

# ドライバーの反応時間を鑑みた 微視的モデルによる 車線がない交通における安定性の数値的検討

長濱 章仁<sup>1</sup>・和田 隆広<sup>2</sup>

<sup>1</sup>非会員 立命館グローバル・イノベーション研究機構研究助教

(〒525-8577 滋賀県草津市野路東一丁目1-1)

E-mail:naga0862@fc.ritsumei.ac.jp

<sup>2</sup>非会員 立命館大学教授 情報理工学部実世界情報コース (〒525-8577 滋賀県草津市野路東一丁目1-1)

E-mail:twada@fc.ritsumei.ac.jp

一部の新興国では、車線がなく車種が混在する自動車交通が見られ、巨視的・微視的両方の観点から現象理解が必要である。先行研究によって、既に車線がなく車種が混在する交通の微視的モデルが提案されている。それらの一部は、追従関係にある2車両（前走車、後続車）が道路横方向にずれた位置を走行する際に反応強度を変化させることで、斜め後方からの追従、追い越しなどを再現している。しかしながら我々の知る限り、追従時の横位置ずれに起因するドライバーの反応時間変化をモデルに組み込んだ例は見られず、安定性の議論も反応強度の変化のみを鑑みたものであった。そこで本研究はドライビングシミュレータを用いた実験に基づき反応時間変化をモデル化し、エージェントシミュレーションによって安定性の変化傾向を検討する。

**Key Words** : *Weak lane discipline, stability, response time, microscopic model, numerical analysis*

## 1. 序論

人口増加や経済発展により、一部の新興国では自動車交通の渋滞が社会問題となっている。それらの国で見られる交通には、多種多様な種類の車両タイプ、すなわち大型トラック、乗用車、自動三輪車やオートバイ等が含まれ（混合交通）、車線がないもしくは車線が守られない場合（2次元交通）が散見される。本稿ではこのような交通を2次元混合交通と呼ぶこととする。

混合交通を再現するモデルの研究について、例えば Oketch<sup>1)</sup>は歩行者から大型車までの計9タイプのモデルパラメータを求め、ケニアにおける実際の交通の再現性を検証した。ただし、道路横方向の移動はファジー論理を含む離散的なルールで記述されており、完全に自由な横位置を取ることができる交通とは乖離があった。また、追従関係にあると推測されるが自車に対して斜め前方に位置する前走車の挙動に対する感度や反応時間の変化は考慮されていなかった。

Shiomiら<sup>2)</sup>はオートバイの車線に基づかない挙動をモデル化するために、効用関数を用いて加減速および左右

旋回、直進の各選択肢から行動を選択する離散選択モデルを構築し、そのモデルパラメータ推定に成功した。選択は離散的に行われるが、取ることのできる位置は連続的であり2次元交通の連続的な挙動を再現した。

一方、Gunay<sup>3)</sup>は実際の交通において前走車からの横位置ずれに車間時間が増加することを確認しており、2次元交通に対して前走車から斥力を受けるような微視的モデルを構築するにあたって、斥力に横位置ずれを考慮する必要性が示唆されている。

ロボティクスや自動運転、歩行者交通流の分野では2次元に広がる斥力場を用いた経路生成法<sup>4) 5)</sup>や微視的モデル<sup>6)</sup>が提案されている。斥力場を2次元的に発生させると、前走車が自車正面にある場合と斜め前方にある場合に異なる斥力を及ぼすことができる。

実際に横位置ずれがある場合に異なる影響を及ぼすモデルは例えば Kanagarajら<sup>7)</sup>によって提案され、パラメータ推定が行われている。縦方向の挙動のモデルには横位置ずれによって感度が増加する追従モデルが用いられた。なお横方向の挙動のモデルには離散的な車線変更のモデルを連続化したものが用いられている。

以上、2次元混合交通を再現するモデル研究は多く存在するものの、前走車横位置ずれによって、前走車の挙動に対する自転車ドライバーの反応時間を測定した研究やそれを鑑みた微視的モデルは、我々の知る限り存在しない。加えて反応時間が変化すれば、交通の安定性が変化すると考えられる。そこで本研究は、ドライバーの反応時間が前走車と自転車の横位置ずれによって変化するかを検討すること、およびその変化の安定性への影響の傾向を掴むことを目的とする。

2章では反応時間の変化をドライビングシミュレータ(DS)を用いて測定し変化の有無を確認する。続いて3章では反応時間変化を車線のない2次元動的な動きが可能であるシミュレーションに組み込むために、反応速度の変化を関数でフィッティングする。4章では2次元交通モデルを用いて、反応時間変化の及ぼす影響を定性的に検討する。本研究の展望として、2次元交通の解析的な安定性の議論を念頭に置いているため、反応時間変化がない場合の安定性について既に検討されている、中山ら<sup>8)</sup>が提案した2次元交通流モデルを用いて検証を行う。

## 2. 反応時間に対する前走車位置の影響評価

本章では前走車横位置ずれによってドライバーの反応時間が変化するか否かをDSを用いて確認する。なお3章以降で微視的モデルに効果を加える際に道路縦方向の効果も鑑みる必要があるため、合わせて測定を行う。なお本実験は「立命館大学人を対象とする医学系研究倫理審査委員会」の承認を得て行い、被験者からはインフォームドコンセントを書面にて受け取っている。

### (1) 実験手法

#### a) 測定装置

測定に用いたDSは固定式基台を持ち、5面の液晶ディスプレイで運転環境を表示する。被験者はそれらのディスプレイで、左右側方およびミラーに表示された左右後方及び後方を確認することができる。

自転車挙動はMechanical Simulation社製のCarsimによって計算され、前走車はAdvanced Solutions Technology Japan社製のDS-nanoによって制御される。計算頻度はどちらも10msである。

#### b) 車両の配置

図-1に前走車と自転車の配置を示す。左側に配された緑の車両が自転車であり、右側の橙色の車両が前走車である。各車両の幅は1.9 mである。道路は幅10.4 mの車線のない直線道路とし自転車はその中心に位置する。一方前走車の位置は図-1に示された $dx$ および $dy$ の各3座標から選ばれた。道路縦方向の $dy$ 座標は自転車中心を基準にしてそれ

ぞれ $dy_1=14\text{ m}$ 、 $dy_2=34\text{ m}$ 、 $dy_3=54\text{ m}$ とし、道路横方向の $dx$ 座標は自転車中心を基準に左側にそれぞれ $dx_1=0\text{ m}$ 、 $dx_2=1.5\text{ m}$ 、 $dx_3=3.0\text{ m}$ と設定した。

#### c) 実験手順

実験開始前に被験者は十分にDS操作に慣れるように練習を行い、以下の手順で測定を行った。初期状態では自転車と前走車が17 m/sで走行している。前走車が減速を行い速度差が-5 m/sに達するので、減速に気付いたドライバーはステアリングに設置されたボタンを押下する。その後ドライバーはブレーキおよびステアリングを任意に用いて、衝突回避を行う。

この手順を各3回ずつ、ランダムに呈示される $dx$ および $dy$ の計9座標に対して行い、前走車の減速からボタン押下までの時間(反応時間 $\tau$ )を測定した。

#### d) 被験者

普通自動車運転免許を所持する被験者13名から運転データを取得した。年齢は平均22.5歳(SD=1.2)、運転経験は平均2.6年(SD=1.6年)、男女比は69.2%対30.8%であった。

### (2) 測定結果

#### a) 走行方向の車間距離が反応時間に及ぼす影響

図-2に各前走車位置に対して測定された、反応時間の変化を示す。左右それぞれの図が各 $dy$ および $dx$ 座標における平均値と標準偏差を表している。

まず、走行方向に対する車間距離 $dy$ が増加すると反応時間も大きくなる傾向が見られる。2要因分散分析と多重比較から、すべての組合せについて有意差が認められた。車間距離が増えれば、ドライバーは急いで衝突回避を行う必要がないため、この傾向は自然であると言える。

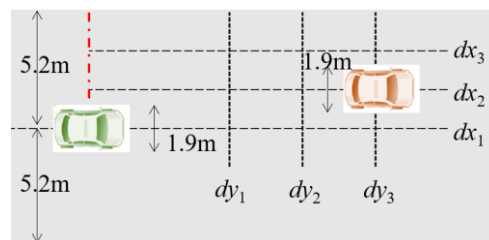


図-1 前走車と自転車の位置関係

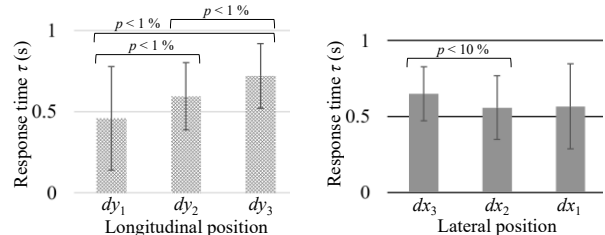


図-2 各前走車位置に対して測定された反応時間

b) 横位置ずれが反応時間に及ぼす影響

一方、図-2の $dx$ 座標変化に対する結果を見ると、横位置ずれが増加するに従い反応時間が増加する傾向が見られた。2要因分散分析では、要因 $dx$ の効果が有意確率5%以下で認められたものの、多重比較では $dx_2$ と $dx_3$ の間のみ有意傾向が認められた。なお、要因 $dx$ および $d\phi$ の交互作用は確認されなかった。

(3) 反応時間のフィッティング

a) 関数の候補とフィッティング方法

反応時間は、式(1)に示す通り反応時間が $dx$ および $d\phi$ の変化の影響の合算により決まると仮定した。2.2節で交互作用が見られなかったためである。また、 $dx_2$ および $d\phi_2$ において反応時間が最大、最小値を持つような傾向は見られなかった。そのため、各軸に対してフィッティング関数は単調増加、減少関数である式(2a)から(2d)より最も決定係数 $R^2$ 値が大きくなるものを選んだ。なお式(2)の座標 $q$ には $dx$ および $d\phi$ が入る。フィッティングはNelder-Mead法により、測定値とフィッティング値の二乗誤差の和が最小になるように行った。

$$\tau = \tau_{dx} + \tau_{d\phi} \tag{1}$$

$$\tau_q = A_q(q - B_q) + C_q \tag{2a}$$

$$\tau_q = A_q \exp(q - B_q) + C_q \tag{2b}$$

$$\tau_q = A_q \log(q - A_q) + C_q \tag{2c}$$

$$\tau_q = A_q \arctan(B_q(q - C_q)) + D_q \tag{2d}$$

b) フィッティング結果

$dx$ 座標に対しては指数関数を、 $d\phi$ 座標に対しては一次関数を用いた場合、最も大きな $R^2$ 値が大きいものが得られた。表-2に得られたパラメタの値を示す。

表-2 フィッティングされたパラメタ

$A_{dx}$ (s)	0.11
$B_{dx}$ (m)	2.96
$C_{dx}$ (s)	1.10
$A_{d\phi}$ (s/m)	0.01
$B_{d\phi}$ (m)	-2.03
$C_{d\phi}$ (s)	-0.79
$R^2$	0.21

3. 2次元交通シミュレーションを用いた安定性の変化検証

(1) 2次元最適速度モデル

a) モデルへの反応時間変化の組み込み

1章に述べた通り、2次元交通を精度良く再現するモデルは先行研究で提案されている。しかし、追従挙動に加え、左右方向への移動に複雑なルールや離散的なルールが採用されており、反応時間変化を微分方程式に組み込んだ際、解析的に安定性を議論することが難しいと考えられる。従って本研究では既に解析に安定性が議論されている中山ら<sup>8)</sup>の2次元交通モデルに対して反応時間変化を組み込み、まずは数値的に安定性の変化を確認する。

中山ら<sup>8)</sup>は粒子を六角格子状に整列させ2次元最適速度モデルを用いてその安定性条件を解析的に求めた。2次元最適速度モデルでは以下の式(3)に従って粒子 $j$ が運動する。

$$\frac{d^2 \mathbf{x}_j}{dt^2}(t) = a \left[ \left\{ \mathbf{V}_0 + \sum_{k=1}^6 \mathbf{F}(\mathbf{x}_k(t) - \mathbf{x}_j(t)) \right\} - \frac{d}{dt} \mathbf{x}_j(t) \right] \tag{3a}$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}_k - \mathbf{x}_j) = f(r_{kj})(1 + \cos \phi) \mathbf{n}_{kj} \tag{3b}$$

$$f(r_{kj}) = \alpha \left[ \tanh \beta(r_{kj} - b) + c \right] \tag{3b}$$

$\mathbf{x}_j$ は $j$ の位置座標、 $kl$ は周囲に6つ配置された各粒子の番号である。 $\phi$ は粒子 $j$ から $kl$ に対する角度、 $\mathbf{n}_{kj}$ は $j$ から $k$ へ方向ベクトル、 $r_{kj}$ は粒子間の距離である。 $\mathbf{V}_0$ は定ベクトルである。粒子 $j$ が周囲の6粒子から、各 $\phi$ に基づいて異なる斥力を受けるモデルである。

最適速度モデルはNewellのモデル<sup>9)</sup>の一次の展開であり反応時間 $\tau$ は時間遅れ $T$ の逆数、すなわち式(3a)の感度 $a$ に含まれている考えられる。さらに時間遅れ $T$ には、操作を開始するまでの反応時間 $\tau$ および速度を調整する時間 $T_{\text{vadj}}$ が含まれていると考えられる。そこで図-3に示すように、まず定数である感度 $a$  (基準感度と呼ぶ)の逆数から位置 $dx=0$ 、 $d\phi=0$ で仮定される反応時間 $\tau_{0,0}=0.31$ sを除き $T_{\text{vadj}}$ を得る。

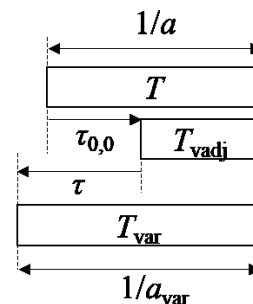


図-3 速度適応時間の内訳と反応時間変化の概念図

再度位置 $dx$ ,  $dy$ で想定される反応時間 $\tau$ を加え $T_{var}$ を求め、その逆数 $a_{var}$ を反応時間変化を含んだ感度とすることで、2次元最適速度モデルに反応時間変化を組み込むこととした。ただし2章では自車位置から前方左に車両がある際の反応時間のみを測定したので、左右対称かつ自車より後方に対して一定の反応速度を仮定した。

## (2) シミュレーション方法

### a) 粒子配置と速度擾乱の与え方

粒子配置は<sup>8)</sup>と同様6角格子とし、初期状態で定常状態にあるように速度と粒子間距離を設定した。粒子は同じ方向に定速で流れるが、その進行方向と反対方向に、定常速度から1%速度が減少する速度擾乱を与えた。初期擾乱は進行方向と垂直方向に並んだ粒子の列から1つを選び与えた。

粒子数は進行方向50列、進行方向と垂直方向に4列の200粒子とし、両方向で周期境界とした。ただし、速度擾乱が系を一周することがないように、シミュレーション時間を設定した。

また、粒子シミュレーション内の距離とDSでドライバーが認知する距離は異なる可能性があり、その変換式は未検討である。そのため、本稿では反応時間による安定性への影響を定性的に理解するためにDSでの距離を0.25倍した値を用いて計算を行った。

### b) 安定性の判別手法

系のString stabilityを検証するため、初期速度擾乱、すなわち定常速度からの速度減少に対して、上流の粒子が起こした速度減少の比（ゲインと呼ぶ）が1倍より大きければ、不安定であるとする。速度擾乱の大きさが有限であるため、この手法で得られる安定不安定の区別は、線形安定性を記述したものではない。

### c) シミュレーションの範囲

本稿では<sup>8)</sup>で解析的に求められた安定、不安定両方の領域を含む感度 $a = 0.5$ から2.0の領域に対してシミュレーションを行う。反応時間をさせない場合、進行方向にのみ変化させた場合、横位置ずれも鑑みて変化させた場合のシミュレーションを行い、安定な領域がどのように変化するかを検証する。

## (3) シミュレーション結果と考察

図4a, c, eは反応時間をさせない場合（ND），進行方向にのみ変化させた場合（LD），横位置ずれも鑑みて変化させた場合（WD）の各粒子ゲインを擾乱方向と垂直方向の列番号（Row number）ごとにプロットしたものである。Row number = 0が初期速度擾乱を与えた列であり、番号が大きくなるにしたがって上流の列を表す。

ただし周期境界であるため、Row number = 49の粒子はRow number = 0の粒子の1列下流側に位置する。各図の矢印より左の領域が、上流に進む速度擾乱の様子を表している。縦軸は基準感度 $a$ である。同じ列の粒子は、対称性から同じ速度擾乱を起こした。なお白の領域は、速度擾乱によって速度が極小を迎えなかった粒子、すなわち速度擾乱が伝わらなかった、もしくは減衰した列を表す。また、図4b, dは条件NDとLD, LDとWD間でのゲインの比を示している。例えば図4dの赤の領域（ $a = 1.5$ , Row number = 20付近）は横位置ずれによる反応時間変化によって、特に速度擾乱が成長したことを示している。

ND条件（図4a）で上流に進む擾乱のゲインを見ると、 $a$ が大きい線形安定領域において確かに速度擾乱が減衰している様子が見られる。反対に感度を下げるに従い、速度擾乱が増幅している様子も確認される。

一方、WD条件（図4e）では、 $a$ が大きい領域においても速度擾乱が伝わっている様子が見られる。

各条件のゲインの比をプロットした図4b, dを見ると、条件NDとLDの間では、大きな変化が見られなかったものの、横位置ずれを考慮したLDからWDへの変化では

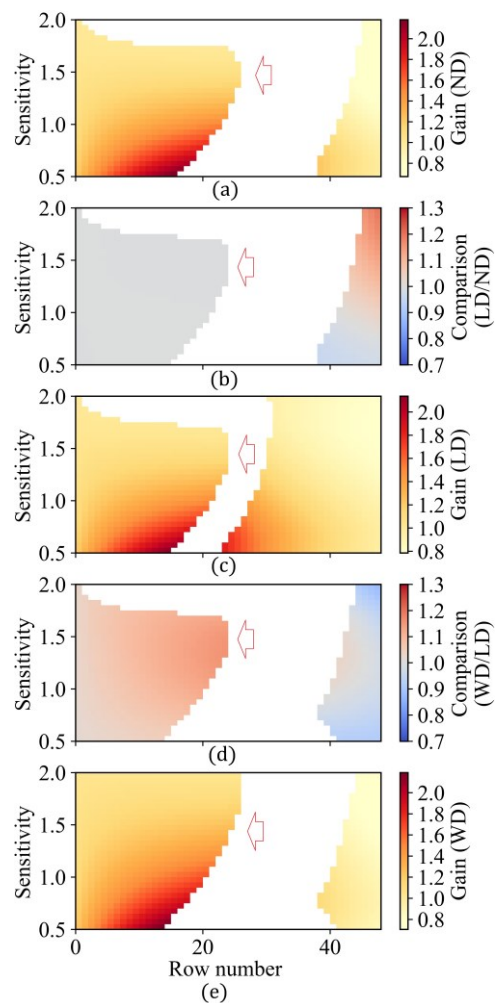


図4 各条件での速度擾乱のゲインと条件間の比較

ゲインが明確に増加している様子が見られる。

以上より、まず反応時間の変化を導入することで、安定であると思われる感度領域が狭まることが確認された。粒子の周囲に六角格子状に配置された他粒子のうち、特に横位置ずれを持った粒子の運動に対する反応が遅れるため、マクロに観測した際に感度が下がってしまったような効果が現れたためであると考えられる。また、速度擾乱の成長も同様に横位置ずれを導入することで大きくなることが分かった。なお、変化の大きさはシミュレーション内の距離とDSでの距離の関係によって変化する。

なお、図4では矢印より右側、すなわち下流側の粒子も速度擾乱を起こしている。これは、用いた2次元最適速度モデル<sup>9)</sup>が自車より後方の車両からも斥力を小さいながらも発生させる、元来歩行者流の安定性を検討するために導入されたモデルであるためだと考えられる。

## 5. 結論

新興国で深刻化する自動車交通渋滞に対して、微視的なモデルが多く提案されているものの、自車と前走車の横位置ずれによる反応時間変化を考慮したモデルはなかった。そこで本研究では、まず自車と前走車の横位置ずれによって反応時間が変化するかを、ドライビングシミュレータを用いて確認した。結果、走行方向および横位置どちらに対しても、距離がのびることで反応時間が増加する傾向が確認された。

続いて、その効果をモデルに組み込むためフィッティングを行い、2次元最適速度モデルにその効果を導入した。結果、安定領域が狭まることが確認された。これはマクロに見た際、最適速度モデルの感度が下がったような効果が現れたためだと考えられる。

なお、本研究ではDSとシミュレーションの距離尺度を揃えられなかったため、反応時間の変化が具体的に安定性をどの程度変化させるかといった検討はできなかった。また用いた2次元最適速度モデルをより自動車流に近いものにした上で解析的な安定性条件の導出が必要である。さらに、最適速度モデルは陽に反応時間を含んでおらず、感度の一部を観測された反応時間で変化させる

必要があった。反応時間を陽に含んだモデルには1次元交通での安定性が求められているものがあるため<sup>10)</sup>、これを2次元に展開し安定性の議論を行う必要がある。

謝辞：本研究はJSPS科研費19K15246の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) Okech, T. : New modeling approach for mixed-traffic stream with nonmotorized vehicles, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.1705, pp. 61-69, 2000.
- 2) Shiomi, Y., Hanamori, T., Uno, N. and Shimamoto, H : Modeling mixed traffic flow with motorcycles based on discrete choice approach, *IN Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, No.14-4846, pp., 2014.
- 3) Gunay, B. : Car following theory with lateral discomfort, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.41, No.7, pp. 722-735, 2007.
- 4) González, D., Pérez, J., Milanés, V. and Nashashibi, F. : A review of motion planning techniques for automated vehicles, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol.17, No.4, pp. 1135-1145, 2015.
- 5) Gasparetto, A., Boscaroli, P., Lanzutti, A. and Vidoni, R. : Path planning and trajectory planning algorithms: A general overview, *IN Motion and operation planning of robotics systems*, pp. 3-27, 2015.
- 6) Helbing, D. and Molnar, P. : Social force model for pedestrian dynamics, *Physical review E*, Vol.51, No.5, p. 4282, 1995.
- 7) Kanagaraj, V. and Treiber, M. : Self-driven particle model for mixed traffic and other disordered flows, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol.509, pp. 1-11, 2018.
- 8) Nakayama, A., Hasebe, K. and Sugiyama, Y. : Instability of pedestrian flow and phase structure in a two-dimensional optimal velocity model, *Physical Review E*, Vol.71, No.3, p.036121, 2005.
- 9) Newell, G. F. : Nonlinear effects in the dynamics of car following, *Operations research*, Vol.9, No.2, pp.209-229, 1961.
- 10) Zhang, X. and Jarrett, D. F. : Stability analysis of the classical car-following model, *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol.31, No.6, pp. 441-462, 1997.

(2019. 10. 3 受付)

## NUMERICAL STABILITY ANALYSIS OF TRAFFIC WITH WEAK LANE DISCIPLINE USING MICROSCOPIC MODEL WITH VARIED RESPONSE TIME

Akihito NAGAHAMA and Takahiro WADA

Physical analysis of mixed traffic with weak lane discipline is essential to improve vehicular traffic in some developing countries. Using a driving simulator, we confirmed that the response time of drivers was varied by both the relative longitudinal and lateral positions between the leader and ego vehicle. Simulation analysis considering the varying response time implied enlargement of the unstable region.