

神戸大学工学部 学生員 ○山科 卓摩  
 神戸大学大学院 正会員 瀬谷 創  
 神戸大学大学院 正会員 喜多 秀行

1. はじめに

ITS や自動運転技術の進展が著しく、道路ネットワークの政策や運用ルールを評価・検討する必要が一段と強まっている。ITS の政策評価には交通行動の記述が欠かせないが、とりわけ車線変更挙動モデルについては1980年代から研究が進んでおり、ゲーム理論を用いることでドライバー間の相互作用を表現したモデルが開発されている<sup>1)</sup>。しかし、既存の研究は直面するギャップのみへの流入選択に留まっており、複数のギャップへの流入可能性を比較している現実の車線変更挙動は記述できていない。

本研究では、高速道路合流部における運転挙動を対象に、複数ギャップを考慮するモデルへと拡張し、ドライバーの車線変更挙動への理解を深める。

2. モデル

(1) モデルの枠組み

合流車の速度が本線走行車の速度よりも小さい「低速合流」を分析対象とする。加速車線と走行車線、追越車線の3つの車線から構成される高速道路合流部における6台の車両に着目し、図1のように車両番号を付す。

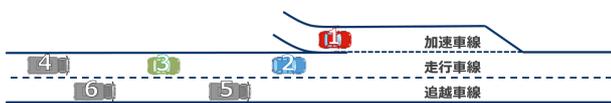


図1: 合流部の構成

本研究では複数ギャップを考慮したモデルを構築するため、二段階のゲームを想定する。まず、図2の赤枠の車両を対象に車両1と車両2で一段階目のゲームを行う。

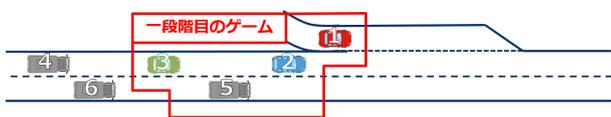


図2: 一段階目のゲーム

ここで、車両1が車両2を見送ると、低速合流と仮定しているため、図3のように移り変わり、次に緑枠の車両を対象に車両1と車両3で二段階目のゲームを行うとする。



図3: 二段階目のゲーム

モデルのフローチャートを図4に示す。利得はパラメータ、交通特性、誤差項の3つの要素より構成される。本研究では純粋戦略下・混合戦略下の両方の戦略下においてパラメータ推定を行うが、どちらも利得から結果の生起確率を導出し、対数尤度関数を算出する。そして、対数尤度関数を最大化することで最尤推定値を導出する。

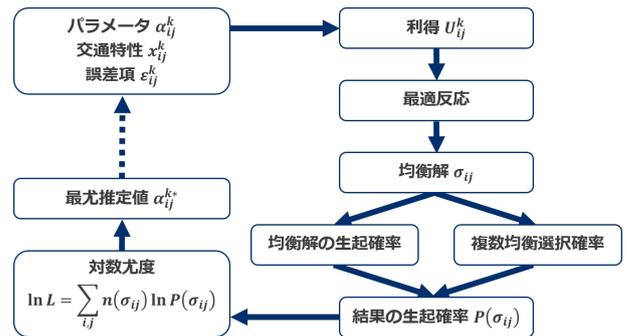


図4: モデルのフローチャート

(2) 利得関数の定式化

プレイヤー1の行動を「合流する」( $A_1^1$ )、「合流しない」( $A_2^1$ )、プレイヤー2 (プレイヤー3) の行動を「避走する」( $A_1^2(A_3^1)$ )、「避走しない」( $A_2^2(A_3^2)$ )とする。ゲームの結果が  $A_i^k \times A_j^l$  のときのプレイヤー  $k$  の利得関数を  $U_{ij}^k$  とする。利得関数  $U$  は、パラメータ  $\alpha$  と交通特性  $x$ 、誤差項  $\epsilon$  を用いて式1のようになる。

$$U_{ij}^k = \alpha_{ij}^k x_{ij}^k + \epsilon \quad (1)$$

交通特性にはTTCを用いる。TTCは後方車両との距離を相対速度で除すことで算出される衝突までの余裕時間であり、例えばプレイヤー  $k$  とプレイヤー  $l$  のTTC( $TTC_{kl}$ )は式2で与えられる。ここでは、基準時刻からの経過時間を  $t$ 、基準時刻におけるそれぞれのプレイヤーの速度を  $v_k, v_l$ 、プレイヤー間の距離を  $y_{kl}$  としている。

$$TTC_{kl} = \frac{v_k t - v_l t + y_{kl}}{v_l - v_k} \quad (2)$$

以後、一段階目のゲームをGame1、二段階目のゲームをGame2とする。また、既存のモデル<sup>2)</sup>をGame0とする。Game0は一段階目におけるプレイヤー1とプレイヤー2のゲームだが、本研究のモデルと異なりTTCのみを説明変数として表現されている。それぞれのゲームの利得行列は以下のとおりである。

表 1: Game0 の利得行列

$P_1 \setminus P_2$	$A_1^2$ (避走する)	$A_2^2$ (避走しない)
$A_1^1$ (合流する)	$(U_{11}^{1'}, U_{11}^{2'})$	$(U_{12}^{1'}, U_{12}^{2'})$
$A_2^1$ (合流しない)	$(U_{21}^{1'}, U_{21}^{2'})$	$(U_{22}^{1'}, U_{22}^{2'})$

表 2: Game1 の利得行列

$P_1 \setminus P_2$	$A_1^2$ (避走する)	$A_2^2$ (避走しない)
$A_1^1$ (合流する)	$(U_{11}^1, U_{11}^2)$	$(U_{12}^1, U_{12}^2)$
$A_2^1$ (合流しない)	$(U_{21}^1, U_{21}^2)$	$(U_{22}^1, U_{22}^2)$

表 3: Game2 の利得行列

$P_1 \setminus P_3$	$A_1^3$ (避走する)	$A_2^3$ (避走しない)
$A_1^1$ (合流する)	$(U_{11}^1, U_{11}^3)$	$(U_{12}^1, U_{12}^3)$
$A_2^1$ (合流しない)	$(U_{21}^1, U_{21}^3)$	$(U_{22}^1, U_{22}^3)$

ただし, Game1 においてプレイヤー 1 が  $A_2^1$  を選択する場合, Game2 の期待利得を説明変数とする. Game2 における結果  $A_i^1 \times A_j^3$  を  $\sigma_{ij}$  とし,  $\sigma_{ij}$  となる確率を  $P(\sigma_{ij})$  とすると利得関数  $U_{21}^1(U_{22}^1)$  は式 3 のようになる.

$$U_{21}^1(U_{22}^1) = \sum P(\sigma_{ij})U_{ij}^1 + \epsilon \quad (3)$$

以上を整理すると, 表 4 のようになる. 本研究では Game0 と Game1 の現象説明力(尤度比  $\rho^2$ )を比較する.

表 4: モデルの整理

	Game0	Game1	Game2
対象の段階	一段階目	一段階目	二段階目
対象のプレイヤー	プレイヤー1とプレイヤー2	プレイヤー1とプレイヤー2	プレイヤー1とプレイヤー3
説明変数	TTC	TTC+期待利得	TTC
パラメータの個数	7つ	5つ	7つ

### 3. 事例分析

#### (1) シミュレーションの条件設定

モデルの現象説明力を検証するため, ミクロ交通流シミュレータ Vissim を使用してデータを収集し分析を行う. 図 5 に示す 4 つのリンクを接続して, 合流部を構成する.

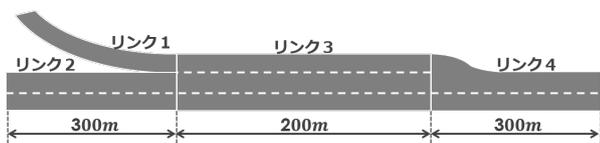


図 5: 仮想合流部の構成

リンク 1 の交通量を 1000(台/時), リンク 2 の交通量を 3000(台/時)に設定する. 低速合流を表現するため, 車線ごとの希望走行速度を加速車線 60km/時, 走行車線 80km/時, 追越車線 100km/時に設定する. シミュレーション時間長を 3600 秒とし, シミュレーションを行う.

#### (2) 分析結果

純粋戦略下のモデルによる分析結果を表 5 に示す. Game0 より Game1 の尤度比の方が高く, 本研究のモデルの方が既存モデル<sup>2)</sup>より現象説明力が高いと言える.

表 6 に混合戦略下のモデルによる分析結果を示す. 尤度比は Game0 より Game1 のほうが高く, 提案したモデルの現象説明力が高いことを示している. 尤度比が純粋戦略に比べ低くなっているのは, 混合戦略の方が推定手法が複雑で多段階の確率演算を含む収束計算を行っているため, 推定誤差が累積している可能性が考えられる.

表 5: 純粋戦略下における分析結果

	Game0		Game1		Game2			
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値		
$U_{11}^{1'}$	0.0162	1.868	$U_{11}^1$	0.2008	28.029	$U_{11}^{1'}$	0.0043	0.490
$U_{21}^{1'}$	0.0876	3.700	$U_{12}^1$	0.8415	24.546	$U_{21}^{1'}$	-0.0078	-0.206
$U_{12}^{1'}$	0.9492	10.685	$U_{21}^1$	0.0003	0.678	$U_{12}^{1'}$	0.2282	2.029
$U_{22}^{1'}$	0.3007	9.728	$U_{22}^1$	0.0006	1.394	$U_{22}^{1'}$	-0.0543	-0.707
$U_{11}^{2'}$	0.0002	0.650	$U_{12}^2$	0.3432	11.100	$U_{11}^{2'}$	-0.0026	-0.974
$U_{21}^{2'}$	0.0006	1.416				$U_{21}^{2'}$	0.0016	0.587
$U_{22}^{2'}$	0.3586	10.708				$U_{12}^{2'}$	0.1852	6.737
対数尤度 $\ln L_0$	-981.8		対数尤度 $\ln L_0$	-2072.3		対数尤度 $\ln L_0$	-337.4	
対数尤度 $\ln L^*$	-476.2		対数尤度 $\ln L^*$	-888.0		対数尤度 $\ln L^*$	-183.3	
尤度比 $\rho^2$	0.515		尤度比 $\rho^2$	0.5715		尤度比 $\rho^2$	0.4567	

表 6: 混合戦略下における分析結果

	Game0		Game1		Game2			
	推定値	t 値	推定値	t 値	推定値	t 値		
$U_{11}^{1'}$	-0.1454	NaN	$U_{11}^1$	-0.2321	-2.590	$U_{11}^{1'}$	0.0693	4.877
$U_{21}^{1'}$	0.0738	NaN	$U_{12}^1$	-26.1537	NaN	$U_{21}^{1'}$	-0.1537	-2.826
$U_{12}^{1'}$	0.0046	NaN	$U_{21}^1$	-30.0718	-2241.0	$U_{12}^{1'}$	-0.0609	-39.005
$U_{22}^{1'}$	0.0345	NaN	$U_{22}^1$	-30.2035	-868.22	$U_{22}^{1'}$	-0.3962	-251.19
$U_{11}^{2'}$	-0.2084	-3.701	$U_{12}^2$	-0.4395	-10.765	$U_{11}^{2'}$	-0.8706	NaN
$U_{21}^{2'}$	0.0006	0.923				$U_{21}^{2'}$	0.0006	4.394
$U_{22}^{2'}$	0.1153	2.265				$U_{12}^{2'}$	0.1568	323.71
対数尤度 $\ln L_0$	-895.5		対数尤度 $\ln L_0$	-895.5		対数尤度 $\ln L_0$	-307.8	
対数尤度 $\ln L^*$	-781.5		対数尤度 $\ln L^*$	-705.0		対数尤度 $\ln L^*$	-247.1	
尤度比 $\rho^2$	0.1274		尤度比 $\rho^2$	0.2128		尤度比 $\rho^2$	0.197	

### 4. 結論

本研究では, 高速道路合流部における合流挙動を複数ギャップを考慮した二段階のゲームとして記述した. また, シミュレーションデータを用いた純粋戦略下・混合戦略下それぞれの分析結果で提案したモデルが既存モデルより現象説明力が高いことを示した. しかし, パラメータの数が多いこともあり, 課題として t 値が安定しないことが挙げられ, 分析プログラムの改善が必要がある. また, 本研究のモデルでは混雑状態を考慮していないほか, 速度を全車一定とするなど, 簡略化のための仮定も少なからず残されている. 今後これらの諸仮定を緩め, 実証分析を重ねることにより, さらに現実的なモデルへと改良したい.

#### 参考文献

[1] A. Talebpour, H. S. Mahmassani and S. H. Hamdar: Modeling lane-changing behavior in a connected environment: A game theory approach, Transportation Research Part C-Emerging Technologies, 59, 216-232, 2015.

[2] H. Kita, K. Tanimoto, K and Fukuyama: A game theoretic analysis of merging-giveway interaction: A joint estimation model, in Talor, M. (ed.): Transportation and Traffic Theory in the 21st Century, 503-518, Pergamon, 2002.