

セル・オートマトンによる自動車専用道路の交通シミュレーション

玉城 龍洋[†] 安江 里佳[†] 北 栄輔(英輔)^{††}

本研究では、確率速度モデルとセル・オートマトン法を用いた自動車専用道路の交通シミュレーションについて述べる。最初に、研究の背景について説明し、本論文で用いる確率速度モデルについて紹介する。続いて、解析対象のモデル化と、セル・オートマトンシミュレーションで用いるローカル・ルールを定義する。そして、提案手法を片側1車線と2車線の自動車専用道路道路での交通流のシミュレーションに適用し、シミュレーション結果を実データと比較し、実データでみられるメタ安定分岐現象が提案したモデルによって再現されていることを示す。最後に、車両の初期配置、最高速度、車間距離のとおり方、加速度などの交通流への影響を検討する。

Traffic Flow Simulation on a Freeway Using Cellular Automata

TATSUHIRO TAMAKI,[†] SATOKA YASUE[†] and EISUKE KITA^{††}

This paper describes traffic flow simulation on a freeway by stochastic velocity model and using cellular automata. First existing simulation models for the traffic flow are explained and the stochastic velocity model is introduced. Then, the mathematical model of the object under consideration and the local rules are defined. First, 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.

1. はじめに

円滑な道路交通を実現することは、経済の円滑な発展だけでなく、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^{1)~6)}。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^{7),8)}。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。そこで、計算コストの問題から、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、棚橋ら⁵⁾は、現実の交通にみられる渋滞問題の解決には交通を形作る個々の車両の挙動特性を評価する必要があることを指摘している。したがって、個々の車両の挙動を記述できるミクロモデルに基づくシミュレーション手法の研究が必要となる。そこで、本研究では、ミクロモデルの1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・オートマトンは、von Neumann と Ulam により 1950 年代の初めに提案された^{7),9)~11)}。セル・オートマトンによるシミュレーションでは、時間は微小タイムステップに、解析対象領域はセルと呼ばれる多数の区分領域に分割され、各セル上にはある種の離散的状態量が定義される。その状態量を近傍のセルとの相互作用のみを考慮することで離散時間ステップごとに推移させ、全体としての現象を表現する。各セルの状態量の更新には、ローカル・ルールと呼ばれる近傍セル間の局所関係式が用いられる。セル・オートマトンモデルを交通シミュレーションに用いる場合、道路は連続するセルの集まりとして定義される。そして、各セルの状態量として、そのセルに車両が存在するかどうかをとる。そして、車両間の関係式としてローカル・

[†] 名古屋大学人間情報学研究所

Graduate School of Human Informatics, Nagoya University

^{††} 名古屋大学情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Nagoya University

ルールを定義することになる。

セル・オートマトン法を用いた交通シミュレーションモデルとしては、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である¹²⁾。その後、これに速度変化を加えた NaSch モデル¹³⁾ なども提案されている。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。一方、都市の交通、特に交差点の交通をモデル化した研究としては、Biham らによって提案された BML モデルがある¹⁴⁾。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、NaSch モデルのように、1 タイムステップで複数セルを移動するモデルと比べると、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、自動車専用道路道路での交通流を確率速度モデルを用いたセル・オートマトン法を用いてモデル化し、シミュレーションを行う。そして、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について検討する。現実の交通では、同一の車両密度においても交通渋滞が発生する場合と発生しない場合が確認されており、これはメタ安定分岐現象と呼ばれている。そこで、特に、提案するモデルにおけるメタ安定分岐現象の再現性について検討する。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。

本論文の構成は以下のようになっている。2 章では、これまでの研究について簡単に述べる。3 章では、本研究で用いるセル・オートマトンモデルについて説明する。4 章は解析例であり、5 章では、解析例を通じて得られた結論について述べる。

2. 研究の背景

自動車専用道路での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マイクロモデルに大別できる^{7),8)}。マクロモデルでは交通流を流体现象として連続の式により扱うのに対して、マイ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。

最初に用いられていたのはマクロモデルであり、1950 年代に Lighthill-Whitham によって 1 次元流体モデルが提案されている¹⁵⁾。その後、日本でも、Musha

らによって Bergeres 方程式を適用した研究が行われている¹⁶⁾。

これに対して、マイクロモデルには、セル・オートマトンモデル、車両追従モデルなどがある⁸⁾。交通に対するセル・オートマトンモデルの研究は、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¹²⁾。これをルール 184-CA モデルと呼ぶことにする。このルールでは車間距離が開いていても加速しないなど現実と異なる点があるので、ルール 184-CA モデルに速度変化を加えたモデルが Nagel と Schreckenberg により提案されている¹³⁾。これを Schreckenberg に従って NaSch モデルと呼ぶことにする。一方、車両追従モデルでは、自車両と前方車両との距離により定められた連続関数によって車両速度を変化させる。このモデルも 1950 年代頃から研究されており、連続関数として様々なものが提案されている。この中で、関数として最適速度関数と名付けられた関数を用いるのが、最適速度モデルである。

我々の研究で提案するモデルは、基本的にセル・オートマトンモデルに基づいている。セル・オートマトンモデルなど、これまでマイクロモデルでは、速度変化を表現するために時間ステップごとの車両移動距離（セル・オートマトンモデルでは移動セル個数）を増減させるので、車両行動を制御するルールを定義するとき、かなり広い範囲について車両の存在を確認し、それらの車両と自車両の関係としてルールを定義する必要がある。そこで、本研究では車両速度を確率変数によって表現する方法を用いる。これを、確率速度モデルと名付けている。このモデルでは最大速度で走行するときに 1 セル移動するので、車両行動を制御するルールを定義するとき参照するセルの範囲がかなり小さくなり、その結果ルールを簡略化できる。

3. 提案するシミュレーション手法

3.1 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 $3\text{m} \times 3\text{m}$ のセルを一列に並べて 1 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

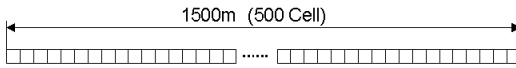


図 1 1 車線道路
Fig. 1 One lane road.

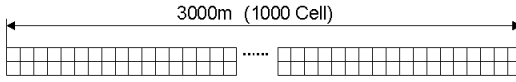


図 2 2 車線道路
Fig. 2 Two lane road.

は実時間で 0.1s と考えている。

3.2 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（ここで、上添字 i は車両 i における数値であることを示す）。

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

ここで v_{\max} は解析領域のセルの大きさと 1 タイムステップの設定時間により一意に決まる解析領域内の車両最大速度を示す。

そして、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) より導いた次式より P_0^i を求める。

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

(2) 0~1 の範囲で一樣乱数 $P(x)$ 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。

したがって、最大速度で走行する車両が 1,000 セルからなる道路を通り抜けるにかかる時間は、1 タイムステップが実時間で 0.1s であるから、

1000 タイムステップ = 100s \approx 1.67 分
となる。

3.3 ローカル・ルール

車両の行動を決定するために本研究で用いるローカル・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、これらのローカル・ルールは、車両と前方車両の相対距離により定義されるので、このために最初に安全車間距離を定義する。

3.3.1 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 と呼ぶことにする。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 $G_s^{i,\min}$ よりもはるかに小さいので、 $v^i = 0$ 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。

3.3.2 行動ローカル・ルール

行動ローカルルールは、片側 1 車線と片側 2 車線の場合で少し異なるので、それぞれに定義する。

片側 1 車線道路の場合の行動ローカル・ルールを図 3 に示す。最初に、車両は自車両と前方車両の車間距離 G^i を評価する。車間距離 G^i の評価方法を図 4 に示す。車間距離 G^i は自車両の存在するセルと自車両の進行方向前方で最も近い位置にある車両の存在するセルの間の空白セルの数にセルの長さ（今回のシミュレーションでは 3m）をかけて算出する。車間距離を評価した後、現在速度 v^i から安全車間距離 G_s^i を式 (4) により計算する。この後、速度ローカル・ルールへ進む。速度ローカル・ルールで速度を変更した後、3.2 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。

片側 2 車線道路の場合の行動ローカル・ルールを図 5 に示す。この場合、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。車両は、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。車間距離 G_0^i と G_1^i の評価方法を図 6 に示す。車間距離 G_0^i は自車両の存在するセルと自車両の進行方向前方で最も近い位置にある車両の存在するセルの間の空白セルの数にセルの長さをかけて算出する。一方、車間距離 G_1^i は、自車両の存在するセルの隣のセルと隣車線上で自車両の進行方向前方で最も近い位置にある車両の存在するセルの間の空白セルの数にセルの長さをかけて算出する。車間距離を評価した後、現在速度 v^i から安

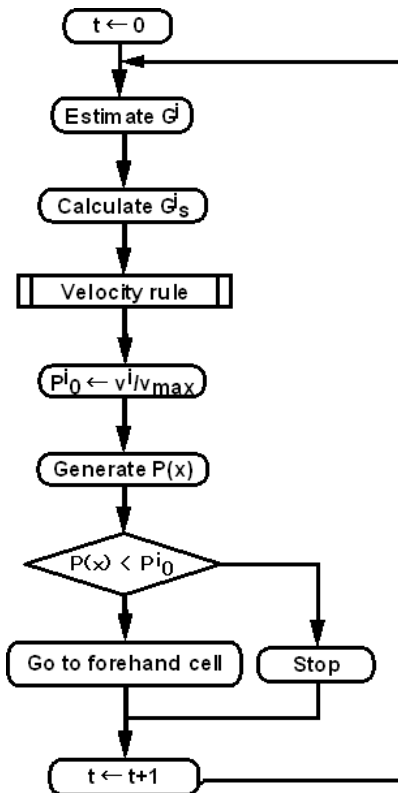


図 3 1車線行動ローカル・ルール
Fig. 3 Behaviour local rule on one-lane free-way.

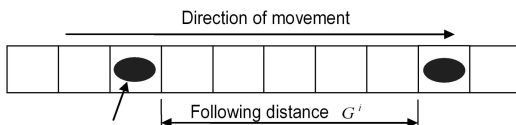


図 4 1レーン道路における車間距離
Fig. 4 Following distance in one-lane road.

全車間距離 G_s^i を式 (4) により計算する。 $G_0^i > G_1^i$ ならば、 $G^i \leftarrow G_0^i$ として速度ローカル・ルールへ進む。 $G_0^i < G_1^i$ ならば車線変更を行い、 $G^i \leftarrow G_1^i$ として速度ローカル・ルールへ進む。速度ローカル・ルールで速度を変更した後、3.2 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。

3.3.3 速度ローカル・ルール

速度ローカル・ルールのフローチャートを図 7 に示す。図中において、 v_{max}^i 、 α^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、 $v_{max}^i \leq v_{max}$ である。そして、現在速度から求めた安全車間距離 G_s^i と、自車両と前方車両との車間距離 G^i に応じて速度を変化させる。 $G_s^i = G^i$ の場合は現在速度を維持する。 $G_s^i > G^i$ の場合は、車間距離を大きくするために車両速度を $v^i \leftarrow v^i - \alpha^i$ として減速する。 $G_s^i < G^i$

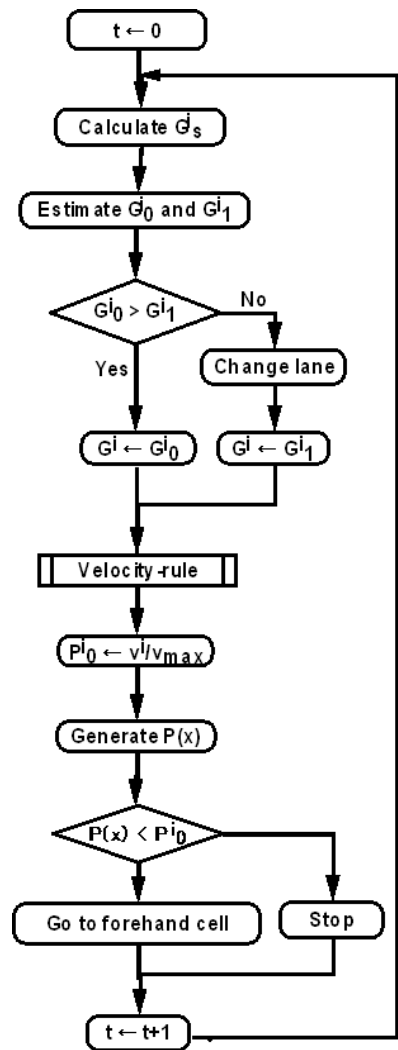


図 5 2車線行動ローカル・ルール
Fig. 5 Behaviour local rule on two-lanes free-way.

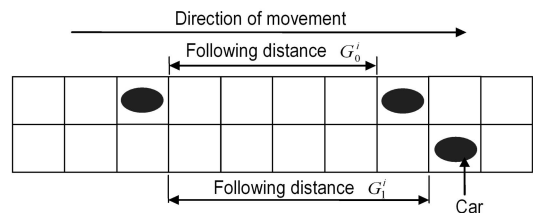


図 6 2レーン道路における車間距離
Fig. 6 Following distance in two-lane road.

の場合は、車間距離を小さくするために車両速度を $v^i \leftarrow v^i + \alpha^i$ として加速する。ただし、 $v^i > v_{max}^i$ のとき、つまり計算で求めた速度 v^i がその車両の最大速度 v_{max}^i よりも大きい場合、 $v^i \leftarrow v_{max}^i$ として、最大速度を超えないように修正する。

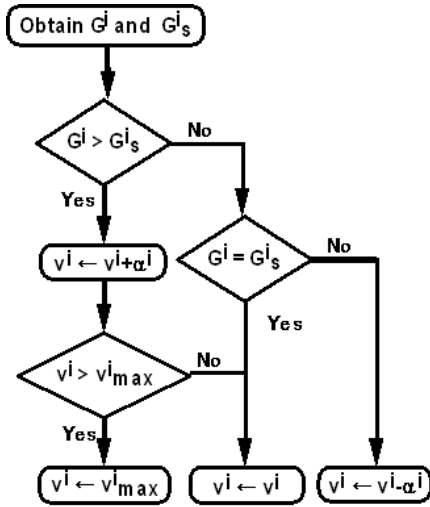


図 7 速度ローカル・ルール
Fig. 7 Velocity local rule.

3.4 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 2 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。

4. 解析例

4.1 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 1,000 セル、合計 2,000 セルの 2 車線直線道路である (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、右側へ流出する。そこで、道路の左端と右端には周期境界条件をとる。周期境界条件では、流出した車両は流入点に発生するので、ちょうど道路を 1 本につないだような状況を実現する。これにより、車両密度を一定に保つことができる。解析に用いたパラメータ値を表 1 に示す。ここで、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樣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¹⁷⁾をもとに設定している。

表 1 解析パラメータ (2 車線道路)
Table 1 Simulation parameters (2 lane road).

1 タイムステップ	0.1 s
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	$6 < G_s^{i,min} < 21 \text{ m}$
境界条件	周期境界条件
車両の初期配置	車両密度に比例してランダム配置

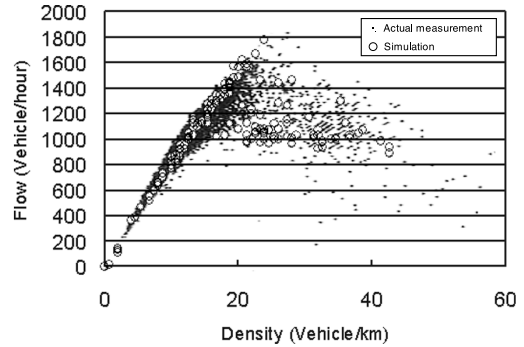


図 8 車両密度と交通量の関係図
Fig. 8 Traffic flow and density.

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 8 に示す。横軸には 1 km 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 カ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¹⁸⁾。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 のデータは、車両密度 0~20 台/km 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分かる。これは、車両密度 20~40 台/km では、同一車両密度にもかかわらず渋滞が発生する場合と発生しない場合が起こりうることを示している。このような現象は、実データから読みとることができるとともに、シミュレーションによってよく表現できていることが分かる。異なる車両密度において、渋滞が発生する場合と発生しない場合が起こる現象はメタ安定分岐現象と呼ばれており、この例からも分かるように実際の交通流でも一般に観測される現象である。

以下では、加速度、最小車間距離、最高速度、車両の初期配置などを変更してシミュレーションを行い、これらのパラメータが交通流に与える影響について検

表 2 解析パラメータ (加速度の影響)

Table 2 Simulation parameters (Effect of acceleration).

1 タイムステップ	0.1 s
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	$G_s^{i,\min} = 0 \text{ m}$
境界条件	周期境界条件
車両の初期配置	車両密度に比例してランダム配置

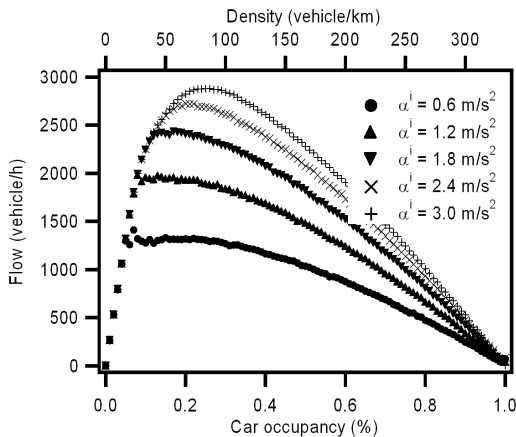


図 9 交通量に対する加速度の影響

Fig. 9 Effect of acceleration for traffic flow.

討することにする。

4.2 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・パラメータを表 2 に示す。加速度は 0.6, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0 m/s² 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 36,000 タイムステップ (1 時間) である。

図 9 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、車両密度の増加にともな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

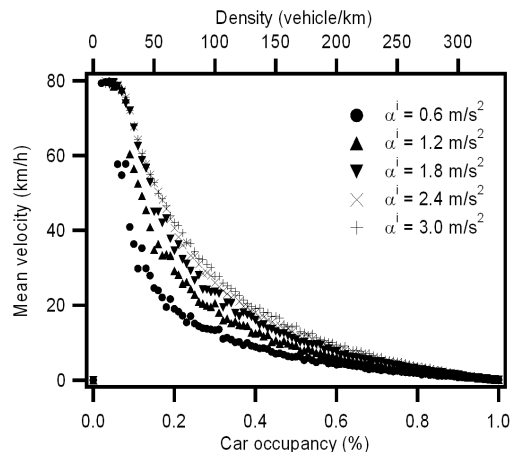


図 10 平均速度に対する加速度の影響

Fig. 10 Effect of acceleration for mean velocity.

表 3 解析パラメータ (最小安全車間距離の影響)

Table 3 Simulation parameters (Effect of minimum safety gap).

1 タイムステップ	0.1 s
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	$G_s^{i,\min} = 0, 18, 30 \text{ m}$
境界条件	周期境界条件
車両の初期配置	車両密度に比例してランダム配置

により最大交通量は増大する。

図 10 には、異なる加速度の場合における車両密度と車両平均速度の関係を示す。少々分かりにくいですが、車両密度が 0~0.1% においてはほぼ同様の速度で、平均速度は設定された最大速度 $v_{\max}^i = 80 \text{ km/h}$ となっている。つまり、この間は車両台数が少ないので、すべての車両が最大速度で走行していることが分かる。車両密度が 0.1% を超えると平均速度は徐々に減少し、車両密度が 1.0% において平均速度は 0 km/h となっている。また、加速度の増加にともない、平均速度のグラフは上方に変位している。これは、加速度が大きいほど車両速度の増減が容易なためと思われる。

4.3 最小安全車間距離の影響

すべての車両の最小安全車間距離 $G_s^{i,\min} = 0, 18, 30 \text{ m}$ 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・パラメータを表 3 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 36,000 タイムステップ (1 時間) である。

図 11 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、車両密度の増加にともない交通量は直線的に増加し、車両密度 30 台/km 付

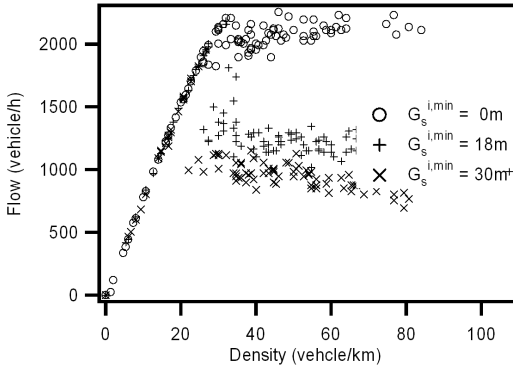


図 11 交通量に対する最小安全車間距離の影響
Fig. 11 Effect of minimum safty gap for traffic flow.

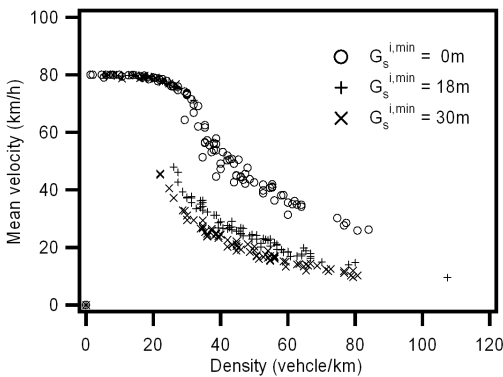


図 12 平均速度に対する最小安全車間距離の影響
Fig. 12 Effect of minimum safty gap for mean velocity.

近において最大値を示している．車両密度 30 台/km を超えたところの様子は最小安全車間距離により異なる．まず， $G_s^{i,min} = 0m$ の場合，車両密度 30 台/km 以上では交通量はおおよそ最大交通量を保っている．これに対して， $G_s^{i,min} = 18, 30m$ の場合では最大交通量は急に減少し，減少の程度は $G_s^{i,min} = 30m$ 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．渋滞状態では車両は連続して走行するので，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．

図 12 には，異なる安全車間距離の場合における車両密度と車両平均速度の関係を示す．少々分かりにくいですが，車両密度 0~20 台/km においては安全車間距離の大きさによらず平均速度はほぼ同一であり，設定された最大速度 $v_{max}^i = 80 \text{ km/h}$ となっている．車両密度が 20 台/km を超えると平均速度は徐々に減少している．車両密度 30 台/km を超えたところの様子は安全車間距離により異なる．まず， $G_s^{i,min} = 0m$ の

表 4 解析パラメータ (最高速度の影響)
Table 4 Simulation parameters (Effect of maximum velocity).

1 タイムステップ	0.1 s
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	$G_s^{i,min} = 0, 18 \text{ m}$
境界条件	周期境界条件
車両の初期配置	車両密度に比例してランダム配置

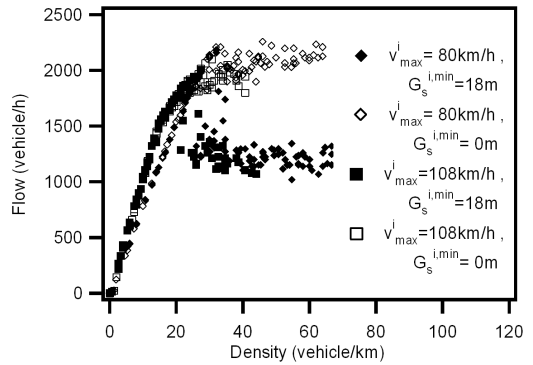


図 13 交通量に対する最高速度の影響
Fig. 13 Effect of maximum velocity for traffic flow.

場合，車両密度 30 台/km 以上では平均速度はそれまでの値とほぼ連続した曲線にある．これに対して， $G_s^{i,min} = 18, 30m$ の場合では平均速度は急に小さくなり，減少の程度は $G_s^{i,min} = 30m$ のほうが大きい．

4.4 最高速度の影響

すべての車両の最大速度を $v_{max}^i = 80$ または 108 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 $G_s^{i,min} = 0, 18m$ 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表 4 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 36,000 タイムステップ (1 時間) である．

図 13 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分かる．一方，最大速度の大きさによらず，ほぼ同じ車両密度 (20~30 台/km 付近) で交通量は最大となっている．そして，車両密度が 30 台/km を超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， $G_s^{i,min} = 0m$ ではだいたい最大交通量に等しい状態で推移するのにに対して， $G_s^{i,min} = 18m$ では極端に少なくなる．

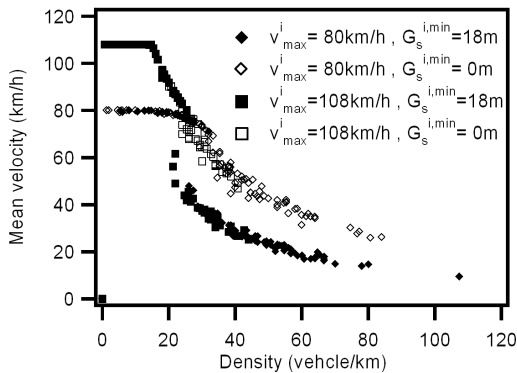


図 14 平均速度に対する最高速度の影響

Fig. 14 Effect of maximum velocity for mean velocity.

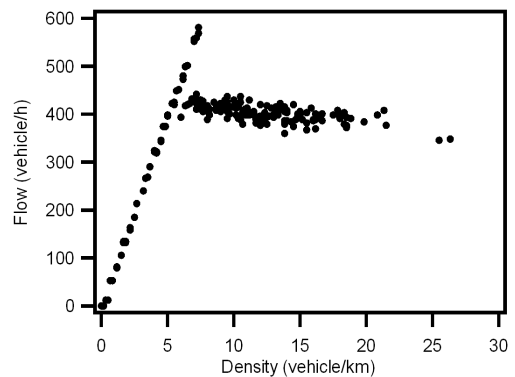


図 15 車両密度と交通量の関係図 (1 レーン道路)

Fig. 15 Traffic flow and density (1 lane freeway).

表 5 解析パラメータ (1 車線道路)
Table 5 Simulation parameters (1 lane road).

セルの大きさ	3 m × 3 m
1 タイムステップ	0.1 s
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	$G_s^{i,\min} = 18 \text{ m}$
境界条件	周期境界条件
車両の初期配置	車両密度に比例してランダム配置

図 14 には、車両密度と車両平均速度の関係を示す。これにより、車両密度が小さい状態では平均速度は設定された最大速度となっているが、車両密度が大きくなって交通が渋滞状態となると、平均速度は徐々に減少している。そして、渋滞状態での平均速度は、設定された最大速度ではなくて安全車間距離に依存し、 $G_s^{i,\min} = 0 \text{ m}$ のほうが大きい。

4.5 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 3,000 m 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)。解析に用いたパラメータ値を表 5 に示す。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 36,000 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 15 に示す。横軸には 1 km 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、車両密度の増加にともな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分かる。

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 16 と図 17 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」をとっており、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 16 と図 17 を比較すると、図 16 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 16 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ともない、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 16 と図 17 では車両の平均密度は同じであるが、図 16 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。

最後に、解析領域である道路長の影響について検討する。上記の解析では解析領域である道路長を 3,000 m として解析を行ったが、解析領域の両端における境界条件の影響を検討するために道路長 9,000 m (3,000 セル) の解析領域を考え、両者の交通量を比較した結果

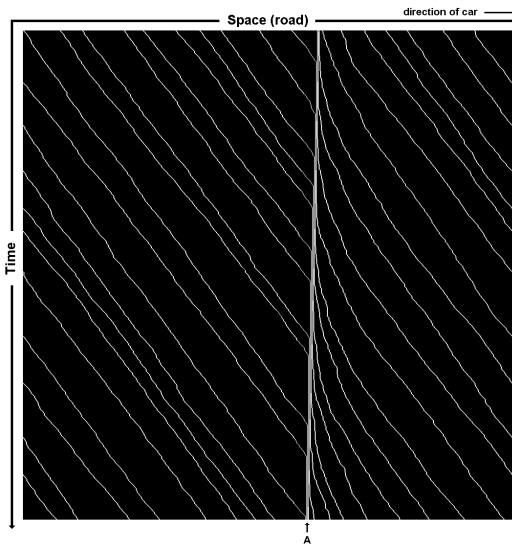


図 16 道路状態時間遷移図 (低速流)
Fig. 16 Road state transition (Low flow).

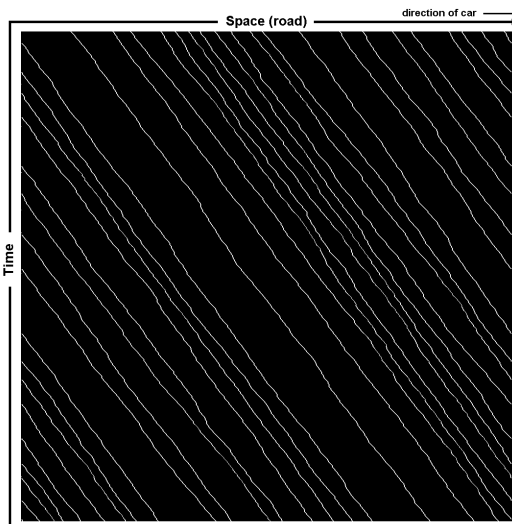


図 17 道路状態時間遷移図 (高速流)
Fig. 17 Road state transition (High flow).

を図 18 に示す．横軸には 1 km 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．この図から道路長によらず交通量は同様な分布を示し，車両密度 5 ~ 10 台/km にかけてメタ安定分岐現象が発生していることが分かる．そこで，メタ安定分岐現象を起こす車両密度 6.67 台/km において，道路長が 3,000 m と 9,000 m の場合について 1,000 回ずつのシミュレーションを行い，各試行における車両の平均速度をプロットした結果を図 19 に示す．横軸には試行番号を，縦

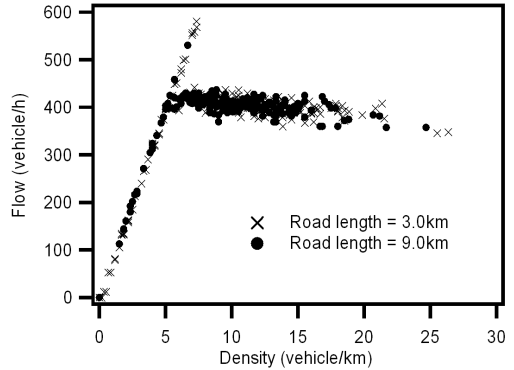


図 18 交通量に対する道路長の影響 (1 レーン道路)
Fig. 18 Effect of road length to traffic flow (1 lane freeway).

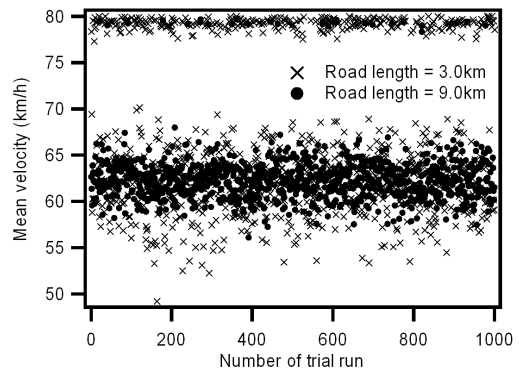


図 19 各試行における平均速度 (1 レーン道路)
Fig. 19 Mean velocity at each trial run (1 lane freeway).

軸には走行車両の平均速度を示す．この図より，道路長 9,000 m においても道路長 3,000 m の場合と同様にメタ安定分岐現象が生じていることが分かる．また，道路長 9,000 m のほうが高速で走行する交通流 (高速流) の回数が少なくなっているが，この理由として以下のことが考えられる．図 16 と図 17 の比較から分かるように，各車両の車間距離にもよるが車両がほぼ均一に配置された道路状態において高速流が発生すると予想される．ところで，本研究のシミュレーションでは車両の配置は一樣乱数によって最初に決定されている．一樣乱数によってランダムに生成された車両が形作る初期配置が均一となる確率は，道路長が長くなるに従って低くなるので，このために道路長 9,000 m では高速流となる試行回数が少なくなっていると考えられる．

5. 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

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。車両密度と交通量について解析結果を実測値と比較すると、両者はよく一致し、メタ安定分岐現象など交通流の特徴を表現できていることが分かった。

次に、同じ片側2車線道路において、いくつかの変数に対する交通現象の挙動について検討し、以下の結果を得た。まず、車両加速度の交通量や平均速度に対する影響を評価した結果、加速度が大きいくほど最大交通量と平均速度が大きくなることが分かった。

最小安全車間距離の交通量や平均速度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くほど交通量は小さくなることが分かった。また、平均速度についても、車両密度30台/km以下では最大速度で走行しているが、その値を超えると徐々に減少していくことが分かった。

最高速度の交通量や車両速度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比例するが、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分かった。

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分かった。

最後に、提案した方法の検討課題についてもう少し述べておきたいと思う。提案した方法では、各タイムステップでの車両の走行距離は最大で1セルとなっている。このために、個々の車両挙動の間に複雑な相互作用がある場合は、相互作用の影響を表現しにくいかもしれない。今回は自動車専用道路を扱ったので、車両間の相互作用の影響は比較的小さく、そのため問題は比較的小なかつたものと考えられる。また、確率速度モデルでは各タイムステップでの移動量を小さくしているため、これまでのモデルに比べて計算コストが余分にかかることになる。そこで、今後並列計算機の利用なども考慮して、計算コストの低減についても検討していきたいと考えている。

今回の研究を基にして、今後は分岐や合流などを有する自動車専用道路や都市部などにおける複雑な交通現象のモデル化とそこにおける車両の挙動を研究していきたいと考えている。そして、実際の現象や他のモデルの結果との比較を通して、確率速度モデルの特性についてもさらに考察していく予定である。

謝辞 本研究の遂行にあたって(財)豊田理化学研究所の平成13年度研究助成をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 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, Vol.1, pp.71-76 (2000).
- 2) 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(iii)—交差点で生じる車列形成のダイナミクス, 情報処理学会高度交通システム研究会, Vol.2, pp.31-36 (2000).
- 3) 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動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: 数理モデル化と応用, Vol.42, No.SIG14(TOM5), pp.90-97 (2001).
- 4) 馬場美也子, 北岡広宣, 棚橋 巖: GAを用いた経路最適化による広域交通流シミュレータNETSTREAMでの交通状況表現手法, 情報処理学会高度交通システム研究会, Vol.7, No.10, pp.67-73 (2001).
- 5) 棚橋 巖, 北岡広宣, 馬場美也子, 森 博子, 寺田重雄, 寺田英二: 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, Vol.9, No.2, pp.9-14 (2002).
- 6) 馬場美也子, 北岡広宣, 棚橋 巖: GAを用いた経路最適化による広域交通流シミュレータ上での交通状況表現手法, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.12, pp.3794-3800 (2002).
- 7) 森下 信: セルオートマトン複雑系の具象化, 養賢堂, 1st edition (2003).
- 8) 杉山雄規: 交通流の物理, ながれ, Vol.22, pp.95-108 (2003).
- 9) Levy, S.: *Artificial Life, The Quest for a New Creation*, 1st edition, Penguin Books (1992).
- 10) Waldrop, M.M.: *Complexity, The Emerging Sciences at the Edge of Order and Chaos*, 1st edition, Simon & Schuster (1992).
- 11) 加藤恭義, 光成友孝, 築山 洋: セルオートマトン法—複雑系の自己組織化と超並列処理, 1st edition, 森北出版(株) (1998).
- 12) Wolfram, S.: *Cellular Automata and Complexity*, 1st edition, Perseus Books (1994).

- 13) Nagel, K. and Schreckenberg, M.: Cellular automaton model for freeway traffic, *Journal of Physics I france*, Vol.2, pp.2221–2229 (1992).
- 14) Biham, O., Middelton, A.A. and Levine, D.: Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models, *Physical Review A*, Vol.46, No.10, pp.R6124–R6127 (1992).
- 15) Lighthill, M.J. and Whitham, G.B.: On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads, *Proc. Royal Society*, Vol.A299, p.317 (1955).
- 16) Musha, T. and Higuchi, H.: Traffic current fluctuation and the Burgers equation, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.17, p.811 (1978).
- 17) 国土交通省：自動車燃費一覧について (2000).
<http://www.mlit.go.jp/jidosha/nenpi/nenpulist/02.pdf>
- 18) 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).
 (平成 15 年 8 月 9 日受付)
 (平成 15 年 10 月 16 日再受付)
 (平成 16 年 4 月 20 日再々受付)
 (平成 16 年 5 月 19 日採録)



玉城 龍洋

1976 年生．名古屋大学大学院人間情報学研究科博士課程後期課程在学中．セル・オートマトン (Cellular Automata) 法を用いた自動車専用道路や都市交通のシミュレーションモデルの開発について研究している．



安江 里佳

1980 年生．名古屋大学大学院人間情報学研究科博士課程前期課程在学中．セル・オートマトン (Cellular Automata) 法を用いた都市交通シミュレーションや，高度交通システム (ITS) について研究している．



北 栄輔 (英輔) (正会員)

1964 年生．1991 年名古屋大学大学院工学研究科博士課程後期課程修了．博士 (工学)．1999 年より名古屋大学助教授，現在に至る．セル・オートマトン (Cellular Automata)，進化的計算手法，数値解析法 (BEM, Trefftz 法) 等の研究に従事．著書に，偏微分方程式の数値解法，計算のための線形代数，Trefftz 法入門等．IEEE, ISBE, 応用数学会，日本機械学会，シミュレーション学会，日本計算工学会，ファジィ学会，情報文化学会，日本図学会各会員．