

交通流における2体ダイナミクスを考慮した 車線変更 CA モデルの開発

藤木拓也¹, 谷本潤², 萩島理², 池谷直樹²

¹九州大学大学院 総合理工学府 環境エネルギー工学専攻

²九州大学大学院 総合理工学府 環境共生工学部門

概要

既往の交通流セルオートマトンモデルにおける車線変更ルールでは、車線変更の動機に拘わるインセンティブと車線変更後に追突されない安全条件を同時に満たすと、即座に車線変更が行われる。本論では、インセンティブ条件を満たしたときに車両がウinkerを出して車線変更意図を周囲に示す企画プロセスと実際に車線変更を行うプロセスとを分離し、その間にその時間ステップにおける車両エージェントの前進処理を挿入する新たな車線変更モデルを提示する。これにより、車線変更により前方に割り込まれる車両は、加速して阻止する、減速して譲ることを両端とする対処行動を採り得ることになる。周期系境界を仮定したシミュレーションにより、提示した2体問題を考慮した車線変更モデルと既往モデルとの特性比較を行った。

A cellular automaton model for lane-change considering the dynamics of 2-particle system

Takuya Fujiki¹, Jun Tanimoto¹, Aya Hagishima¹, Naoki Ikegaya¹

¹Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University

Abstract

In previous Cellular Automaton (CA) models, it has been assumed that a vehicle can immediately change its running lane to a neighboring one when both the Incentive Condition; whether the focal vehicle should lane-change to get more acceleration, and the Safety Condition; whether the focal can avoid a bumping after the lane-change, are satisfied simultaneously. We show, here, a more realistic CA model, where both the process to exhibit lane-change will by the vehicle's winker and the process actually to proceed the lane-change are spitted by the process going ahead in its particular time-step. By this new model considering the dynamics of 2-particle system, it is allowed that the vehicle getting intruded by another may be able to break the intrusion by self acceleration or to make the intrusion easily by self deceleration. By a series of simulations, we discuss how our new lane-changing model differs from conventional model.

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るとの問題意識から、特に二車線狭窄部の割り込みにより流れ場に社会ジレンマが潜在することを明らかにした[1], [2]。同様に多車線系における車線変更によりもたらされる社会ジレンマ構造に注目した研究を継続しているが、そのためには車線変更を適切に再現する交通流モデルの適用が前提になる。

セルオートマトン (CA) に適用される車線変更ルールの基本的な考えは、車線変更の動機に関わるインセンティブ基準と、その車線変更が安全に遂行されるかを判定する安全基準の二つを同時に満たしたとき、実際に車線変更イベントが生起すると仮定している。Nagel ら[3]は車線変更車両の速度と前方近接車両の速度の不等式で定義された車線により異なる非対称なインセンティブ基準提示しているが、Nakata ら[2], Shang ら[4]をはじめ多くの既往モデル[5-9]では、両基準を表す不等式は車線変更車両と前後近接車両との車間距離で定義されており、高密度域での車線変更が生起しにくい構造を有している。このような背景から、Kukida ら[10]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ルールを提示している。また、既往の車線変更モデルでは企画と実行が時間をおかず生起するとしているため、例えば、企画車両がウinkerを出し、それに応じて割り込まれる車両が何らかの行動を起こす、との両車両間の相互作用、すなわち車線変更における2体問題は捨象されてしまう。

そこで本稿では「車線変更をする車両」と「割り込まれる車両」との2体関係を考慮した CA モデルを構築し、その特性を議論する。

2 モデル

2.1 Revised 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[11]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の大小を車間距離により変化させる機構を Sakai ら[12] 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 (Kerner ら[13]) でいう synchronized flow が適切に再現されていない点が改善される特性を持つ。

2.2 車線変更ルール

車線変更ルールは、Kukida らの開発した車間距離と速度差を考慮したモデル[10]を用いる。車線変更の生起に関わる両基準を以下に示す。各変数は Fig.1 参照。

インセンティブ基準

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

安全基準

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

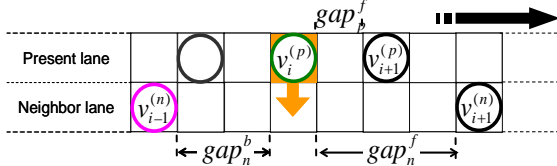


Fig.1 The situation around the focal car i which is trying lane change. The green granular indicates the focal vehicle trying to lane change, the pink one means the vehicle who is intruded by the focal agent.

2.3 2体問題を考慮した車線変更モデル

車線変更の企画と実行を瞬時に完結させることなく、その間に各車両エージェントの前進イベントを差し込むことで、2体関係を盛り込む。すなわち、

1. 車線変更企画；インセンティブ条件を判定して、True の場合はウインカーを表示して、車線変更意図を車線変更前後続車両エージェント（割り込まれる車両エージェント）に示す。（Fig. 1 の緑色エージェント）
2. 各車両エージェントは流れ方向への前進処理を行う。この場合、車線変更により割り込まれる車両エージェント（Fig.1 の桃色エージェント）に、戦略（協調，Cooperation；C と裏切り，Defection；D）を定義し、戦略に応じた加減速により、この前進処理を行う。以下、C 戦略または D 戦略をもつ車両エージェントをそれぞれ C-agent, D-agent と記す。その他の車両は Revised S-NFS モデル[11]により前進する。
3. 車線変更実行；更新された位置関係で安全条件の成否を判定して、True であれば、隣車線への車線変更を実行する。

割り込まれる車両エージェントになったとき、それぞれの戦略に応じた速度決定を行う。但し、割り込まれるエージェントと車線変更エージェントとの車間距離が十分に大きい場合（ $gap_n^b > k \cdot v_{i-1}^{(n)}(t-1)$ 但し、本論では $k=1$ とした）は、割り込まれる車両エージェントとはみなさず、通常車両と同様の前進処理を行う。

(i) 割り込まれる車両が C-agent のとき

C-agent は必要に応じて減速する。安全条件が満たされるためには式 (2) の右辺が小さくなり、左辺が大きくなれば良い。そこで、割り込まれる C-agent の速度が割り込んでくる車両のそれよりも大きいときは、その車両の速度まで減速し、そうでなければ割り込まれる車両の速度を-1減速する((3)式)。

割り込まれる車両の速度が割り込み車両の速度より小さいときは割り込まれる車両は自速を保持していても対象となる車線変更は行われる可能性があるが、ここでは C-agent が“譲る”ことは減速することとみなし-1 の処理を施す ((4)式)。

すなわち、

$$\text{If } v_{i-1}^{(n)}(t-1) > v_i^{(p)}(t-1), \\ v_{i-1}^{(n)}(t) = v_i^{(p)}(t-1) \quad \dots (3)$$

Else if,

$$v_{i-1}^{(n)}(t) = \text{Max}[v_{i-1}^{(n)}(t-1) - 1, 0] \quad \dots (4)$$

(ii) 割り込まれる車両が D-agent のとき

D-agent は必要に応じて加速する。車線変更を企画している車両の真横もしくは、その付近まで進むことができれば、車線変更を阻止出来ると考える ((5)式)。自速が大きくギャップが小さければ、速度保持していても真横より前方に行くケースもある ((6)式)。

If $v_{i-1}^{(n)}(t-1) < gap_n^b + v_i^{(p)}(t-1) + 1$

$$v_{i-1}^{(n)}(t) = \text{Min}[V_{\text{max}}, gap_n^b + v_i^{(p)}(t-1) + 1] \quad \dots (5)$$

Else

$$v_{i-1}^{(n)}(t) = v_{i-1}^{(n)}(t-1) \quad \dots (6)$$

(3)-(6)式で加減速により速度決定した割り込まれる車両は、Revised S-NFS モデルの見通し効果による速度決定とランダムブレーキをスキップして最終的な速度を決定する。

また、上記(3)-(6)式は、Kukida らのインセンティブ条件と安全条件に応じた表式であり、両条件が異なればそのまま用いることは出来ない。しかし、車線変更に対して、割り込まれる車両の“協力”（意図的な減速）と“非協力”（意図的な加速）行動に関する基本的考え方はある程度一般性を持つと考えられる。

2.4 実験条件

車両エージェントは、前述したように、あらかじめ C 戦略 (C-agent)、また D 戦略 (D-agent) を有する。本稿では Revised S-NFS モデルに周期境界を適用する。Revised S-NFS モデルの各モデルパラメータは以下のよう

に与えた。スロースタート適用確率 $q=0.99$ 、見通し処理（クイックスタート）適用確率 $r=0.99$ 、最大見通し台数 $S=2$ 、最大速度 $V_{\text{max}}=5$ 、ランダムブレーキに拘わる確率パラメータ； $P_1=0.15, P_2=0.99, P_3=0.98, P_4=0.01$ 、車間距離に応じたランダムブレーキ処理の適用閾値 $G=15$ 、システム長 $L=500$ とする。

数値解析は、車の台数を、10 台から 940 台まで 10 台ずつ増やし系内密度を制御する。系内のすべての車両を C-agent（以下 All C）または D-agent（以下 All D）に設定しそれぞれ解析を行う。また、比較のため、エージェントに戦略を付与せず、割り込まれる車両は割り込み車両に対して特別な行動を採らない（Kukida モデル[10]で車線変更企画と実施との間に車両前進処理を差し込んだ構造）モデル、車線変更企画と実施が同時に起きる Kukida モデル[10]を計算する。

3 結果

まず、本提案モデルの 2 体問題考慮がローカルな車両間相互作用にどのように再現されているのかを Fig.2 の中程度の密度域で生じる典型的エピソードで確認する。車線変更企画エージェント（オレンジ色）に対して C 戦略の割り込まれるエージェント（青色）は減速して車線変更の実施を扶助しているが（パネル(a)）、D エージェント（赤色）は自速を保持して車線変更をそしている（パネル(b)）、なお、(a)、(b)は夫々、All C と All D の設定である。

以下では、系全体の統計量を観ることで既往モデルに対する提案モデルの特性を確認していく。

Fig.3 はインセンティブ条件を満たした車両エージェント数 N_{MC} と正規化密度の関係、Fig.4 はそのうち実際に車線変更が成功したイベント数との比を取った車線変更成功確率 P_{SLC} 、Fig.5 は基本図である。2 体問題を考慮した All C、All D の両ケース、車線変更企画と実施を分離し 2

体問題を考慮していないケース（以下、企画-実施分離モデル）、企画と実施未分離の Kukida モデルによるケース（以下、企画-実施未分離モデル）を比較している。既述のように企画-実施分離モデルは Kukida モデルにおけるインセンティブ条件のチェックと安全チェックのチェックおよび車線変更の実施を車両前進の前後に分けて処理するモデルである。 N_{MC} と P_{SLC} の積が実際に車線変更に成功した車両エージェント数となる。また、車両エージェント数は、単位時間ステップ当たり、単位セル当たりで正規化している。Fig.5 の基本図には、比較のため車線変更のない1車線周期系の結果も併記している。

企画-実施分離モデルと企画-実施未分離モデルとの比較により、車線変更の企画と実行を分離することで、おおよそ全ての密度域で企画回数が大きく減り、その上で車線変更が実際に行われる成功率（ウインカーを点灯後車線変更出来る確率）も減少することが確認できる。現実の交通流で生じている車線変更は、ここで示したウインカー点灯と同時に車線変更が行われる場合とその間に1時間ステップ相当の前進処理が起きる場合のどこか中間に存すると推量されるから、モデル化の考え方の相違によりここで示した車線変更回数の差異が生じることに留意すべきだろう。流量を観ると高密度域の企画-実施未分離モデルによる流量は企画-実施分離モデルのそれより有意に大きい。これは殆ど渋滞に近いノロノロ運転時の流動状況下では、ウインカーの点灯と同時に車線変更を行うか、ある程度のウインカー点灯時間の後に車線変更を行うかの違いが、小さな流動効率の相違になることを示唆している。結果は示していないが時空図を観ると、企画-実施未分離モデルでは、前記した高頻度の車線変更の影響により、同密度の分離型モデルと比べると、大きな stop-and-go 波部分と比較的粗な部分が出来、後者の領域で特に多くの車線変更企画が為される。これが Fig.3 における未分離モデル（黒線）と分離モデル（緑）の差異となる。

All C と All D の比較により2体問題を考慮する効果を観てみる。車線変更の企画に対して減速して協力する、加速して阻止することの差異は、車線変更の成功率にきわめて大きく影響する。特に全車両が車線変更の企画に対して減速して協力する場合には、多くの車線変更が生起するため、無視できない流量の低下が起きる。現実の交通流におけるドライバーの態度は、ここで云う All C と All D の中間的態度を状況に応じて採っている可能性があり、また系内の全ての車両エージェントが C 戦略もしくは D 戦略との設定も極端な場合の想定ではあるが、より現実的な CA モデルの構成に際しては、2体問題のモデル化如何によって、系内で起きる車線変更の特性に大きな違いが出ることに十分な配慮が必要だろう。

流量だけを観るなら、ウインカー点灯による車線変更企画に対して無感度（2体問題を考慮せず）のケース（企画-実施分離モデル）と全車両がこれを阻止する意図を持つケース（All D）とでは大きな差異はない。しかし、高密度域では、後者の企画回数は前者に比して高く、また後者の車線変更成功率は前者に比して低い。これは、非協力エージェントだけからなる系では、ウインカー点灯のチャンスは、2体問題を考えないケースより多くなるが、実際には他車両の阻止に遭って行い得ず、結果としての車線変更回数に大きな差異が生じなかったことを示唆している。

Fig.6 は低密度（0.2）と高密度（0.5）について、2体問題を考慮する All C、All D の両ケース、2体問題を考慮しない企画-実施分離ケースにおける、車線変更により割り込まれる車両が、自分の速度（相手の企画車両がウインカーを点灯させた時点）に対して実際に行った加減速度の発生密度をカウンターで示した結果である。なお、ある速度に

対して発生した加減速度の密度を積分すると1となり、その発生回数（単位時間ステップと単位セルで正規化）はマップ下端の数字により表されている。

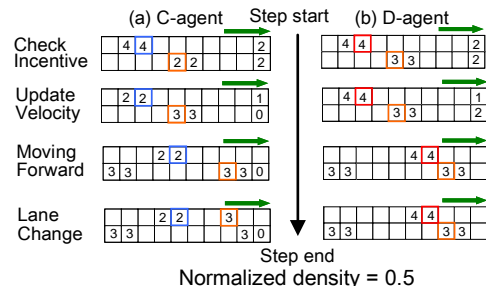


Fig.2 Examples of each strategy; C and D in a curtain single time-step. The digit in cells means the velocity. In an orange cell, there is the car turning on its blinker. Cars in blue and red cells will update their velocity according to respective strategies; C and D

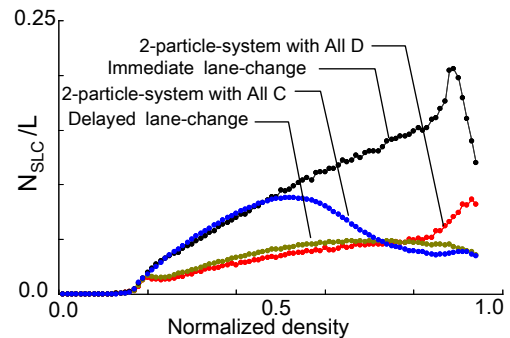


Fig.3 The average number of cars meeting with "incentive criteria" during unit time-step in unit cell vs. traffic density. The proposed method brings the two results denoted by 2-particle-system with All C and All D. As comparison, Delayed lane-change case, where a vehicle first shows blinker, goes forward flowingly, and finally lane-changes if possible; and Immediate lane-change case are shown. Immediate lane-change case is derived from Kukida et al [10].

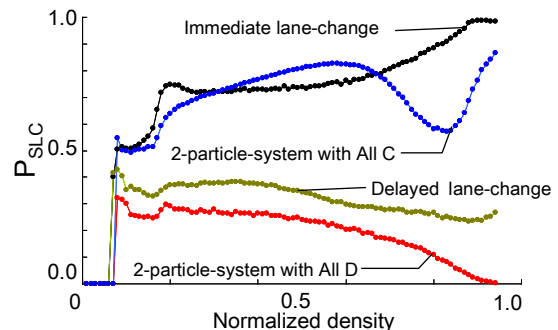


Fig.4 Probability of succeeded lane-changes of respective cases vs. traffic density.

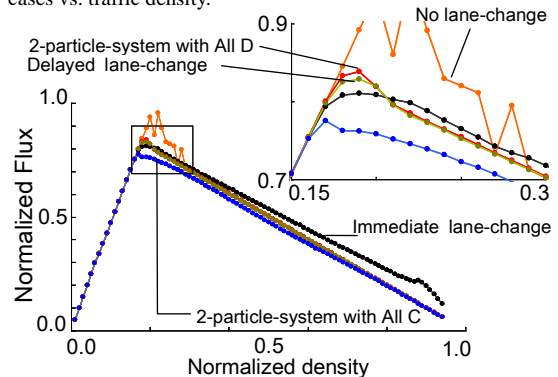


Fig.5 Fundamental diagrams of respective cases. Inset shows enlarged image around the so-called meta-stable phase.

All D では加速により車線変更の阻止が、All C では減速により車線変更の扶助が行われている様子が、特に、All D

による車線変更阻止では可成りな急加速が行われていることが解る。

企画-実施未分離ケースの加速は、Revised S-NFS モデルのデフォルト加速度+1 以上は生じ得ない。興味深いのは、2 体問題を考慮しない本ケースでも多くの場合で割り込まれる車両には+1 の加速が生じている点で、ウインカー点灯と車線変更実施の間の一刹那に、後続車両がこの点灯に顧慮しないとするなら、後続車両は加速をし、その結果は、前記したように All D とほぼ同様の実際の車線変更回数、流量になることである。つまり、車線変更により割り込まれる後続車両がウインカーに注目しない（無視する）ことは、急加速により意図的に割り込みを阻止すること、フラックスの観点で観るなら結果的には同様の流動特性をもたらすことになる。両ケースで個々の加速度の分布に差異があることは流れ場もミクロに観れば異なっていることを意味するが、流れ場全体のグローバルな指標である流量で丸めて評価すると大きな差には顕れない。

4 結語

車線変更を企画、実行に分割し、その間に前進過程を差し込むことで、車線変更により割り込む車両と割り込まれる車両の2体を考慮して生起する CA モデルを掲示した。周期系境界条件を適用し、既往の車線変更モデルと比較しながら特性解析を行い、以下の結論を得た。

車線変更の企画と実行を分離することで、おおよそ全ての密度域で企画回数が大きく減り、その上で車線変更が実際に行われる成功率（ウインカーを点灯後車線変更出来る確率）も減少する。

2 体問題を考慮する効果も顕著であり、車線変更の企画に対して減速して協力する、加速して阻止することの差異は、車線変更の成功率に大きく影響する。特に全車両が車線変更の企画に対して減速して協力する場合には、多くの車線変更が生起するため、無視できない流量の低下が起きる。流量だけを観るなら、ウインカー点灯による車線変更企画に対して無感度（2 体問題を考慮せず）のケースと全車両がこれを阻止する意図を持つケースとは大きな差異はない。

謝辞

本研究の一部は科研費・萌芽研究（#23651156）、中山隼雄科学技術文化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.; Dilemma Game Structure hidden in traffic flow at bottleneck due to a 2 into 1 lane junction, *PhysicaA* 389,5353-5361,2010
- [2] 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
- [3] K.Nagel., D.E.Wolf., P.Wagner., P.Simon.; Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach, *Physical Review E*, 58, NUM.2,1425, 1998
- [4] Shang.H.Y., Peng Y. A.; A new cellular automaton model for traffic flow considering realistic turn signal effect, *Sci China Tech Sci* ,55,1624-1630, 2012
- [5] Tanaka.K., Nagatani.T, Masukura.; Fundamental diagram in traffic flow of mixed vehicles on multi-lane highway, *Physica A* 387, 5583-5596, 2008.
- [6] Zhu,H.B., Dai,S.Q.; Two-lane traffic simulation with a blockage induced by an accident car, *Physica A* 388, 2903-2910, 2009.
- [7] Qian,Y.S., Shi,P.J., Zeng,Q., Ma,C.X., Lin,F., Sun,P., Yin,X.T.; Analysis of the influence of occupation rate of public transit vehicles on mixing traffic flow in a two-lane system, *Chinese Physics B* 18(9), 4037-4041, 2009.
- [8] Masukura.S., Nagatani.T., Tanaka.K.; Jamming transitions induced by a slow vehicle in traffic flow on a multi-lane highway, *J. of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, P04002,

- 2009.
- [9] X.M.Zhao., Z.Y.Gao., K.P.Li., The capacity of two neighbour intersections considering the influence of the bus stop, *PhysicaA*, 387, 4649-4656,2008.
- [10] 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.
- [11] Kokubo.S., Tanimoto.J., Hagishima.A.; A New CellularAutomata Model including a decelerating damping effect to reproduce Kerner's three-phase theory, *Physica A* 390(4),561-568,2011
- [12] Sakai.S, Nishinari.K, Iida.S; A new stochastic cellular automatonmodel on traffic flow and jamming phase transition, *Transactions of the Japan Society for Industrial and Applied Mathematics* 16(4), 371-384, 2006.
- [13] B.S.Kerner, S.L.Klenov; Phase transition in traffic flow on multilane roads, *Physical Review E* 80, 056101, 2009.

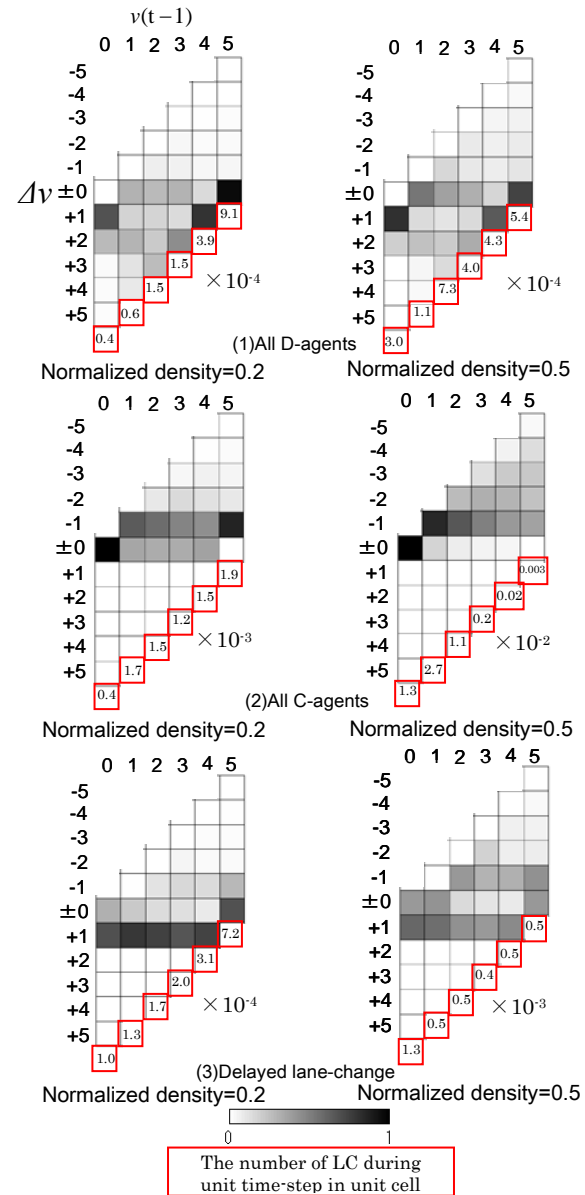


Fig.6 Contours show the occurrence ratio of positive or negative acceleration from each discrete velocity before updating. The left panel indicates the results under traffic density of 0.2, while the right one is for 0.5. The summation over vertical column, which means an integrated density for each of the velocity, is always 1. The digit under each column means the number of lane changing during unit time-step in unit cell.