

複車線交通流に与える運転選択速度と後方視野の影響

Influence of Driver's Speed Selection and Rearward View on Multi-lane Traffic Flow

内田英明*1 荒井幸代*1
Hideaki Uchida Sachiyo Arai

*1千葉大学工学部
Faculty of Engineering, Chiba University

In this paper, we proposed a model for simulating multi-lane traffic flow by using a well-known cellular automata(CA) model. To extend from a single-lane model to a multiple-lane, we introduce two additional abilities to driver-agent. One is s/he will be able to have a rearward view information, and the other is that s/he can select an arbitrary speed. The main reason of introducing these two abilities is to see the influence of traffic flow by lane changing behavior of the heterogeneous drivers. Through our experiments, we examine that lane-changing behavior is related to get ease up traffic congestion.

1. 背景と目的

交通システムの整備に伴い、物資輸送や移動手段としての自動車への依存度が増し、それに伴って生じる交通渋滞が与える経済的損失も高水準を保っており、国土交通省の試算では年間 12 兆円にのぼる [国交省]。またこの数値には渋滞の及ぼす環境負荷は含まれず、CO₂ 排出権についての議論も進むな一歩も早い問題解決が望まれている。

具体的な交通渋滞の緩和・改善の施策としては近年の ETC (Electronic Toll Collection System) 導入が挙げられる。本格的に導入の開始された 2002 年以降、高速道路における主要な渋滞原因であった料金所渋滞は当時の 1 割程度まで減少した [2]。そして、これに換わって高い割合を占めるようになったのがサグ部での自然渋滞である。

サグ部では、上り坂における一時的な速度低下が後続車両へ伝播することで局所的な交通集中を発生するが、この区間に複数のレーンが存在すれば速度低下を避けようとする車両が車線変更を行うことが想定される。本研究ではこの点に注目し、車線変更を考慮した交通流のモデル化及び、自然渋滞における追越行動の影響の考察を目的とする。

2. 準備

2.1 渋滞現象の定義

高速道路における渋滞現象の定義は「時速 40km 以下で 1km の車列の延長が 15 分以上継続したとき (日本道路公団)」等、平均速度の低下がある一定以上の距離に達した場合に渋滞とみなされる。

本研究では臨界密度によって渋滞現象の判定を行う (図 1)。臨界密度はまさに渋滞が始まるとする密度であり、また多くの高速道路において共通した値を持つことが知られていることから、交通流を定量的に評価するための適切な目安となる。

2.2 ASEP モデル [西成 06]

ASEP (Asymmetric Simple Exclusion Process) はニュートン粒子と異なり、ヒトや自動車といった意志を持って自発的に動く「自己駆動粒子系」の理論モデルである。道路は連続した

連絡先: 内田英明, 千葉大学工学部, 千葉市稲毛区弥生町 1-33, 043-251-1111(代表)

セルの 1 次元格子空間として表現され、各セルにはエージェントが 1 体まで存在できるものとする。

セルにエージェントが存在するときは 1, 存在しない場合は 0 と表現し、進行方向に隣接するセルによって状態遷移を行う。前方のセルが 0 ならば前進, 1 ならば停止する。このルールは自動車を例にとると、前方車両との車間距離が詰まってくると速度を落とすことに対応している。以上のルールにしたがってセルの状態を 1 時間 step ごとに更新していくことによって図 2 のようにあたかも渋滞が後方に伝播していく様子も再現することが出来る。ASEP は渋滞現象を良く再現できる上に直感的で扱いやすいモデルであるため、交通流の研究に利用されている。[西成 06][加藤 00]

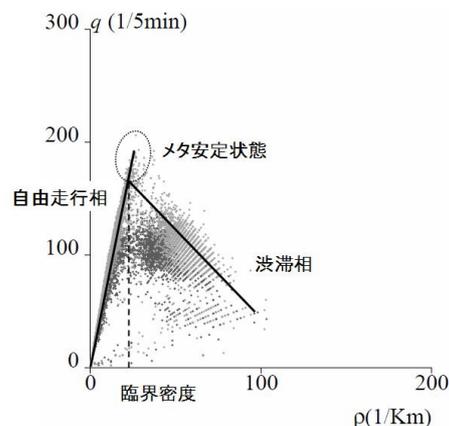


図 1: 高速道路における交通基本図の例 ([杉山 03] から引用)

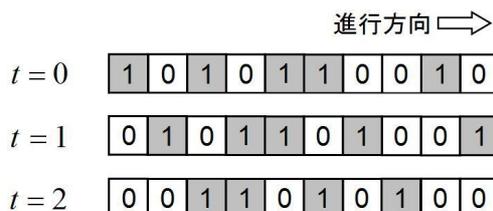


図 2: ASEP による状態更新の様子

3. 拡張 ASEP モデル

3.1 環境の記述

道路状況は 2 レーンとし、車線変更ルールを追加した拡張 ASEP モデルを考える。この車線変更ルールを 2 回適用することによって結果的に追越行動が実現できる。以下にモデルの記述に必要な記号を定義する。

- x_{ij} : 座標 (i, j) のセルの状態 $.j = 0$ が走行, $j = 1$ が追越車線を示す
- v_{ij} : x_{ij} の車の前 unit での速度
- p_{ij} : x_{ij} の車の上限速度

3.2 走行ルール

拡張 ASEP モデルにおける前進ルールと車線変更ルールを図 3, 図 4 にそれぞれ示す。

3.2.1 前進ルール

最高速度を $7[\text{セル}/\text{unit}]$ とし、更新は $7[\text{step}]$ を $1[\text{unit}]$ として行う。 $1[\text{step}]$ ごとに ASEP モデルと同様のルールを適用する。 ASEP との相違は一度停止した運転者（以下、エージェントと呼ぶ）はその unit が終了するまで停止し続けるという点である。これは「スロースタートルール」[西成 06] と呼ばれ、一度停止した車は発進が鈍くなるという性質を反映するためのルールである。

また、各エージェントに上限速度 p_{ij} を設定したため、更新の結果それ以上前進できる場合であっても停止する可能性がある。この上限速度 p_{ij} を複数用意することによってエージェントの技術や性格などに依存する運転特性の多様性が実現できる。

3.2.2 車線変更ルール

unit 開始時には以下の 3 つの判断を行い、かつ隣のレーンが空いている場合に車線変更を行う。自由走行ルールと他の 2 つのルールが同時に適用されることはなく、また通常変更ルールとクラクションルールが同時に適用される場合にはクラクションルールが優先されるものとする。

1. 自由走行ルール

走行・追越両車線について前後 100 セルにわたってエージェントが存在しない場合、必ず走行車線に移動する。これは道路交通法 20 条により、追越を行わない車両は走行車線を維持することが求められていることに対応した。

2. 通常変更ルール

走行・追越両車線について前方 20 セル間のエージェントの平均速度を取得し、その値が高いレーンへ車線変更を実行する。これは、渋滞に巻き込まれないよう比較的空いているレーンに移動するエージェントの心理に対応している。ただし移動先の平均速度が上限速度 p_{ij} より高い場合車線変更は行わない。

3. クラクションルール

同一レーンの後方 1 セルにエージェントが存在する場合、車線変更を思考する。そのエージェントと自己の上限速度 p_{ij} を比較した結果、後方の上限速度の方が大きい場合に車線変更を実行する。これは後方の車両に煽られている状況に対応している。

```

if  $x_{ij} = 1, x_{i+1j} = 0,$  and  $p_{ij} > v_{ij}$ 

then  $x_{i+1j} \leftarrow x_j$ 

```

図 3: 拡張 ASEP モデルの前進ルール

1. 自由走行ルール

```

if  $x_{ij} = 1$ 

and  $\sum_{k=-100}^{100} x_{i+kj} + x_{i+kj'} = 1$ 
( $j \neq j', j = 0, 1$ )

then  $x_{ij'} \leftarrow x_{ij}$ 

```

2. 通常変更ルール

```

if  $x_{ij} = 1, x_{ij'} = 0,$  and  $p_{ij} \geq ave_{j'} > ave_j$ 
( $ave_j = \sum_{k=0}^{20} v_{i+kj}/x_{i+kj}$ )

then  $x_{ij'} \leftarrow x_{ij}$ 

```

3. クラクションルール

```

if  $x_{i1} = x_{i-11} = 1, x_{i0} = 0,$  and  $p_{i-11} > p_{i1}$ 

then  $x_{i0} \leftarrow x_{i1}$ 

```

図 4: 拡張 ASEP モデルの車線変更ルール

4. 実験

4.1 実験設定

全長 1000 セルの高速道路を考え、走行・追越の 2 車線をおく。また、エージェントが道路の終端に至ると再び始点に現れる周期的境界条件とし、道路内のエージェント数は不変になるよう設定した。初期配置は車線に関係なくランダムとした。

4.2 予備実験

上限速度 p_{ij} を 4, 5, 6, 7[セル/unit] の 4 種とし、現実的な分布を探るためそれらを正規分布 $N(\mu, (2/3)^2)$ で発生させて予備実験を行った。それぞれの間で基本図の形状に差は見られなかったが、走行車線走行割合を密度ごとにプロットした結果を図 5 に示す。 $5.5 \leq \mu \leq 6.0$ で図 6 に示した現実のデータに近づいていることがわかる。特に低密度域での走行割合に関してその差が顕著である。 $5.5 \leq \mu \leq 6.0$ では明確な逆転が見られ、追越車線に存在するエージェント数が走行車線を上回っていることがわかる。

また、今後の実験においてこれらの値の間に有意な差は見られなかったため、以降 $\mu = 6.0$ のパラメータについての結果を採用するものとする。

この時、1 セル = 5[m] とし $1[\text{unit}] = 1[\text{sec}]$ と考えると上限速度の平均値は 108[km/h] となり、日本国内における高速道路の実勢速度 [警察庁 08] と対応させることができる。

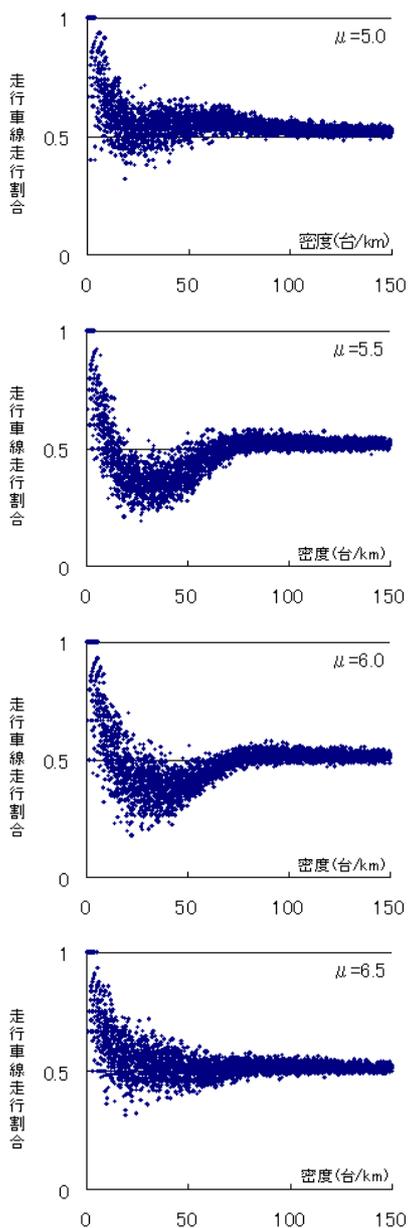


図 5: 走行車線走行割合 $5.0 \leq \mu \leq 6.5$

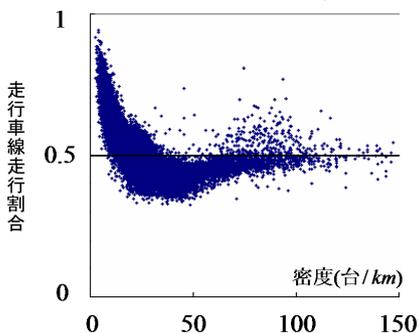


図 6: 現実のデータ ([西成 06] から引用)

4.3 実験結果

図 7 に拡張 ASEP モデルとクラクションルールを除いたモデルの基本図を示す．密度 50 [台/km] 付近で拡張 ASEP モデルにだけメタ安定状態が見られることがわかる．

また，この拡張 ASEP モデルについて車線ごとの基本図を

図 8 に示す．追越車線の流量は低密度領域で走行車線を逆転し，密度 25 [台/km] 付近でメタ安定状態が確認された．ただし，車線ごとの基本図においては密度，流量ともに道路全体の半分の値をとることに注意したい．結果として両基本図におけるメタ安定状態は同一のものである．

5. 考察

5.1 走行車線走行割合の逆転現象について

図 7 に示されるように，双方のモデルの基本図に見られる違いは 50 [台/km] 付近でのメタ安定状態のみであった．そこで図 9 にクラクションルールを除いたモデルの走行車線走行割合を示す．図 6 と比較し，密度 50 [台/km] 以下で走行車線走行割合が追越車線を下回る逆転現象が見られないことがわかる．このことは追越車線における高速交通流が実際の交通流に大きな影響を与えていることを示している．

加えて，高速交通流を実現するためには後方からの相互作用が大きく関わっているとも言える．実際，上限速度 p_{ij} の高い車両が後方からクラクションを鳴らすことにより高速での移動を志向する車両のみが選択的に追越車線に残される．これにより相対的に追越車線の流量とエージェント数が増加し，臨界密度以下での逆転現象がもたらされたと考えられる．

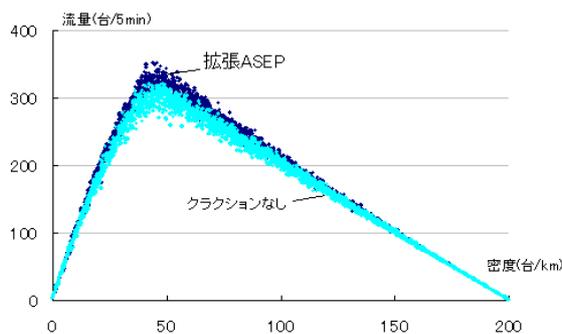


図 7: モデル別の基本図

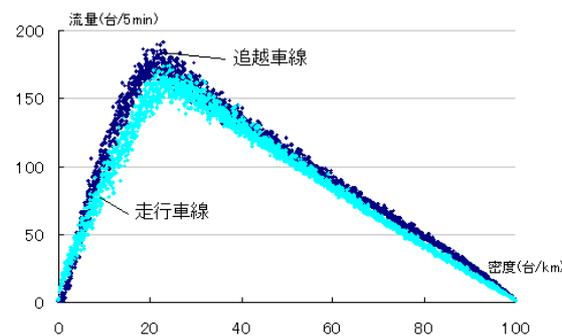


図 8: 拡張 ASEP モデルの車線別基本図

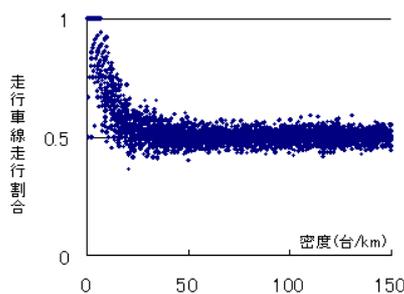


図 9: クラクションルールを除いたモデルの走行車線割合

5.2 車線別の相移転について

図 8 は道路全体のグローバルな密度によって各車線の流量をプロットしたものであった。しかし、実際には図 7 のように車線ごとのエージェント数は複雑に変化しているため車線ごとに解析する必要がある。そこで図 10 に車線別のローカルな密度による基本図を示す。

第一に自由走行相での傾きの違いが確認できる。一般に渋滞していない道路においては追越車線の流れが速くなるが、基本図におけるこの傾きは観測地点での平均速度に対応するため、臨界密度付近までは追越車線の平均速度のほうが高くなっていることがわかる。

次に、相転移の起こる密度が異なっていることも確認できた。ローカルな密度を使用した場合にも追越車線にのみメタ安定状態が現れているものの、渋滞相への相転移が走行車線よりも低密度で起こっている。これは高速交通流の不安定さによるものであり、メタ安定状態維持の難しさを表している。実際には追越車線のみで渋滞が起こることはなく、図 8 のとおり同時に相転移するが、臨界密度付近では走行割合の逆転現象が発生しているため、常に追越車線からの車線変更を原因とした渋滞が系全体で引き起こされていることがわかる。

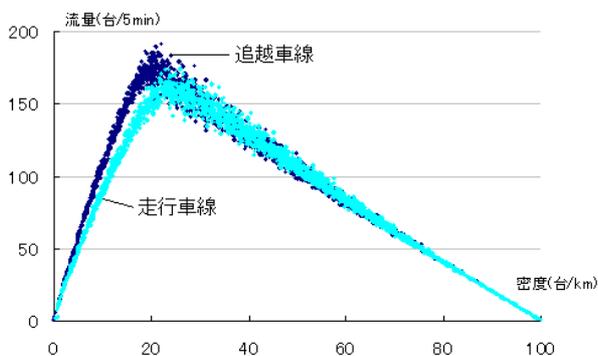


図 10: ローカルな密度による車線別基本図

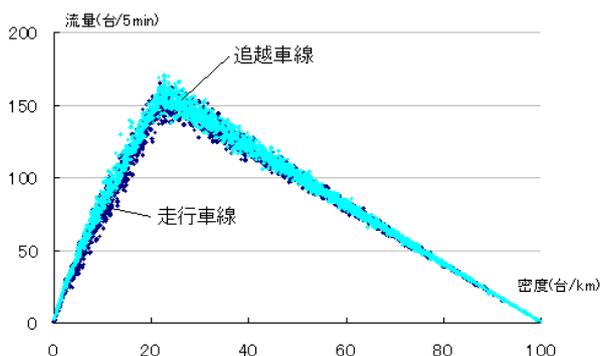


図 11: クラクシヨナルールを除いたモデルの車線別基本図

5.3 モデル別の自由走行速度について

拡張 ASEP モデルからクラクシヨナルールを除いた場合の基本図を図 11 に示す。図 10 と比較し自由走行相での挙動が大きく異なるため、この点について以下に考察する。

まず、拡張 ASEP モデルからクラクシヨナルールを除いた場合走行変更ルールは 2 車線間でほぼ同じものとなる。自由走行ルールはごく低密度時にしか適用されないため、車線変更は通常変更ルールの適用時にもみ発生するからである。以上の結果として車線ごとの交通流の性質に偏りが無くなるため、図 11 のとおり基本図差はほぼ重なった状態となる。

この時、各車線におけるエージェントの上限速度 p_{ij} にも偏りは生じていないため、比較的上限速度の低い $p_{ij} = 4, 5$ [セル] のエージェントがボトルネックとなる。4.2 と同様に 1 セル = 5[m], 1[unit] = 1[sec] とみなせば 72[km/h] から 96[km/h] に相当することになり、基本図から読み取れる自由走行相での速度と一致している。

また、拡張 ASEP モデルの追越車線にはクラクシヨナルールが適用されるため、一定以上の密度において上限速度 p_{ij} の低いエージェントは次々と走行車線へ車線変更していく。結果的に車線の平均速度が増加し、走行車線からの通常変更ルールの適用を妨げることになる。実験では $\mu = 6.0$ としたため追越車線のエージェントはほぼ $p_{ij} = 6, 7$ [セル] で構成されることになり、108[km/h] から 126[km/h] に相当する。実際、基本図から読み取れる自由走行速度は常にこの値におさまっていることがわかる。

拡張 ASEP モデルの走行車線については、追越車線でのクラクシヨナルール適用により p_{ij} の低いエージェントが集中することになる。特に実験開始から一定時間が経過すると $p_{ij} = 4, 5$ [セル] のエージェントに対して車線変更ルールが適用されることは少なくなるため、クラクシヨナルールを除いたモデルと同様に車線の平均速度は 72[km/h] から 90[km/h] に相当する。基本図から読み取れる自由走行速度と一致する。

6. まとめ

本研究では高速道路の複数レーン区間での自然渋滞に注目し、車線変更が与える交通流への影響について考察した。その結果車両の前方の情報のみで行動するモデルに比べ、後方からの情報も考慮する拡張 ASEP モデルではメタ安定状態が確認された。以上は走行ルール、主として車線変更ルールにおいて車線間で偏りを持たせることにより、ボトルネックを一部解消して系全体の効率を高めたことによるものであった。

今後は車線変更ルールを適用する頻度・順序の影響の考察、及び車線間の走行ルールの偏りの再設定によってメタ安定状態を維持していくことが課題として挙げられる。

参考文献

- [国交省] <http://www.mlit.go.jp/road/ir/data/jutai/index-d.html> (国土交通省)
- [東日本道路] http://www.e-nexco.co.jp/activity/agreeable/detail_03.html (東日本道路株式会社)
- [西成 06] 西成活裕: "渋滞学", 新潮社 (2006)
- [杉山 03] 杉山雄規: "交通流の物理", ながれ, 第 22 巻 pp.95-108(2003).
- [警察庁 08] "平成 20 年度 規制速度決定の在り方に関する調査研究"
<http://www.npa.go.jp/koutsuu/kisei39/kisei20090402-3.pdf>(警察庁)
- [加藤 00] 加藤恭義: "セルオートマトン法による道路交通シミュレーション", 人工知能学会誌, 15 巻 2 号, pp.242-250(2000).
- [玉城 04] 玉城龍洋, 安江里佳, 北英輔: "確率速度モデルと CA 法による交通シミュレーション" 情報処理学会論文誌, vol.45, No.3, pp.858-869(2004).