

# 車線変更と車線変更に対するリアクションを許した場合の 交通流ジレンマ構造の解析

岩村泰郎<sup>1</sup>, 谷本潤<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

本研究では、社会的ジレンマ構造が現実的な交通流に見られるかどうかという問題を調査した。そのため、運転者が他の車両の前に車線を変更しようとした際、割り込まれる車両がその車線変更を妨げ、または幫助する行動をとる系を想定し、そのような交通流を再現するための新しいモデルを構築した。我々のモデルは、(1) 実際の交通流を再現するセルオートマトンと、(2) 運転者の意思決定プロセスをシミュレートするための進化的ゲーム理論の2つの部分からなる。シミュレーションの結果、交通密度に応じて、チキンや囚人のジレンマのマルチプレイヤーゲームのような社会的ジレンマが出現することが示された。このことは、社会的ジレンマが現実における交通流の背後に潜むことを暗示する。

## Complex traffic flow that allows lane-changing and hampering intrinsically contains social-dilemma structures

Yoshiro Iwamura<sup>1</sup>, Jun Tanimoto<sup>1</sup>

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

## Abstract

We investigate the interesting question of whether social-dilemma structures can be found in realistic traffic flows. To this end, we have built a new model to reproduce traffic flow when an intentional driver attempts to change lanes before other vehicles, hampering others' lane changes and decreasing their payoff. Our model consists of two parts: (1) a cellular automaton that emulates real traffic flow and (2) evolutionary game theory to simulate a driver's decision-making process. Numerical results indicate that a social dilemma—like a multi-player game of Chicken or a Prisoner's Dilemma game—emerges, depending on the traffic phase. This finding implies that social dilemmas underlie realistic traffic flows, which have so far been treated by applied mathematics simply using fluid dynamics.

## 1 緒言

交通渋滞は、輸送効率の低下、車両が滞留することで引き起こされる大気汚染などにより社会的損失を引き起こしている。交通渋滞緩和は社会的要請の大きな今日的課題である。

著者らは、交通流動が道路という有限の資源を奪い合う、資源割り当て問題の様相を呈すという問題意識から、特に車線変更に着目して2車線狭窄部や通常2車線系の流れ場に社会ジレンマが潜在していることを明らかにしてきた[1-3]。一方、藤木らはより実際に近い交通流れ場を表現するため、車線変更を行う車両に対するリアクションを可能とする系を考案した[4]。

本稿では、車両エージェントの駆動ダイナミクスにS-NFSモデル(Sasakiら[5])のシンクロ流再現性を向上させたRevised S-NFSモデル[6]を適用し、Kukidaら[7]の開発した車線変更モデルを組み込んだ上で、より現実的な車線変更の表現を主眼とし、上記[4]を参考に車線変更に対する後続車両のリアクション(自らの加速による妨害または自らの減速による幫助)のサブモデ

ルを組み込んだ系で計算機実験を行い、その背後にどのようなジレンマが潜在しているのかを調査した。これにより、密度ごとに異なるジレンマに対しより適切な緩和策を模索、提案することが可能となった。

## 2 モデル

### 2.1 Revised S-NFS model

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[6]のRevised S-NFSモデルを適用する。Revised S-NFSモデルとは、ランダムブレーキ確率を車間距離や先行車両との速度差により変化させる機構をSakaiら[5]によるS-NFSモデルに付加したモデルであり、S-NFSモデルに見られた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が改善され、3相交通流理論(Kernerら[8])でいうsynchronized flowが適切に再現される特性を持つ。

Revised S-NFSモデルは以下の6ルールで構成される。

#### Rule 1. “加速”

$$v_i^{(1)} = \min [V_{max}, v_i^{(0)} + 1] \quad (A1)$$

( $g_i \geq G \wedge v_i^{(0)} \leq v_{i+1}^{(0)}$ )が満たされた場合のみ.

$g_i$ は自車両前方の車間距離

**Rule 2.** “スロースタート” (慣性を表現)

$$v_i^{(2)} = \min[v_i^{(1)}, x_{i+s}^{t-1} - x_i^{t-1} - s_i] \quad (A2)$$

( $q$  の確率で適用.  $r$  の確率で  $s=S$ , 余事象  $s=1$ .)

( $x$  は対応する時間 (右上の添え字)、車両 (右下の添え字. 自車両  $i$ , 前方  $i+1$ ) の座標. 以下も同様)

**Rule 3.** “減速” (前方車両を追い越さない)

$$v_i^{(3)} = \min[v_i^{(2)}, x_{i+s}^t - s_i] \quad (A3)$$

**Rule 4.** “ランダムブレーキ” (確率的に速度-1)

$$v_i^{(4)} = \max[1, v_i^{(3)} - 1] \quad (A4)$$

( $1-p_i$  の確率で適用.  $p_i$  については以下. 各確率の定義は 2.5 実験方法を参照. 距離が大きい, 前方車両の速度が自車両より大きい場合低確率に, そうでなければ高確率となる)

if( $g_i \geq G$ )

$$p_i = P_1 \quad (A5-1)$$

if( $g_i < G$ )

$$p_i = P_2 \quad \text{for } v_i^{(0)} < v_{i+1}^{(0)} \quad (A5-2)$$

$$p_i = P_3 \quad \text{for } v_i^{(0)} = v_{i+1}^{(0)} \quad (A5-3)$$

$$p_i = P_4 \quad \text{for } v_i^{(0)} > v_{i+1}^{(0)}. \quad (A5-4)$$

**Rule 5.** “衝突回避”

$$v_i^{(5)} = \min[v_i^{(4)}, x_{i+1}^t - x_i^t - 1 + v_{i+1}^{(4)}] \quad (A6)$$

**Rule 6.** “前進”

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{(5)}, \quad (A7)$$

## 2.2 基本となる車線変更

後続車両によるリアクションを含んだ車線変更ルールについて述べる前に, 基本となる, リアクションを想定しない従来の系の車線変更ルールについて述べる.

リアクションを想定しない基本的な系の場合, エージェントの有する戦略は, 車線変更を試みるか否かの 2 戦略となる. 車線変更を試みる車両は, Revised S-NFS モデルの Rule 4 直後, 後述のインセンティブ基準が満たされた場合に車線変更を試みる. 車線変更を試みた車両は安全基準を確認し, 安全基準が満たされた場合に車線変更を実行する. Kukida ら[7]による車間距離と速度差を考慮したインセンティブ, 安全基準を示す.

**インセンティブ基準**

$$\begin{aligned} gap_p^f &\leq v_i^{(p)} - v_{i+1}^{(p)} \\ \wedge gap_n^f &> v_i^{(p)} - v_{i+1}^{(n)} \\ \wedge gap_n^f &> 0 \end{aligned} \quad \dots(1)$$

**安全基準**

$$gap_n^b \geq v_{i-1}^{(n)} - v_i^{(p)} \quad \dots(2)$$

( $gap$  は車間距離. 右上の添え字  $b$ :後方,  $f$ :前方, 右下の添え字  $p$ :自車線,  $n$ :隣接車線)

## 2.3 後続車両のリアクションを含む車線変更

本研究では, 上述の車線変更ルールに加えて, 車線変更の企画と実行の間に後続車両によるリアクションを想定している. そのため, この場合には, 車線変更を行うか否かの 2 戦略, リアクションにおいて加速するか減速するかの 2 戦略を夫々独立に選択する 4 戦略系 (戦略空間は{CA, CD, DA, DB})となる. 車線変更を行う車両の戦略は D(Defector), 車線変更を行わなければ C(Cooperator), リアクションで加速すれば A(Accelerate), 減速すれば B(Brake)の戦略を持つ. 例えば, 車線変更を行いかつリアクション時に加速する車両の戦略は DA となる.

D 戦略を持つ車両は, まずインセンティブ基準(1)式をチェックし, 車線変更を試みる状態となる (ウインカーを出した状態). その後, 基本となる車線変更ルールと異なり, 後続車両によるリアクションが行われる. このとき, 加速または減速のどちらかが後続車両の戦略 (A または B) に依存して選択される. 但し, このリアクションはウインカーを出した車両までの距離が ( $V_{max}+1$ )+1 (=5+1+1=7) 以下の時だけ起動される. 割り込まれる車両が A の場合にはその時点の自速度に+1を (場合によっては  $V_{max}+1$  を許容する), B の場合には自速度に-1 (停止車両は除く) する. 安全基準のチェックはそのあとに行われ, 速度差や距離に後続車両のリアクションの影響が考慮されることとなる. 以上の概略を纏めて図 1 に示す.

## 2.5 実験方法

本研究では, 各戦略の存在比を 0.1 刻みで制御し, 周期境界条件の Revised S-NFS モデル (パラレルアップデート) で数値シミュレーションを行った.

Revised S-NFS モデルの各モデルパラメータは以下のように設定した. スロースタート適用確率  $q=0.99$ , 見通し車台数が 2 台( $S=2$ )となる確率  $r=0.99$ , 最大見通し台数  $S=2$ , 普通車の最大速度  $Vmax=5$ , ランダムブレーキに拘わる確率パラメータ ;  $P_1=0.999, P_2=0.99, P_3=0.98, P_4=0.01$ , 車間距離に応じたランダムブレーキ処理の適用閾値  $G=15$  とする (その他の条件は[6]による).

また, システム長は  $L=500$  として, 車の台数を 100 台から 500 台まで 20 台ずつ増やし系内密度を制御しながら数値解析を行った. 各結果は 10000 ステップの助走期間を経たあとに設けた 100 ステップの測定期間から 1 試行のデータを採り, 独立な 100 試行のアンサンブル平均を解析には用いている.

## 3 結果

図 2 を参照されたい. 図 2 は 3 種類 5 パネルからなるデータ群である.

上段(a), (b), (c)は特徴的な 3 密度  $\rho=(a) 0.1, (b) 0.22, (c) 0.5$  における戦略空間を示している. 3 つの三角形はその面積が大きい順に  $CB=0.0, 0.5, 0.9$  の断面を示す. 図内の矢印はその点での (各戦略の平均速度を利得として換算した) レプリケータダイナミクスを, CA-DB-DA 平面の二次元方向に示したものである. すなわち, あ

る戦略比における各 4 戦略の平均利得（その戦略に属する車両の平均速度）を算出、4 戦略間の優劣により（各戦略の利得と 4 戦略平均利得との差）戦略比更新幅を求め、これをベクトルとして戦略空間に描いたものである。すべてのケースで CB は減少する。NE と書かれた円はナッシュ均衡(Nash Equilibrium)の座標を示している。コンターの色は社会平均利得を意味する流量を示すが、この最大点とナッシュ均衡とが不一致であるとジレンマが存在することを意味する。

本研究では 4 戦略の戦略空間でナッシュ均衡を探索するため、まずベクトルの長さが最小である点を検索、そこから周辺のベクトルを含めて戦略変化の方向を判断し疑似的に進化を行わせる方法をとっている。

パネル(d) はナッシュ均衡の戦略比における密度-流量関係 ( $q_{max}$ ,  $q_{min}$  はその戦略比における最大流量と最小流量) とジレンマに関する特性量を示している。青ライン  $\eta$  と紫ライン  $\kappa$  の (定義は軸参照)いずれも Nash 均衡と社会平均利得の不一致の程度、すなわちジレンマ強度 ([1-2], [9]) を意味しているが、 $\eta$  が最大流量で正規化されているのに対して、 $\kappa$  は最大-最小流量の差で正規化している。 $\kappa$  が 1 に近い値を示すのであれば、内部均衡に吸引される Chicken 型でなく Prisoner's Dilemma (PD) 型のジレンマを有していることを意味する。

パネル(e)は、ナッシュ均衡の戦略比における車線変更企画頻度と車線変更実行（企画したイベントのうち実際に車線変更できた）頻度を示す。

上段のコンターから、メタ安定が生じる、基本図の極大点付近で戦略による流量の変化が最も大きいことが分かる（パネル(b)）。これは潜在的にはこの領域でジレンマが最大となることを意味し、これが現れる領域と流れ場本来のもつメタ安定とが一致している（但し、ジレンマ強度が大きい領域とは言えない）。

一方、 $\eta$  と  $\kappa$  で評価するジレンマ強度は、メタ安定が生じるよりも高い密度域で大きくなっており、本研究の条件下では、高密度領域でより望ましい効率的な流

動状態からかけ離れた流れ場が社会均衡となる。

ここで強調しておきたいことは、メタ安定を与える密度では CA 支配（均衡において CA の戦略比が 1 となる状況）、すなわち車線変更を行わない戦略支配が最大流量（パネル(b)の流量最大点）を与えているのに対し、より高密度では CA 支配が最小流量を与えているということである。さらに、メタ安定を与える密度では複数の戦略が併存平衡する Chicken 的なジレンマとなるのに対し、高密度領域では最小流量を与える CA 支配の状態が均衡となる、これは PD 的なジレンマ構造と云うことが出来る。

このことは、以下のように予想される。高密度領域では 2 車線の車両密度を少しでも平準化し、少しでも車両を前進させることが望ましいため、局所的な車両の集中を車線変更によって緩和することが求められる。けれど、支配戦略となる CA は、妨害的な加速をして、本来は望ましい車線変更を封じてしまうとともに、妨害者（CA 戦略エージェント）自らの利得を引き上げることになるため、社会利得最大とはかけ離れた CA 支配の Nash 均衡が出現してしまう。自ら車線変更せず、他者の車線変更を邪魔する戦略が増えることで、適度な車線変更により特に高い密度が局所的に生じるのを緩和する可能性を排除され、道路資源の有効な活用が封じられてしまう。

#### 4 結語

本研究では、Revised S-NFS モデルで記述される交通流の前進モデルに車線変更、それに対するリアクションの 2 つのサブモデルを組み込み、戦略比、密度を制御した計算機実験によって、車線変更する車両とそれに応じる車両との 2 体問題を考慮した流れ場に潜在する社会ジレンマの構造を調べた。その結果、ジレンマフリーとなる自由相とは異なり、潜在的には大きなジレンマを持つメタ安定相では内部均衡を有する Chicken 型ジレンマが、高密度相では寧ろ車線変更を封じてしまう状況へと吸引される PD 型ジレンマが存在することがわかった。

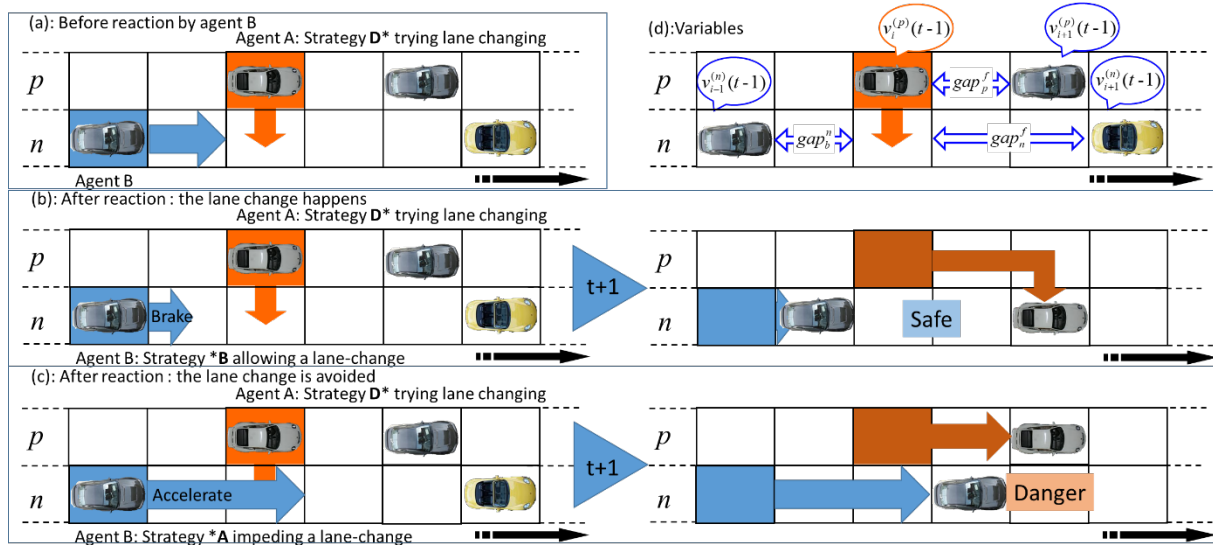


図 1：車線変更とリアクションの概略 (a)リアクション前 (b)後続車両が減速した場合 (c)後続車両が加速した場合 (d)基準式に用いる変数

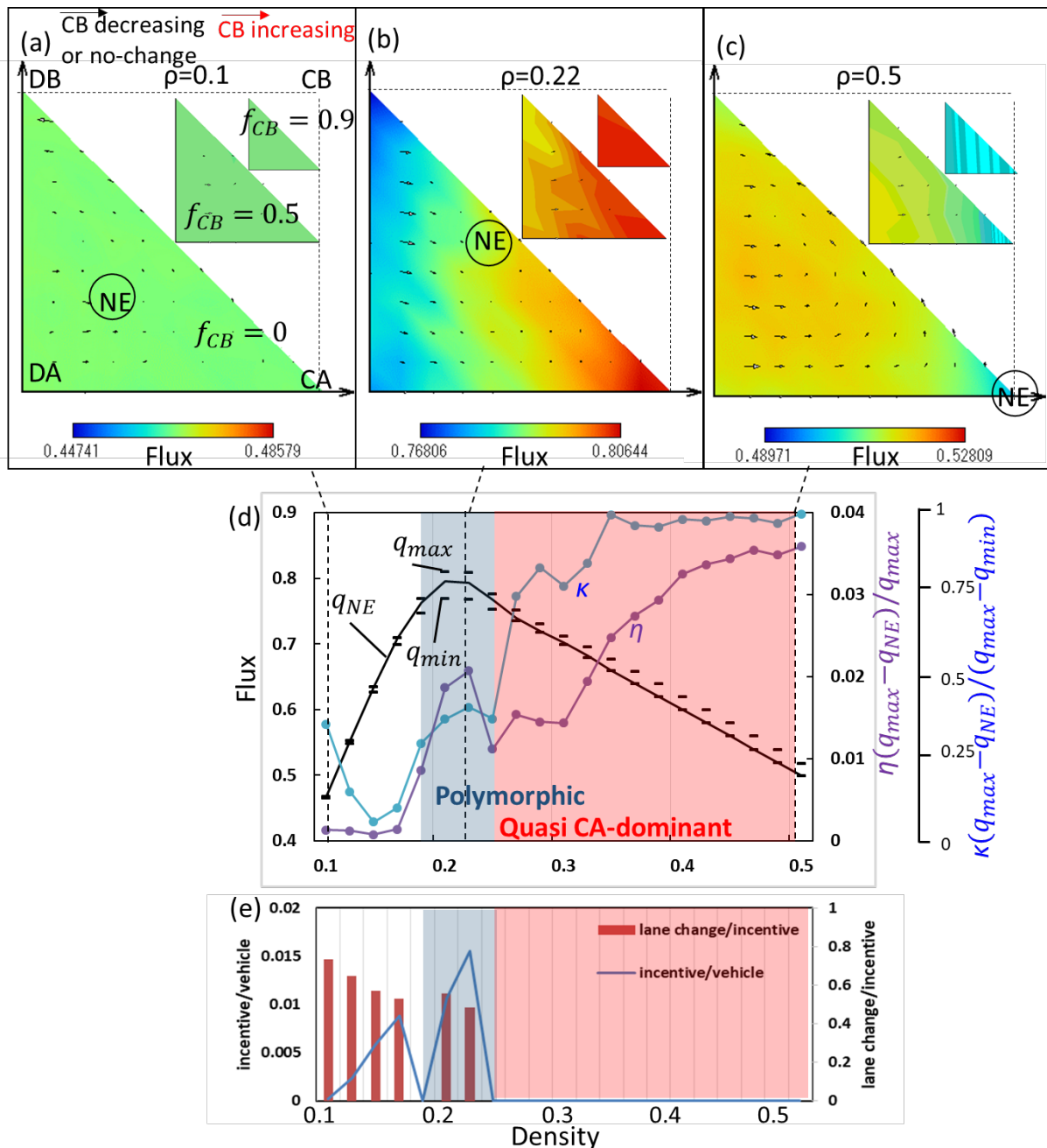


図 2 : 上段(a)(b)(c)特徴的な 3 密度の戦略空間

中段(d)ナッシュ均衡の流量を用いた基本図およびジレンマ強度

下段(e)車線変更企画頻度および車線変更実行頻度

#### 謝辞

本研究の一部は大林財団, 柿原科学技術財団による。記して謝意を表する

#### 参考文献

- [1] Nakata.M., Yamauchi.A., Tanimoto.J., Hagishima.A; *Physica A*,389,5353-5361,2010
- [2] Yamauchi.A., Tanimoto.J., Hagishima.A., Sagara.H., *Phys Rev E*, 79, 036104, 2009
- [3] 莖田慎司, 谷本潤, 萩島理; *交通流のシミュレーションシンポジウム講演概要集* 2011
- [4] 藤木拓也, 谷本潤, 萩島理, 池谷直樹; *交通流のシミュレーションシンポジウム講演概要集* 2012

#### ユレーションシンポジウム講演概要集 2012

- [5] Sakai.S, Nishinari.K, Iida.S, *Transactions of the Japan Society for Industrial and Applied Mathematics* 16(4), 371-384,2006.
- [6] Kokubo.S.,Tanimoto.J.,Hagishima.A., *Physica A*, 390(4), 561-568,2011
- [7] Kukida.S.,Tanimoto.J., Hagishima.A., *International Modern Physics C*, 22(3), 1-11, 2011.
- [8] B.S.Kerner, S.L.Klenov, *Physical Review E*, 80, 056101, 2009
- [9] 中村光佑, 谷本潤, 萩島理, 池谷直樹, 藤木拓也, 莖田慎司; *交通流のシミュレーションシンポジウム講演概要集* 2013