

# 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

伊藤 篤志<sup>1</sup>・柳沼 秀樹<sup>2</sup>・羽藤 英二<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: ito@trip.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: yaginuma@civil.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

近年、自動運転技術の開発競争が急速に進展しており、そう遠くない将来における実社会への導入・普及が予想される。そのため、多様なドライバー間に働く相互作用を加味した上で時々刻々と変化するドライバーの運転行動の記述は、道路ネットワークの運用上必須となる。本研究では、車線変更行動を対象に、周辺車両との相互作用を前提としたドライバーの動学的な意思決定モデルの定式化を試みた。加えて、パラメータの構造推定を適用した。阪神高速道路合流部における実データを適用した結果、静的なモデルでは従来明らかにされなかったバイアスが確認された。さらに、相互作用項の導入により、車線変更を意図する前方車両を拒むドライバーの存在が確認された。

**Key Words :** *traffic analysis, traffic planning, structural estimation, dynamic problem*

## 1. はじめに

近年、自動運転技術の実用化を目指した開発競争が目覚ましく、一部の機能については既に実車に実装されており、そう遠くない将来において実現することが予想される。自動運転技術の導入は、ドライバーの運転支援のみならず、社会的な交通問題である事故の減少や渋滞の解消に資する可能性が高い<sup>1)</sup>。自動運転制御の導入はヒューマンエラーを排除し、交通安全の確保を可能とする。自動運転技術の実社会への導入ならびに普及を見据え、手動・自動運転の車両が混在する交通流を想定すると、いま一度道路ネットワーク上におけるドライバーの運転行動について検討することが必須となる。

既往研究においては、運転時におけるドライバーの主な行動として、車両追従と車線変更の2つが分析対象となっている。車両追従行動は、その決定要因の数が限られるため、古くからモデリングが行われており、多くの研究が蓄積されている。一方、車線変更行動は、車線変更の必要性や実行可能性、他車両との車間距離、速度調整など多くの要素が含まれるため解析が困難であり、研究の遅れが指摘されている<sup>2)</sup>。周知の通り、車線変更行動は、周囲の交通環境に依存して意思決定が大きく変容

するものであり、他のドライバーから受ける影響によって行動要因が決定される。しかしながら、従来の車線変更モデルはドライバー個人の独立した意思決定として扱われており、他車両間で相互に及ぼし合う影響については考慮されない場合が多い。そのような中で、Hidas(2002, 2005)<sup>3)4)</sup>は、混雑した状況下での合流部の記録動画を用いて、車線変更を意図するドライバーとこれを受容するドライバー間の車線変更モードを独立的、強制的、協力的の3タイプに分類した。交通マイクロシミュレータARTEMISによる再現実験の結果、車線変更を企図する前方車両と車線変更先を走行する後方車両との間で速度の調整が行われることを明らかにしている。車線変更モードの分類という概念は、多くの研究で適用されているものの、その判別がシミュレータの性質に強く依存している。またKita et al. (2002)<sup>5)</sup>は、高速道路ランプ合流部での車線変更を対象に、合流車と本線後続車両の完全情報非ゼロ和協力2人ゲームとして定式化している。しかし、このモデルは合流時の速度調節を加味されておらず、記述能力に欠ける。従来の研究では、モデル化の対象となるデータの取得範囲が限定的であり、直近の車両挙動の影響とその変遷の表現が困難であった。これに対して、羽藤ら<sup>6)</sup>は画像データとプローブデータを用いて、まと

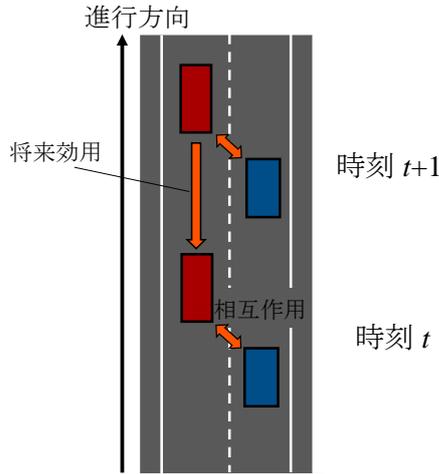


図-1 車線変更における動的な相互作用の概念図

まった長さの詳細な走行軌跡分析を行っている。

ところで、本来ドライバーは、時間遷移に伴って最適な環境を探しながら車線変更の実行に至ると考えられるが、時系列に沿った複雑な思考の表現の乏しさが指摘されている<sup>2)</sup>。Choudhury et al.(2010)<sup>7)</sup>は、Plan-Action の概念を念頭に一次隠れマルコフモデル(HMM)を用いて非観測なドライバーの意思(i.e., Latent plan)の時間遷移を明らかにしている。このようにドライバー相互に及ぼし合う影響や、ドライバーの意思の時間遷移を加味した意思決定に関する研究は非常に有意義な示唆を与えている。しかしこれらの研究には個人間や時系列に内生する要因が考慮されていないため、推定結果にバイアスが生じる可能性がある。

以上を踏まえ本研究では、車線変更に伴う周囲の車両との相互作用ならびにドライバーの動的な意思決定に着目し、これらを記述するモデルの定式化を試みる。具体的には、意思決定者の効用関数に他者の選択行動や将来の効用が内生する入れ子型のモデル構造を定式化する。阪神高速道路路口環状線合流部におけるビデオ撮影調査から取得された座標データを基に、車線変更を企図するドライバーと車線変更先の後方を走るドライバー間の相互作用、並びに将来効用による再帰的な作用を記述し、擬似最尤推定を行う。構造推定を援用した動的な意思決定構造をもつ車線変更相互作用モデルを構築し、従来の静的モデルとの比較によってその妥当性を検証する。

## 2. モデルのフレームワーク

本研究における、車線変更に伴う動的な相互作用の概念(図-1)に基づき、以下のような定式化を行う。

### (1) 社会的相互作用モデル

様々な社会的相互作用のうち、本研究では特定の個人

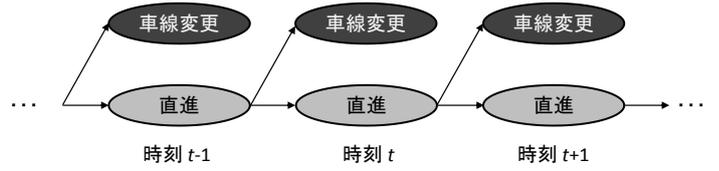


図-2 動的離散選択モデルにおける意思決定構造

間での影響を考慮したローカルインタラクションを想定する。個人  $i$  が特定の個人  $j$  から影響を受ける際の効用  $u_i$  を以下の式(1)で表す。

$$u_{i,t} = \alpha_i x_{i,t} + \gamma_j y_{j,t} + \varepsilon_i \quad (1)$$

ここで、 $x_{i,t}$  は時刻  $t$  における外生的な説明変数ベクトル、 $y_{j,t}$  は個人  $j$  が  $i$  に与える相互作用変数、 $\varepsilon_i$  は誤差項、 $\alpha_i$  ならびに  $\gamma_j$  は推定パラメータである、一般に  $y_j$  は内生変数であり、 $j$  の選択確率  $P_{ij}$  や効用の確定項  $u_{ij}$  などを代理変数として適用されている。

### (2) 動的離散選択モデル

#### a) 動的計画法に基づく動学モデルの定式化

本節では将来効用を考慮したモデルの定式化を行う。各個人  $i$  の意思決定ルールとして、時刻  $t$  における状態変数  $s_{i,t}$  を観測し、式(2)で表される現在割引将来機会効用を最大化する行動  $d_{i,t} \in D$  を選択すると仮定する。

$$E \left( \sum_{m=0}^{T-t} \beta^m u(d_{i,t+m}, s_{i,t+m} | d_{i,t}, s_{i,t}) \right) \quad (2)$$

ここで、 $\beta \in (0,1)$  は時間割引率、 $u(d_{i,t}, s_{i,t})$  は時刻  $t$  での効用を示す。これは個人ごとに動的計画問題 (DP 問題) になっており、 $v(s_{i,t})$  を価値関数とする Bellman 最適性原理<sup>8)</sup>により、式(3)のように再帰的な表現で記述できる。この式では将来の価値が入れ子の構造となって現在の価値関数に組み込まれている。

$$v(x_{j,t}) = \max_{d \in D} \left\{ u(a, s_{j,t}) + \beta \int v(s_{j,t+1}) dF(s_{j,t+1} | d, s_{j,t}) \right\} \quad (3)$$

各個人  $i$  の将来の状態変数は 1 次マルコフ過程で表現されると仮定し、マルコフ推移確率分布関数を  $F(s_{i,t+1} | d, s_{i,t})$  とする。

各時間帯の効用関数を  $u(d, s_{i,t})$ 、状態変数  $s_{i,t}$  のうち観測可能な変数を  $x_{i,t}$ 、観測不可能な変数を確率項  $\varepsilon_{i,t}$  とすると、価値関数  $v(d, s_{i,t})$  は式(4)となる。

$$v(d, x_{i,t}) = u(d, x_{i,t}) + \varepsilon_{i,t}(d) + \beta \sum_{x_{i,t+1}} \bar{v}(x_{i,t+1}) f_x(x_{i,t+1} | d, x_{i,t}) \quad (4)$$

ここで誤差項に i.i.d.ガンベル分布を仮定すると、行動  $d_{i,t}$  の選択確率は式(5)で記述できる。

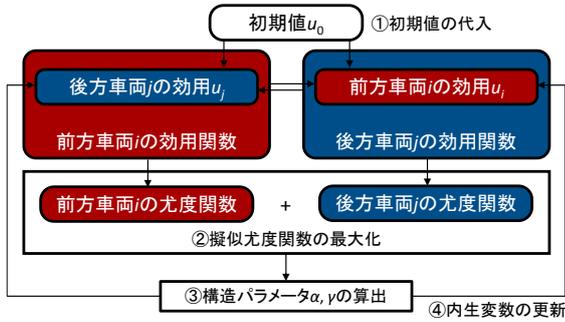


図-3 擬似最尤推定法の計算プロセス

$$P(d_{i,t} | x_{i,t}, \theta) = \frac{\exp(v(d_{i,t}, x_{i,t}))}{\sum_{d'} \exp(v(d'_{i,t}, x_{i,t}))} \quad (5)$$

### b) 意思決定構造と価値関数

価値関数  $v$  の設定にあたり、ドライバーが車線変更または直進を選択する際の意思決定構造(図-2)を次のように考える。個人  $i$  が時刻  $t$  で直進を選択する際には、次の時刻  $t+1$  での車線変更実施を想定した意思決定を行っているとする。これは、現時刻  $t$  での車線変更実施により得られる効用(価値関数)と現時刻  $t$  での直進と次時刻  $t+1$  での車線変更実施により得られる効用の和(価値関数)を比較し、効用を最大化する意思決定構造を仮定している。この仮定に基づき、価値関数  $v(d, x_{i,t})$  は式(6)で表される。

$$\begin{aligned} v_{LC}(d^{LC}, x_{i,t}) &= u_{LC}(d^{LC}, x_{i,t}) + \varepsilon_{i,t}(d^{LC}) \\ v_{ahead}(d^{ahead}, x_{i,t}) &= u_{ahead}(d^{ahead}, x_{i,t}) + \varepsilon_{i,t}(d^{ahead}) + \beta u_{LC}(d^{LC}, x_{i,t+1}) \end{aligned} \quad (6)$$

車線変更の価値関数  $v_{LC}(d^{LC}, x_{i,t})$  は車線変更実施で得られる効用を示す。すなわち、車線変更完了による効用である。

次時刻  $t+1$  での車線変更実施であっても車線変更完了による効用を得られる場合、すなわち、車線変更実施可能性が高いケースでは、時間割引率  $\beta$  は大きくなる。一方、次時刻  $t+1$  においては車線変更完了による効用を得にくい場合、すなわち、車線変更実施可能性が低いケースでは、時間割引率  $\beta$  は小さくなる。式(6)の  $\beta u_{LC}$  は次時刻  $t+1$  の車線変更完了による効用の期待値を示す。

## 3. 推定手法

構造推定アプローチは、各個人が特定の経済理論モデルの中で最適化行動を行うという仮定の下、その経済理論を特定化するパラメータの推定手法である。集団内の各個人間、あるいは同一個人の時系列の効用の間に入れ子の構造をもつモデルのパラメータを推定する際、特に効用を加法分離して逐一計算できる場合には、NFXP (Rust, 1987)<sup>9)</sup>などの手法を用いる。ここではNFXPから計算負荷の軽減を目的に発展した手法のうち、本研究において用

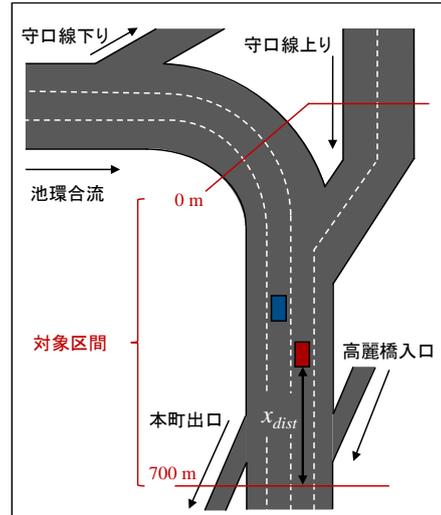


図-4 車両データ化区間

いた擬似最尤法<sup>10)</sup>について説明する。

擬似最尤法は、適切に与えられた内生変数の初期値をもとに算出される擬似尤度を最大化するようパラメータを求め、以降収束するまで内生変数と擬似尤度関数の更新を繰り返す計算手法である。以下に本研究における擬似最尤法の推定プロセス(図-3)を概説する。

- ① 意思決定者の効用関数に内生する他者の効用に初期値  $u_0$  を代入する
- ② プレイヤー  $i$  の効用関数に内生する他者  $j$  の効用に、分析者が任意に設定した初期値を代入することで算出されたプレイヤー  $i$  の尤度関数を擬似尤度と呼ぶ。プレイヤー  $j$  の場合も同様であり、両擬似尤度関数を足した全体擬似尤度関数を最大化する
- ③ 全体擬似尤度関数を最大化する構造パラメータ  $\alpha, \gamma$  を算出する
- ④ 推定されたパラメータ  $\alpha, \gamma$  を  $i, j$  の効用関数に代入し、内生変数を更新する  
以降、パラメータの変化値が  $10^4$  以下に収束するまで②～④を繰り返す。

## 4. データ概要

### (1) 使用データ概要

本研究では、阪神高速道路守口線環状線合流部において2006年1月12日に取得されたデータを用いた。データは守口線環状線分流部付近から高麗橋入口付近までの全長700mの区間(図-4)において、7台のカメラで取得された。混雑、非混雑各時間帯を対象に任意に抽出された連続した車両100台に対し、1秒毎にキロポストと車線番号を与えている。このうちこれから車線変更を行う車両のデータと、車線変更先後方に存在する車両のデータのみそ

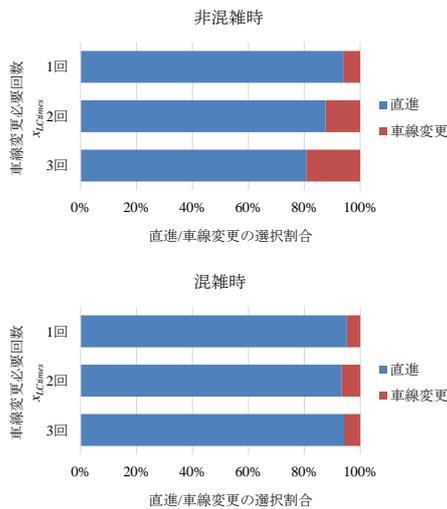


図-5 車線変更必要回数と直進/車線変更の割合

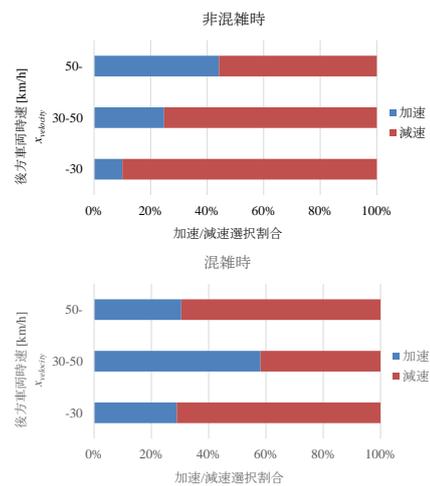


図-7 後方車両時速と加速/減速の選択割合

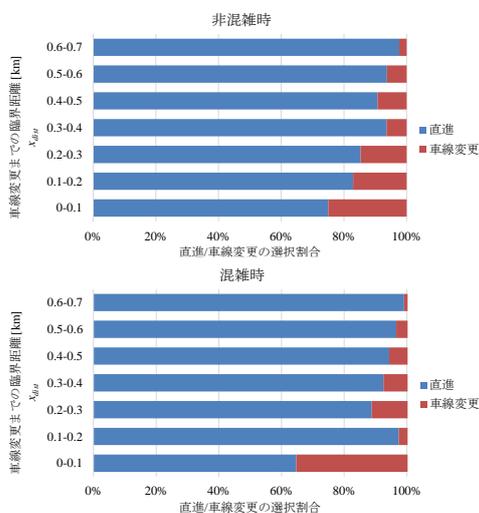


図-6 車線変更までの臨界距離と直進/車線変更の選択割合

れぞれ抽出した。

## (2) クロス集計

上記データを用いて車両挙動の行動特性を把握するため、その状況の推計を行う。特に車線変更とその受容の意思決定を行う車両や周囲の状況に着目し、再現性の高いモデルの構築を目指す。

### a) 車線変更車の意思決定 (直進・車線変更)

車線変更に際して、ドライバーの意思決定に関わる要素について考察する。図-5に、残りの車線変更必要回数に応じた直進と車線変更の選択割合を示す。ここで車線変更必要回数  $x_{LCimes}$  とは、車両が対象区間内で行う車線変更の回数に対して必要な残りの車線変更の回数と定義した。非混雑時においては、車線変更必要回数が多いほど車線変更を選択する傾向にある。これは車線変更を出来るだけ早く済ませてしまいたいという心理が反映されている

表-8 前方車両と後方車両の行動の組み合わせ件数

	加速	減速	計
車線変更	23	49	72
直進	464	821	1285
計	487	870	1357

と考えられる。一方で混雑時においては、周囲の車両の流れに対応しなくてはならないことから、車線変更を企図しても実行できない状況が読み取れる。また交通流の流れが全体として遅くなることから、必然的に直進を選択する割合が多くなるのがわかる。

図-6に車線変更臨界距離に応じた直進と車線変更の選択割合を示す。車線変更臨界距離  $x_{ldr}$  とは、対象区間終了地点までの残り距離と定義した。混雑時・非混雑時ともに、臨界距離が小さくなるほど車線変更の選択割合が大きくなるのがわかる。対象区間の終了地点が近づくほど車線変更を余儀なくされ、車線変更の選択割合が大きくなると考えられる。

### b) 後方車両の意思決定 (加速・減速)

車線変更先の後方を走る車両に関して、加速・減速の意思決定に関わる要素を検討する。図-7は、後方車両の時速に応じた加速と減速の選択割合の関係を示す。この図から、自身の速度が大きいほどその速度を維持したいというドライバーの心理を推察することができる。また、後方車両が加速する際には、後方車両の速度が車線変更車の速度より大きい割合が 69.2%であり、減速する際には 27.5%であった。このことから、後方車両の速度の方が大きい場合には、車線変更を受け入れる前に通過してしまおうという意志がはたらき、一方で比較的遅い場合には減速することで車線変更を受け入れる傾向にあるといえる。

表-9 推定結果

		混雑時 (N=1357)				非混雑時 (N=850)			
		相互作用項なし		相互作用項あり		相互作用項なし		相互作用項あり	
		時間割引率 $\beta = 0$							
		推定結果	t値	推定結果	t値	推定結果	t値	推定結果	t値
車線変更効用	車線変更必要回数	-0.231	-1.169	1.768	4.087**	0.470	2.380 *	0.789	3.305 **
	臨界距離[km]	-6.061	-8.924 **	-14.067	-5.970 **	-6.521	-8.998 **	-8.036	-8.060 **
	後方車両減速効用	-	-	1.756	2.781 **	-	-	1.453	2.213 *
加速効用	後方車両の方が速いダミー	0.065	0.467	0.625	3.552 **	-0.254	-1.520	-0.243	-1.433
減速効用	後方車両秒速[km/s]	35.261	5.055 **	-32.575	-3.133 **	7.238	0.958	-28.419	-2.407 *
	前方車両車線変更効用	-	-	-9.589	-7.799 **	-	-	-5.766	-3.938 **
初期尤度		-1881.201		-1881.201		-1178.350		-1178.350	
最終尤度		-563.910		-724.525		-500.640		-819.552	
自由度修正済尤度比		注) 0.698		0.334		注) 0.572		0.299	
注) 尤度関数を足さず、各モデルで独立に尤度を最大化させた									
		時間割引率 $\beta = 0.95$							
		推定結果	t値	推定結果	t値	推定結果	t値	推定結果	t値
車線変更効用	車線変更必要回数	0.017	0.005	-0.120	-0.031	8.886	2.511 *	7.620	2.031 *
	臨界距離[km]	-90.104	-9.848 **	-80.635	-6.464 **	-82.949	-9.806 **	-77.964	-8.129 **
	後方車両減速効用	-	-	-10.810	-1.089	-	-	-11.661	-1.085
加速効用	後方車両の方が速いダミー	0.065	0.469	0.047	0.329	-0.254	-1.520	-0.243	-1.434
減速効用	後方車両秒速[km/s]	35.282	5.058 **	-23.116	-2.301 *	7.250	0.959	-22.919	-2.127 *
	前方車両車線変更効用	-	-	-0.023	-8.092 **	-	-	-0.020	-3.942 **
初期尤度		-1881.201		-1881.201		-1178.350		-1178.350	
最終尤度		-1183.805		-1148.178		-826.300		-817.788	
自由度修正済尤度比		0.369		0.386		0.295		0.301	
		時間割引率 $\beta$ 推定							
		推定結果	t値	推定結果	t値	推定結果	t値	推定結果	t値
車線変更効用	車線変更必要回数	1.098	0.458	1.665	0.773	5.958	2.443 *	5.983	2.562 *
	臨界距離[km]	-66.309	-4.498 **	-65.570	-4.436 **	-54.332	-3.971 **	-50.504	-3.497 **
	後方車両減速効用	-	-	5.964	0.812	-	-	5.451	0.974
直進効用	時間割引率 $\beta$	0.918	41.207 **	0.901	25.537**	0.897	27.371 **	0.873	16.792 **
加速効用	後方車両の方が速いダミー	0.065	0.470	0.040	0.283	-0.255	-1.522	-0.242	-1.428
減速効用	後方車両秒速[km/s]	35.290	5.059 **	-21.274	-2.138 *	7.241	0.958	-19.597	-1.880
	前方車両車線変更効用	-	-	-0.030	-7.994 **	-	-	-0.030	-3.751 **
初期尤度		-1881.201		-1881.201		-1178.350		-1178.350	
最終尤度		-1181.845		-1147.537		-823.212		-815.703	
自由度修正済尤度比		0.369		0.386		0.297		0.302	

(\*5%有意, \*\*1%有意)

c) 車線変更車と後方車両の行動の組み合わせ  
 観測されたデータから、車線変更車の行動と後方車両の行動の組み合わせを考察する。表-8は、双方の意思決定の組み合わせ件数を示している。この表から、車線変更を行う際には後方の車両は進入を受容するために減速する割合が多いこと、そして車線変更車は後方の車両の減速を期待して車線変更を実行する可能性が示唆されている。従って、後方車両は前方の車両が車線変更を行うか否かを常に予測し、相互に接触する事態を避ける行動を選択するという仮説が立てられる。

### 5. 車線変更モデル・受容モデル

4章での集計結果を踏まえ、車線変更を企図する前方車両のドライバー、及びその変更先車線後方を走行する

ドライバーのモデルを構築する。

#### (1) 車線変更モデル

表-8より、車線変更を企図するドライバー*i*は後方車両のドライバー*j*が減速する機会を伺っていると仮定できる。そこで車線変更の効用に、後方車両が減速する効用を内生変数として組み込む。Iが時刻*t*において車線変更(LC)、直進(ahead)のそれぞれを選択した際に得られる効用の確定項を式(7)に示す。

$$\begin{aligned}
 u_{LC}^{i,t} &= \alpha_{LCtimes} \times x_{LCtimes}^{i,t} + \alpha_{dist} \times x_{dist}^{i,t} + \gamma_{dec} \times u_{dec}^{j,t} \\
 u_{ahead}^{i,t} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

ここで、パラメータベクトル  $\alpha$  及び外生的な説明変数  $x$  によって定まる値を独立効用項、パラメータ  $\gamma$  及び後方車両*j*が減速する効用  $u_{dec}^j$  によって定まる値を相互作用

表-10 選択確率の集計結果

モデルの種類	混雑時	非混雑時
観測データ	5.3 %	8.8 %
静学的 ( $\beta=0$ ) 相互作用なし	6.4 %	3.6 %
動学的 ( $\beta=0.95$ ) 相互作用あり	5.4 %	4.3 %

項とする。推定するパラメータは  $\alpha_{LCinnes}$ ,  $\alpha_{dis}$ ,  $\gamma_{dec}$  である。

## (2) 車線変更受容モデル

表-8 から、車線変更を受容するドライバーは接触を避けるため減速すると仮定できる。そこで減速の効用に、前方車両が車線変更する効用を内生変数として組み込む。  $j$  が時刻  $t$  において加速( $acc$ ), 減速( $dec$ )のそれぞれを選択した際に得られる効用の確定項を式(8)に示す。

$$\begin{aligned} u_{acc}^{j,t} &= \alpha_{faster} \times \delta_{faster}^{j,t} \\ u_{dec}^{j,t} &= \alpha_{velocity} \times x_{velocity}^{j,t} + \gamma_{LC} \times u_{LC}^{i,t} \end{aligned} \quad (8)$$

車線変更モデルと同様に、 $\alpha$  及び  $x$  によって定まる値を独立効用項、 $\gamma$  及び前方車両  $i$  が車線変更する効用  $u_{LC}^{i,t}$  によって定まる値を相互作用項とする。推定するパラメータは  $\alpha_{faster}$ ,  $\alpha_{velocity}$ ,  $\gamma_{LC}$  である。

## 6. 推定結果

相互作用項、時間割引率  $\beta$  それぞれの有無の組み合わせを変えながらモデルのパラメータを推定した。表-9 は混雑、非混雑の状況下における推定結果である。以下に、前方車両の車線変更モデル、後方車両の車線変更受容モデル、ならびにモデル全体の尤度比の変化について考察する。

### (1) 車線変更モデル (前方車両)

車線変更必要回数パラメータ  $\alpha_{LCinnes}$  は全体として正の値である。また非混雑時には有意である一方、混雑時には有意ではない。これは4章で述べたように、非混雑時には企図された車線変更の実行が容易であるのに対し、混雑時には困難であることが反映されているといえる。車線変更までの臨界距離パラメータ  $\alpha_{dis}$  は全て負の値であり、車線変更が迫られるほどその効用が増大するという仮説に一致する。混雑、非混雑状況下とともに時間割引率( $\beta = 0.95$ )を導入することで  $t$  値が改善されている。動学的な意思決定を加味したことで、静的なモデルでは従来明らかにされなかった車線変更までの臨界距離に対するバイアスが検証されたといえる。後方車両減速効用パラメータ  $\gamma_{dec}$  に関して、静的なモデルでは混雑状況を問わず有意であるものの、将来効用を加味すると有意ではなくなる。一方で時間割引率  $\beta$  を推定した場合、混雑、非混雑双方にお

いてそのパラメータ値が減少している。このことから、他者との相互作用を加味すると、将来的な自身の効用に対する関心がやや薄れることが示唆される。

### (2) 車線変更受容モデル (後方車両)

後方車両の方が速い場合のダミー変数パラメータ  $\alpha_{faster}$  は、ほとんどの場合で有意ではないものの、一貫して混雑時には正の値、非混雑時には負の値を示している。このことから、混雑時においては後方車両の方が速い場合には車線変更を受容せずに加速する意思がはたらき、一方で非混雑時においては車線変更を企図する前方車両に対し、受容しようとする意思が汲み取れる。また速度パラメータ  $\alpha_{velocity}$  は、相互作用項なしの場合には正であるが、相互作用を加味すると負の値となる。この傾向は4章図-7の結果と一致し、相互作用項の導入によって実際のドライバーの行動選択の再現性が増したといえる。前方車両車線変更効用パラメータ  $\gamma_{LC}$  は一貫して負の値であり、全て有意であった。前方車両の車線変更に応じて減速する、とする仮説とは反する結果となり、後方車両のドライバーは前方車両の車線変更の受容を拒む心理が読み取れる。これは時間的な条件や地域性、あるいはドライバーの性格なども作用すると考えられ、更なる検証の余地があるといえる。

### (3) モデル全体の尤度比と選択確率の集計

全体的に、相互作用項ならびに時間割引率の導入に伴って尤度比は微増している。動学的な意思決定を導入したことで、モデルの再現性が改善されたといえる。また混雑時と非混雑時を比較すると、全体として混雑時の方が高い尤度比が算出された。

また、これらのモデルを用いた選択確率の集計結果を表-10に示す。混雑時には将来効用や相互作用を加味しない場合、観測データから1ポイントほどの差を生じた。一方でこれらを加味した場合、選択割合はほぼ観測データと整合する値となった。また非混雑時には将来効用や相互作用を考慮することで選択割合に若干の改善が見られるものの、混雑時に比べてその再現性は劣る。尤度比や選択確率の集計結果から、本研究で提唱された相互作用ならびに動学的な意思決定を考慮した車線変更モデルによって、特にこれらの要因が大きく作用すると考えられる混雑時において、その再現性が改善されたといえる。

## 7. まとめ

本研究では車線変更に伴う周囲の車両との相互作用ならびにドライバーの動学的な意思決定に着目し、これらを記述したモデルの定式化を行った。またこのモデルを用いて、高速道路上合流部のビデオ調査から抽出された

車両の挙動データを基に車線変更とこれを受容する車両の動きに関して、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、意思決定問題の分析を行った。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、前方の車両の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。本研究で提唱されたモデルを用いた車線変更の選択確率の集計結果から、特に混雑した交通流での再現性の増加を確認した。車両の自動運転技術の導入に向けた交通流の把握に際し、有用な知見が得られたといえよう。シミュレータへの実装を想定すると、繰り返し計算による負荷の大きさが課題となるため、構造推定を伴う計算の高速化が求められる。

#### 参考文献

- 1) 津川定之: 自動運転システムの展望, *IATSS Review*, Vol.37, No.3, 2012.
- 2) Zheng, Z.: Recent developments and research needs in modeling lane changing, *Transportation Research Part B*, **60**, 2014.
- 3) Peter Hidas: Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation, *Transportation Research Part C*, **10**, pp.351-371, 2002.
- 4) Peter Hidas: Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving, *Transportation Research Part C*, **13**, pp.37-62, 2005.
- 5) Kita H, Tanimoto K, Fukuyama K.: A game theoretical analysis of merging-giveway interaction: a joint estimation model, *Transportation and traffic theory*, **15**, pp.503-518, 2002.
- 6) 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性に関する考察, 第27回交通工学研究発表会論文報告集, pp.101-104, 2007.
- 7) Charisma F. Choudhury, Moshe Ben-Akiva, Maya Abou-Zeid: Dynamic Latent Plan Models, *Journal of Choice Modelling*, **3** (2), pp.50-70, 2010.
- 8) Bellman, R.: Dynamic Programming, *Princeton University Press*, Princeton, 1957.
- 9) John Rust: Optimal replacement of GMC Bus Engines: An empirical model of Harold Zurcher, *Econometrica*, Vol.55, No. 5, pp.999-1033, 1987.
- 10) Victor Aguirregabiria and Pedro Mira: Swapping the nested fixed point algorithm: a class of estimators for discrete markov decision models, *Econometrica*, Vol.70, No.4, pp.1519-1543, 2002.

## Structural estimation of the dynamic interaction lane changing model

Atsushi ITO, Hideki YAGINUMA and Eiji HATO