

## 2車線合流狭窄部の交通流に見るジレンマゲームに関する研究

山内敦雄<sup>†</sup>, 谷本 潤<sup>‡</sup>, 相良博喜<sup>††</sup>, 萩島 理<sup>†</sup>

実在の高速道路における基本図を再現する確率最適速度モデル (SOV) を基礎とする開放セルオートマタ交通流モデルを構成した。これを2車線合流狭窄部合流問題に適用し、この物理機構にゲーム性が存在すること、すなわち流動状態に応じて Trivial ゲームか囚人のジレンマゲームの相が創発することがわかった。

A study on the dilemma game structure observed in a traffic flow of 2-to-1 lane junction

Atsuo Yamauchi<sup>†</sup>, Jun Tanimoto<sup>‡</sup>, Hiroki Sagara<sup>††</sup>, Aya Hagishima

A cell automata traffic model based on Stochastic Optimal Velocity (SOV) model with an appropriate open boundary condition at both in-coming and out-going edges was established. The model can plausibly reproduce the fundamental diagram of a traffic flow observed in Japanese highway shown by Sugiyama. The model was applied to an analysis for a traffic flow of 2-to-1 lane junction considering co-existence of C-strategy agents always driving in a first lane and D-strategy agents driving in a lower density lane either the first or second lane. In both High-density and Jamming phases, D-agent's interruption into the first lane makes a heavier traffic jam bringing a lower social efficiency, in which we can observe the so-called Prisoner's Dilemma game structure.

キーワード: 確率最適速度 (SOV) モデル, セルオートマタ交通流モデル, 囚人のジレンマ  
Key words: Stochastic Optimal Velocity (SOV) model, Cell automata traffic model, Prisoner's Dilemma

### 1. 緒言

「渋滞学」<sup>1)</sup>は一般語彙としても浸透しつつある。道路上の車両流動の動力学に関しては1次元流れを表す Burgers 方程式と車両エージェントを自己駆動粒子と見なすセルオートマタ型モデルが超離散化を介して等価であることが証され (図1), 純理論アプローチへの道が拓かれた。加えて, ASEP (Asymmetric Simple Exclusion Process) や SOV (Stochastic Optimal Velocity) モデルをはじめとするマルチエージェント・シミュレーション・モデルに基づく数値的アプローチが試みられることで, 交通流動の基本的な物理機構が明らかになりつつある。例えば, 単純な道路上の交通流動は, 高密度化するに伴い, 自由流相から渋滞相へ相転移し, その間にはきわめて不安定ながら高流動状態が出現するメタ安定相が存在するとの観測事実 (観測による所謂「基本図」が示唆している現象; 後述図3(a))が, 上記の物理モデルで再現されるに至っている<sup>2)</sup>。自己駆動粒子理論を交通流動問題へ適用することで, 力学系システムとして観た車両流動の物理機構そのものの理解は過去数年で大きな進捗を見たが, 車両を操作する人間の意志決定機構を含めた包括的かつ

俯瞰的な「渋滞学」の理解には残念ながら未だ至っていないのが現状である。現在の渋滞学では自己駆動粒子である車両エージェントの動力学のみに焦点が当てられ, 操作主体の人間の意志決定がその運動に及ぼす影響を含めて再現する枠組みが存在しない。本研究では, 自己駆動粒子のダイナミクスに意志決定機構としての進化ゲームを組み込んだ理論構成手法を構築することが目的である。本稿では提示モデルが現実の渋滞現象を忠実に再現することを実測データから検証し, 2車線の合流狭窄部におけるボトルネック効果の物理機構がジレンマゲームの構造を有することを示す。

### 2. 理論

#### 2.1 SOV モデル

図1に示すように1次元の衝撃波伝播を表す Burgers 方程式は線形拡散方程式に Cole-Hopf (C-H) 変換を行うことで変換出来る。線形拡散方程式を時空間離散化し, さらに流体を連続体でない離散的な粒子に変換する超離散化 (数学的にはある種の極限操作に相当) を施す。先ほどの変換過程の図式をここでも適用し超離散化 C-H 変換することで超離散 Burgers 方程式を得ることができる。

<sup>†</sup> 九州大学工学部エネルギー科学科, Department of Energy Science, School of Engineering, Kyushu University.

<sup>‡</sup> 九州大学大学院総合理工学研究院, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

<sup>††</sup> 九州大学大学院総合理学府, Research Fellow of JSPS, Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University.

これは Wolfram の 3 近傍セルオートマタ rule184<sup>3)</sup>と本質的には等価であり、前進確率（ホップ確率、正規化された流速に相当）を確率変数とすることでセルオートマタ型の交通流モデル ASEP が導出される。ASEP は自己駆動粒子の動力学としては基本的なモデルであるが、車両動力学モデルとしてみたとき交通流の特徴ともいえるメタ安定相を再現出来ない。そこで、本研究では車両エージェントの速度は、ASEP が規定するような慣性の影響と先行車両との車間距離に応じて加速度を制御する追従型セルオートマトンモデルの ZRP を重畳した SOV モデルを用いることにした。これら ASEP と ZRP は共に密度とフラックスの間に厳密解を持つ。なお、SOV モデルは車両エージェントの速度変化と慣性と車間距離とを微分方程式で関連付ける最適速度モデルの時空間離散型と等価である。

開放端境界を想定した SOV モデルによるセルオートマタを図 2 に示す。(1)式に従って車両エージェントごとにホップ確率が決まり、車両エージェントは前セルが空いていればその確率で前に進むことができる。(1)式右辺第 1 項は慣性、第 2 項は車間距離に応じた速度変化を表す。(1)式中の最適速度関数  $V(\Delta x)$ は(2)式で与える。

$$v_i^{t+1} = (1 - a_i)v_i^t + a_i V_i(\Delta x_i^t) \dots \dots \dots (1)$$

$$V(\Delta x) = \frac{\tanh(\Delta x - c) + \tanh c}{1 + \tanh c} \dots \dots \dots (2)$$

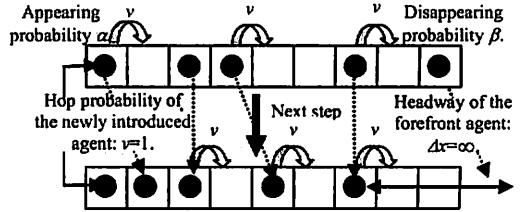


Fig.2 Proposed SOV model considering both in-coming and out-going open boundary conditions.

### 2.2 SOV モデルにおける開放系周期境界条件の扱い

本研究では現実問題への比喩の妥当性から、システムの両端は開放系周期境界条件を仮定した。本研究で適用した開放端の扱いを図 2 に示す。生成確率、消滅確率をそれぞれ  $\alpha, \beta$  とする。流入した車両エージェントの初期前進確率は一律に  $v=1$  を付与。流出端に直近エージェント（システム内で下流に向かって最先頭に位置する車両）の  $\Delta x$  は  $\infty$  とした。また、エージェントの更新はパラレルアップデート（シンクロ更新）とした。

以上のモデルで実際の交通流動を如何に再現するかを検証した。まず実際の高速道路で観測された基本図<sup>4)</sup>と SOV モデルの式中のパラメータ  $a=0.01, c=3/2$  で得られた基本図を図 3 に示した。ただし、系のシステム長は 200 セルとした。ここで基本図の横軸は密度、縦軸は速度と密度の積と与えられるフラックス（交通流束）である。一般に、現実の基本図では、自由流相と高密度相との間にきわめて不安定ながら高流動状態であるメタ安定相が出現する。メタ安定とは高速道路などで非常に稠密な状態ながら高速に車両が流れる状態を表し、何らかの擾乱が付加されるとそれを契機に高密度相や渋滞相へと不可逆に相転移する。力学的には不安定な相である。今回の実験で得られた基本図はこれら現実の基本図に表れる特性をきわめて良好に再現する。ASEP を始め多くのセルオートマタ型モデルではメタ安定の再現性は不良であることが知られているが、本研究で適用した SOV に上記の開放端境界条件を付与すると良好な再現性を示すことが分かった。なお、

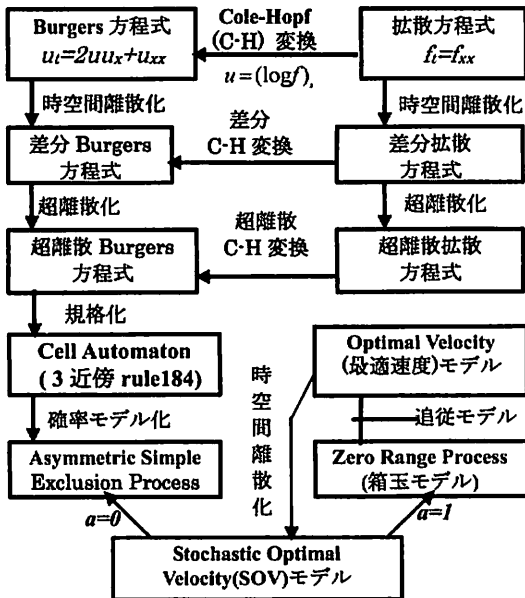


Fig.1 Relationship of Burgers Equation and traffic flow model.

本モデルの正規化特性量を実スケールに置換する(図3(B)の上端および右端に示した第2軸の値)際には、1セル長を5m, 自由流の速度最大値を100km/hとした。

### 3. モデル

本研究では前章で構築した開放系 SOV モデルを用いて、2車線の合流狭窄部におけるボトルネック効果を解析する。ここで人間の意志決定過程をゲーム理論に

より記述する。すなわち、車両エージェントには、常に走行車線(左車線)を走る協調エージェント( Cooperation, C 戦略エージェント)と、走行車線か追い越し車線のどちらかを選択して走る裏切りエージェント( Defect, D 戦略エージェント)がいると仮定する。D 戦略エージェントは生成時にはより空いている(密度の低い)車線に生成させ、システム中でも追い抜き域(長さ  $L_3$ )にいる間は追い越し車線の密度が低くければ車線変更でき、狭窄部の直前割り込み域(長さ  $L_4$ )に達すると走行車線に割り込みを図る。車線変更時のルールは図4のように、追い越し車線への変更の場合、隣接車線1セル後ろに車両が存在しなければ可能とし、割り込みの場合は、隣接車線1セル後ろに別の車両が存在しないとき、存在する場合でも強制割り込み確率  $p$  で割り込みが可能であるとした。

次に本モデルにおける1時間ステップの更新順序を説明する。

- 1) 確率  $\alpha$  で流入口に車両を生成する。生成される車両の戦略はC戦略の比(協調率  $P_C$ )によって振り分ける。
- 2) 全車両のホップ確率を算出する。
- 3) それぞれの車両の動作を決める。すなわちC戦略であれば前進するかその場に留まるか、D戦略であればさらに車線変更するかどうかを決定する。
- 4) 全車両を更新する。
- 5) 生成された車両が流入口に留まった場合その車両は消滅させる。

実験では協調率  $P_C$  および系への流入パラメータ  $\alpha$ ,  $\beta$  を変化させながら流動状態を解析する。

### 4. 実験条件

SOVモデルのパラメータ((1), (2)式中)に関しては、

**Overtaking-Area;**  
An D-agent can move from the 1<sup>st</sup> lane to 2<sup>nd</sup> lane.

**Interrupting-Area;**  
An D-agent can move from the 2<sup>nd</sup> lane to 1<sup>st</sup> lane with probability  $p$ .

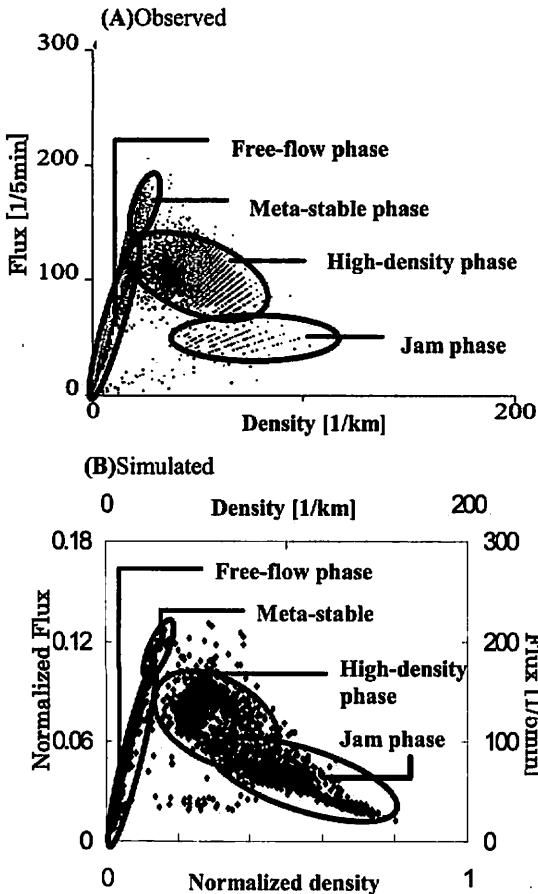
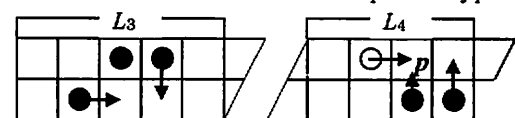


Fig.3 Comparison of fundamental diagrams between (A) field observed data and (B) simulated one by the proposed SOV model.

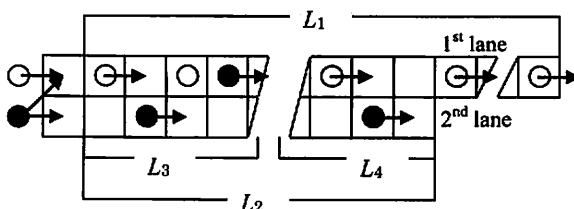


Fig.4 Assumed Model with both in-coming and out-going open boundary conditions.  $L_1$ : length of 1<sup>st</sup> lane,  $L_2$ : length of 2<sup>nd</sup> lane,  $L_3$ : length of Overtaking-Area and  $L_4$ : length of Interrupting-Area. An open circle indicates a C-agent, closed one is a D-agent, respectively.

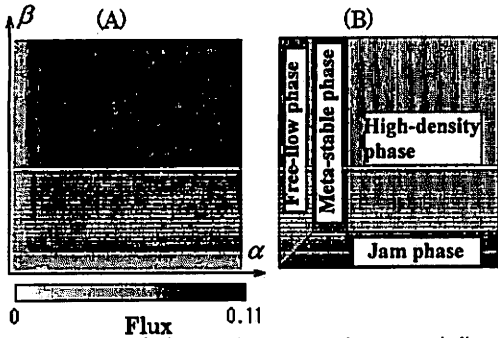


Fig.5 Flow- $\alpha$ - $\beta$  diagram. (A); gray scale contour indicates normalized flux with an assumption of cooperation fraction  $P_c=1$ . (B) indicates 4 representative traffic flow phases based on a sketch observation on (A).

$c=3/2$ ,  $a=0.01$  とした。図2のシステム長  $L_f=400$  セルとし、以下に示す解析結果は 10001 ステップから 12000 ステップで観測したフラックス、ホップ確率等の特性量を 30 回アンサンブル平均して描画している。なお、以下で図示する結果では、 $L_f=200$ ,  $L_f=100$ ,  $L_f=10$ , 強

制割り込み確率  $p=0$  とした。

### 5. 結果および考察

図5(A)に協調率1, つまりC戦略のみの系におけるフラックスの相図を示す。これを元に流動相の状態をクラス分けしてスケッチしたのが図5(B)である。すなわち、 $\alpha$ の小さいエリアで $\beta$ に依存せず高いフラックスとなる領域(自由相),  $\beta$ の小さいエリアで $\alpha$ に依存せず低いフラックスとなる領域(渋滞相),  $\alpha$ と $\beta$ に依存せずある程度のフラックスを得る領域(高密度相), 全領域の中で高い特にフラックスとなる領域(メタ安定相)である。

図6に協調率を0から0.1刻みで変えながらフラックスの $\alpha$ - $\beta$ 相図を示した。同様に図7には各協調率におけるDエージェントとCエージェントとのホップ確率差を利得差として表した。この2次元マップ上で利得

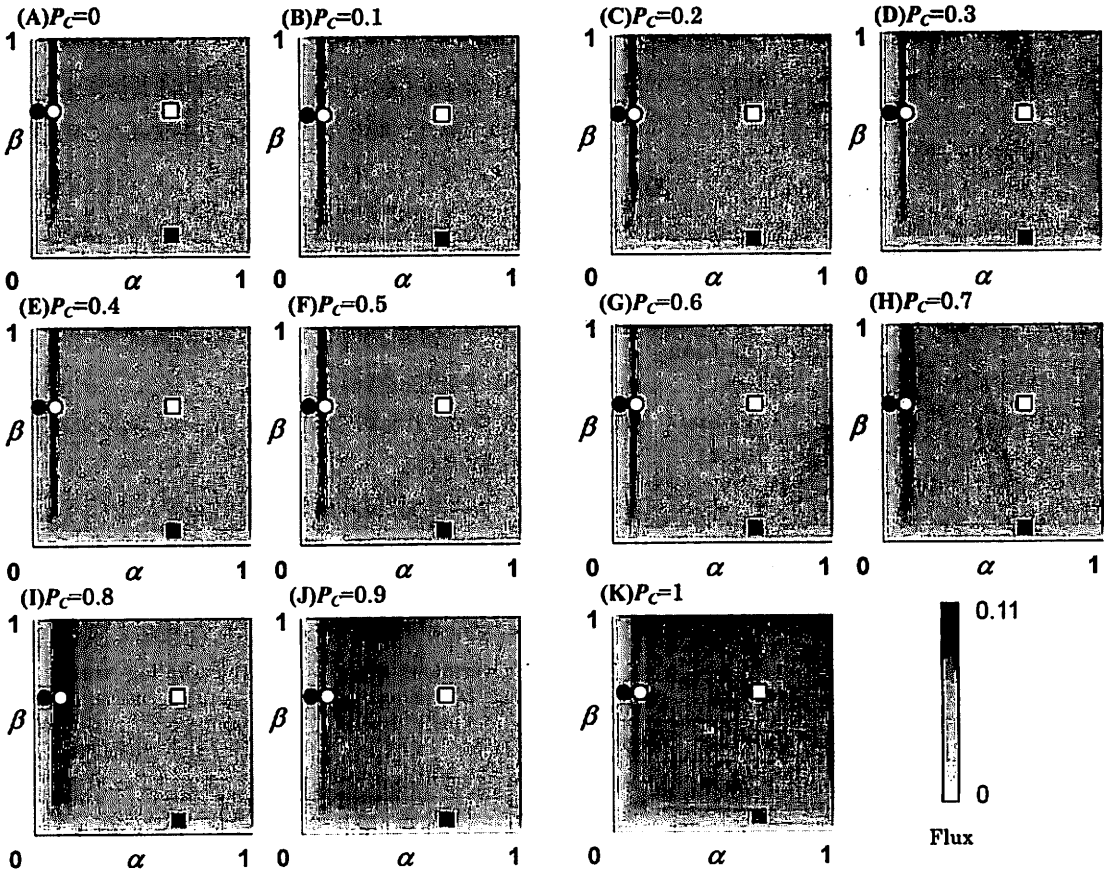


Fig.6 Flow- $\alpha$ - $\beta$  diagram, of which gray scale contour indicates normalized flux. Each sub-graph from (A) to (K) shows the result of  $P_c=0$  to 1. Four plots; open and closed circles, and open and closed squares, are representative points of Free-flow ( $\alpha=0.05$ ,  $\beta=0.65$ ), Meta-stable ( $\alpha=0.10$ ,  $\beta=0.65$ ), High-density ( $\alpha=0.65$ ,  $\beta=0.65$ ) and Jam ( $\alpha=0.65$ ,  $\beta=0.05$ ) phases shown in Fig. 8.

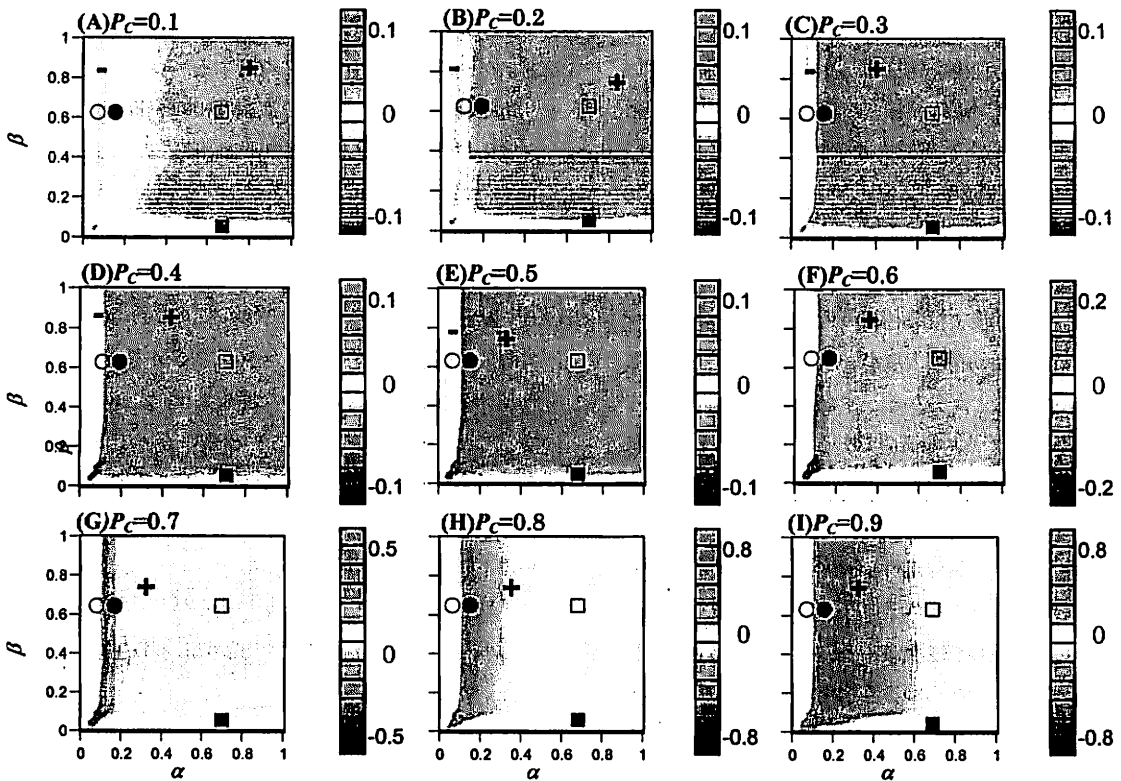


Fig.7 Payoff difference- $\alpha$ - $\beta$  diagram. The Payoff indicates hop probability (normalized velocity) difference between D- and C-agents. Each sub-graph from (A) to (I) shows the result of  $P_c=0.1$  to  $0.9$ . Four plots; open and closed circles, and open and closed squares, are representative points of Free-flow ( $\alpha=0.05, \beta=0.65$ ), Meta-stable ( $\alpha=0.10, \beta=0.65$ ), High-density ( $\alpha=0.65, \beta=0.65$ ) and Jam ( $\alpha=0.65, \beta=0.05$ ) phases shown in Fig. 8.

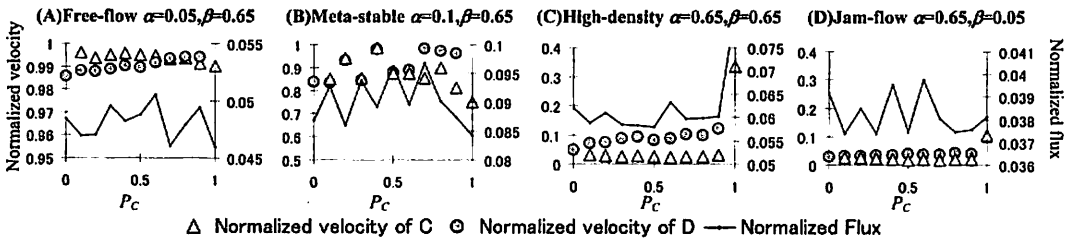


Fig.8 Payoff structure functions of both C- (triangle) and D-agents (gray circle) with social average (line). The payoff implies averaged hop probability (normalized velocity) of agents. A Social average indicates a normalized flux of the traffic(A); Free-flow ( $\alpha=0.05, \beta=0.65$ ), (B); Meta-stable ( $\alpha=0.10, \beta=0.65$ ), (C); High-density ( $\alpha=0.65, \beta=0.65$ ) and (D) Jam ( $\alpha=0.65, \beta=0.05$ ) phases. Those four points are shown in both Fig.6 and Fig. 7 by open and closed circles, and open and closed squares respectively.

差がプラスであれば、協調率の社会ダイナミクスはより裏切り側へ吸引されることを意味する。図8は、図6と図7中に各相の代表的条件として選んだ4つの条件、すなわち自由相 ( $\alpha=0.05, \beta=0.65$ )、メタ安定 ( $\alpha=0.10, \beta=0.65$ )、高密度相 ( $\alpha=0.65, \beta=0.65$ )、渋滞相 ( $\alpha=0.65, \beta=0.05$ ) における利得構造関数である。両戦略の利得は合流狭窄部以前で観測したホップ確率、社会利得は合流狭窄部以降で観測したフラックスで評価している。

自由相は図8(A)からも明らかのように、両戦略の利得差は殆どなく、協調率による社会平均利得の差異も殆どない。すなわち、戦略間の利害が角逐することのない Trivial ゲームの構造になっている。

図8(B)のメタ安定相をみると、協調率が高い領域ではDエージェントの利得がCエージェントのそれより高く、全員が走行車線走行を遵守する  $P_c=1$  の初期状態を考えるなら、追い越し車線の走行を企てるD戦略が

社会に侵入する余地があることになる。しかし、このときの社会平均利得を見ると、 $P_c=1$  より協調率が低い方が却って利得が高くなっている。 $P_c<0.6$  では利得に凸凹が見られるが、D 戦略と C 戦略との利得差はない。従って、この流動相では、追い越し車線を走行するエージェントが社会に侵入することは避け得ないが、社会ダイナミクスの均衡点 (D 戦略と C 戦略の利得差がなくなる点) 前後で社会利得最大点となり、ジレンマ (均衡点と社会効率最大点が一致しない状態) は生じていないことが分かる。すなわち、内部均衡点を有する Trivial ゲームの構造である。これは、流入端における系への車両出現確率  $\alpha$  が比較的小さく高流動状態となるメタ安定にあつては、走行車線走行を墨守するより、追い越し車線走行を適度に利用する方がより流動効率を高めることが出来ることを意味している。

図 8(C) の高密度相を見てみる。社会利得最大点は協調率  $P_c=1$  にあり、あらゆる協調率で D 戦略の利得が C 戦略のそれを上回っており、多人数 (N 人) 2 戦略囚人のジレンマ (N-Prisoner's Dilemma, N-PD) ゲームである Public Goods Game 同様、D 支配の社会ダイナミクスを有することが分かる。すなわち、協調率  $P_c=1$  の効率的な流動状態から僅かな割合の D 戦略が侵入することで社会効率は著しく低下し、常に D 戦略が C 戦略の利得を上回ることと相俟って、最終的には全員が裏切りとなる均衡点に吸引されてしまう。このことは、図 6 と図 7 で、多くの領域を占める高密度相に着目することでも理解出来る。高密度相で PD 型のジレンマが起きるのは、利得を高くするために追い越し車線を走行してきた車両が合流狭窄部直前で割り込みを仕掛けることで、走行車線流れに擾乱を起こしてしまい、社会全体の効率を下げてしまう為だと思われる。

図 8(D) の渋滞相を見てみると、戦略間の利得構造は高密度相と類似しており D 支配のダイナミクスをもつが、社会利得構造の差異は小さく協調率に左右されていない。つまり渋滞相は戦略間の利害のみが存在する Trivial ゲームである。

なお、強制割り込み確率  $p$  を上げると、高密度相とメタ安定相の流動効率が上がり (図には示していない)、高密度相では  $p$  の上昇に伴い  $P_c<1$  でのフラックス、つ

まり社会利得が上昇し、それらが  $P_c=1$  の場合を上回る時ゲーム構造は Trivial に移行する。つまり、強制割り込み確率  $p$  を上げると、高密度相の一部のパラメータ域におけるゲーム構造は Trivial 化する。これは、D 戦略を採って追い越し車線を走行する効果が、合流狭窄部における擾乱を惹起することで生じる負の効果を上回り、社会利得を押し上げる構造になるためである。

## 5. 結語

開放端境界条件を仮定した SOV モデルを構築し、これがメタ安定を含む現実の交通流動状態を適切に再現することを確認した。構築した SOV モデルを 2 車線から 1 車線に絞られる合流狭窄部における、割り込み車両が及ぼす交通流動特性の解析に適用した。解析の結果以下のことが明らかになった。

- (1) 合流狭窄部における割り込みがもとで招生される擾乱による社会効率の低減は、PD 型のジレンマ構造を有する。
- (2) 流入、流出端部のパラメータ領域上、その多くを占める高密度相で、上記の PD が生起するが、他の流動相では Trivial ゲームとなってジレンマは生じない。これは、車両密度が高い状況下で割り込みが企画されると、社会効率を著しく下げて、社会ジレンマを惹起するが、元々の流動効率が低い状況では寧ろ追い越し車線を有効に使った方がより一層高い効率が達成されることによる。なお、このジレンマ構造は強制割り込み確率  $p$  が高くなると、一部の流入、流出パラメータ域では消失する。

## 参考文献

- 1) 西成活裕; 渋滞学, 朝日選書, 2006.
- 2) 例えば, Kanai, M., Nishinari, M., Tokihiro, T.; Stochastic optimal velocity model and its long-lived metastability, Physical Review E 72, #035102, 2005.
- 3) Wolfram, S.; Theory and application of cellular automata, World Scientific (Singapore), 1986.
- 4) 杉山雄規; 交通流の物理, ながれ 22 (95), 2003.
- 5) 友枝明保; 超離散化法及びセルオートマトンモデルによる交通流の研究, 東京大学大学院修士論文, 2006.
- 6) 広田良吾; 高橋大輔; 差分と超離散, 共立出版, 2003.
- 7) 森下信; セルオートマトン, 複雑系の具象化, 養賢堂発行, 2003.