

# 交通の流れ現象とシミュレーション

## SIMULATION OF TRAFFIC FLOW PHENOMENON

玉城龍洋<sup>1)</sup>, 北 英輔<sup>2)</sup>

Tatsuhiko TAMAKI and Eisuke KITA

1) 名古屋大学人間情報学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町1, E-mail: tamaki@ipl.human.nagoya-u.ac.jp)

2) 名古屋大学情報科学研究科 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町1, E-mail: kita@is.nagoya-u.ac.jp)

This paper describes traffic flow simulation on a freeway by using cellular automata based on stochastic velocity model. First the mathematical model of the object under consideration and the local rules are defined. Then, the application of the present scheme to the traffic flow simulation on one- and two-lane freeways shows that the traffic phenomena such as meta-stable phenomenon can be simulated well by the present scheme. Finally, we will discuss the effect of the initial car distribution, the maximum velocity, the car following distance and the acceleration rate to the traffic flow.

**Key Words:** Traffic Flow, Stochastic Velocity Model, Cellular Automata, Local Rule

### 1. はじめに

円滑な道路交通を実現することは、経済の発展だけでなく、最近では都市部を中心とする周辺環境の点からもきわめて重要と考えられている。そこで、交通渋滞の原因を明らかにし、その問題点を改善するために様々な交通シミュレータが開発されている<sup>(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11)</sup>。ところで、交通シミュレーションで用いられるモデルはマクロモデルとミクロモデルに大別できる<sup>(12)</sup>。マクロモデルでは、交通流を流体近似して解析を行うので、計算コストを抑えることができる。これに対して、ミクロモデルでは、車両1台1台の動きをコンピュータ上でシミュレートし、それらの相互干渉の結果として交通流を表現するので、計算コストがかかる。計算コストの理由から交通シミュレータにおいてはマクロモデルを中心とした手法をとる場合が多い。しかし、実際の交通を表現するには車両ごとの挙動特性を表現する必要があるとの指摘<sup>(10)</sup>があり、個々の車両の挙動を記述できるシミュレーション手法が必要となる。マクロモデルを改良し、車両ごとの特性や交差点などでの車両行動を表現できるようにした方法も提案されている<sup>(1, 10)</sup>が、それとは別にミクロモデルに基づく手法が提案されている。本研究においても、ミクロモデルの一つであるセル・オートマトン法を用いて自動車専用道路の交通シミュレーションを行うことについて述べる。

セル・オートマトン法を用いた交通モデルとしては、Wolframにより分類されたルール184と名付けられたローカル・ルールに基づくモデルが最初と考えられる<sup>(13)</sup>。その後、これに確率的な速度変化を加えたNaSchモデル<sup>(14)</sup>などが提案されている。また、速度を自車両と前方車両の距離の関数と

考える車両追従モデルなどが提案されている<sup>(15)</sup>。これらの研究過程で、高速道路における実際の交通データを評価した結果、最大交通量をすぎると交通量が走行車両密度だけでは決定されず、同じ走行車両密度で交通量が大きく異なる場合の生じるメタ安定分岐現象<sup>(16, 17)</sup>が観察されることが示された。この現象はルール184-CAモデルでは観察できず、NaSchモデルでも完全には表現できない。そして、車両の加減速時の遅れを考慮しなければならないことが判ってきた<sup>(18)</sup>。このような挙動の遅れを効果的に表現するために、車両間距離に応じて車両速度を制御するような方法が必要となる。しかし、これまでのミクロモデル・シミュレータの中には比較的速度制御が単純なもの<sup>(11)</sup>がある。車両追従モデルを用いて柔軟な速度表現を可能とする方法<sup>(7)</sup>もあるが、この場合移動範囲が比較的広範囲となるために、車両の行動を決定するルールが複雑になる。これに対して、本研究では確率変数を用いた車両速度表現によるモデルを提案する。この方法では、各タイムステップごとに車両が移動する距離の最大値は1セルとなっている。したがって、これまでのモデルに比べて、1タイムステップでの移動距離が短い分移動区間に含まれる他車両は少なくなるので、他車両に対する自車両の行動を制御するローカル・ルールが単純化できる。

本研究では、確率速度モデルを用いたセル・オートマトン法を用いて、自動車専用道路での交通流をシミュレーションする。最初に確率変数を用いた速度モデルを提案し、それをもとに車両の行動や速度変化を表現するローカル・ルールを定義する。確率変数を用いた速度モデルと、それを用いたローカル・ルールは、本研究独自のものである。そして、シ

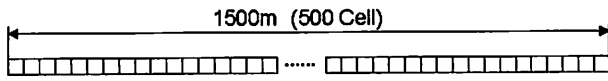


Fig. 1 one-lane road

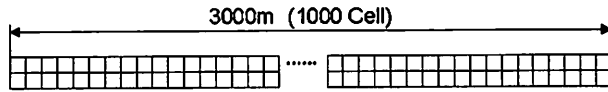


Fig. 2 Two-lane road

シミュレーション結果を実際の交通流のデータと比較し、現象をどの程度表現できるか検討する。特に、メタ安定分岐現象が提案したモデルで表現できることを示す。続いて、車両の初期配置、最高速度、加速度、車間距離などの交通流に影響を与える変数について検討していく。

## 2. 提案するシミュレーション手法

### 2.1. 解析領域

解析領域として片側1車線または2車線の自動車専用道路を考える。道路は多数の正方形セルの並びとして表現されており、解析例では大きさ  $3\text{m} \times 3\text{m}$  のセルを1000セル一列に並べて一本の道路を表現する。片側1車線道路でのセル配置を図1に、片側2車線道路でのセル配置を図2に示す。シミュレーションでは、連続する2セルによって車両1台を表現している。なお、このシミュレーションでは、乗用車、トラックなど車両の大きさの違いは無視している。また、シミュレーションにおいて1タイムステップは実時間で0.1sと考えている。

### 2.2. 確率速度モデル

本研究では、車両  $i$  の車両速度  $v^i$  は次式に基づいて確率変数  $P^i$  により表現される。

$$v^i = v_{\max} \times P^i \quad (1)$$

ここで  $v_{\max}$  は解析領域内の車両最大速度を示す。

速度  $v^i (< v_{\max})$  で走行する車両の移動は、シミュレーション上では以下のようにして実現される。

1. 式(1)を  $P^i$  について解き、それを  $P_0^i$  とする。

$$P_0^i = \frac{v^i}{v_{\max}} \quad (2)$$

2.  $0 \sim 1$  の範囲で一様乱数  $P(x)$  を発生する。
3.  $P(x) < P_0^i$  のときに、1セル進む。

この場合、 $P_0^i = 1$  のとき車両は毎タイムステップで1セル進むことになり、これが解析領域で走行する車両のうち最も高速で走行する車両の可能最大速度  $v_{\max}$  となる。

### 2.3. ローカル・ルール

車両の行動を決定するローカル・ルールは車両の直進・車線変更を表現する行動ローカル・ルールと車両の速度を制御するための速度ローカル・ルールからなる。そして、これら

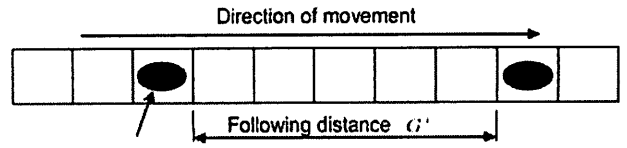


Fig. 3 Following distance in one-lane road

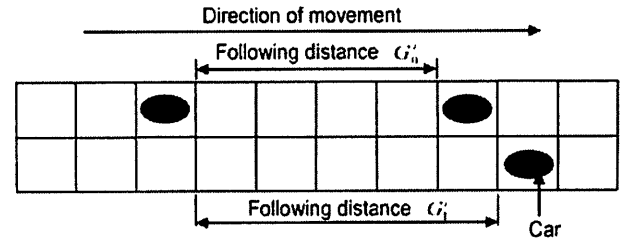


Fig. 4 Following distance in two-lane road

のローカル・ルールは、車両と前方車両の相対距離と安全車間距離により定義するので、最初に安全車間距離について述べる。

#### (1) 安全車間距離

本研究では、車両は前方車両との車間距離をあらかじめ与えられた距離に保とうとすると仮定する。この距離を安全車間距離  $G_s^i$  とよぶことにする。自動車検査業務実施要領によれば車両速度  $v^i$  の車両がとるべき車間距離  $G_s^{i,0}$  は次式と定められている。

$$G_s^{i,0} = 0.15 \times v^i + 0.0097 \times (v^i)^2 \quad (3)$$

$G_s^{i,0}$  は自動車性能から決定されるものであるが、実際には運転者の個性や車両特性によりこれ以上は近づかないという値、安全車間距離の最小値は異なる。そこで、安全車間距離の最小値を最小安全車間距離として車両ごとに異なる値に定め、記号  $G_s^{i,\min}$  で示すことにする。ただし、車両が停車時には車間距離は最小安全車間距離  $G_s^{i,\min}$  よりも遙かに小さいので、 $v^i = 0$  においては  $G_s^i = 0$  とする。

以上をまとめると、安全車間距離  $G_s^i$  は次式で与えられる。

$$G_s^i = \begin{cases} \max(G_s^{i,0}, G_s^{i,\min}) & (v^i > 0) \\ 0 & (v^i = 0) \end{cases} \quad (4)$$

ここで  $\max(G_s^{i,0}, G_s^{i,\min})$  は、両者の大きい方を与える。

#### (2) 行動ローカル・ルール

##### 片側1車線道路の場合

1. 自車両と前方車両の車間距離  $G^i$  を評価する (図3)。
2. 安全車間距離  $G_s^i$  を式(4)により計算する。
3. 速度ローカル・ルールへ進む。
4. 2.2節で示した確率速度モデルの定義に従って車両は前方に進む。

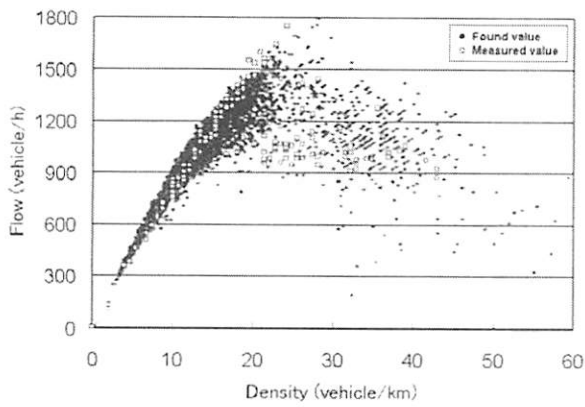


Fig. 5 Traffic flow and density

### 片側 2 車線道路の場合

片側 2 車線道路の場合、車線変更を含むので片側 1 車線道路の場合よりも複雑となる。

1. 走行している車線の前方車両との車間距離  $G_0^i$  と、隣車線の前方車両との車間距離  $G_1^i$  を評価する (図 4).
2. 安全車間距離  $G_s^i$  を式 (4) により計算する。
3.  $G_0^i > G_s^i$  ならば、 $G^i \leftarrow G_0^i$  とする。
4.  $G_0^i < G_s^i$  ならば車線変更を行い、 $G^i \leftarrow G_1^i$  とする。
5. 速度ローカル・ルールへ進む。
6. 2.2 節で示した確率速度モデルの定義に従って車両は前方に進む。

### (3) 速度ローカル・ルール

以下において、 $v_{\max}^i, \alpha^i$  はそれぞれ車両ごとに設定された最大速度と加速度を示す。ただし、 $v_{\max}^i < v_{\max}$  である。

1.  $G_s^i = G^i$  の場合、現在速度を維持する。
2.  $G_s^i > G^i$  の場合、 $v^i \leftarrow v^i - \alpha^i$  (減速)
3.  $G_s^i < G^i$  の場合、 $v^i \leftarrow v^i + \alpha^i$  (加速)
4.  $v^i > v_{\max}^i$  の場合、 $v^i \leftarrow v_{\max}^i$  (最大速度を超えないように修正)

### 2.4. 車両配置と端点条件

交通流セル・オートマトンにおいて、車両を発生する方法として二つの方法が考えられる。シミュレーションの初期段階で解析対象領域にランダムに車両を配置する初期配置型と、流入車両密度を設定することにより、流入する車両を一定に保つ車両流入型である。このうち、本研究では初期配置型を用いる。また、端点において周期境界条件を用いる。周期境界条件では、道路出口から流出した車両が反対側の流入点から進入するので、車両密度を一定に保つことができる。

## 3. 解析例

### 3.1. 実データとの比較

解析対象として片側 2 車線の自動車専用道路を考える。解析領域は各車線 1000 セル、合計 2000 セルの 2 車線直線道路

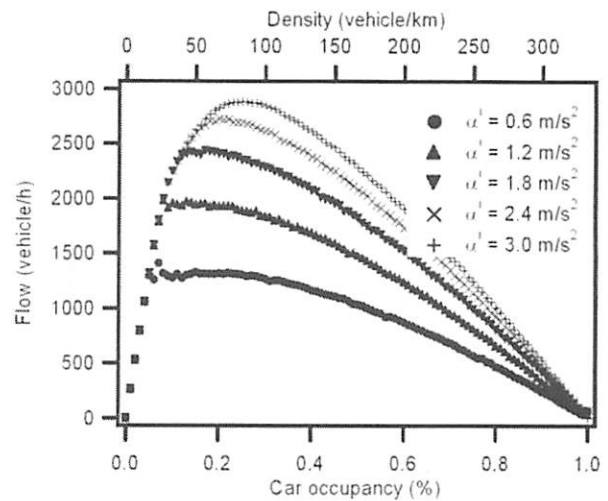


Fig. 6 Effect of acceleration for traffic flow

である (図 2)。解析開始時に平均 20 台/km、標準偏差 10 の正規乱数に従った車両密度で車両を配置する。車両流は左側から流入して、右側へ流出した後、左側から再び流入する (周期境界条件)。なお、以下において走行車両台数の単位には台/km (= 台/(1000m)) を、車両速度に km/h (= 5/18 × m/s) を用いている。MKS 単位系を用いるよりも、感覚的に理解しやすいと考えたからである。

最大速度	$75.6 < v_{\max}^i < 108 \text{ km/h}$
加速度	$0.6 < \alpha^i < 0.9 \text{ m/s}^2$
最小安全車間距離	$6 < G_s^{i, \min} < 21 \text{ m}$

このように、最大速度、加速度、最小安全車間距離には幅を持たせており、シミュレーションのときに各車両で一様乱数により範囲内から値を設定するようにすることで、車両ごとに異なる値をとるようにしてシミュレーションしている。なお、加速度は国土交通省のデータ<sup>(19)</sup>を元に設定している。

車両密度を変化させてシミュレーションを行い、十分な時間が経過した後の交通量を図 5 に示す。横軸には 1km あたりの車両台数である車両密度を、縦軸には道路の終端 (右端) で評価した 1 時間に通過する車両台数である交通量をとる。灰色の点が実データを、白丸印が解析結果を示す。比較に用いた実データは、東名高速道路下り岡崎・豊田間の交通量であり、1999 年 8 月の 1 か月分のデータについて、5 分ごとの平均値を計算してプロットしている<sup>(20)</sup>。交通量は車両密度の増加とともに増加し、車両密度 20 台/km 付近で最大値を示している。また、車両密度 20~40 台/km でのデータは、車両密度 0~20 台/km でのデータに比べるとばらつきが大きく、同一の車両密度で異なる交通量の交通流が生じていることがわかる。これは、車両密度 20~40 台/km では、同一車両密度にも関わらず渋滞が発生する場合と発生しない場合が起こりえることを示している。このような現象はメタ安定分岐現象と呼ばれている。

### 3.2. 加速度の影響

全車両の加速度を変化させて解析を行い、車両密度と交

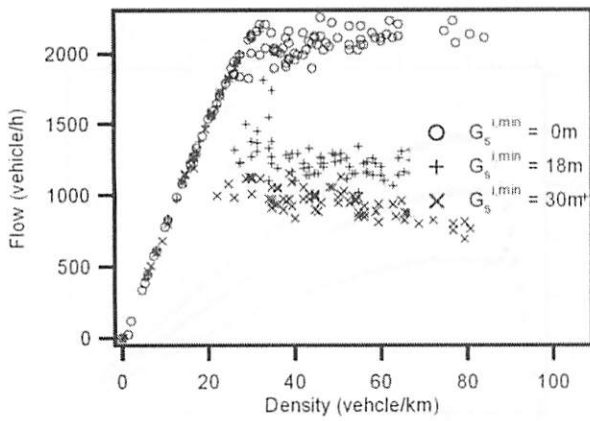


Fig. 7 Effect of minimum safety gap for traffic flow

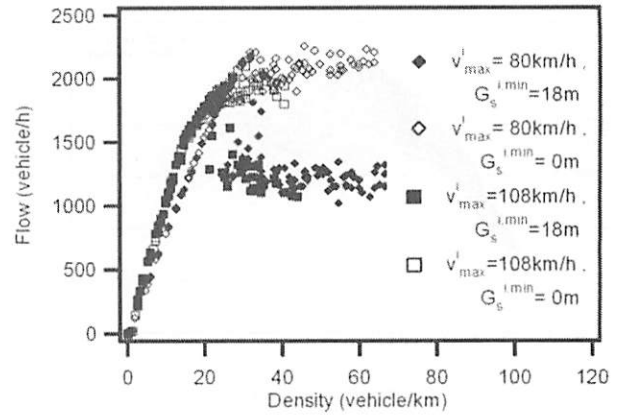


Fig. 8 Effect of maximum velocity for traffic flow

流量や車両速度の影響を比較する。シミュレーション・パラメータを次のように与える。

最大速度	$v_{\max}^i = 80\text{km/h}$
加速度	$\alpha^i = 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0\text{m/s}^2$
最小安全車間距離	$G_s^{i,\min} = 0\text{m}$

加速度は0.6,1.2,1.8,2.4,3.0 m/s<sup>2</sup>のいずれかの値をとり、最小安全車間距離  $G_s^{i,\min} = 0\text{m}$  である。パラメータは、すべての車両で同一とする。解析回数は36000タイムステップ(1時間)である。

図6には、異なる加速度の場合における車両の道路占有率(車両密度)と交通量の関係を示す。横軸には、セルのうち車両によって占められたセルの割合である車両の道路占有率(%)と車両密度(台/km)を、縦軸には1時間あたりの走行車両台数である交通量を示す。これより、車両密度の増加に伴い交通量は徐々に増加し、そのときの加速度に応じて異なる車両密度で最大交通量に達した後、徐々に減少して最大密度において交通量は0台/hとなっている。加速度の増加により最大交通量が増加する理由は次のように考えられる。つまり、車両加速度が大きい場合、安全車間距離よりもかなり小さな車間距離をとって走行しても、車両は安全に減速することができる。逆に、かなり大きな車間距離をとっていても、短時間で最大速度に達するので、短時間で走行することができて、これにより最大交通量は増大する。

### 3.3. 最小安全車間距離の影響

全ての車両の最小安全車間距離  $G_s^{i,\min} = 0\text{m}$ 、または18m、または30mとして解析を行い、車両密度と交通量や車両速度の影響を比較する。シミュレーション・パラメータを次に示す。パラメータは、すべての車両で同一とする。解析回数は36000タイムステップ(1時間)である。

最大速度	$v_{\max}^i = 80\text{km/h}$
加速度	$\alpha^i = 1.2\text{m/s}^2$
最小安全車間距離	$G_s^{i,\min} = 0, 18, \text{ or } 30\text{m}$

図7には、異なる最小安全車間距離の場合における車両密度と交通量の関係を示す。これより、最小安全車間距離の

大きさによらず、車両密度の増加に伴い交通量は直線的に増加し、車両密度30台/km付近において最大値を示している。車両密度30台/kmを越えたところでの様子は最小安全車間距離により異なる。まず、 $G_s^{i,\min} = 0\text{m}$ の場合、車両密度30台/km以上では交通量はおよそ最大交通量を保っている。これに対して、 $G_s^{i,\min} = 18, 30\text{m}$ の場合では最大交通量は急に減少し、減少の程度は  $G_s^{i,\min} = 30\text{m}$ のほうが大きい。これは、安全車間距離の大きさによらず、車両密度30台/km以上では交通状態は渋滞となるが、渋滞状態では車両は連続して走行するので、同一の平均速度で比較すると交通量は車間距離に反比例することになり、最小安全車間距離が大きいほど交通量は少なくなることを示している。

### 3.4. 最高速度の影響

全ての車両の最大速度を  $v_{\max}^i = 80$  または  $108\text{km/h}$  として解析を行い、車両密度と交通量や車両速度の影響を比較する。また、先の解析において安全車間距離の影響も大きいことが判明したので、最小安全車間距離も  $G_s^{i,\min} = 0, 18\text{m}$  の2つの場合について解析を行う。解析に用いたパラメータを次に示す。パラメータは、すべての車両で同一とする。解析回数は36000タイムステップ(1時間)である。

最大速度	$v_{\max}^i = 80 \text{ or } 108\text{km/h}$
加速度	$\alpha^i = 1.2\text{m/s}^2$
最小安全車間距離	$G_s^{i,\min} = 0 \text{ or } 18\text{m}$

図8には、車両密度と交通量の関係を示す。これより、車両密度0~30台/kmでの交通量の増加割合(グラフの傾き)は、安全車間距離の大きさによらず、最大速度の大きい方が大きくなっていることがわかる。このことは、最大交通量に達するまでの交通量の増加率が最大速度の大きさに依存することを示している。一方、最大速度の大きさによらず、最大交通量はほぼ同じ車両密度(20~30台/km付近)で生じている。そして、車両密度が30台/kmを越えたところでの交通量は、最大速度  $v_{\max}^i$  よりも最小安全車間距離  $G_s^{i,\min}$  に強く依存している様子が見られる。つまり、 $G_s^{i,\min} = 0\text{m}$  ではだいたい最大交通量に等しい状態で推移するのに対して、 $G_s^{i,\min} = 18\text{m}$  では極端に少なくなる。

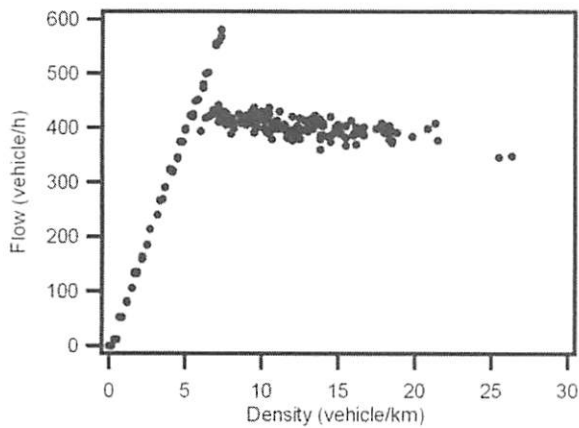


Fig. 9 Traffic flow and density (1 lane freeway)

### 3.5. 車両配置の影響

車両の初期配置の影響を検討するために、道路長 3000m の片側 1 車線直線道路での交通シミュレーションを考える (図 1)。片側 1 車線の道路を用いるのは次のような理由である。片側 2 車線道路では車両間で追い越しが発生するので車両の初期配置における相対位置の関係が変化するのに対して、片側 1 車線ではそのようなことがないので、初期配置の影響を評価するのにより適していると考えられるためである。解析に用いたパラメータ値を次に示す。

最大速度	$v_{\max}^i = 80\text{km/h}$
加減速度	$\alpha^i = 0.6\text{m/s}^2$
最小安全車間距離	$G_s^{i,\min} = 18\text{m}$

このパラメータは、すべての車両で同一とする。解析回数は 36000 タイムステップ (1 時間) である。

車両密度を変化させてシミュレーションを行い、十分な時間が経過した後の交通量を図 9 に示す。横軸には 1km あたりの車両台数である車両密度を、縦軸には解析領域の終端で測定した 1 時間に通過する車両台数である交通量をとる。車両密度 0~10 台/km では、車両密度の増加に伴って交通量も直線的に増加している。そして、車両密度 5~10 台/km において同一車両密度において異なる交通量の交通流が存在しており、ここでメタ安定分岐現象が発生していることがわかる。

そこで、メタ安定分岐現象を起こす車両密度 6.67 台/km に固定して 50 回の試行を行い、交通量が最小となった交通流と交通量が最大となった交通流での状態遷移図を比較する。ここで、前者を低速流、後者を高速流と呼ぶことにする。低速流 (交通量 367.2 台/h) の遷移図と高速流 (交通量 547.2 台/h) の遷移図を、それぞれ図 10 と図 11 に示す。図は横方向に「あるタイムステップでの車両位置」を、縦方向に「タイムステップ」を取っており、黒い部分は空きセル (道路) を、白い部分は車両を示している。

図 10 と図 11 を比較すると、図 10 においては地点 A において渋滞が発生しているために全体の交通量が小さくなり、それが平均速度の低下を招いていると予想できる。図 10 において渋滞が発生する状況は次のように説明できる。初期状態ではすべての車両が図の左から右方向に同時に進行し始めるが、地点 A 付近では後続車の最小安全車間距離に比べて前走車との車間距離が比較的近く、後続車は走行開始後すぐに減速し、車間距離によってはほとんど停止した状態となる。しばらくすると、前方車両との車間距離の広がりに伴い、減速した車両は再び走行を開始するが、そのころには後続車両が近づいており、後続車が渋滞状態に入ることとなる。このようにして、地点 A における渋滞は継続することとなる。このように、図 10 と図 11 では車両の平均密度は同じであるが、図 10 では初期配置において最小安全車間距離に比べて局所的に車両密度の高いところがあり、これによって発生した渋滞が最後まで解消されないために、交通量や平均速度を減少させることになる。

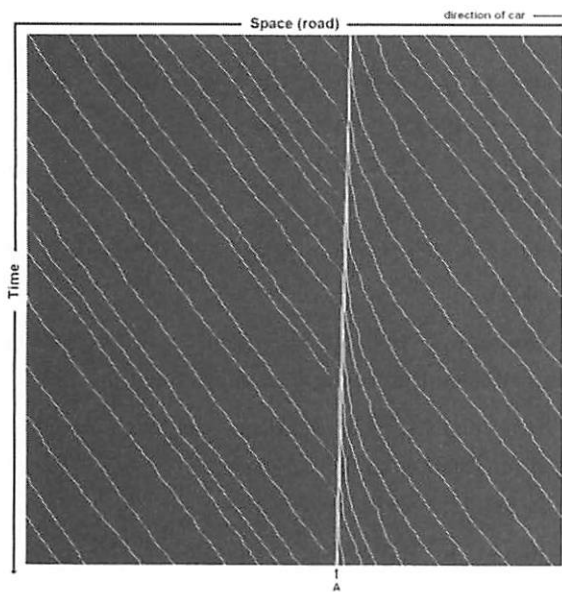


Fig. 10 Road state transition (Low flow)

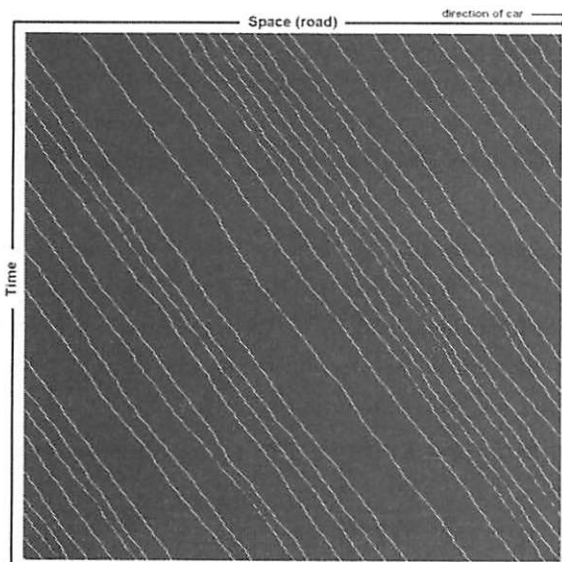


Fig. 11 Road state transition (High flow)

### 4. まとめ

本研究では、確率速度モデルを用いたセルオートマトン法による自動車専用道路の交通流シミュレーションについて述べた。

最初に、提案する方法によって片側2車線道路における交通流シミュレーションを行い、その結果を東名高速道路下り岡崎-豊田間における実データと比較した。それにより、提案手法は実測値をよく表現できていることがわかった。

次に、片側2車線または1車線道路において、車両加速度、最小安全車間距離、最高速度、初期車両配置の交通挙動に対する影響を評価した。

車両加速度の交通量に対する影響を評価した結果、加速度が大きいほど最大交通量と平均速度が大きくなることがわかった。

最小安全車間距離の交通量に対する影響を評価した。これより、最小安全車間距離の大きさによらず車両密度30台/km付近において交通量は最大となった。そして、車両密度30台/km以上では交通量は最小安全車間距離に依存し、最小安全車間距離が大きいほど交通量は小さくなることがわかった。

最高速度の交通量に対する影響を評価した結果、最大交通量に達するまでの交通量の増加率は最大速度の大きさに依存するが、最大交通量は最大速度の大きさに依存せず、ほぼ同じ車両密度(20~30台/km付近)で最大となることがわかった。

片側1車線道路について、異なる車両の初期配置から解析を行い、メタ安定分岐現象の原因について検討した。ここで、交通量の大きい場合と小さい場合の交通流の道路状態遷移図を比較し、局所的に高い車両密度が存在するときに局所的な交通渋滞が発生し、それが解消しないで他の車両に伝播することによりメタ安定分岐現象が発生することがわかった。

## 参考文献

- (1) アイ・トランスポート・ラボ. 街路網交通流シミュレーションモデル AVENUE. <http://www.i-transportlab.jp/products/avenue/>.
- (2) フェニックス・リサーチ. 交通流シミュレータ NETSIM 日本語版. <http://www.phoenix-r.co.jp/products/netsim/netsim.htm>.
- (3) 鹿島建設. Its 道路インフラ計画支援システム REST. <http://www.kajima.co.jp/news/press/199812/22c1fo-j.htm>.
- (4) 国土交通省国土技術政策総合研究所. Sipa. <http://www.nilim.go.jp/japanese/its/fields/sipa/sip.htm>.
- (5) (株)日立製作所・日立研究所. 交通流シミュレーションシステム TRAFFICSS. <http://www.ijsinet.co.jp/cp1/trafficss/pr01.htm>.
- (6) 伊藤忠テクノサイエンス(株). GIS 交通シミュレーションシステム tiss-NET. <http://www.gis.ctc-g.co.jp/geo/01products/tiss/tiss-NET01.HTML>.
- (7) VISITOK 研究会. ミクロ交通シミュレーションシステム VISITOK. <http://www.visitok.gr.jp/>.
- (8) 高木相, 藤木澄義, 谷口正成, 鈴木伸夫. 道路交通のダイナミクス(ii)-交差点車列生成ショックウェーブの挙動-. 情報処理学会, 高度交通システム研究会, 第1巻, pp. 71-76, 2000.
- (9) 猪飼國夫, 石川亮, 本多中二, 板倉直明. ファジィ推論を用いたネットワーク構造モデルによる自動車すり抜け運転動作などのシミュレーションモデルと渋滞解析. 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. SIG 14(TOM5), pp. 90-97, 2001.
- (10) 棚橋巖, 北岡広宣, 馬場美也子, 森博子, 寺田重雄, 寺本英二. 広域交通流シミュレータ NETSTREAM. 情報処理学会, 高度交通システム研究会, 第9-2巻, pp. 9-14, 2002.
- (11) 中村俊一郎, 五十嵐智也, 宮西洋太郎, 斉藤成一. 交通シミュレータ NITTS とそのマルチプロセッサ化について. 情報処理学会, 高度交通システム研究会, 第7-3巻, pp. 15-22, 2001.
- (12) 森下信. セルオートマトン 複雑系の具象化. 養賢堂, 第1版, 2003.
- (13) S. Wolfram. *Cellular Automata and Complexity*. Addison-Wesley Publishing Company, 1 edition, 1994.
- (14) K. Nagel and M. Schreckenberg. Cellular automaton model for freeway traffic. *Journal of Physics I france*, Vol. 2, pp. 2221-2229, 1992.
- (15) M. Bando, K. Hasebe, K. Nakanishi, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama. Phenomenological study of dynamical model of traffic flow. *Journal of Physics I France*, Vol. 5, pp. 1389-1399, 1995.
- (16) E. Tomer, L. Safonov, and S. Havlin. Stable and metastable states in congested traffic. In D. Helbing, H. J. Herrmann, M. Schreckenberg, and D. E. Wolf, editors, *Traffic and Granular Flow'99 - Social, Traffic and Granular Dynamics*, pp. 419-424. Springer Verlag, 1999.
- (17) R. Sollacher and H. Lenz. Nonlinear control of stop-and-go traffic. In D. Helbing, H. J. Herrmann, M. Schreckenberg, and D. E. Wolf, editors, *Traffic and Granular Flow'99 - Social, Traffic and Granular Dynamics*, pp. 315-320. Springer Verlag, 1999.
- (18) 杉山雄規. 交通流の物理. *ながれ*, Vol. 22, pp. 95-108, 2003.
- (19) 国土交通省. 自動車燃費一覧について. <http://www.mlit.go.jp/jidosha/nenpi/nenpulist/02.pdf>, 2002.
- (20) 菊池誠. 高速道路交通流の数理・はじめに. *応用数理*, Vol. 12, No. 2, pp. 2-6, 2002.