

# 複数ギャップを考慮した高速道路における 流入・避走挙動に関するゲーム論的分析

山科 卓摩<sup>1</sup>・瀬谷 創<sup>2</sup>・喜多 秀行<sup>3</sup>

<sup>1</sup>学生会員 神戸大学工学部市民工学科 (〒 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1) E-mail:1414260t@stu.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (同上) E-mail:hseya@people.kobe-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (同上) E-mail:kita@crystal.kobe-u.ac.jp

車線変更挙動はドライバー間の相互依存行動であるため、ゲーム理論に基づくモデル化が有用である。しかし、既往モデルは直面するギャップのみを対象とし、後続のギャップと比較して選択するという行動を考慮できない。そこで本研究では、複数ギャップの選択を二段階のゲームとして記述することによりモデル化し、シミュレーションデータを用いた分析により、提案モデルが既往モデルより高い現象説明力を有することを確認した。

**Key Words** : multiple gaps, on-ramps, merging-yielding behavior, interdependence, game theory

## 1. はじめに

交通渋滞と交通事故の解消に向けて、ITS や自動運転技術の進展が著しく、道路ネットワークの性能や施策の効果を評価・検討する必要が一段と強まっている。ITS 技術の評価にはそこでの交通行動に対する理解が欠かせないが、とりわけ車線変更挙動については 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依存行動を表現したモデルが開発されている<sup>9)~14)</sup>。

車線変更挙動モデルに関する研究の蓄積は Zheng<sup>1)</sup>、岩崎・野中<sup>2)</sup> によって整理されている。Gipps<sup>3)</sup> は、ドライバーが「希望速度を維持できているか」「意図した車線を走行できているか」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 を構築している。その後、車線変更挙動をギャップ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。

高速道路の流入部における Gap Acceptance Model に関しては、多くの研究がなされている。喜多・畠中<sup>4)</sup> は、流入挙動が無信号交差点におけるギャップアクセプタンス挙動と共通していることに着目し、ドライバーの「ギャップに流入する」「ギャップを見送る」という 2 つの行動の選択を離散選択モデル (二項ロジットモデル) で記述した。次いで、喜多・久保蘭<sup>5)</sup> は加速車線上における流入車の存在確率と TTC (Time of Collision) 分布の算定式を提案することにより、加速車線長決定問題への応用の可能性を論じた。その後、喜多・平井<sup>6)</sup> は、流入車の加速挙動を新たにモデルに組

み入れるなどの改良を加え、高速道路流入部における流入挙動が概ね良好に記述されるようになった。さらに、喜多・原田<sup>7)</sup> は、流入車の速度調整行動を考慮できる形へ拡張することで、複数のギャップを考慮して流入行動を選択するモデルに改良した。Ahmed et al.<sup>8)</sup> 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) に区別し、3 つのステップで車線変更挙動をモデル化した。

相互依存行動に着目したモデルに関しても、多くの研究がなされている。喜多・久保蘭<sup>9)</sup> は、交通現象の生成主体である流入車と本線車のドライバーの意思決定に着目し、ゲーム理論を用いて高速道路流入部でのドライバーの挙動モデルを構築している。Kita<sup>10)</sup> は、同様のアプローチの下で解析的に求めた流入・避走行動に関する複数均衡解における実現解の判定など、均衡解の解釈に関するさらに詳細な考慮を行った。Kita and Fukuyama<sup>11)</sup> は、Kita<sup>10)</sup> の流入・避走モデルの利得を走行環境 (TTC) で特定化し流入部全域にわたって繰り返されるゲームに拡張した。ここでは、各時点・各走行環境での流入・避走現象を説明するモデルを構築し、観測データを用いてモデルの妥当性を示している。喜多ら<sup>12)</sup> は、交通条件が生起する確率を車頭間隔分布から導出し、ゲーム理論を援用して特定の位置関係にある車両のミクロな流入・避走挙動をマクロな交通特性へと関連付けることにより、流入部での相互依存行動を考慮した交通特性を推定するモデルを構築し、交通条件の変化が交通流に及ぼす影響を数値的に求めている。さらに、Kita et al.<sup>13)</sup> は、複数均衡選択確率

をパラメータとして最尤推定することで複数均衡を考慮したモデルを構築した。Talebpour et al.<sup>14)</sup> は本線車の車線変更挙動を MLC と DLC の 2 つのタイプに区別し、流入車のドライバーはゲームの相手がどちらのタイプなのかを識別できない状況をそれぞれ完備情報下と不完備情報下のゲームで記述し分析を行った。

しかし、既往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。流入行動モデルについては、喜多・原田<sup>7)</sup> が複数ギャップへの選択行動を扱っているが、流入車と本線車との間の相互依存関係は考慮されていない。これは、ゲーム理論の利得関数を推定するプロセスの複雑さと複数均衡下における均衡解選択の扱いが困難であったためと推察される。そこで本研究では、相前後に走行する複数の本線車とのゲームを二段階のゲームとして記述し、ロジットモデルを用いた複数均衡選択確率の導出を行うことで、複数ギャップを考慮しうるモデルへと拡張する。

## 2. モデル

### (1) モデルの枠組み

モデル化に際しては、ドライバーがどの範囲の車両の動きを気にして運転行動を選択するかが重要な要素となる。本研究では、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。また、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流入部を対象区間とし、6 台の車両に着目し、図-1 のように車両番号を付す。

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 の枠内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。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、次に図-3 の枠内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。

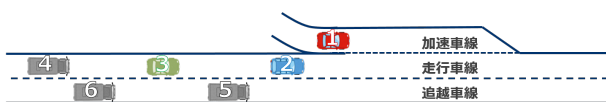


図-1 流入部の構成

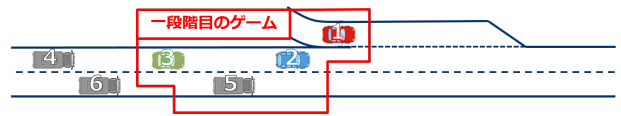


図-2 一段階目のゲーム

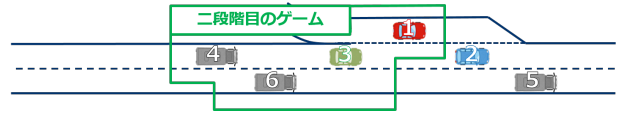


図-3 二段階目のゲーム

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。利得に関しては、2.(2) 節で取り上げる。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。

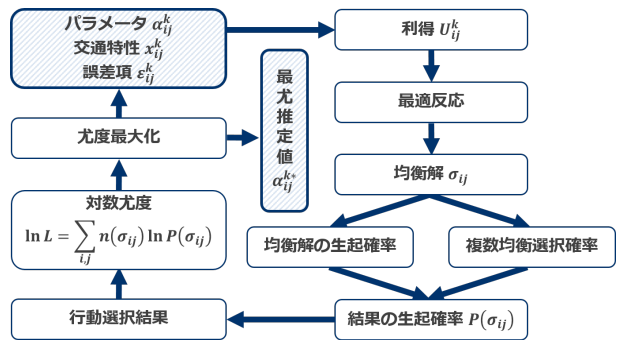


図-4 モデルのフローチャート

### (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 は相前後する 2 台の車両の車間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表した一種の危険度指標であり、例えばプレイヤー  $k$  とプレイヤー  $l$  の TTC ( $\tau_{kl}$ ) 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。危険指

標としては PICUD もあるが、本研究では既往研究に従って TTC を用いることとする。

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

以後、一段階目のゲームを Game-1、二段階目のゲームを Game-2 とする。また、既往のモデル<sup>13)</sup>を Game-0 とする。Game-0 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 Game-0 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 Game-1 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 Game-2 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、Game-1 においてプレイヤー 1 が  $A_2^1$  を選択する場合、Game-2 の期待利得を説明変数とする。Game-2 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 Game-0 と Game-1 の現象説明力（尤度比  $\rho^2$ ）を比較する。

表-4 モデルの整理

	Game-0	Game-1	Game-2
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

交通特性変数を図-5 のように設定する。プレイヤー 1 が本線の状況を確認できる地点をゲーム開始地点とする。距離  $y_k(m)$  は、プレイヤー 1 がゲーム開始地点を通過した瞬間のプレイヤー 1 とプレイヤー  $k$  との距離である。 $X(m)$  は加速車線長である。また、プレイヤー 1 がゲーム開始地点を通過した瞬間のプレイヤー  $k$  の速度を  $v_k(m/s)$  とする。 $t_1$  はプレイヤー 1 がゲーム開始地点を通過してから一段階目のゲームをするまでの時間である。本研究ではゲーム開始地点にて一段階目のゲームをするとし、 $t_1 = 0$  とする。 $t_2$  はプレイヤー 1 がゲーム開始地点を通過してから二段階目のゲームをするまでの時間である。本研究ではプレイヤー 1 とプレイヤー 2 との距離が 0 になったとき二段階目のゲームをするとし、 $t_2 = \frac{y_2}{v_2 - v_1}$  とする。

それぞれのゲームにおけるプレイヤーごとの利得関数は表-5～表-10 のようになる。

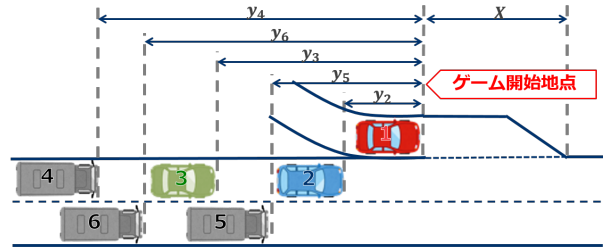


図-5 交通特性変数

表-5 Game-0 におけるプレイヤー 1 の利得行列

$P_1 \setminus P_2$	$A_1^2$	$A_2^2$
$A_1^1$	$\gamma_{11}^1 \tau_{14} + \epsilon_{11}^{1''}$	$\gamma_{12}^1 \tau_{13} + \epsilon_{12}^{1''}$
$A_2^1$	$\gamma_{21}^1 \frac{X - v_1 t_2}{v_1} + \epsilon_{21}^{1''}$	$\gamma_{22}^1 \frac{X - v_1 t_2}{v_1} + \epsilon_{22}^{1''}$

表-6 Game-0 におけるプレイヤー 2 の利得行列

$P_1 \setminus P_2$	$A_1^2$	$A_2^2$
$A_1^1$	$\gamma_{11}^2 \tau_{25} + \epsilon_{11}^{2''}$	$\gamma_{12}^2 \tau_{12} + \epsilon_{12}^{2''}$
$A_2^1$	$\gamma_{21}^2 \tau_{25} + \epsilon_{21}^{2''}$	0

表-7 Game-1 におけるプレイヤー 1 の利得行列

$P_1 \setminus P_2$	$A_1^2$	$A_2^2$
$A_1^1$	$\alpha_{11}^1 \tau_{13} + \epsilon_{11}^1$	$\alpha_{12}^1 \tau_{12} + \epsilon_{12}^1$
$A_2^1$	$\sum P(\sigma_{ij})U_{ij}^{1'} + \epsilon_{21}^1$	$\sum P(\sigma_{ij})U_{ij}^{1'} + \epsilon_{21}^1$

表-8 Game-1 におけるプレイヤー 2 の利得行列

$P_1 \setminus P_2$	$A_1^2$	$A_2^2$
$A_1^1$	$\alpha_{11}^2 \tau_{25} + \epsilon_{11}^2$	$\alpha_{12}^2 \tau_{12} + \epsilon_{12}^2$
$A_2^1$	$\alpha_{21}^2 \tau_{25} + \epsilon_{21}^2$	0

表-9 Game-2 におけるプレイヤー 1 の利得行列

$P_1 \setminus P_3$	$A_1^3$	$A_2^3$
$A_1^1$	$\beta_{11}^1 \tau_{14} + \epsilon_{11}^1$	$\beta_{12}^1 \tau_{13} + \epsilon_{12}^1$
$A_2^1$	$\beta_{21}^1 \frac{X - v_1 t_2}{v_1} + \epsilon_{21}^1$	$\beta_{22}^1 \frac{X - v_1 t_2}{v_1} + \epsilon_{22}^1$

表-10 Game-2 におけるプレイヤー 3 の利得行列

$P_1 \setminus P_3$	$A_1^3$	$A_2^3$
$A_1^1$	$\beta_{11}^3 \tau_{36} + \epsilon_{11}^3$	$\beta_{12}^3 \tau_{13} + \epsilon_{12}^3$
$A_2^1$	$\beta_{21}^3 \tau_{36} + \epsilon_{21}^3$	0

### 3. モデルの特定化

本章では、Game-1 を対象として純粋戦略での利得関数の推定手法を論述する。推定手法は、喜多ら<sup>15)</sup>の手法を基礎とし、これを二段階のゲームに組み込むことにより構築する。

#### (1) 利得と最適反応の関係

プレイヤー 1, 2 の最適反応はそれぞれ式 (4) と式 (5) で定義される。最適反応とは、相手プレイヤーの戦略を所与としたときに自らの利得が最大となる行動である。戦略  $A_i^1$  が戦略  $A_j^2$  に対する最適反応である、戦略  $A_j^2$  が戦略  $A_i^1$  に対する最適反応であるとは、式 (4) と式 (5) がそれぞれ成立することを示す。

$$U_{ij}^1 = \max_{A_i^1} U_{ij}^1 \quad (4)$$

$$U_{ij}^2 = \max_{A_j^2} U_{ij}^2 \quad (5)$$

どの戦略が最適反応になるかは、利得の大小関係で決定される。例えば、プレイヤー 2 の行動が  $A_1^2$  の下でのプレイヤー 1 の最適反応は、 $U_{11}^1 \geq U_{21}^1$  の場合戦略  $A_1^1$ 、 $U_{11}^1 \leq U_{21}^1$  の場合戦略  $A_2^1$  となる。

#### (2) 最適反応と均衡解の関係

ナッシュ均衡解は、すべてのプレイヤーの戦略が他者の戦略に対する最適反応となっている結果である。したがって、当該の結果が均衡解であるための条件とは、その結果を規定するすべてのプレイヤーの戦略が最適反応であるための条件である。具体的には、以下に示す 16 通りの利得の大小関係に対応して当該の結果が均衡解となる。なお、以下では結果  $U_{ij}^1 \times U_{ij}^2$  を  $\sigma_{ij}$  と記す。以下の 16 通りのうち  $l$  番目における結果を表す場合、これを  $\sigma_{ij}^l$  と示す。また、「なし」とは、当該の利得の大小関係の下で（純粋戦略の下では）均衡解が存在しないことを意味している。

- 1)  $U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{11}$
- 2)  $U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{11}$
- 3)  $U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{12}$
- 4)  $U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{12}$
- 5)  $U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{11}$
- 6)  $U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{11}, \sigma_{22}$  (複数均衡)
- 7)  $U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2$  のとき, なし
- 8)  $U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{22}$
- 9)  $U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{21}$
- 10)  $U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2$  のとき, なし
- 11)  $U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{21}, \sigma_{12}$  (複数均衡)
- 12)  $U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{12}$
- 13)  $U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{21}$
- 14)  $U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{22}$
- 15)  $U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{21}$
- 16)  $U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2$  のとき,  $\sigma_{22}$

注意すべきは、ゲームに複数均衡が存在する場合である。複数均衡下における均衡解選択に関する研究は、近年高まる構造推定アプローチ研究の重要性に加え、統計理論や数値計算手法の発展により精力的に進められている。吉村<sup>16)</sup>は、複数均衡問題への対処法別に、1) 一意均衡モデル制約<sup>17)18)</sup>、2) 均衡選択メカニズムの特定化<sup>19)</sup>、3) 境界アプローチ<sup>20)21)</sup>の三つの対処法を整理している。しかしながら、いかなるゲームに対しても成立すると認められる選択基準は今のところ存在しない。本研究を検討するに当たってこの問題は避けて通れないが、この問題は本研究の範囲を超えた課題である。本研究では議論の見通しをよくするため、複数均衡が生じる場合、どの均衡解が選択されるかについては外生的に基準が与えられていると考える。つまり、複数均衡が生じる場合であっても、実際に観測される結果と対応する均衡解は予め与えられた基準により一



意に決定されるとする。具体的には、3.(4) 節で取り上げる。

### (3) 均衡解の生起確率の導出

結果  $\sigma_{11}^1$  が均衡解となる確率を例として、その導出方法について述べる。仮に  $\sigma_{11}^1$  が均衡解となる条件を以下のように特定したとする。

$$U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2 \quad (6)$$

まず、 $U_{11}^1 \geq U_{21}^1$  が成立する確率を求めよう。この条件を利得の確定項と誤差項に分解して表すと、以下のようになる。

$$V_{11}^1 + \epsilon_{11}^1 \geq V_{21}^1 + \epsilon_{21}^1 \quad (7)$$

誤差項がガンベル分布に従うと仮定すると、上式が成立する確率は次式のロジットモデルで表される。

$$Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1) = \frac{\exp(V_{11}^1)}{\exp(V_{11}^1) + \exp(V_{21}^1)} \quad (8)$$

同様にして、式 (6) が成立する確率、すなわち結果  $\sigma_{11}^1$  が均衡解となる確率  $P(\sigma_{11}^1)$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} P(\sigma_{11}^1) &= Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2) \\ &= \frac{\exp(V_{11}^1)}{\exp(V_{11}^1) + \exp(V_{21}^1)} \cdot \frac{\exp(V_{12}^1)}{\exp(V_{12}^1) + \exp(V_{22}^1)} \cdot \\ &\quad \frac{\exp(V_{21}^2)}{\exp(V_{21}^2) + \exp(V_{11}^2)} \cdot \frac{\exp(V_{22}^2)}{\exp(V_{22}^2) + \exp(V_{12}^2)} \quad (9) \end{aligned}$$

同様の議論により、結果  $\sigma_{11}$  が均衡解となる確率  $P(\sigma_{11})$  は次式により導出される。

$$\begin{aligned} P(\sigma_{11}) &= P(\sigma_{11}^1) + P(\sigma_{11}^2) + P(\sigma_{11}^5) + P(\sigma_{11}^6) \quad (10) \\ &= Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2) \\ &\quad + Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2) \\ &\quad + Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2) \\ &\quad + \theta_{11} Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2) \end{aligned}$$

$\theta_{11}$  は複数均衡において、 $\sigma_{11}^6$  が選択される確率である。

### (4) 複数均衡選択確率の導出

Kita<sup>10)</sup> は、複数均衡選択確率をパラメータとみなすことで利得関数の特定化を可能にしたが、収束計算の過程で複数均衡選択確率が 0~1 に収まらない可能性も想定される。そのため本研究では、プレイヤー 1 とプレイヤー 2 の利得の和がガンベル分布に従っていると仮定し、複数均衡選択確率をロジットモデルを用いて導出する。 $U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2$  のとき、複数均衡  $\sigma_{11}, \sigma_{22}$  となる。 $\sigma_{11}$  となる確率  $\theta_{11}, \sigma_{22}$  となる確率  $\theta_{22}$  は以下のようになる。

$$\theta_{11} = \frac{\exp(V_{11}^1 + V_{11}^2)}{\exp(V_{11}^1 + V_{11}^2) + \exp(V_{22}^1 + V_{22}^2)} \quad (11)$$

$$\theta_{22} = \frac{\exp(V_{22}^1 + V_{22}^2)}{\exp(V_{11}^1 + V_{11}^2) + \exp(V_{22}^1 + V_{22}^2)} \quad (12)$$

$U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2$  のとき、複数均衡  $\sigma_{21}, \sigma_{12}$  となる。 $\sigma_{21}$  となる確率  $\theta_{21}, \sigma_{12}$  となる確率  $\theta_{12}$  は以下のようになる。

$$\theta_{21} = \frac{\exp(V_{21}^1 + V_{21}^2)}{\exp(V_{21}^1 + V_{21}^2) + \exp(V_{12}^1 + V_{12}^2)} \quad (13)$$

$$\theta_{12} = \frac{\exp(V_{12}^1 + V_{12}^2)}{\exp(V_{21}^1 + V_{21}^2) + \exp(V_{12}^1 + V_{12}^2)} \quad (14)$$

### (5) 結果の生起確率の導出

以上の考え方に基づくと、各結果の生起確率は以下のようになる。

$$\begin{aligned} P(\sigma_{11}) &= P(\sigma_{11}^1) + P(\sigma_{11}^2) + P(\sigma_{11}^5) + P(\sigma_{11}^6) \quad (15) \\ &= Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2) \\ &\quad + Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2) \\ &\quad + Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2) \\ &\quad + \theta_{11} Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(\sigma_{21}) &= P(\sigma_{21}^9) + P(\sigma_{21}^{11}) + P(\sigma_{21}^{13}) + P(\sigma_{21}^{15}) \quad (16) \\ &= Pr(U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2) \\ &\quad + \theta_{21} Pr(U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2) \\ &\quad + Pr(U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2) \\ &\quad + Pr(U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(\sigma_{12}) &= P(\sigma_{12}^3) + P(\sigma_{12}^4) + P(\sigma_{12}^{11}) + P(\sigma_{12}^{12}) \quad (17) \\ &= Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2) \\ &\quad + Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2) \\ &\quad + \theta_{12} Pr(U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \geq U_{22}^2) \\ &\quad + Pr(U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(\sigma_{22}) &= P(\sigma_{22}^8) + P(\sigma_{22}^{10}) + P(\sigma_{22}^{14}) + P(\sigma_{22}^{16}) \quad (18) \\ &= \theta_{22} Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2) \\ &\quad + Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \leq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2) \\ &\quad + Pr(U_{11}^1 \geq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \geq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2) \\ &\quad + Pr(U_{11}^1 \leq U_{21}^1, U_{12}^1 \geq U_{22}^1, U_{11}^2 \leq U_{12}^2, U_{21}^2 \leq U_{22}^2) \end{aligned}$$

最尤推定法を用いて、利得関数のパラメータを推定する。任意の結果  $\sigma_{ij}$  の観測数をそれぞれ  $n(\sigma_{ij})$  とすると、尤度関数  $L$  は次式で与えられる。

$$L = \prod_{i,j} P(\sigma_{ij})^{n(\sigma_{ij})} \quad (19)$$

$L$  を最大にするパラメータ  $\alpha$  が最尤推定値  $\alpha^*$  であり、次式によって求められる。

$$\alpha^* = \arg \max_{\alpha} L \quad (20)$$

また、現象説明力を評価する基準として、尤度比を用いる。最尤推定値  $\alpha^*$  を用いた場合の対数尤度を  $\ln L^*$ 、パラメータ  $\alpha$  をすべて 0 にした場合の対数尤度を  $\ln L_0$  とすると、尤度比  $\rho^2$  は以下のようになる。

$$\rho^2 = 1 - \frac{\ln L^*}{\ln L_0} \quad (21)$$

本研究では、まず Game-2 について尤度関数を導出し、Game-2 における最尤推定値  $\beta^*$  を推定する。導出した最尤推定値  $\beta^*$  を用いて Game-1 における Game-2 の期待利得を算出し、Game-1 の尤度関数を導出し、Game-1 における最尤推定値  $\alpha^*$  を推定する。

#### 4. 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-6 に示す 4 つのリンクを接続して、流入部を構成する。

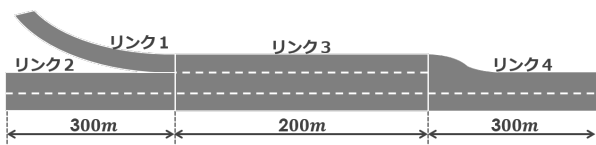


図-6 仮想流入部の構成

リンク 1 の交通量を 1000(台/時)、リンク 2 の交通量を 2 車線で 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 60(km/時)、走行車線 80(km/時)、追越車線 100(km/時) に設定する。シミュレーション時間長を 3600(s) としてシミュレーションを行い、データを収集する。具体的には、ある流入車が図-5 に示すゲーム開始地点にさしかかった瞬間に「1」～「6」に該当する 6 台の車両を特定し、それらの速度  $v_k(m/s)$ 、車間距離  $y_k(m)$ 、ゲームの結果  $\sigma_{ij}$  を計測してひとつのサンプルとする。

##### (2) 分析結果

Game-1 におけるシミュレーションデータのサンプル数は 646 セット、Game-2 におけるシミュレーションデータのサンプル数は 222 セットである。Game-0 に用いるデータは Game-1 と同じである。Game-1 における結果ごとのサンプル数を図-7 に、Game-2 における結果ごとのサンプル数を図-8 に示す。どちらも  $\sigma_{12}$  が突出しているが、これは直面ギャップに流入する一番シブな流入形態のためである。

また、リンク 1 とリンク 2 の末端、リンク 4 の先端にトラカンを設置して交通量と平均速度を測定した。縦軸を 5 分間平均速度 (km/h)、横軸を 5 分間交通量 (台/5 分) とし、その結果を図-9 に示す。

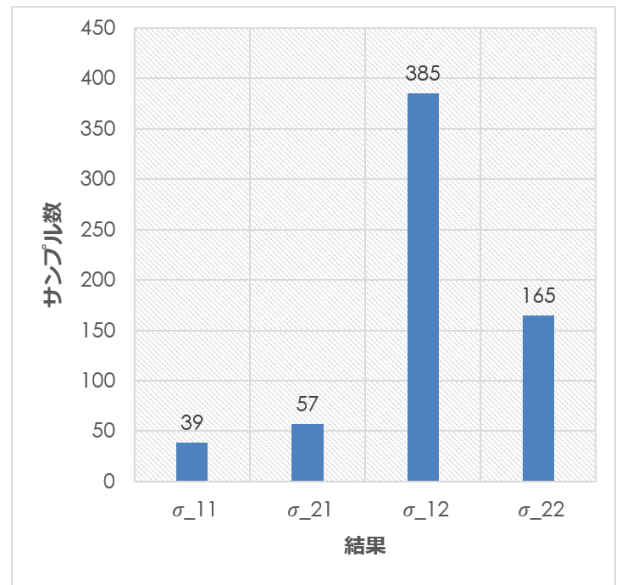


図-7 Game-1 の結果ごとのサンプル数

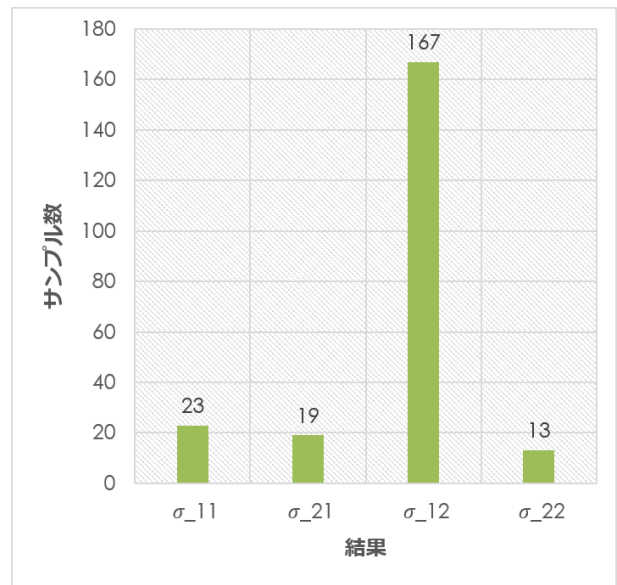


図-8 Game-2 の結果ごとのサンプル数

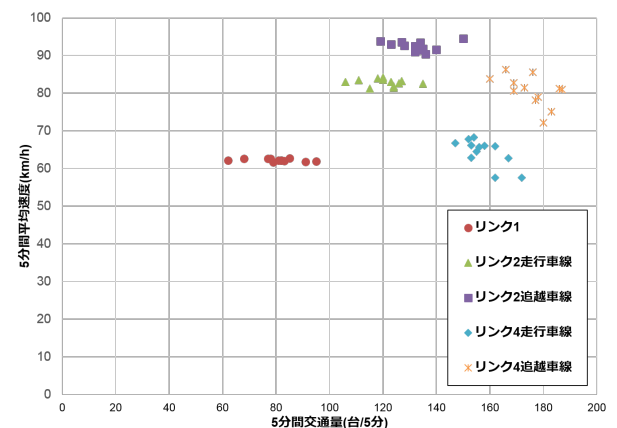


図-9 QV 図

表-11 純粋戦略下における分析結果

	Game-0		Game-1		Game-2			
	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				$U_{21}^{1'}$	-0.0078	-0.206
$U_{12}^{1''}$	0.9492	10.685	$U_{12}^1$	0.8415	24.546	$U_{12}^{1'}$	0.2282	2.029
$U_{22}^{1''}$	0.3007	9.728				$U_{22}^{1'}$	-0.0543	-0.707
$U_{11}^{2''}$	0.0002	0.650	$U_{11}^2$	0.0003	0.678	$U_{11}^3$	-0.0026	-0.974
$U_{21}^{2''}$	0.0006	1.416	$U_{21}^2$	0.0006	1.394	$U_{21}^3$	0.0016	0.587
$U_{12}^{2''}$	0.3586	10.708	$U_{12}^2$	0.3432	11.100	$U_{12}^3$	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-12 混合戦略下における分析結果

	Game-0		Game-1		Game-2			
	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				$U_{21}^{1'}$	-0.1537	-2.826
$U_{12}^{1''}$	0.0046	NaN	$U_{12}^1$	-26.1537	NaN	$U_{12}^{1'}$	-0.0609	-39.005
$U_{22}^{1''}$	0.0345	NaN				$U_{22}^{1'}$	-0.3962	-251.19
$U_{11}^{2''}$	-0.2084	-3.701	$U_{11}^2$	-30.0718	-2241.0	$U_{11}^3$	-0.8706	NaN
$U_{21}^{2''}$	0.0006	0.923	$U_{21}^2$	-30.2035	-868.22	$U_{21}^3$	0.0006	4.394
$U_{12}^{2''}$	0.1153	2.265	$U_{12}^2$	-0.4395	-10.765	$U_{12}^3$	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	

純粋戦略下のモデルによる分析結果を表-11 に示す。Game-0 より Game-1 の尤度比の方が高く、本研究のモデルの方が既往モデル<sup>13)</sup>より現象説明力が高いと言える。

表-12 に混合戦略下のモデルによる分析結果を示す。尤度比は Game-0 より Game-1 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。尤度比が純粋戦略下の結果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。

## 5. おわりに

相互依存状態における複数ギャップを考慮した車線変更挙動モデルはこれまで研究されていなかった。これは、ゲーム理論の利得関数を推定するプロセスの複雑

さと複数均衡下における均衡解選択の問題があったためと推察される。そこで本研究では、相前後に走行する複数の本線車とのゲームを二段階のゲームとして記述し、ロジットモデルを用いた複数均衡選択確率の導出を行うことで、複数ギャップを考慮しうるモデルへと拡張した。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において、提案したモデルが既往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る。プログラムにおいても、外れ値的なサンプルを除外せずに分析しているため、サンプルによって結果が大きく変化していると考えられる。また、複数均衡選択確率においても、利得の総和がガンベル分布に従うと仮定し、ロジットモデルを用いて算出しているが、この点についてもさらなる検討が必要である。また、本研究のモデルでは

低速合流のみを対象としたほか、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) Z. D. Zheng: Recent developments and research needs in modeling lane changing, *Transportation Research Part B-Methodological* 60, 16-32, 2014.
- 2) 岩崎真純, 野中康弘: 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, *土木計画学研究・講演集*, vol.55, 2017.
- 3) P. G. Gipps: A model for the structure of lane-changing decisions, *Transportation Research Part B-Methodological* 20, 403-414, 1986.
- 4) 喜多秀行, 畠中康行: 高速道路流入部におけるギャップアクセプタンス挙動の解析, 第 11 回交通工学研究発表会論文集, pp.9~12, 1991.
- 5) 喜多秀行, 久保蘭寛: 低速合流時の合流挙動と潜在事故危険度に関する一考察, *交通工学研究発表会論文集*, No.12, pp.81-84, 1992.
- 6) 喜多秀行, 平井克尚: 運転行動分析に基づく低速合流時の潜在事故危険度推定法, *土木計画学研究・論文集* 11, 327-334, 1993.
- 7) 喜多秀行, 原田裕司: 流入タイミング調整行動を考慮した流入挙動モデル, *土木計画学研究・論文集* 12, 673-679, 1995.
- 8) K. I. Ahmed, M. E. BenAkiva, H. N. Koutsopoulos, R. G. Mishalani, *Models of freeway lane changing and gap acceptance behavior*. *Transportation and Traffic Theory*, 501-515, 1996.
- 9) 喜多秀行, 久保蘭寛: 高速道路流入部における流入一避走挙動のモデル化, *交通工学研究発表会論文集*, No.14, pp.45-48, 1994.
- 10) H. Kita: A merging-giveway interaction model of cars in a merging section: a game theoretic analysis, *Transportation Research Part a-Policy and Practice* 33, 305-312, 1999.
- 11) H. Kita, K. Fukuyama: A merging-giveway behavior model considering interactions at expressway on-ramps. *Transportation and Traffic Theory*, 173-187, 1999.
- 12) 喜多秀行, 幸坂謙之介, 福山 敬: 流入・避走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* 18, 903-908, 2001.
- 13) H. Kita, K. Tanimoto, K. Fukuyama: A game theoretic analysis of merging-giveway interaction: A joint estimation model, *Transportation and Traffic Theory in the 21st Century*, 503-518, 2002.
- 14) 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.
- 15) 喜多秀行, 谷本圭志, 福山 敬: ゲーム的状况下におけるプレイヤーの利得推定モデル, *土木学会論文集*, 147-157, 2003.
- 16) 吉村有博, : 静学離散ゲームの推定手法の近年の展開, *経済論叢 = The economic review* 188, 59-75, 2015.
- 17) T. F. Bresnahan, P. C. Reiss: Entry in monopoly markets. *Review of Economic Studies* 57, 531-553, 1990.
- 18) T. F. Bresnahan, P. C. Reiss: Empirical-models of discrete games. *Journal of Econometrics* 48, 57-81, 1991.
- 19) P. Bajari, H. Hong, S. P. Ryan: Identification and estimation of a discrete game of complete information, *Econometrica* 78, 1529-1568 (2010).
- 20) E. Tamer: Incomplete simultaneous discrete response: Model with multiple equilibria. *Review of Economic Studies* 70, 147-165, 2003.
- 21) F. Ciliberto, E. Tamer: Market structure and multiple equilibria in airline markets. *Econometrica* 77, 1791-1828, 2009.

(2019. 3. 10 受付)

## A Game Theoretic Analysis of Merging-Yielding Behavior at On-Ramps Considering Multiple Gaps

Takuma YAMASHINA, Hajime SEYA and Hideyuki KITA

Since lane changing behavior is interdependent behavior among drivers, modeling based on game theory is useful. However, the historical model covers only the gaps that face, there is no model yet to consider the selection behavior of multiple gaps. Therefore, in this study, we modeled by choosing multiple gaps as a two - step game and confirmed that the proposed model has a higher explanatory power than the past model by analysis using simulation data.