

# 確率速度モデルと CA 法による交通シミュレーション

玉城 龍洋<sup>†</sup> 安江 里佳<sup>†</sup> 北 英輔<sup>††</sup>

本論文では、セル・オートマトン法を用いた交通のシミュレーション手法について述べる。セル・オートマトン法による交通シミュレーションでは、実際の交通流を表現するために、車両の速度変動を表現するための適切な車両速度モデルの構築が必要である。そこで、最初に、これまでの研究で提案されている車両速度モデルを紹介し、それらと本研究で提案する確率速度モデルと名付けたモデルの特徴を比較する。続いて、確率速度モデルに基づくローカル・ルールを定義する。最後に、解析対象として自動車専用道路や T 字型交差点での交通流のシミュレーションを考え、シミュレーション結果と実測値やシミュレータ用の性能評価式から得られる結果を比較することで、提案するシミュレーション法の特徴を評価する。

## Traffic Simulation Using Stochastic Velocity Model and CA

TATSUHIRO TAMAKI,<sup>†</sup> SATOKA YASUE<sup>†</sup> and EISUKE KITA<sup>††</sup>

This paper describes traffic simulation by using cellular automata. In the traffic flow simulation using cellular automata, the mathematical model to control vehicle velocity is very important for simulating real traffic flow. First existing car-velocity models for traffic simulation are introduced and, the stochastic speed model proposed in this paper are compared with them in order to discuss the features. Then, the local rules based on the stochastic speed model are defined. Finally, the traffic flow simulation on the freeways and the T-shaped intersection is considered as the numerical examples. Comparison of the numerical results and the real data and them obtained from the verification equation for the traffic simulator reveals the features of the traffic simulation scheme presented in this paper.

### 1. はじめに

交通渋滞は、現在都市生活を営んでいくうえで大きな社会問題の 1 つとなっている。交通渋滞による問題点の 1 つとして輸送コストおよび輸送時間がもたらす大きな経済的損失があげられる。これに加えて、近年では環境汚染や地球温暖化と交通渋滞の関係を評価し、それを改善することは重要な課題となっている。これらのことから、高度交通システム (ITS) のプロジェクトにおいても、渋滞問題は交通管理の重要課題としてとりあげられている。そこで、いくつかの交通流シミュレータが開発されている<sup>1)~6)</sup>。交通流のシミュレーション方法はマクロシミュレーションとミクロシミュレーションに大別できる<sup>7)</sup>。マクロシミュレーション

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、ミクロシミュレーションでは、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欠点がある。しかし、柵橋ら<sup>5)</sup>は交通シミュレータと実データとの比較を通して、渋滞予測の精度向上には個々の車両の挙動計算が必要であると指摘しており、ミクロシミュレーションに基づく交通流シミュレーション方法についての研究が必要と考えられる。ミクロシミュレーションはマクロシミュレーションに比べて計算コストがかかるが、個々の車両を考慮して解析を行うので、車両ごとの特性を考慮に入れることがより容易だからである。そこで、本研究ではミクロシミュレーションの中でも、セル・オートマトン (以降「CA」と略す) 法を用いた交通流シミュレーション法を提案する。

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<sup>8),9)</sup>。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

<sup>†</sup> 名古屋大学人間情報学研究所

Graduate School of Human Informatics, Nagoya University

<sup>††</sup> 名古屋大学大学院情報科学研究科

Graduate School of Information Sciences, Nagoya University

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态量が定義される。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。

このようなセル・オートマトン法を用いた交通流のモデル化がいくつか提案されている<sup>10)~13)</sup>。これらのモデルで用いられる車両の速度表現モデルでは、高速走行する車両の移動を表現するために、1 タイムステップあたりの移動セル数を複数セルとしている。しかし、このように複数セルを移動する車両速度表現は日本の都市部のように多くの交差点や枝道を有する道路の交通流をシミュレートする場合には適用が難しい場合が予想される。そこで、将来的に自動車専用道路と都市交通を同じモデルでシミュレートすることを目的として、確率変数を用いた速度モデルを用いたセル・オートマトン法による交通流シミュレーションについて述べる。本研究で提案する確率変数を用いた速度モデルを、確率速度モデルと名付けることにする。

本論文の構成は以下のようになっている。2 章では、これまでに提案されたモデルと本研究での方法を比較する。3 章では、本研究で提案する交通流シミュレーション手法について述べる。4 章では、提案したモデルによる自動車専用道路のシミュレーション結果について述べる。続いて、5 章では、同じシミュレーション・アルゴリズムを都市交通シミュレーションの例題に適用し、解析結果を交通工学会の評価式<sup>14)</sup>と比較する。最後に、6 章は本論文全体のまとめである。

## 2. 研究の背景

### 2.1 マクロモデルとマイクロモデル

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<sup>7),15)</sup>。マクロモデルでは交通流を流体現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<sup>16)</sup>。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<sup>17)</sup>。

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<sup>15)</sup>。本研究で

提案する方法はセル・オートマトンを用いたマイクロモデルである。そこで、以下ではこれまでに提案されたセル・オートマトンを用いたモデルについて紹介し、あわせて本研究で提案する方法について説明する。

### 2.2 ルール 184-CA モデル

車両交通の CA によるシミュレーションモデルとして最初に提案されたモデルは、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である<sup>10)</sup>。これをルール 184-CA モデルと呼ぶことにする。この方法では、直線道路を一定速度で走行する複数の車両からなる交通流をモデル化している。しかし、すべての車両が同一速度で走行するモデルなので車間距離が開いていても車両が加速しないなど、実際の交通流と比べると不自然なところがある。

### 2.3 Nagel-Schreckenberg (NaSch) モデル

Nagel と Schreckenberg はルール 184-CA モデルに車両の加減速のルールを加えたモデルを提案している<sup>11)</sup>。これを Schreckenberg に従って NaSch モデルと呼ぶことにする。

NaSch モデルでは、車両速度は 1 タイムステップあたりに車両が進むセル数  $v$  によって表現される。最大速度  $v_{max}$  で走行可能な車両が速度  $v$  ( $v < v_{max}$ ) で走行しているとき、速度  $v$  および前方車両とその車両の距離  $GAP$  に応じて以下のように加減速される。

加速  $v < v_{max}$  かつ  $GAP \geq v + 1$  ならば  $v \rightarrow v + 1$  に加速する。

減速 1)  $GAP < v - 1$  ならば  $v \rightarrow GAP$  として減速する。

減速 2) 確率  $p$  で、車両速度を  $v$  から  $v - 1$  に減速する。

この方式では、1 タイムステップあたりの移動距離が複数セルになるので、右左折がなく車線変更の少ない自動車専用道路などのシミュレーションにおいては計算時間が削減できる。その反面、移動するセル数に応じて異なる範囲のセルを参照して自車両の次の行動を決定しなければならない(ここで、行動を決定するためにローカル・ルールで参照するべきセルを参照セルと称することにする)。したがって、これを交差点や分岐・合流などを含む市街地シミュレーションに適用する場合、参照セルの範囲に含まれる可能性のある道路形状に応じただけのルールを必要とし、ローカル・ルールが複雑となってしまう。

### 2.4 車両追従モデル

車両追従モデル (Car following model) では、車

両とその前方の車両の相対的な関係に基づいて速度を決定する．この方法では，注目車両の速度  $v$  または加速度  $a$  についての関係式は論文によって異なり，以下のような関係式が提案されている<sup>18)~20)</sup>．

$$v \propto \Delta x$$

$$a \propto \frac{v^m}{(\Delta x)^l} \Delta v$$

$$a \propto V[\Delta x] - v$$

ここで， $\Delta x$ ， $\Delta v$  はそれぞれ前方車両との距離，前方車両との速度差を示す． $m$ ， $l$  は定数である．また， $V[\Delta x]$  は最適速度関数 (Optimal velocity function) と呼ばれ，Sugiyama<sup>20)</sup> によって提案された．この関数を導入したモデルは最適速度モデル (Optimal velocity model) と呼ばれている．

車両追従モデルでは，速度または加速度を前方車両との相対関係として連続関数で表現しているので，NaSch モデルよりもきめ細かな速度表現が可能と考えられる．しかし，片側1車線道路のモデル化を目的としているので，複数レーンの場合で車両の車線変更がある場合については修正が必要である．また，基本的に自動車専用道路を走行する車両のモデル化を目的としているので，市街地のシミュレーションにおいては，NaSch モデルと同様な難しさがあると思われる．

2.5 Biham-Middleton-Levine (BML) モデル

Biham ら<sup>12)</sup> は，市街地の交通流をシミュレートすることを目的としたモデル (BML モデル) を提案している．このモデルでは市街地を正方形で表現し，車両は下から上向き，または左から右向きに走行する．BML モデルには3種類のモデルがあり，BML-I モデルでは奇数タイムステップでは下から上向き，偶数タイムステップでは左から右向きにだけ走行する．これは，交通信号によって交通流を制御している状態をモデル化している．BML-II モデルでは，すべての車両が同時に走行し，交差点で車両が出会ったときは確率的に進入車両を決定する．一方，BML-III モデルでは，すべての車両が同時に走行し，交差点で車両が出会ったときはすべての車両が同一のセルを占めるようになっている．このモデルは，市街地の交通流をモデル化した最初の例であり，信号のシミュレーションとしては有効であるが，実際の市街地のモデル化としては簡単すぎると考えられる．

2.6 本研究で提案するモデル

本研究では市街地の交通流をシミュレートするために，確率変数を用いた速度モデルを提案する．この方法では，車両速度  $v$  は確率変数  $P$  を用いて次式で与

えられる．

$$v = v_{\max} \times P \tag{1}$$

ここで  $P$  は0から1の間の一様乱数として与えられる確率変数を， $v_{\max}$  は設定された車両の最大速度を示す．式 (1) では1タイムステップに1セル移動するに要する速度を車両の可能最大速度  $v_{\max}$  とし，これに各車両が実際に1セル移動するための確率  $P$  を掛けることにより速度  $v$  を表現している．この方法では1タイムステップで車両が移動するセル数を最大1セルとすることで，ローカル・ルールを定義するために参照するセルの範囲を他のモデルよりも狭くすることができるので，交差点などが多く複雑な道路状態での交通流をシミュレートする場合においても，ローカル・ルールが比較的簡単になるとと思われる．たとえば，1タイムステップにおいて複数セルを移動するモデルを都市交通に利用する場合，その複数セル間に複数の交差点などが含まれる可能性がある．したがって，交差点で合流する他車両との相対関係を決定するために参照すべきセル範囲はかなり広くなるので，それともなって必要な自車両の行動ルールも複雑となる．これに対して，確率速度モデルでは，1タイムステップで移動するセルは最大1セルであるから，参照すべきセル範囲はかなり狭くなるので，必要な自車両の行動ルールも単純化されと思われる．

3. 自動車専用道路のシミュレーション手法

自動車専用道路の交通シミュレーションを用いて，本研究で用いるシミュレーション・アルゴリズムについて述べる．

3.1 解析領域

解析例においては，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し，解析例では大きさ3(m) × 3(m)のセルを1,000セル一列に並べて1つの道路を表現する．片側1車線道路の様子を図1に，片側2車線道路の様子を図2に示す．セルの大きさ3(m) × 3(m)は，1つのセルに車両1台が入ることを前提として，実際

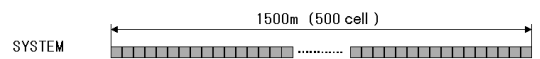


図1 1レーン道路  
Fig. 1 One-lane road.

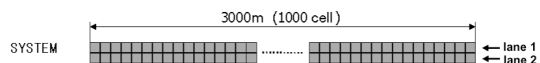


図2 2レーン道路  
Fig. 2 Two-lane road.

の道路幅や車両の大きさを基に設定している。車両の大きさは普通車や大型車で少しずつ異なるので、それらの中間の値として幅 3(m) と長さ 3(m) を設定している。長さ 3(m) は車両の平均長さとしてはすこし小さいように思われるが、本研究ではすべての車両の大きさは同じとしていること、さらに車両の流入地点と流出地点で周期境界条件を用いていることより、車両長さがシミュレーション結果に与える影響は小さいと考えられる。

3.2 確率速度モデル

本研究では、車両速度  $v$  は次式に基づいて確率変数  $P$  により表現する。

$$v = v_{\max} \times P \tag{2}$$

ここで  $v_{\max}$  は設定された車両の最大速度を示す。

自車両の前方セルが空白の場合、速度  $v (< v_{\max})$  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 (2) より導いた次式より  $P_0$  を求める。

$$P_0 = \frac{v}{v_{\max}} \tag{3}$$

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

$P_0 = 1$  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、これが車両速度としては最大速度  $v_{\max}$  となる。また、このモデルに従う車両は、発進時、定常走行時の車両である。なお、ここで示したアルゴリズムは自車両の前方セルが空白の場合のものであるので、これに前方セルが空白でない場合を考慮したものが、以下で述べる直進ローカル・ルールとなる。

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基本行動ローカル・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  $G$  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  $G_s$  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  $v$  の車両がとるべき車間距離  $G_s^0(m)$  は次式と定められている。

$$G_s^0 = 0.15 \times v + 0.0097 \times v^2 \tag{4}$$

$G_s^0$  は自動車性能から決定されるものであるが、実際には安全車間距離の最小値は運転者の個性や車両特性

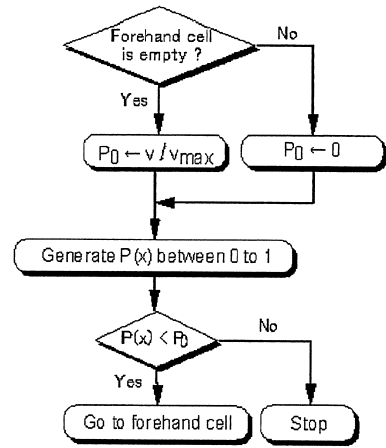


図 3 直進ローカル・ルール

Fig. 3 Local rule for through car.

に依存し、異なる値をとると考えられる。そこで、安全車間距離の最小値を最小安全車間距離  $G_s^{\min}$  と呼ぶことにする。ただし、車両が停車時には車間距離は最小安全車間距離  $G_s^{\min}$  よりもはるかに小さいので、 $v = 0$  においては  $G_s = 0(m)$  とする。

以上をまとめると、安全車間距離  $G_s$  は次式で与えられる。

$$G_s = \begin{cases} \max(G_s^0, G_s^{\min}) & (v > 0) \\ 0 & (v = 0) \end{cases} \tag{5}$$

ここで  $\max(G_s^0, G_s^{\min})$  は、両者の大きい方を与える。なお、最小安全車間距離は、シミュレーションのときに車両ごとに設定し、シミュレーションの間一定値をとるものとする。

3.3.2 基本行動ローカル・ルール

基本行動ローカル・ルールには、直進ローカル・ルール、車線変更ローカル・ルールがある。

直進ローカル・ルールのフローチャートを図 3 に示す。自車両の前方セルが空の場合、3.2 節で示した確率速度モデルに従って直進する。前方セルが空でない場合、車両はその場所にとどまる。それを実現するために、確率速度モデルの変数  $P_0$  を 0 としている。

次に、車線変更ローカル・ルールのフローチャートを図 4 に示す。最初に、車両が走行している車線の前方車両との車間距離  $G_0$  と、隣車線の前方車両との車間距離  $G_1$  を得る。次に、現在速度  $v$  から安全車間距離  $G_s$  を式 (5) により計算する。 $G_0 > G_1$  ならば、 $G \leftarrow G_0$  として速度ローカル・ルールへ進む。 $G_0 < G_1$  ならば車線変更を行い、 $G \leftarrow G_1$  として速度ローカル・ルールへ進む。

実際にこれらのローカル・ルールを適用する際には、

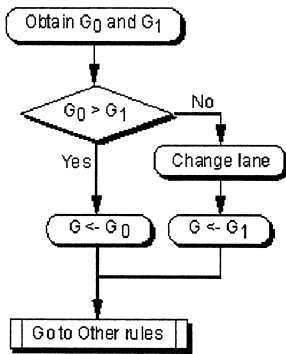


図 4 車線変更ローカル・ルール  
Fig. 4 Local rule for lane-changing car.

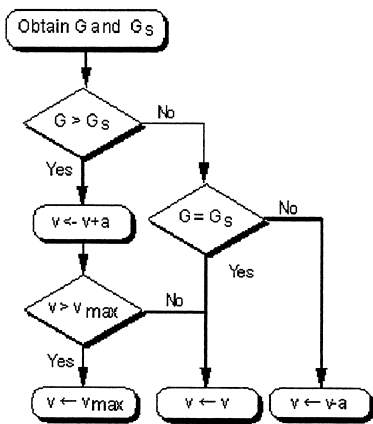


図 5 速度ローカル・ルール  
Fig. 5 Velocity local rule.

各行動ローカル・ルールを組み合わせ適用する。組み合わせの方法については、解析例で改めて述べる。

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 5 に示す。図中において、 $v_{max}$ 、 $\alpha$  はそれぞれ設定された最大速度と加速度を示す。シミュレーションにおいて、加速度  $\alpha$  は国土交通省の評価データ「自動車燃費一覧について」<sup>21)</sup> を参考にして設定している。実際の車両では、加速時と減速時で加速度の大きさ（絶対値）は異なる値となるが、本研究では簡単のために同じ値をとっている。 $v_{max}$ 、 $\alpha$  は車両ごとに設定できるので、車両ごとに異なる値を設定することで実際の交通に近い状況を作り出すことも可能である。

そして、現在速度から求めた安全車間距離  $G_s$  と、自車両と前方車両との車間距離  $G$  に応じて速度を変化させる。 $G_s = G$  の場合は現在速度を維持する。 $G_s > G$  の場合は、車間距離を大きくするために車両速度を  $v \leftarrow v - \alpha$  として減速する。 $G_s < G$  の場合は、

表 1 解析パラメータ  
Table 1 Simulation parameters.

1 タイムステップ (s)	0.1
最大速度 (km/h)	$75.6 < v_{max} < 108$
加速度 (m/s <sup>2</sup> )	$0.6 < \alpha < 0.9$
最小安全車間距離 (m)	$6 < G_s < 21$

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

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、本研究では自動車専用道路のシミュレーションに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、道路出口からの流出車両が反対側の流入点から進入するので、長い道路のシミュレーションを行っている状態となり、車両密度を一定に保つことができる。

4. 解析例

4.1 2 車線道路での交通シミュレーション

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 Vehicle/km、標準偏差 10 の正規乱数から車両密度を選択し、その車両密度となるように車両を一様乱数で道路に配置する。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が実現される。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様乱数により範囲内から値を設定することにより、現実の交通におけるデータのばらつきを表現している。なお、加速度は国土交通省の評価データ「自動車燃費一覧について」<sup>21)</sup> を基に設定している。

この場合の各車両の行動ローカル・ルールを図 6 に示す。まず、タイムステップ  $t$  を初期化する。次に、自車両の現在速度  $v$  から安全車間距離  $G_s$  を式 (5) に

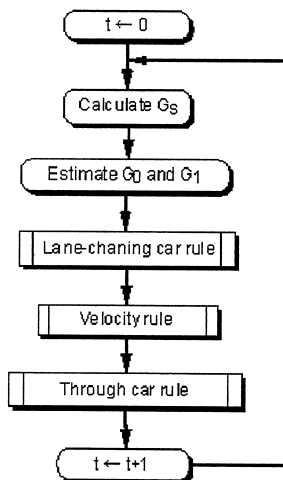
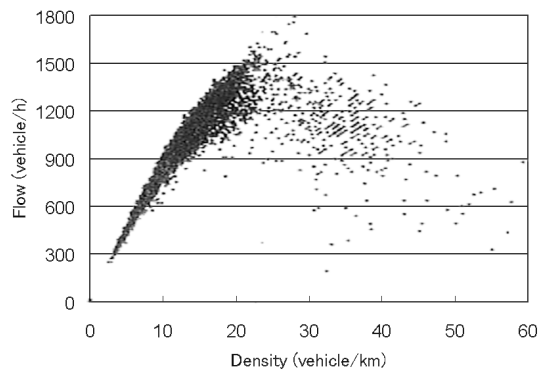


図 6 2車線行動ローカル・ルール

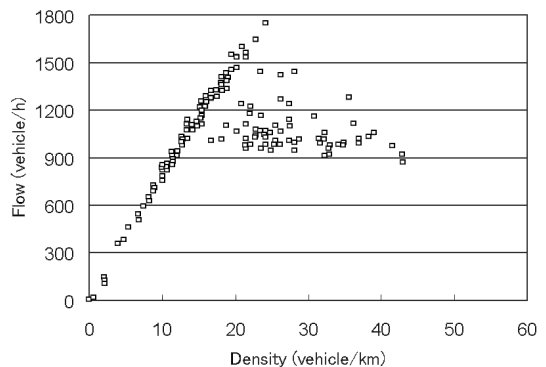
Fig. 6 Behaviour local rule on two-lanes free-way.

より計算し、自車両の現走行車線における前方車両との車間距離  $G_0$  と隣車線の前方車両との車間距離  $G_1$  を評価する。車線変更ルールによって必要により車線変更を行い、続いて速度変更ルールにより速度を更新する。最後に、前進ルールによって前方セルへ進む。

最初に様々な車両密度に設定してシミュレーションを開始して、36,000 タイムステップ (1 時間) 経過後で交通流がある程度定常状態となった後に測定した交通量を図 7 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、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<sup>22)</sup>。交通量は車両密度の増加とともに増加し、車両密度 20 Vehicle/km 付近で最大値を示している。また、車両密度 20 ~ 40 Vehicle/km でのデータは、車両密度 0 ~ 20 Vehicle/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分かる。これは、車両密度 20 ~ 40 Vehicle/km では、同一車両密度にもかかわらず定常状態において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、実データから読み取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。同一の車両密度において、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<sup>15),23),24)</sup>。



(a) 実データ (文献 22) より抜粋



(b) シミュレーション結果

図 7 シミュレーション結果と実データの比較

Fig. 7 Comparison of simulation results and real data.

#### 4.2 走行車線と追い越し車線の交通量の比較

4.1 節と同様に解析対象として片側 2 車線の自動車専用道路 (図 2) を考え、道路の左車線と右車線における交通量を比較する。マクロモデルを基本とする交通シミュレータでは、複数車線からなる道路で、車線ごとの交通流の挙動を評価検討することは困難なので、このような問題にはセル・オートマトン法などのミクロモデルが適している。

解析開始時に平均 33.3 Vehicle/km、標準偏差 16.7 の正規乱数から車両密度を選択し、その車両密度となるように車両を一樣乱数で道路に配置する。4.1 節と異なる正規乱数を設定したのは、4.1 節よりも広い範囲の車両密度について、車線ごとの交通流を評価するためである。道路の両端で周期境界条件をとり、車両流は左側から流入して右側へ流出する。解析に用いたパラメータ値を表 1 に示す。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。2 車線のうち、走行方向に向かって左車線を走行車線、右車線を追い越し車線とする。車両行動は

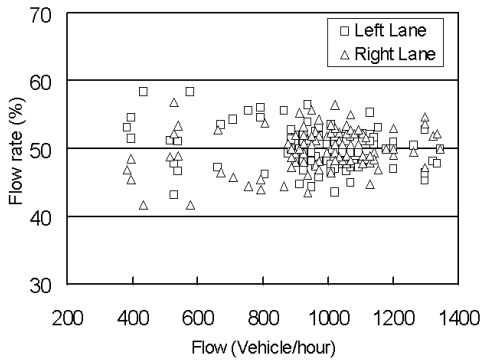


図 8 総交通量と車線ごと交通量の関係図

Fig. 8 Whole traffic flow vs. individual traffic flow.

図 6 に示されたローカル・ルールに従うものとする。

総交通量と車線ごと交通量の関係を図 8 に示す。横軸には 1 時間あたりに全車線を走行する車両総数である総交通量 (Vehicle/hour) を、縦軸には総交通量に占める車線ごと交通量の割合 (%) を示す。異なる初期状態でシミュレーションを行い、得られた結果をグラフにプロットしている。この図より、総交通量 1,000 Vehicle/hour 付近で車線ごとの交通量にばらつきが生じており、総交通量が同じであっても、車線ごと交通量の割合が異なる交通流が生じていることが分かる。実は、このシミュレーションにおいては総交通量 1,000 Vehicle/hour 付近でメタ安定分岐現象が発生しており、メタ安定分岐現象が車線ごとの交通量に影響していると予想される。只木の文献 [25] に示された 1996 年 8 月 9 日の東名高速日本坂トンネル付近上り方向における実測データと本シミュレーションの結果を比較すると、交通量が少ない状態では走行車線における交通量が大きい、交通量が増大すると走行車線の交通量は減少して追い越し車線の交通量が増大する点において、全体としての傾向はシミュレーション結果と実測結果が定性的に似通っているといえる。

#### 4.3 1 車線道路におけるメタ安定分岐

メタ安定分岐現象についてさらに考察するために、解析領域を道路長 1,500 m の 1 車線直線道路 (図 1) とする。解析開始時に平均 15 Vehicle/km、標準偏差 5 の正規乱数から車両密度を決定し、その車両密度となるように車両を一様乱数で道路に配置する。道路の左端と右端には周期境界条件をとり、車両流は左側から流入して右側へ流出する。シミュレーションでは各車両のパラメータ値を表 1 に示すようにとる。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。

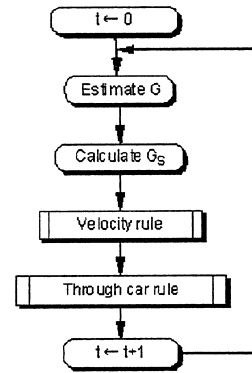


図 9 1 車線行動ローカル・ルール

Fig. 9 Behaviour local rule on one-lane free-way.

各車両に適用される行動ローカル・ルールを図 9 に示す。車両は自車両と前方車両の車間距離  $G$  を評価し、現在速度  $v$  から安全車間距離  $G_s$  を式 (5) により計算した後、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、前進ルールによって前方セルへ進む。

様々な車両密度に設定してシミュレーションを開始し、36,000 タイムステップ (1 時間) が経過した後の車両密度と交通量の関係を図 10 に、車両密度と車両平均速度の関係を図 11 に示す。図 10 では、横軸に 1 km あたりの車両台数である車両密度 (Vehicle/km)、縦軸に 1 時間に通過する車両台数である交通量 (Vehicle/hour) をとる。図 11 では、横軸に 1 km あたりの車両台数である車両密度、縦軸に解析領域内の全車両の平均速度をとる。図 10 から、車両密度 6.7 ~ 9.3 Vehicle/km において、同一車両密度でありながら異なる交通量を示す交通状態が発生していることが分かる。これがメタ安定分岐現象である。また、図 11 からメタ安定分岐現象の生じている車両密度においては、同じ車両密度で異なる平均車両速度の交通流が生じていることが分かる。

メタ安定分岐をより詳しく調べるために車両密度を 8 Vehicle/km に固定して 50 回の試行を行った。50 回の試行のそれぞれにおける交通量を図 12 に、平均車両速度を図 13 に示す。図 12 では横軸は試行番号 (Trial No.)、縦軸は 1 時間に通過する車両台数である交通量 (Vehicle/hour) を示す。図 12 では横軸は試行番号、縦軸は解析領域内の全車両の平均速度 (km/h) をとる。これらから、メタ安定分岐現象が発生すると同じ車両密度において交通量の異なる交通流が生じ、平均速度も一定とならないことが分かる。

図 12 において交通量が最小である試行 No. 10 (交通量 385 Vehicle/hour) と最大である試行 No. 12 (交

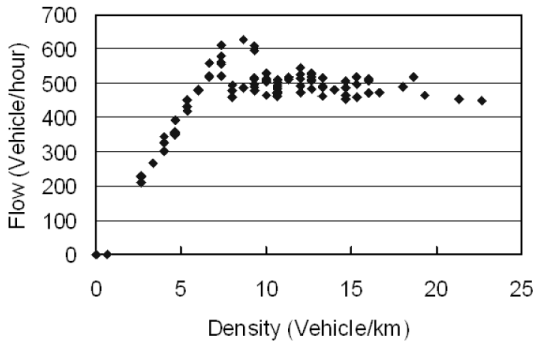


図 10 車両密度と交通量の関係図  
Fig. 10 Traffic flow and density.

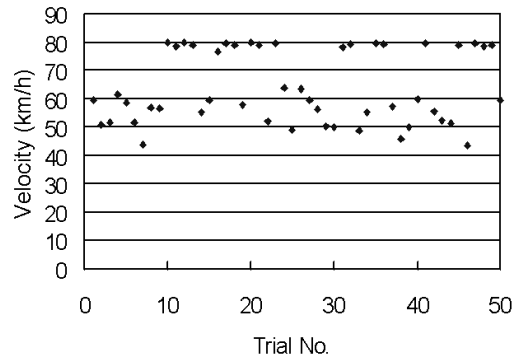


図 13 各試行における平均車両速度  
Fig. 13 Mean velocity at trials.

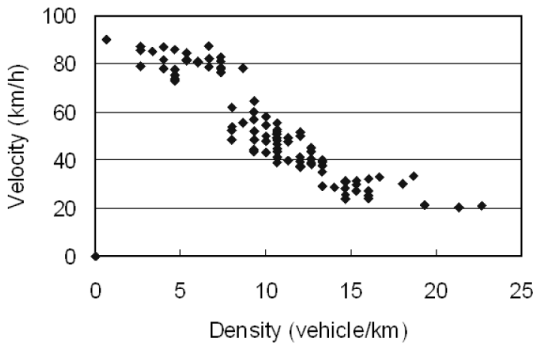


図 11 車両密度と車両平均速度の関係図  
Fig. 11 Traffic velocity and density.

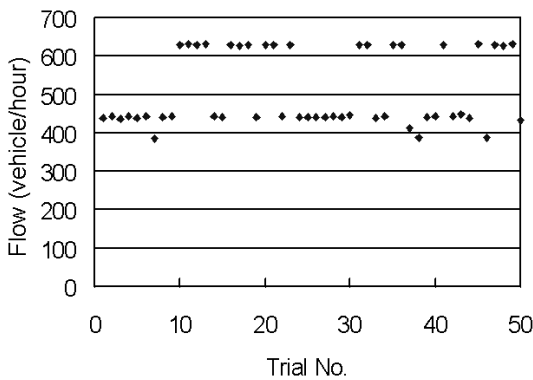


図 12 各試行における交通量  
Fig. 12 Traffic flow at trials.

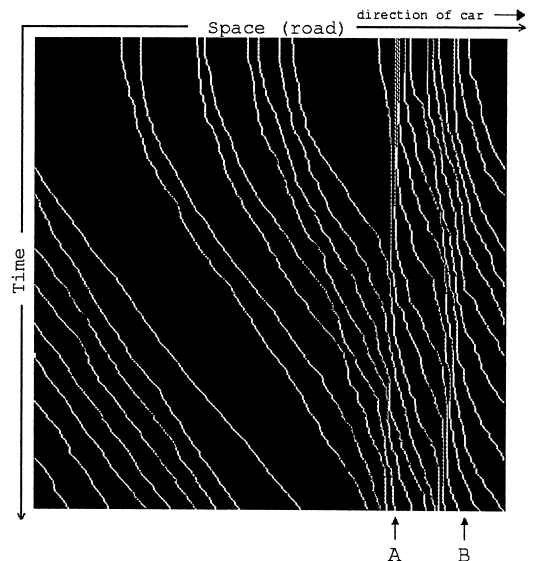


図 14 道路状態時間遷移図 (低速流)  
Fig. 14 Road state transition (Low flow).

通量 630 Vehicle/hour) について、それらの道路状態の遷移図を図 14, 図 15 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、黒い部分が空きセル(道路)を、白い曲線部分が車両を示している。したがって、白い曲線部分が右下方方向に進行している場合は車両が走行していることを示し、白い曲線部分が真下へ伸びている場合は車両が渋滞のために停止していることを示している。図 14 と図 15 を比較すると、図 14

においては地点 A および B において渋滞が発生していることが分かる。その結果、図 15 に比べて図 14 においては全体の交通量が小さくなり、それが平均速度を低下させていると予想できる。そこで、図 14 を低速流、図 15 を高速流と呼ぶことにする。図 14 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 および B 付近では比較的車両間距離が短く、後続車は走行開始後すぐに減速し、車両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、前方車両との車両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 および B における渋滞は継続することとなる。図 14 と図 15 で



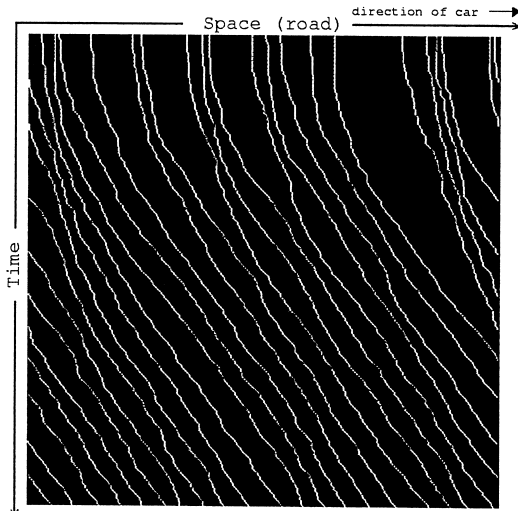


図 15 道路状態時間遷移図 (高速流)  
Fig. 15 Road state transition (High flow).

は車両の平均密度は同じであるが、図 14 では初期配置におい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ている。このような渋滞の例として、ほぼ同速度で走行している車両の中に 1 台だけ低速走行する車両が存在するものをあげることができる。このような場合、低速車両の後方では局所的に車両密度の高い状態が生じるので、この節で示したような交通渋滞が発生する可能性がある。このような局所的に高い車両密度の状態を含む交通流というのは実際の交通においてもしばしば見られる状態であり、これが交通渋滞の原因と推測される現象が再現できた。

5. 交差点交通流シミュレーション

ここでは、先に自動車専用道路のシミュレーションに用いたアルゴリズムを簡単な都市交通のシミュレーションへ拡張することを考える。解析モデルは、交通工学研究会で主にマクロモデルに基づく交通シミュレータの評価用として定められたものであり、交通工学研究会ではこのモデルについて交通量を評価するための簡単な評価式を定めている<sup>14)</sup>。シミュレーション結果を評価式による値と比較する。

5.1 解析対象とルール

解析例として、図 16 に示すような T 字型交差点を考える。左端から進入する車両は、交差点を左折することなくすべての車両が右端から流出する。一方、右端から進入する車両は、全車両が T 字型交差点で右折して上端から流出する。このとき、左端からの流入

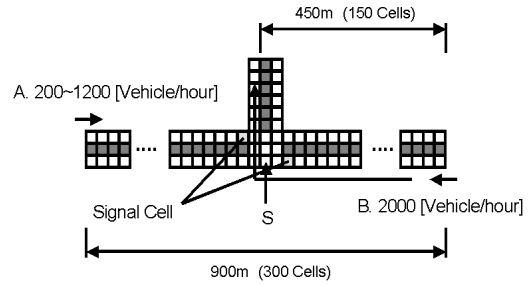


図 16 T 字型交差点  
Fig. 16 T-shaped intersection.

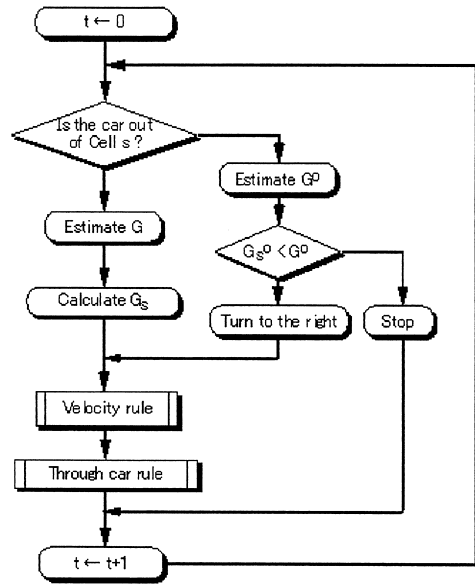


図 17 右折車行動ローカル・ルール  
Fig. 17 Behaviour local rule for right-turning car.

交通量を変化させたときの upper からの流出交通量を評価する。この解析対象では upper からも車両が進入し、交差点のところで左折または右折するが、upper から進入する車両は今回のシミュレーションには影響しないので、無視することにする。

次に、車両のローカル・ルールについて述べる。まず、左端から進入して直進する車両のルールは 1 車線自動車専用道路の場合と同じなので、図 9 に示すルールに従うものとする。一方、右から進入して右折する車両のローカル・ルールは図 17 のようになる。この場合、車両が交差点にあるとき以外は 1 車線自動車専用道路の場合と同じルールに従う。しかし、車両が交差点手前のセル (セル s) に達すると、車両は対向車と自車両の距離  $G^0$  を評価する。これが、対向車に対する最小安全車間距離  $G_s^0$  よりも大きければ、つまり  $G_s^0 < G^0$  であれば車両は右折する。交通工学研究会

表 2 解析パラメータ

Table 2 Simulation parameters.

1 タイムステップ (s)	0.1
最大速度 (km/h)	$v_{max} = 60.0$
加速度 ( $m/s^2$ )	$\alpha = 2.4$
最小安全車間距離 (m)	$G_s = 0$
対向車最小安全車間距離 (m)	$G_s^o = 36, 66, 99$

での評価データにあわせて、解析パラメータを表 2 のようにとる。

交差点のところには信号が設置されている。信号による停車を実現するために、アルゴリズム上は表 16 中にある信号セル ( 図中では Signal cell ) に一定時間ごとに障害物を発生させる。走行車両は障害物を停止車両と判断して障害物の後方に停車するので、信号のために特に新しいルールは追加する必要はない。なお、左端から進入する車両から見たときに、信号が青から赤まで変化する 1 周期の信号サイクルを 120 秒、このうち青信号の時間である有効青時間を 40 秒とする。これも、交通工学研究会での評価データにあわせて定めている。

5.2 解析結果

解析結果を図 18 に示す。横軸には左端からの進入車両交通量を、縦軸には右端からの進入車両交通量を示す。交通量は 1 時間あたりの通過車両台数 ( Vehicle/hour ) で表すが、左端から進入する車両の交通量は右端で、右端から進入する車線での交通量は上端で計測する。グラフにおいて、太い実線は交通工学研究会での評価式から求めた結果を示し、細い実線は交差点付近での自車両と対向車に対する最小安全車間距離  $G_s^o$  を  $G_s^o = 36, 66, 99$  (m) とした場合の結果を示す。 $G_s^o$  の値は交通工学研究会でのシミュレーション例で用いているデータを基に定めた<sup>14)</sup>。評価式から求めた結果は、左端からの流入交通量が少ない場合は右端からの流入交通量は大きい、左端からの流入交通量が増えるに従って急激に減少し、左端からの流入交通量が 600 ~ 800 Vehicle/hour をすぎると交通量の変化はほぼ一定になっている。一方、シミュレーション結果を見ると、左端からの流入交通量が増えるに従って右端からの流入交通量が急激に減少し、左端からの流入交通量が 600 ~ 800 Vehicle/hour をすぎると交通量の変化がほとんど一定になるという傾向をよく表している。また、左端からの流入交通量が少ない場合における右端からの流入交通量の値は評価式よりも少なく見積もっているが、左端からの流入交通量が増えた場合のシミュレーション結果は評価式とよく一致していると思われる。

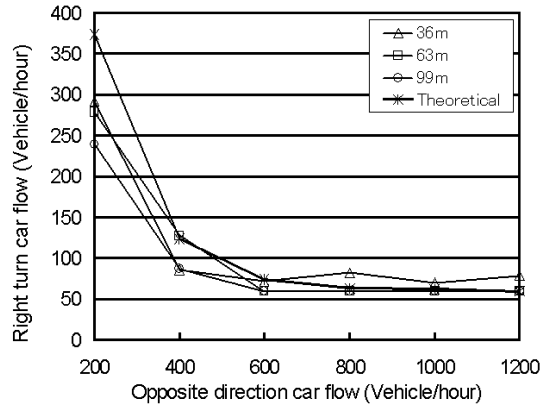


図 18 交差点での交通流  
Fig. 18 Traffic flow on T-shaped intersection.

6. 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交通流シミュレーションについて述べた。確率速度モデルでは、1 タイムステップに 1 セル移動するに要する速度を最大速度とし、これに各車両が実際に 1 セル移動するための確率変数を掛けることで車両速度を表現している。解析対象として 1 車線および 2 車線の自動車専用道路および T 字型交差点における交通流を考え、以下のような結論を得た。

まず、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、交通量は車両密度の増加とともに増加し、ある車両密度で最大値を示す。そして、交通量が最大になる車両密度よりも少し大きい車両密度の地点では、同一の車両密度で異なる交通量の交通流が生じるメタ安定分岐現象が発生していることが確認できた。このような現象は実データでも観察されるが、同様のことが提案したシミュレーション手法においても見られたので、提案した速度モデルの妥当性が確認できたと思われる。

次に、片側 2 車線道路において車線ごとの交通量について検討した。マクロモデルを基本とする交通シミュレータでは、複数車線からなる道路で車線ごとの交通流の挙動を評価検討することは困難であったが、セル・オートマトンなどのミクロモデルを用いればこのような解析も可能となる。この解析例において、走行車線と追い越し車線における交通流の挙動の違いを評価し、メタ安定分岐現象が起こる交通量付近では個々の車線での交通量にシミュレーションごとのばらつきが見られることが分かった。

そこで、解析対象として片側1車線道を考え、メタ安定分岐現象の原因について検討した。同一車両密度での高速流と低速流の道路状態時間遷移図を比較した結果、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がメタ安定分岐現象の原因の1つと推測されたが、それがシミュレーションで再現できた。

最後に、都市交通の例としてT字型交差点を考え、そこでの交通流シミュレーションを行った。解析結果を交通工学研究会の評価式と比較したところ両者の傾向は定性的にはよく似ており、定量的に見ても交通量が増加した状態での交通流を比較的良好に表現していると思われる。

本研究の解析結果からも分かるように、ミクロシミュレーションによる交通流の解析は自動車専用道路や交差点などにおける個々の車両挙動が交通流全体の挙動にどのような影響を与えるかを評価できるようになる。そこで、これを拡張して道路の分岐や合流部分、自動車専用道路における長い上り坂部分などのボトルネック部分の車両挙動を解析できるので、ナビゲーションシステムや交通管制システムの高度化に役立つと思われる。

今後は、提案した方法によって需要交通量の変化による交通渋滞の発生、延伸、解消といったような交通流の動的特性を評価して提案手法の特性をさらに検討していきたい。続いて、その結果を基に道路形状などによる交通におけるボトルネック現象の解析などを行い、都市部などで見られる複雑な交通現象のモデル化と、そこにおける交通流の挙動を研究していきたいと考えている。

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.2-6, pp.31-36 (2000).
- 3) 猪飼國夫, 石川 亮, 本多中二, 板倉直明: ファジ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: 数理モデル化と応用, Vol.42, No.SIG 14(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 NET-STREAM 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.7-10, pp.67-73 (2001).
- 5) 棚橋 巖, 北岡広宣, 馬場美也子, 森 博子, 寺田重雄, 寺本英二: 広域交通流シミュレータ NET-STREAM, 情報処理学会高度交通システム研究会, Vol.9-2, 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再現手法, 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, 第1版, 養賢堂 (2003).
- 8) Levy, S.: *Artificial Life, The Quest for a New Creation*, 1st edition, Penguin Books (1992).
- 9) Waldrop, M.M.: *Complexity, The Emerging Sciences at the Edge of Order and Chaos*, 1st edition, Simon & Schuster (1992).
- 10) Wolfram, S.: *Cellular Automata and Complexity*, 1st edition, Adison-Wesley Publishing Company (1994).
- 11) Nagel, K. and Schreckenberg, M.: Cellular automaton model for freeway traffic, *Journal of Physics I France*, Vol.2, pp.2221-2229 (1992).
- 12) 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).
- 13) Nagel, K. and Rasmussen, S.: Traffic at the edge of chaos, *Artificial Life IV (Proc. 4th International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems)*, Brooks, R.A. and Maes, P. (Eds), pp.222-235, The MIT Press (1994).
- 14) 交通工学研究会・交通シミュレーション自主交通研究会: モデルの基本検証(verification)マニュアル (2002). <http://www.jste.or.jp/sim/manuals/index.html>
- 15) 杉山雄規: 交通流の物理, *ながれ*, Vol.22, pp.95-108 (2003).
- 16) Lighthill, M.J. and Whitham, G.B.: On kinematic waves II, A theory of traffic flow on long crowded roads, *Proc. Royal Society London*, Vol.A299, p.317 (1955).
- 17) Musha, T. and Higuchi, H.: *Traffic current fluctuation and the Burgers equation*, Vol.17, p.811 (1978).
- 18) Bando, M., Hasebe, K., Nakanishi, K., Nakayama, A., Shibata, A. and Sugiyama, Y.: Phenomenological study of dynamical model of traffic flow, *Journal of Physics I France*, Vol.5,

pp.1389–1399 (1995).

- 19) Yukawa, S. and Kikuchi, M.: Coupled-map modeling of one-dimensional traffic flow, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol.64, No.1, pp.35–38 (1995).
- 20) Sugiyama, Y.: Optimal velocity model for traffic flow. Vol.121–122, pp.399–401 (1999).
- 21) 国土交通省：自動車燃費一覧について (2002).  
[http:// www.mlit.go.jp/jidosha/nenpi/nenpulist/02.pdf](http://www.mlit.go.jp/jidosha/nenpi/nenpulist/02.pdf)
- 22) 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).
- 23) 西成活裕：超離散法とセルオートマトンおよび粉体の離散モデルについて，*粉体工学会誌*，Vol.37, No.7, pp.46–56 (2000).
- 24) 西成活裕：交通流のセルオートマトン・モデルについて，*応用数理*，Vol.12, pp.26–37 (2002).
- 25) 只木進一：高速道路交通流の実測データと二車線模型，*応用数理*，Vol.12, No.3, pp.17–25 (2002).

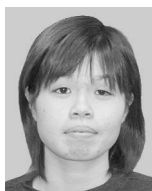
(平成 14 年 12 月 26 日受付)

(平成 15 年 12 月 2 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，高度道路情報システムについて研究している．



北 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．数値解析法 (BEM, Trefftz 法)，セル・オートマトン (Cellular Automata) 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, 応用数理学会，日本機械学会，シミュレーション学会，日本計算工学会各会員．