを得て、車線選択モデルへのRLモデルの適用に関して、その可能性と課題を報告する。以下、2. では、従来の車線選択モデルの展開を整理する。3. では、RLモデルを用いた車線選択モデルの考え方とパラメータ推計結果および車線選択の再現性を述べる。最後に、4. で本論から得られた成果をまとめ今後の課題を整理する。

2. 既存研究の概観

(1) ドライバー心理を考慮した車線変更モデル

車線変更モデルの構築に伴い、ドライバーの意思決定のタイミングや特性を勘案する必要がある。羽藤⁹⁾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ている。車線変更挙動を右車線変更行動、左車線変更行動を自由流時と混雑流時とに分け、車線変更モデルを構築している。その結果、前方車両と後方車両の車間距離の合計の影響を表すパラメータが右車線変更と左車線変更で符号が逆転していることから左右方向への車線変更行動に一定の非対称効果があることを定量的に明らかにした。

一方、柳原ら¹⁰⁾は、車線変更と加速度制御に関わるドライバーの判断過程に着目し、ドライバーの意図の推移を表現するモデルを提案している。そのため、速度調整と車線変更の双方の挙動を1つに統合している。このモデルにより、従来の加速度モデルや車両挙動に伴う各選択モデルを包含でき、既存研究における説明変数選択や推定による知見を応用できる可能性を示した。これらの車線変更モデルでは、ドライバーの意思決定タイミングを考慮して構築されている。

また、伊藤ら¹¹⁾は、車線変更に伴う周囲の車両との相互作用とドライバー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の効用が内生化されている。そのため、車線変更モデルと車線変更受容モデルに関して、構造推定を用いて入れ子構造モデルのパラメータを推定し、相互作用項の有無によりモデルを比較している。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が示された。一方車線変更車後方を走行する車両は、前方の車両車線変更効用の上昇に伴い減速効用が低減し、車線変更の受容を拒む心理が示唆された。

庄司ら¹²⁾は、ドライバー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」とドライバー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内生化した入れ子型の「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ている。

西脇ら¹³⁾はドライバーはあらかじめ様々な車両軌跡を想定し、その中から最も好ましい軌跡を交通環境に応じて選択すると仮定し、運転軌跡を生成している。車

線変更のように複数の運転状態の組み合わせにより構成される運転行動を隠れマルコフモデル(HMM)を用いて車線変更の動的な性質を表現している。しかし、HMMを用いたため、車線変更挙動を定量的に把握できたとはいえない。

以上の様にドライバーの意思決定タイミングや思考をモデルに実装した例は多く、これらは車線変更を行う車両の周辺交通状況を把握したうえで構築されている。

(2) 周辺車両状況を考慮した車線変更モデル

周辺車両挙動を考慮した車線変更モデルは、周辺車両との合流ギャップやラグを考慮した、合流挙動モデルに多く見受けられる。内山⁸⁾は、高速道路の工事規制時に着目し、合流挙動を合流準備挙動と車線変更を開始し合流が完了する合流調整挙動とに分けている。走行軌跡データ取得システムから得られる走行特性(合流車の位置、後方ラグの相対変化率、ギャップの相対変化率、合流車の速度)を説明変数とし、合流挙動をギャップへの「合流を開始する」「合流を見送る」という二項選択ロジットモデルを構築し、有意な結果を得ている。渡辺ら¹⁴⁾はビデオ画像処理システムを用いて取得した軌跡データから位置、速度、加速度を算出し、直近/追越のギャップ選択をする「ギャップ選択モデル」と選択したギャップごとの合流車の加減速挙動を表現した「加速度推定モデル」を構築した。ギャップ選択を行う際にギャップ長や合流車と本線車との車頭距離変化相対率に影響を受けることを明らかにした。また加速度推定モデルにおいては、合流車は先行車と後続車との関係を意識し、追越合流の場合は、先行車との関係を強く意識して加速度調整行動をとっていることを明らかにした。しかし、加速度調整モデルは流入するギャップが決まっている場合に適用されるモデルとなっているため、他車の挙動に応じて選択するギャップを変更することは考慮されていない。また、柳原ら¹⁰⁾は、都市間高速道路の合流部においてギャップ選択時の車両の車両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。

洪ら¹⁵⁾は、合流部への動的チャンネルリゼーションの導入において懸念される事故リスクを想定し、1車線閉鎖時におけるドライバーの車線変更挙動を、交通量の多い状態と少ない状態に分けドライビングシミュレータ実験を実施し、車線変更挙動を分析している。実験の結果から、車線閉鎖が突然現れたときの横方向速度は増加する傾向にあるということを明らかにした。しかし、前方車両との相対的な関係を車線変更挙動に考慮

できていない。

根川ら¹²⁾は、付加車線内での追越挙動のモデルを、前車1台のみだけではなく、2台目以降も考慮した車両走行モデルを構築し、より現実的な挙動を示している。

また、これらの周辺状況をコンフリクト指標に着目し、アプローチした例として、飯田ら¹³⁾は、工事規制始端部における危険な車両挙動を把握し、潜在的な追突危険性を表すPICUD(Possibility Index for Collision with Urgent Deceleration)を用いて危険な車両挙動と規制材配置との関連性を分析している。交通量が多い場合に潜在的危険性が高くなる車両が多く、走行車線規制時はギャップ後方車、追越車線規制時は車線変更車の危険性が高くなることを明らかにした。また規制する車線によらず規制材が車線内に配置され始めた地点でPICUDがより低下しており、走行車線規制時は狭いギャップへの強引な車線変更および複数の車両の同じ地点での同じギャップへの車線変更が、追越車線規制時は狭いギャップへの車線変更および車線変更車の速度が速いことが、PICUD低下の要因となる可能性を把握している。

(3) シミュレーションによる車線変更モデル

ミクロシミュレーションやセルオートマトンを用いて、車線変更や追従挙動を再現し検証した例として、牧野ら¹⁴⁾は、渋滞発生前の走行車線から追越車線への車線変更行動を強引な割り込み等をするアグレッシブドライバに着目し、減速波発生と車線変更行動の因果関係や減速波発生伝播につながった車線変更行動の特徴について時空間車両軌跡データを用いて分析し、直接的に減速波の発生・増幅に繋がった車線変更は、追越車線における後方ラグが短いギャップへの強引な車線変更(割り込み)が原因となり、減速波を発生・増幅させた可能性が高いことが示唆された。

一方加納ら¹⁵⁾は、ミクロシミュレータKAKUMO上に実走されるドライバーモデルを用いて、車線変更挙動を含む運転行動モデルを構築している。このモデルは、左車線変更、右車線変更、追従走行、自由走行の優先順位で運転行動が選択される。それぞれのモデル内で要求、判断、実行、完了の制御フェーズを設け車線変更させる。しかし、実際の交通状況との再現性については検証が行われていない。また、近藤ら¹⁶⁾は、加納ら¹⁵⁾が構築したモデルを改良し、自由走行時の車線変更と追従走行時の車線変更とを区別しモデルを構築している。左車線変更モデルに関しては、後続車からの影響を考慮したモデルへと改良している。さらに、実データとの比較をし、評価と検討を行った結果、実データとの再現がほぼ可能であることを示した。しかし、このモデルでは最終的に左車線へ車線変更をさせるモデルとなっており、追越車線を走行し続けるドラ

イバーを表現するまでには至っていない。

遠藤ら¹⁸⁾は、ドライバーがどのような判断をすることでどのような交通現象が起きるのかを、CA(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。ドライバーはまず自分と自分よりも一つ前の車両までの距離、隣の車線の一つ前の車両までの距離、隣の車線の一つ後ろの車両までの距離とその車両の速度を確認し、ドライバーは行動の決定をするというルールの下シミュレーションを行っている。しかし、このモデルでは走行車線と追越車線において移動ルールが同じであるため、追越車線からの車線変更挙動を上手く表現できていない。

以上の事を踏まえて、ドライバーの車線変更ロジックは次のように言える。ドライバーは自由走行時において自車の希望速度を維持しようとするなか、走行中の前方車両が希望速度より遅いまたは、希望車間距離が取れない場合、速度を改善するために車線変更を試みる。その際、車線変更先の前・後方車両との相対的な距離や速度を確認し、車線変更可能か思考し、安全な車線変更が可能な場合、車線変更を行う。

一方、上記に比べ追越車線から走行車線へ復帰する車線変更はドライバーの意思決定タイミングが不明確であるため、この挙動を再現した研究は少ない。また、時々刻々と変化する道路状況やドライバーの意思決定を考慮した研究はあるが、高速道路上に仮想のノードを設け、ノードごとにドライバーが逐次経路選択を繰り返すモデルは提案されていない。

3. RLモデルの車線選択の応用

(1) RLモデル適用の考え方

従来型の経路選択モデルは、パスベースのため、選択肢集合を設定する必要があった。しかしFosgrerau²⁾が提案したリンクベースのLOS情報のみで経路選択モデルを構築できるRLモデルは、選択可能性のあるリンクの情報と選択結果のリンクの情報さえあれば、経路選択モデルが構築できる。従って、選択肢集合の設定によるパラメータの変動の問題が解消でき、選択肢が膨大な場合でも選択確率が容易に求められる。

車線選択にRLモデルを適用するには、リンクの設定が必要であり、マルコフ連鎖の性質を考慮するため、経路選択の終点を1つに絞らなくてはならない。よって、本論では仮に、図1のように車線上に100mピッチでノードを設定し、分析対象区間の最終ノードの先にセントロイド(図1中の赤丸)を1つ設けて、車線選択を経路選択とみなしてRLモデルを適用する。

選択可能性のあるリンクの情報が分かっている、あ

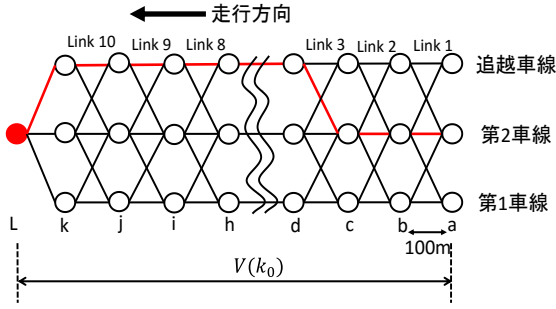


図1 車線選択モデル図

る車両のlink10までの車線選択が図1の赤線だった場合、バス σ の選択確率は式(1)で求められる。

$$P_{(\sigma)} = e^{-\frac{1}{\mu}V(k_0)} \prod_{i=0}^{I-1} e^{\frac{1}{\mu}v(k_{i+1}|k_i)} \quad (1)$$

$$V_n^d(k) = \begin{cases} \mu \ln \sum_{a \in A} \delta(a|k) e^{\frac{1}{\mu}(v_n(a|k) + V_n^d(a))} & \forall k \in A \\ 0 & k = L \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 μ : スケールパラメータ、 v_n : 各リンクの効用、 V_n^d : ログサムである。

なお、各ノードのログサム $V(k)$ は、Bellman方程式を利用してリンク情報のみで算出できる。詳細は、Fosgerau²⁾を参照されたい。

(3) 車線選択モデルの基礎分析

a) データ概要

国土技術政策研究所から提供頂いた車両軌跡データを用いる。対象区間は東名高速道路（下り線）の21.7kp～22.7kpとする。本稿ではテストケースとしてパラメータ推定の対象車両は車線変更をした5台のみをサンプルとしている。時々刻々と交通状況が変わるため、各ノードで選択確率を算出する。よって、サンプル数は50サンプル（5台×10リンク）である。

b) モデルの設定

モデルの説明変数は速度、車間距離、第1車線ダミー、第2車線ダミー、右車線変更ダミー、左車線変更ダミーである。速度は、サンプル車両があるリンクを走行している時刻の各リンクの平均速度である。車間距離は、サンプル車両があるリンクを走行している時刻に各リンクを走行する車両の台数でリンク長を除して算出する。第1車線のノードaから第1車線のノードb間のリンクの効用関数を式(3)に示す。

$$V_{a \rightarrow b_1} = \theta_1 v_{a \rightarrow b_1} + \theta_2 H_{a \rightarrow b_1} + \theta_3 L1_{a \rightarrow b_1} + \theta_4 L2_{a \rightarrow b_1} + \theta_5 RC_{a \rightarrow b_1} + \theta_6 LC_{a \rightarrow b_1} \quad (3)$$

ここで、 v は速度、 H は車間距離、 $L1$ は第1車線ダミー、 $L2$ は第2車線ダミー、 RC は右車線変更ダミー、 LC は左車

表1 パラメータ推定結果

変数	パラメータ
速度	(km/h) 0.00788
車間距離	(m) -0.0611
第1車線ダミー	3.13
第2車線ダミー	1.55
右車線変更ダミー	-3.23
左車線変更ダミー	-2.17
μ	1.00
$L(0)$	-244.43
$L(\theta)$	-153.20
尤度比	0.373

線変更ダミー、 $\theta_1 \sim \theta_6$ はパラメータである。

表1にパラメータ推定結果を示す。車間距離のパラメータの符号が負であるなどパラメータの符号や感度など、再検討が必要だが、発表時までには改良を重ねたい。

(4) モデルの再現例

図2は、車両ID12013と12016、22006の3台の車両の実績経路とモデルの推定経路（効用最大経路と次善経路）を示した図である。経路の選択確率に差が少ない場合、2つの経路を選択する可能性を考慮して、2番目に選択確率が高い経路を次善経路とした。

1番目の車両ID12003は再現性は極めて低いが、ID12016、22006は、概ね実績同様の車線走行を追従できており、さらに検討を進めていく価値はあると考えている。

4. まとめ

本研究では、車線変更モデルを構築するにあたり具備すべき要因を既存研究より整理し、これまで多くの車線変更モデルが提案がされているが、追越車線から走行車線へ復帰する挙動を表現した研究は少ない。追越車線利用偏重の原因を解明するためには、追越車線から走行車線への復帰挙動を把握することは必要不可欠である。また、時々刻々と変化する道路状況やドライバーの意志決定を考慮するために、RLモデルを適用し、車線選択モデルの可能性を示した。

本モデルでは、時々刻々と変化するLOSを反映して、各タイミング、各ノードのログサムを設定した。しかし、進行先の情報が不完全な中でドライバーが想定しうる将来効用（ログサム）の設定の仕方は検討の余地が多い。リンクの分割長を100mで設定したが、分割長を伸ばすと、集計化に伴って、実績値とは乖離した

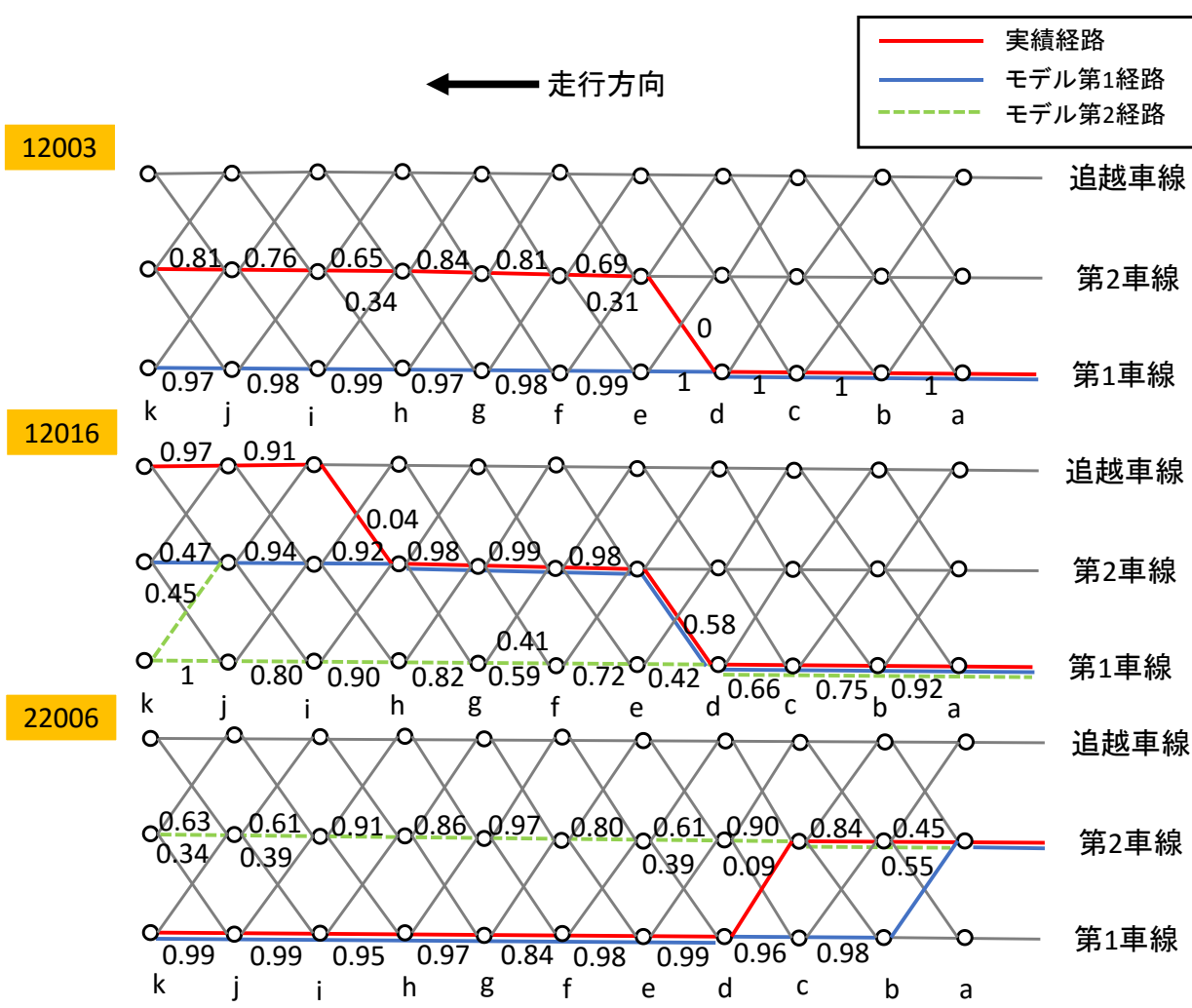


図2 モデルの再現例

LOSになる可能性があるため、適切な集計単位を検討することも必要である。なお、分割長を短くすることで、瞬間瞬間の影響は反映できるが、リンクのLOS情報の欠測が増える。なお、当然ではあるが、サンプル数及び適切な変数を増やすことで、モデルの精度を向上させて、RLモデルの妥当性を検証する必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたって、国土技術政策総合研究所の方々に貴重なデータをご提供して頂きました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 岩崎真純, 山口恭平, 野中康弘, 高速道路の追越車線利用偏重解明のための車線変更挙動の研究, 第71回年次学術講演会, IV-004, 2016
- 2) Mogens Fosgerau, Emma Frajinger, Anders Karlstorm : A link based network route choice model with unrestricted choice set, Transportation Research Part B, Vol.56, pp.70-80, 2013
- 3) 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に関する考察, 交通工学研究発表会論文報告集27, 129-132, 2007-

- 4) 柳原正実, 宇野伸宏, 嶋本寛, 塩見康博, ドライバー意図の遷移を考慮した統合型車両走行モデルの提案, 土木計画学研究講演集, 2011
- 5) 伊藤篤志, 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論文報告集, pp. 615-620, 2014
- 6) 庄司惟, 北澤俊彦, 柳沼秀樹, ドライバー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, 46-02
- 7) 西脇由博, 宮島千代美, 北岡教英, 武田一哉, 確率的手法を用いた車線変更軌跡のモデル化, 情報処理学会誌, Vol. 51, No. 1, 131-140, 2010
- 8) 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. 625/IV-44, 29-37, 1999. 7
- 9) 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, pp4, 2005
- 10) 柳原正実, 宇野伸宏, 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 no27 2010
- 11) 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, 65(2), 241-245, 2013
- 12) 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, 第1巻, 第4号, pp. A_24-pp. 30, 2015. 4
 - 13) 飯田克弘, 日暮智紀, 高橋秀喜, Jian Xing, 山下和彦, 高速道路の工事規制始端部における規制材配置と車両挙動との関連性分析, 土木計画学研究・論文集, Vol127, No5, pp. 983-990, 2010-9
 - 14) 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, 第50回土木計画学研究発表会・講演集, 2014
 - 15) 加納誠, 白石智良, 丸岡, ドライバー挙動モデルの開発, 第4回ITSシンポジウム, 2005, pp251-256, 2005
 - 16) 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
 - 17) 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, pp205-209, 2007
 - 18) 遠藤紀彬, 中山晶一朗, 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
 - 19) 佐佐木綱: 吸収マルコフ過程による交通量配分理論, 土木学会論文集第121号, 1965. 9