

# 車線変更が交通流にもたらすジレンマ構造の解析

莖田慎司<sup>1</sup>, 谷本潤<sup>2</sup>, 萩島理<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州大学大学院 総合理工学府 環境エネルギー工学専攻

<sup>2</sup>九州大学大学院 総合理工学研究院 エネルギー環境共生工学部門

## 概要

Yamauchi ら (*PRE* 79, #036104, 2009), Nakata ら (*Physica A* 389, 5353-5361, 2010) により, 2車線合流狭窄部に生じるボトルネックでの割り込み流れの背後には, 囚人のジレンマ (Prisoner's Dilemma, PD) の構造が存在することが明らかにされた. 本論では, 明示的ボトルネックの無い流れ場において, 車線変更が同様のジレンマ構造を惹起するのかを解明した. 車線変更をせず走行する協調戦略, 車線変更を行う裏切り戦略を併存させて流れ場解析を行ったところ, 高フラックスの流動相では PD が生じ, 渋滞相の一部においては車線変更を行うことが寧ろ社会効率を上昇させる数理構造が潜在していることを示した.

## Traffic flow analysis on whether lane-change brings a social dilemma

Shinji Kukida<sup>1</sup>, Jun Tanimoto<sup>1</sup>, Aya Hagishima<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

## Abstract

Following previous works by Yamauchi et al. (*PRE* 79) and Nakata et al. (*Physica A* 389), who investigated whether a traffic flow with lane closing instinctively contains social dilemma, another question of whether lane changes in a traffic flow without any evident bottlenecks bring about social dilemma structures. Simulation result reveals that flow phases featured with high flux and high density have obvious social dilemma classified with Prisoner's Dilemma, where all drivers tend to take the strategy trying lane changes as long as possible, and this causes the worst beneficial situation from social payoff point of view. Whereas, in flow regimes having local jams but much more flux than entire jam phase, frequent lane changes can rather improve the total social payoff, defined by averaged flux, because driving with lane changes can earn pretty small forward gains, leading to larger flux than driving without any lane changes.

## 1 緒言

著者らは, 交通流動が道路という有限の資源を車両エージェント同士が奪い合う, 所謂, 資源割り当て問題の様相を呈し, そこにはジレンマゲームとの関連性があるとの問題意識から研究を継続している. Yamauchi ら[1]は CA (Cellular Automaton) モデルとして Stochastic Optimal Velocity (SOV) を, Nakata ら[2]は Sakai ら[3]により開発された S-NFS モデル(Stochastic Nishinari Fukui Schadschneider Model)を適用し, 2車線狭窄合流部のボトルネックでの割り込みにより流動相に擾乱が生じ輸送効率が低下する現象の背景には, 囚人のジレンマ

(Prisoner's Dilemma, PD) のゲーム構造が潜在することを発見した. 流動相への擾乱を付加することとジレンマ性との因果があるのだとすれば, 通常走行時の過剰な車線変更が効率的流動を阻害する現象にも同様の, もしくは異なるクラスのジレンマ性が潜在する可能性がある.

現実交通流の再現に供するモデルとして CA が頻用されているが, これはマクロモデルにみられない柔軟性があるため, 合流, 分岐, 割り込みその他の現実の交通流に観察される様々なイベントの再現に対して頑強なモデル化が可能であることが挙げられる. 就中, S-NFS モデルは, 現実のドライバー挙動として尤もらしいスロースタート効果, 見通し効果, ランダムブレーキ効果を確率的に組み

込んだ枠組みで、現実の交通流に対して高い再現性を示す。Kokubo ら[5]は S-NFS モデルのランダムブレーキ効果を改良し、シンクロ相を良好に再現するモデルを提示している。一方、多車線系を扱う CA モデルでは車線変更のサブモデルを組み込む必要がある。車線変更サブモデルの基本的な考え方は、車線変更する動機に関わるインセンティブ基準、企画した車線変更が安全に遂行できるかを評価する安全基準を同時に満たしたとき、実際の車線変更イベントが起ると扱うものである。既往の多くの車線変更サブモデルにおいては両基準を前後直近隣接車両の車間距離に関する不等式で定義しており、現実より厳しい条件が仮定されていた。この点に関し Kukida ら[6]は前後直近隣接車両との車間距離及び速度差を考慮した車線変更サブモデルを提示している。

本稿では、Kokubo らによる改良 S-NFS モデルに Kukida らの車線変更者サブモデルを埋め込み、一般多車線系 CA モデルを構築する。開放系境界条件を設定した一連のシミュレーションにより、車線変更の背後に潜むジレンマ構造を解明することを目的とする。

## 2 モデル

### 2.1 改良 S-NFS モデル

本稿では車両エージェントの進行方向ダイナミクスには kokubo ら[5]の改良 S-NFS モデルを適用する。以下では、Sakai らの開発した S-NFS モデル[4]からの主な改良点をまとめておく。

S-NFSモデルの適用前に、focal車両と前方車両との速度差および車間距離を考慮してランダムブレーキ確率  $1-p_i$  を決定する。

if ( $g_i \geq G$ )

$$p_i = P_1 \quad \dots(1)$$

if ( $g_i < G$ )

$$p_i = P_2 \quad \text{for } v_i^{(0)} < v_{i+1}^{(0)} \quad \dots(2)$$

$$p_i = P_3 \quad \text{for } v_i^{(0)} = v_{i+1}^{(0)} \quad \dots(3)$$

$$p_i = P_4 \quad \text{for } v_i^{(0)} > v_{i+1}^{(0)} \quad \dots(4)$$

但し、 $G$ はモデルパラメータである閾値、 $g_i$ と $p_i$ はそれぞれ自車と前方車両との車間距離、ランダムブレーキ確率である。 $v_i^{(0)}$ は自車の速度、 $v_{i+1}^{(0)}$ は前方車両の速度を示す。上式では、ランダムブレーキ確率の大小を車間距離で大きく2つにクラス分けしており、車間距離が短いときは、前方車両との速度差の関係により更に3つにクラス分けする。 $P_1 > P_2 > P_3 > P_4$ を仮定するので、車間距離が短く、前方車両より速い場合ほどランダムブレーキが発動されやすい(確率  $1-p_i$  でランダムブレーキが発動するため)。これにより、S-NFSモデルに見られた2つの問題点、すなわち先行車

に衝突するように急減速する非現実的減速ダイナミクスと、3 相交通流理論 (Kernorら[6]) でいうsynchronized flowが適切に再現されていない点が解消されるという。

改良 S-NFS モデルの1時間ステップにおける漸化式表現は以下のように表される。

**Rule 1.** “Acceleration”

$$v_i^{(1)} = \min\{V_{\max}, v_i^{(0)} + 1\} \quad \dots(5)$$

(only if  $g_i \geq G \cup v_i^{(0)} \leq v_{i+1}^{(0)}$  then Rule 1 is applied)

**Rule 2.** “Slow-to-start”

$$v_i^{(2)} = \min\{v_i^{(1)}, x_{i+S}^{t-1} - x_i^{t-1} - s_i\} \quad \dots(6)$$

(only if  $\text{rand}(0 \leq q)$  then Rule 2 is applied)

and (if  $\text{rand}(0 \leq r)$  then  $s=S$  else  $s=1$ ).

**Rule 3.** “Perspective (Quick start)”

$$v_i^{(3)} = \min\{v_i^{(2)}, x_{i+S}^t - x_i^t - s_i\} \quad \dots(7)$$

**Rule 4.** “Random brake”

$$v_i^{(4)} = \max\{1, v_i^{(3)} - 1\} \quad \dots(8)$$

(if  $\text{rand}(0 < 1-p_i)$  then Rule 4 is applied).

**Rule 5.** “Avoid collision”

$$v_i^{(5)} = \min\{v_i^{(4)}, x_{i+1}^t - x_i^t - 1 + v_{i+1}^{(4)}\} \quad \dots(9)$$

**Rule 6.** “Moving forward”

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{(5)} \quad \dots(10)$$

但し、 $x_i^t$ は時刻  $t$ における番号  $i$ の車両位置、 $v_i^{(0)}$ は現在速度 ( $= x_i^t - x_i^{t-1}$ )、 $V_{\max}$ は最高速度、 $s_i$ は見通し台数である。本稿では各式についてパラレルアップデートを採用する。また、互いに独立な確率  $p_i$ 、 $q$ 、 $r$ を設定し、確率  $1-p_i$ で (8) 式、確率  $q$ で (6) 式の更新ルールを適用、確率  $r$ で  $s=S$ 、確率  $1-r$ で  $s=1$  とする。

### 2.2 車線変更モデル

車線変更モデルは Kukida ら[6]の開発したモデルを用いる。インセンティブ基準と安全基準を以下で付与する。

**インセンティブ基準；**

$$gap_p^f \leq v_i^{(p)} - v_{i+1}^{(p)} \cap gap_n^f > v_i^{(p)} - v_{i+1}^{(n)} \quad \dots(11)$$

**安全基準；**

$$gap_n^b \geq v_{i-1}^{(n)} - v_i^{(p)} \quad \dots(12)$$

ここで  $gap_p^f$  は前方車両との車間距離、 $gap_n^f$  は車線変更した場合の前方車両との車間距離、 $gap_n^b$  は車線変更した場合の後続車両との車間距離を表しており  $v_i^{(p)}$  は自車の速度を表している。また  $v_{i+1}^{(p)}$  は先行車両の速度、 $v_{i+1}^{(n)}$  は車線変更した時の先行車両の速度、 $v_{i-1}^{(n)}$  は車線変更した時の後続車両の速度を表している。隣に車両が無く、これらの条件を同時に満たした車両は確率  $P_{LC}$  で車線変更を行う。

### 2.3 実験条件

車両エージェントは、常に車線変更をすることなく走る協調戦略 (Cooperation, C戦略) と車線変更を行いなが

ら走行する裏切り戦略 (Defect, D戦略) のどちらかの戦略を有すると仮定する. D戦略を持つエージェント

(D-agents) は(11), (12)式で述べた条件に従って車線変更を行う. 渋滞が生じる手前の比較的高密度の流動状況下ではD-agentsによる車線変更が流れに擾乱を惹起して著しい渋滞を引き起こすことが想像される. その場合, 社会効率 (フラックスで定義) は低下するがD-agents自身の利得 (D-agentsの平均速度で定義) がC戦略を持つエージェント (C-agents) のそれよりも高ければ, D戦略を採用するインセンティブが存在し, 皆が車線変更することなく秩序だって走行する (全員がC戦略を採用) という社会的互恵関係は崩壊するだろう. 本稿では一連の数値実験により, 全エージェント中のC-agentsの比 (協調率 $P_c$ ) および系への車両エージェント流入パラメータ $\alpha$ ,  $\beta$ を変化させながら流動状態を解析することで, 社会ダイナミクスの均衡点において協調戦略が生き残り得るのか, 或いは強いジレンマ性が存在してC戦略は淘汰されてしまうのかを数理的に解明していく. システムは2車線系開放系境界条件を扱う. 1 time step中のシステムのアップデートは以下のとおりである.

- (i) 車両は各車線の流入部に流入確率 $\alpha$ で生成される. その戦略は協調率 $P_c$ でC戦略を,  $1-P_c$ でD戦略をとる.
- (ii) D-agentsは車線変更条件に従い, 車線変更を実行する.
- (iii) すべての車両のランダムブレーキ確率を決定する. ((1)~(4)式)
- (iv) すべての車両の速度を計算する. ((5)~(9)式)
- (v) アップデートする. このとき, 流出確率 $\beta$ でシステムから流出する. ((10)式)

前出パラメータを $q=0.99$ ,  $r=0.99$ ,  $S=2$ ,  $V_{max}=5$ ,  $P_1=0.999$ ,  $P_2=0.99$ ,  $P_3=0.98$ ,  $P_4=0.01$ ,  $G=15$ ,  $P_{LC}=1.0$ , システム長 $L=500$ とする.

$\alpha$ 及び $\beta$ を0から1まで0.1ずつ変化させ, 各 $\alpha$ ,  $\beta$ ごとに $P_c$ を0から1まで0.1ずつ変化させて流れ場解析を行う. 十分に流れが発達した3000step以降, 測定期間500stepごとに密度, 車両エージェント平均の速度を計量して(100アンサンブル平均して), 解析対象とした. 社会効率をあらわすフラックスは系内全エージェントの平均速度と密度の積で計測する.

### 3 結果及び考察

Fig.1にはジレンマクラスごとに色分けした基本図を, Fig.2には各 $\alpha$ ,  $\beta$ におけるFluxの相図をそれぞれ示す.

$\alpha$ ,  $\beta$ の高い領域において,  $P_c=1$ の方が $P_c=0$ よりも高いフラックスを示していることがわかる. これは車線変更を許容することで系に擾乱が加わり, メタ安定相の維持が

困難となることに起因している.

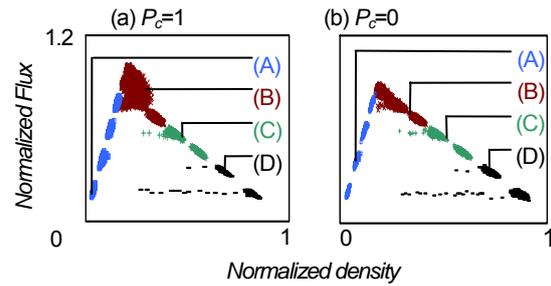


Fig.1 Fundamental diagrams. Four colors (blue, brown, green and black) are representative points of Dilemma-class “A”, “B”, “C” and “D” phases as shown in Fig.3.

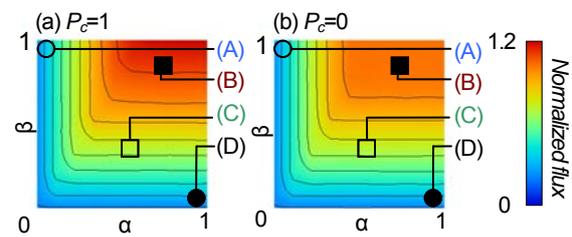


Fig.2 Contour showing the normalized flux to each  $\alpha$  and  $\beta$ . Four symbols (open and closed circles, open and closed squares) are representative points of Dilemma-class “A” ( $\alpha=0.1, \beta=1.0$ ), Dilemma-class “D” ( $\alpha=1.0, \beta=0.1$ ), Dilemma-class “C” ( $\alpha=0.6, \beta=0.4$ ), and Dilemma-class “B” ( $\alpha=0.8, \beta=0.9$ ) phases as shown in Fig.3.

以下では, 車線変更により発生するボトルネック効果について解析する. Fig.3に特定の $\alpha$ ,  $\beta$ について利得構造関数, 各戦略の利得および社会効率と $P_c$ の関係を示した. この図は多人数ゲームの利得構造関数と同様に読めばよく, ある $P_c$ においてD-agentsの利得 (平均速度) がC-agentsの利得よりも高ければD戦略が増える向きに, 低ければC戦略が増える向きに社会ダイナミクスが進化することを意味する. 各戦略の利得構造関数の極小値がダイナミクスの均衡点を表し, これと社会効率最大点との関係から, ジレンマのクラス分類が可能である. Fig.3に示した4つのパネルは, 本解析で確認された異なる4つのジレンマクラスにおける代表点における利得構造である.

Fig.3(A)では,  $\alpha$ が低く,  $\beta$ が高い領域の利得構造を示す. すべての $P_c$ においてD-agentsの利得の方がC-agentsの利得よりも高いため, 社会のダイナミクスは全員がD戦略 ( $P_c=0$ ) に吸引される. しかしこの流れ場では社会効率は $P_c$ に依存しない. Yamauchiら[1]やNakataら[2]は社会効率が $P_c$ に依存しないゲーム構造をTrivial gameの構造としていたが, Trivial gameは本来, 均衡点と社会効率の最大点が一致するゲームクラスであるため, 本稿ではこのような構造をNeutral gameと呼びTrivial Gameと区別する. 従って, この流れ場はD-dominate Neutral gameの構造を持つ.

Fig.3(B)では、 $\alpha$ が高く、 $\beta$ も高い領域の利得構造を示す。すべての $P_c$ においてD-agentsの利得の方がC-agentsの利得よりも高いため、社会のダイナミクスは全員がD戦略( $P_c=0$ )に吸引される。一方社会効率は全員がC戦略( $P_c=1$ )で最大となる。従ってこの流れ場はジレンマを持つ Prisoner's Dilemma gameの構造を持つ。この流れ場は、元来、メタ安定や高密度相の流動相にあるため、車線変更条件を満たす状態が生じやすい。Fig.1に似たように全ドライバーがみな協調的であるとの理想的状況下では高フラックスのメタ安定、高密度相を維持できるが、現実には裏切り戦略へのインセンティブにより、高頻な車線変更を招来して、壊されてしまう。その結果、社会効率は押し下げられる。通常の多人数ゲームにおけるPD構造では、C戦略、D戦略の平均利得は協調率の低下とともに減少するが、本結果では逆に協調率ゼロで最大、1で最小となっている。これは、戦略の平均利得を平均速度に採っているからであり、上記したゲーム構造の本質とは無関係である。しかし、同協調率でCとD戦略の平均利得の大小を判定するには平均速度はよい指標になっており、他に代替え出来る適切な特性パラメータもないので本研究では平均速度を各戦略の平均利得と定義した。

Fig.3(C)は、 $\alpha$ が高く、 $\beta$ はFig.(B)よりは低くFig.3(D)よりは高い領域における代表的利得構造である。すべての $P_c$ においてD-agentsの利得の方がC-agentsの利得よりも高いため、社会のダイナミクスは全員がD戦略( $P_c=0$ )に吸引される。一方社会効率は全員がD戦略( $P_c=0$ )で最大となる。従ってこの流れ場はD-dominate Trivial gameの構造を持つ。この流れ場では、(B)に比べ、 $\beta$ が小さいことが利いて、系内で部分的にstop-and-go波が生じ、流動状況は悪化している。このような流れ場では、車線変更をすることが、ローカルに生じた隙間を埋めて、僅かではあるが前方移動に寄与し、D戦略支配でありながらTrivialなゲーム構造を持つとの結果に繋がったといえる。先行研究の結果では、車線変更をすることがフラックスを増加させる効果は見られなかった。

Fig.3(D)では、 $\alpha$ が高く、 $\beta$ が低い領域の利得構造を示す。すべての $P_c$ においてD-agentsの利得の方がC-agentsの利得よりも高いため、社会のダイナミクスは全員がD戦略( $P_c=0$ )に吸引される。一方社会効率は $P_c$ に依存しない。従ってD-dominate Neutral gameの構造を持つ。この流れ場では平均速度がきわめて小さく、渋滞相となっている。前記の(C)と比べると、より深刻な渋滞が起きている流動相では、車線変更をする方がしない車両より僅かに平均速度は速くなるが、皆が車線変更をしたとて社会全体の効率向上には殆ど結びつかないと言える。

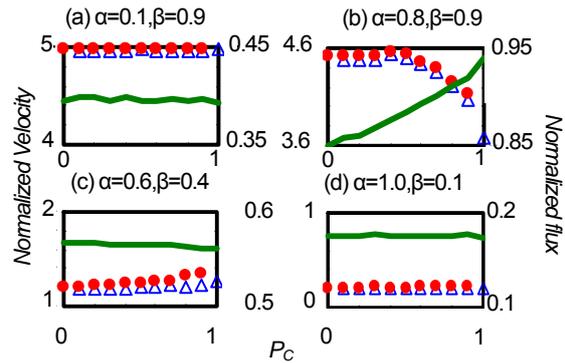


Fig.3. Payoff structure functions of both C(triangles) and D(circles)-agents with social average(line). The payoff implies normalized velocity of agents. The social average indicates a normalized flux of the traffic. (A)  $\alpha=0.1, \beta=1.0$ , (B)  $\alpha=0.8, \beta=0.9$ , (C)  $\alpha=0.6, \beta=0.4$ , (D)  $\alpha=1.0, \beta=0.1$ .

## 4 結語

車線変更の背後に潜むジレンマ構造を解明するために、一般的な2車線系の道路を想定し、開放系境界条件下で改良 S-NFS モデルを基にした CA モデルを適用して流れ場解析を行った。その結果、車線変更の影響により、流れ場の様相によって異なるジレンマ構造が潜んでいることが分かった。概してフラックスの大きい領域ではPDゲームの構造が見られ、フラックス小さい領域ではジレンマのない構造が見られた。これは先行研究とも一致する。しかし本研究では、ローカルに渋滞が生じはじめるような流動相下にあつては、車線変更をすることが寧ろ社会効率を上昇させる効果を示し、先行研究には見られなかったD-dominate Trivial Gameの構造が観られた。

本稿で扱った開放系境界条件下では流出部でボトルネックが生じることになる。車線変更のボトルネック効果のみを厳密に解析するためには周期境界条件で解析する必要がある。

## 参考文献

- [1] Yamauchi.A., Tanimoto.J., Hagishima.A., Sagara.H.; Dilemma Game Structure Observed in Traffic Flow at a 2-to-1 Lane Junction, *Physical Review E* 79, 036104, 2009.
- [2] Nakata.M., Yamauchi.A., Tanimoto.J., Hagishima.A; Dilemma game structure hidden in traffic flow at a bottleneck due to a 2 into 1 lane junction, *Physica A* 389, 5353-5361, 2010
- [3] Sakai.S, Nishinari.K, Iida.S; A new stochastic cellular automaton model on traffic flow and jamming phase transition, *Transactions of the Japan Society for Industrial and Applied Mathematics* 16(4), 371-384, 2006.
- [4] Kokubo.S.; Tanimoto.J.; Hagishima.A.; A new Cellular Automata Model including a decelerating damping effect to reproduce Kerner's three-phase theory, *Physica A* 390(4), 561 -568, 2011.
- [5] Kukida.S.; Tanimoto.J.; Hagishima.A.; Analysis of the influence of lane changing on traffic-flow dynamics based on the cellular automaton model, *International Journal of Modern Physics C* 22(3), 1-11, 2011.
- [6] B.S.Kerner, S.L.Klenov; Phase transition in traffic flow on multilane roads, *Physical Review E* 80, 056101, 2009.