

# 非一様な粒子が混在した二車線系交通流における 車線変更条件の提案と非対称性の再現

藤木拓也<sup>1</sup>, 谷本潤<sup>2</sup>, 萩島理<sup>2</sup>, 池谷直樹<sup>2</sup>, 莖田慎司<sup>1</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

交通流実測で観測される車線占有率の非対称性を再現する試みとして、性質の異なる車両の混在に着目した新たな車線変更ルールを提案し、セルオートマタを用いた数値シミュレーションを行った。モデルでは車線変更を行わず走行車線を巡航する大型車と追い越しのための車線変更を行う普通車の混在した流れ場を想定した。その上で走行車線に十分な車間距離があれば追い越し車線にはとどまらないこと、大型車の後続車は追い越しのため通常より早いタイミングで車線変更を行うことを考慮した車線変更を従来の走行-追い越し車線の差異を区別しない対称モデルに加味することで現実に観測される車線占有率の非対称現象を再現することが出来た。

## Cellular Automaton model in two-lane traffic flow with asymmetric lane change rules considering the heterogeneous particles

Takuya Fujiki<sup>1</sup>, Jun Tanimoto<sup>1</sup>, Aya Hagishima<sup>1</sup>, Naoki Ikegaya<sup>1</sup>, Shinji Kukida<sup>1</sup>

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

## Abstract

In the real 2-lane traffic flow, it has been observed that lane occupied fractions by vehicles in an ordinal running lane and an over-passing lane show asymmetric tendency, where we can see high fraction of over-passing in middle density region, which is called “inversion phenomenon”, between low density region featured with high fraction of ordinal running lane and high density region with equal fractions of the two. To reproduce this, we establish a new Cellular Automata (CA) model implemented lane-changing mechanism brought by mixed flow. The model bases on Revised S-NFS model, where all possible aspects when realistic vehicles moving are considered in a stochastic framework. The sub-model for lane changing action, that we proposed this time, is derived from a new idea, where two kinds of vehicles; high speed and low speed in terms of max speed are running, and only the former, indicating an astute and small-compact car vis-à-vis a dull truck or a slack bus, is allowed to do with lane-changing. Considering the conventional lane-changing mechanism expressed with incentive and safe criteria, and additionally considering the particular mechanism that a high max-speed car on the process of over-passing with staying in the over-pass lane tends to back to the ordinal running lane as long as she can keep a certain long heading distance to guarantee comfortable running, we are successfully able to reproduce the “inversion phenomenon” as well as a plausible relation of lane-changing probability vs. density.

## 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、資源割り当て問題の様相を呈すという問題意識から、特に車線変更という行動に着目して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]。しかし、これまでの前提では、走行車線と追い越

し車線の区別はなかった。実際の2車線交通流においては、それらの違いは無視できないものであり、社会ジレンマ構造に関する研究を拡張していく上で、車線変更の非対称性を考慮した交通流モデルの構築が不可欠である。

実際の2車線交通流の特徴を実測調査により明らかにした先賢の観測結果[4,5]をFig.1に示す。これら既往実測結果を要すれば、中密度領域において追い越し車

線により多くの車両が集中する、いわゆる車線占有率の逆転現象(以下、非対称性)が観測されること(Fig.1(a)), 高流量となる中密度域での車線変更生起頻度が高くなること(Fig.1(b))にある. 日本では法規により走行車線と追い越し車線が厳格に分けられているが, 通常は走行車線を走り, 追い越し時に追い越し車線を走行することは一般的慣習だろうから, 前記の車線占有率の逆転現象とは, 何らかの機構により追い越し車線へ移動した車両が, そこに滞留している現象が一般的に起きていることを示唆している. その一つとして性質の異なる車両による混合流の影響があり得るのではないかと. 最高速度が相対的に小さいバスやトラック等の大型車は基本的には走行車線を走り, 一般の高速車はそれを避けるように車線変更を行使することは, 一般に観察される状況だろう. 既往の交通流モデル研究のいくつかは, このことを考慮し非対称性の再現を試みている. Nagel ら[6]はドイツ特有の交通法に則った非対称車線変更ルールを設定し, 低速車と高速車の混合流下で非対称現象を再現している. また, Chowdhury ら[7]は, 混合流下の車線変更モデルを提示しているが, 実測の特性を旨く再現できているとは言い難い.

本稿では, 車両エージェントの駆動ダイナミクスに, Sakai ら[8]の S-NFS モデルのシンクロ流再現性を向上させた Revised S-NFS モデル[9]を適用し, Kukida ら[10]の開発した車線変更モデルを組み込んだ上で, 混合流下の車線変更の非対称性を加味することで, 上記した2点の特徴, すなわち Fig.1 に示した実測の特性を再現できることを報じる.

## 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[9]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[8]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[11])でいう synchronized flow が適切に再現される特性を持つ.

### 2.2 低速車の定義

混合流を前提とし, 高速車に対して, 相対最高速度の小さい低速車を定義する. これら低速車両は暗にバスやトラックといった大型車を想定していることから, 低速車は走行車線上のみを走行し, Revised S-NFS モデルにおける後続車の見通しを悪くする性質を有すると仮定した.

### 2.3 基本となる車線変更ルール

非対称ルールを定義する前に基本となる走行-追い越し車線を区別しない対称な車線変更ルールについて説明する. 本稿では Kukida ら[10]による速度差を考慮した車線変更ルールに改良を加えた以下のルールを適用する. 車線変更の生起に関わるインセンティブ基準, 安全基準は以下の通りである. 式中の各変数は Fig.2 を参照.

### インセンティブ基準

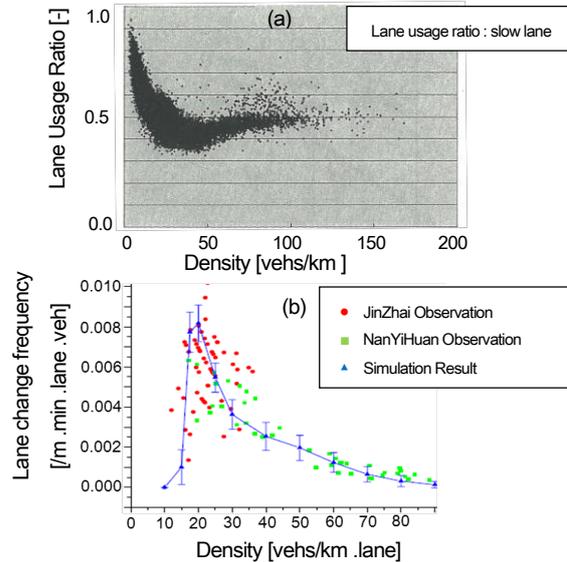
$$gap_p^f \leq v_i^{(p)} - v_{i+1}^{(p)}$$

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

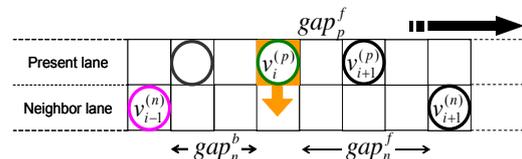
$$\wedge gap_n^f > 0$$

### 安全基準

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



**Fig.1** Traffic measurement in reality as a function of density. (a)Upper: Lane usage diagram(slow lane) data from 西成[5], (b)Lower; lane change frequency: data from Wei et al [6]



**Fig.2** The situation around the focal car  $i$  which is trying to lane change. The green granular indicates the focal vehicle trying to lane change, the pink one means the vehicle who is intruded by the focal agent.

### 2.4 非対称車線変更ルール

まず追い越し車線(Fast lane)から走行車線(Slow lane)への車線変更ルールについて説明する. 原則的に走行車線を巡航すると仮定し, 追い越し車線に留まる必要が無いとき走行車線に戻るルールを定義する. 本稿では, 「追い越し車線に留まる必要が無い」とは走行車線に戻ったあとに現在速度を維持することが出来る状態と考え, それには走行車線側の先行車との車間距離が十分に広いことが必要であることから, 以下のようなルールを定義した. 以後, 本稿では, これを Rule(1)と呼ぶこととする.

#### Fast lane to Slow lane [Rule (1)]

$$\text{if} ( gap_n^f \geq k \cdot Vmax )$$

安全基準のみを確認して車線変更

Else

インセンティブ・安全基準を確認 (基本ルール)

ここで、 $k$  とは走行車線に戻る際に必要な車間距離を増減させるパラメータ、 $V_{max}$  とは高速車の最高速度を夫々表す。次に走行車線から追い越し車線への車線変更ルールについて説明する。走行車線には低速車が走行しており、高速車はランダムブレーキによる減速を避けるため車線変更を企画すると仮定する。これを Rule(2) とする。

### Slow lane to Fast lane [Rule (2)]

if ( $i + 1 = Car_A \wedge gap_p^f \leq G \wedge gap_p^f \geq v_i^{(p)}$ )

安全基準のみを確認

Else

インセンティブ・安全基準を確認 (基本ルール)

ここで、 $G$  とは車間距離に応じたランダムブレーキ処理の適用閾値を示す[9]。以上が本稿で提案する非対称車線変更ルールである。提案車線変更フローチャートを Fig.3 に示す。

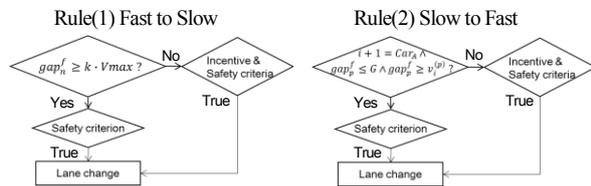


Fig.3 Flow chart of algorithms of each asymmetric lane change rules.

## 2.5 実験方法

車両エージェントには、低速の大型車 ( $Car_A$ ) と高速の普通車 ( $Car_B$ ) の二種を想定する。さらに、両車両の存在比を  $F_A$  で制御して、周期境界条件の Revised S-NFS モデルで数値シミュレーションを行う。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  $r=1.0$  (ただし  $Car_A$  の後続車となった  $Car_B$  は 50% の確率で  $S=1$  となる)、最大見通し台数  $S=2$ 、普通車の最大速度  $V_{max}=5$ 、ランダムブレーキに拘わる確率パラメータ ;  $P_1=0.99, P_2=0.99, P_3=0.98, P_4=0.01$ 、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[9]による)。また、システム長は  $L=500$  として、車の台数を 10 台から 500 台まで 10 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。非対称ルールに用いる各パラメータは  $F_A=0.1\sim 0.4, k=1\sim 4, V_{max}(A)=1\sim 4$  の全ての場合に設定、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 500 ステップの測定期間から算出している。

## 3 結果

### 3.1 非対称車線変更条件なしの場合

まず、大型車の存在の影響を考察するため、追い越しから走行車線、走行車線からの追い越し車線への車線変更はどちらも式(1)と式(2)により生起する対称条件を検討する。 $F_A=0.1, V_{max}(A)=4$  の設定で走行車線に大型車を存在させたときの結果を Fig.4 に示す。比較のため、ランダムブレーキ確率を  $p=0.99$  に固定した場合の

S-NFS モデルを使った結果も示す。結果から走行車線の大型車の存在により、低密度領域で多くの車が追い越し車線に滞留していることが確認される。これは走行車線側にいる高速車が大型車の影響で追い越し車線に移動し、そして追い越し車線には高速車だけが存在していることから走行車線に戻る車線変更は発生しないことに起因している。最高速度で巡行できる密度域では、大型車の存在が高速車を追い越し車線に移動させ滞留させる大きな要因になることが確認できた。

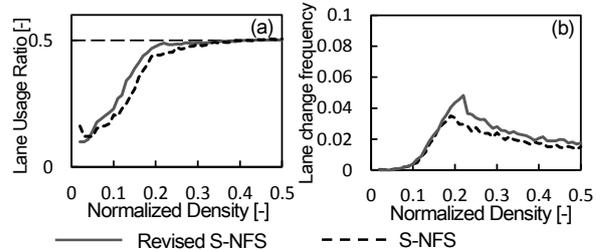


Fig.4 Simulation results with symmetric lane change rules and  $F_A=0.1 V_{max}(A)=4$ : (a) Lane usage ratio vs. normalized density (b) Lane change frequency vs. normalized density. Solid line: Revised S-NFS model. Dotted line: S-NFS model

また、S-NFS モデルによる速度更新の場合、Revised S-NFS モデルの比較と比べ、走行車線の車線占有率が小さくなっていることが分かる。以下では、速度更新モデルの違いが車線変更の生起にもたらす影響を考察する。まず S-NFS モデルでは車間距離が大きいつき、先行車の速度に合わせた減速は発生しないので、低密度では殆どの車両が自身の最高速度を保持する。Revised S-NFS モデルの場合、車間距離が  $G$  以下であれば先行車の速度に応じてランダムブレーキが発動されて速度調整が行われ、最高速度以下となる車両が増加する。この機構は、高速車しか存在しない追い越し車線でも、同様に作用するので、低密度で速度のバラつきを大きくすることにつながる。このことは、対称条件の式(1)と式(2)に則った、追い越し車線から走行車線への車線変更が、S-NFS モデルに比べて高頻度に生起することを示唆する。結果として、Revised S-NFS モデルの走行車線占有率は S-NFS モデルのそれより若干高くなることに繋がる。

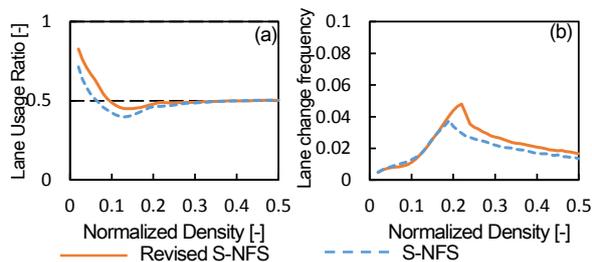
### 3.2 非対称車線変更条件有りの場合

#### 3.2.1 Rule(1)のみ

次に追い越し車線から走行車線への移動が生じやすくなる Rule(1)のみを適用した場合の走行車線の占有率と車線変更頻度を Fig.5 に示す。大型車に関するパラメータは前節と同様に  $F_A=0.1, V_{max}(A)=4, k=3$  とした。これらパラメータは車線占有率の実測結果を最もよく再現する組み合わせであった。

Fig.5(a)から低密度では走行車線に車両が集中していることに対して、中密度では実測で見られる非対称性が確認できる。Rule(1)は車間距離が大きい低密度で満たされやすく、密度が大きくなるにつれて満たされにくくなる構造である。前節で述べたように大型車が存在する状況下で対称条件だけを適用すると基本的に追い越し車線の車線占有率を高くする側に作用する。しかし、これに Rule(1)が加味されると、低密度では(高

速車の追い越し→走行車線への車線変更により) 走行車線の車線占有率が高くなる効果がマスクすることになるので, Fig.5 にみる結果になったものと考えられる。



**Fig.5** Simulation results including only asymmetric lane change rule from fast lane to slow lane [Rule(1)] and  $F_A=0.1$   $k=3$   $V_{max}(A)=4$ . (a) Lane usage ratio vs. normalized density (b) Lane change frequency vs. normalized density. Solid line: Revised S-NFS model. Dot line: S-NFS model

Revised S-FNS モデルと S-NFS モデルとを比較すると, 前節で述べた影響により, 比較的低密度にあつては前者では追い越し→走行車線の車線変更が相対的に後者より高頻度に起きて, 走行車線の車線占有率を押し上げる. 結果として, 前者による中密度域の車線占有率の非対称性は後者のそれより顕著には現れなくなる.

### 3.2.2 Rule(1)と Rule(2)

前節では対称条件に低密度で追い越し車線から走行車線への移動が多く発生する条件 Rule(1)を加味して, 車線占有率の非対称性が再現されることを示した. ただ, Fig.1 の実測結果では, 流れ場の条件に依存するだろうが, 最大で 7 割程度の車両が追い越し車線を走行していることから, 一層, 非対称性を顕著にする仕組みをモデルに組み込む必要がありそうだ. そこで, 本節では追い越し車線へ移動する強いインセンティブとなる Rule(2)をさらに Rule(1)に加えて適用した, その結果を Fig.6 に示す. 比較のため, Fig.5(a)の Revised S-NFS モデルによる速度更新から得られた結果を合わせて示す. 設定パラメータは前節同様.

Fig.6(a)から Rule(2)を更に加えた場合, 強い非対称性が現れていることが確認される. Rule(2)による車線変更は車間距離が小さくなる高密度域で生じなくなることから, 特に低~中密度にかけて走行→追い越し車線への車線変更を強く促進することになる. Fig.6(b)から明らかなように Rule(2)を加えることは低~中密度にかけて車線変更頻度の上昇をもたらす. このことにより, 車線占有率の非対称現象ピークとほぼ同じ密度域で車線変更頻度のピークも生起し, この傾向は Fig.1 で確認した既往の実測結果と整合的である.

しかし, Rule(1)と Rule(2)を加えたときの車線変更頻度にはローカルには 2 ピークが現れており, この点で実測結果に背馳しているようにも見える. これは先述の Rule(2)によるピークに加えて, 通常車線変更ルールによるピークが正規化密度 0.25 付近に現れることに起因している.

## 4 結語

走行車線のみを巡航する大型車と車線変更を行える普通車が混在する流れ場において, 車線の区別を考慮した非対称車線変更ルールを提案して, 数値解析を行った. その結果, 現実に観測される車線占有率の非対称性の再現が出来た.

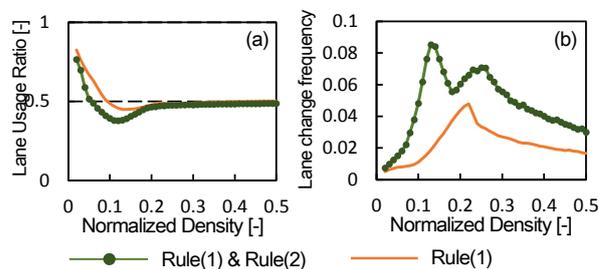
本モデルにおけるこの現象は, 最高速度の高低がある混合流であることが, 高速車の低速車追い越しを生起させることが前提条件になる. このことと, ①追い越し車線はあくまで追い越しのために一時的に滞留するレーンであるとの機構を考慮すること, ②走行車線にいる高速車は通常のインセンティブに加え, 大型車が先行車となったとき増加する減速の可能性を忌避して追い越し車線に移る機構を考慮したことが効いて, 中密度域における車線占有率の逆転現象が再現される.

### 謝辞

本研究の一部は科研費萌芽研究 (#25560165), ファイザーヘルス研究財団による. 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 Revs E*, 79, 036104, 2009
- [3] 荻田慎司, 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 17, 17-19, 2011
- [4] 西成活裕, 「渋滞学」 新潮社,2006
- [5] Wei.L., Wei-guo.S., Xiao-dong.L., Jian.M, *Physica A*, 392, 1142-1152,2013
- [6] Nagel.K., Wolf.D., Wagner.P., Simon.P, *Physical. Review. E* 58, 1425-1437, 1998
- [7] Chowdhury.D., Wolf.D.E., Schreckenberg.M, *Physica A*, 235, 417-439,1997
- [8] Sakai.S., Nishinari.K., Iida.S, *Transactions of the Japan Society for Industrial and Applied Mathematics* 16(4), 371-384,2006.
- [9] Kokubo.S.,Tanimoto.J.,Hagishima.A., *Physica A*, 390(4), 561-568,2011
- [10] Kukida.S.,Tanimoto.J., Hagishima.A., *International Modern Physics C*, 22(3), 1-11, 2011.
- [11] B.S.Kerner, S.L.Klenov, *Physical Review E*, 80, 056101, 2009



**Fig.6** Simulation results with asymmetric lane change rules[Rule(1) and Rule(2) ] and  $F_A=0.1$   $V_{max}(A)=4$   $k=3$   $G=15$ . Both plots are calculated under Revised S-NFS model: (a) Lane usage ratio vs. normalized density (b) Lane change frequency vs. normalized density.