

小特集 「高度道路交通システム (ITS) と AI」

# セルオートマトン法による 道路交通シミュレーション

## Traffic Flow Simulation by Cellular Automaton Method

加藤 恭義  
Yasuyoshi Kato

東京工業大学 原子炉工学研究所  
Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology.  
kato@nr.titech.ac.jp

**Keywords:** computer simulation, traffic flow, cellular automata, intelligent transport systems.

### 1. ま え が き

年末, 年始, お盆のころ, 高速道路の渋滞はテレビのニュースで毎度おなじみの報道となっている. また, 大都市周辺では日常茶飯事のこととなっていて, テレビやラジオが主要道路の込み具合を毎日教えてくれる. 交通渋滞は道路の拡幅や新設で緩和されるが, 地価が高いため, 交通量の増加に追いつかないのが現状である.

交通渋滞はアメリカでも大都市や人口が急増するハイテク都市で大きな問題となっている. ハイテク企業が集まることで有名なシリコンバレーでは, 時給 50 ドルの 10 万人が朝晩の渋滞で 1 時間余分な時間がかかるとすると, その損失は単純計算で 500 万ドルになると推定されている. 土地の広いアメリカでさえ, 道路拡張などによる対応策は限界となり, パロアルト市では, 電車やバスを無料にして自動車通勤を止めたり, 自宅勤務を奨励したりしている (日本工業新聞, 平成 11 年 10 月 4 日).

道路の拡幅や自動車通勤を止めるなどの渋滞緩和策は簡単に試すわけにはいかない. そこで, どのような対策がどの程度の効果をもたらすかを計算機シミュレーションにより予測できれば, 最も有効な手段を短時間で経済的に選定することが可能となり, そのメリットは大きい.

#### 1.1 交通モデルの歴史

車の交通理論は 1950 年代から広範に研究されてきたが, 大まかに分類すると, 流体, 車追従, 最近のセルオートマトン法モデルがある.

##### §1 流体モデル

流体モデルにおいて使用される最も基本的な変数は, 車の速度  $v$  (km/h), 密度  $\rho$  (台/km, 道路の単位長さあたりの車の数), 交通量  $j$  (台/h, 単位時間あたりの車の通過数) である. 定常状態であれば, 交通量は流体流量のように,  $j = \rho v$  と表すことができる. このモデルの問題点は, 交通量の時間的な変化や交通密度がある値以上となると渋滞が発生するというような, 道路交通問題

で重要な動的現象が表現されないことにある.

時間的な変化を取り込んだ動的モデルは, 流体力学の連続の式と運動量保存の基本式をベースにし, これを簡略化することで得られてきた. 1955 年に Lighthill と Whitham は, 連続の式をベースにし, 交通量 (または速度) が密度変化により瞬間的に変動するとした (変動時間の概念は含まれていない) モデルを提案した [Lighthill 55].

Prigogine と Herman は動的交通モデルを開発し, その中で, Lighthill と Whitham のモデルが彼らの動的モデルの極限ケースであることを導き出している [Prigogine 71]. この動的モデルで交通流の波としての振舞いなど多くの現象を予測できるが, 数学的な取扱いが複雑で, 最近までそれ以上の発展はなかった.

一方, Payne は, 71 年に, Lighthill と Whitham の変動モデルに慣性を加えることで, Navier-Stokes 式に近い式を得た [Payne 71]. Kühne は 84 年に粘性項を加え, 非線形動力学特性モデルを提案した [Kühne 84]. また, Musha と Higuchi はバーガース式によるモデルを提唱した [Musha 76].

##### §2 車追従モデル

車追従モデルは, 流体モデルよりミクロに扱い, 個々の車は前方の車の動きに影響されるとする. 多くのモデルは以下の形で表される.

$$a(t+T) \propto \frac{v(t)^m}{[\Delta x(t)]^l} \Delta v(t), \quad (1)$$

ここで,  $a$  と  $v$  は加速度と速度を,  $\Delta x$  と  $\Delta v$  は前方の車との距離と速度差を,  $m$  と  $l$  は定数である.  $T$  は (運転手と車の両方合わせた) 応答遅れ時間である.

上式のほかに,  $v(t+T) \propto \Delta x(t)$  [Newell 61, Whitham 90] や  $a(t) \propto V[\Delta x(t)] - v(t)$  [Bando 94, Yukawa 95] のモデルがある. ここで,  $V[\Delta x(t)]$  は (前方の車との) 車間距離の関数とする速度である. これらのモデルは, 物理的には (結晶の中での原子挙動の取扱いに似て) 多数の車のつながりの安定性についての知見を与えるものである.

### §3 セルオートマトン法モデル

交通流の最も新しいモデルとして、セルオートマトン (CA) 法モデルがある。CA 法モデルでは、道路はたくさんのセルを一行につなげた帯として表され、個々のセルには最大 1 台の車が入り、道路の状態は各セルに車が存在するかないかで表す。CA 法モデルは、車を粒子のように扱うので、粒子モデルとも呼ばれる。車追従モデルと CA 法モデルの違いは、前者が空間と時間について連続であるのに対して、後者は不連続であることである。

最初の CA モデルは Gerlough によって 1956 年に提案され [Gerlough 56], Cremer らによって改良された [Cremer 86]。これらのモデルには、細かな運転規則が組み込まれ、演算を高速化し実時間計算ができるよう 1 ビットでコーディングされている。しかし、このことがかえって汎用性を損なう結果となっている。

92 年には、CA モデルの開発に統計物理の分野の研究者も加わり、Biham らが速度は 1 種類の 1 次元と 2 次元モデルを開発した [Biham 92]。ここで、1 次元とは (複数の車線を持つ場合も含めた) 1 本の道路を、2 次元とは多数の道路が縦横につながった都市の道路網を意味している。

一方、Nagel と Schreckenberg は最高速度  $v_{max} = 5$  まで許容する多速度モデルを提案し [Nagel 92], その後、改良モデルが多数提案されてきた。これらのモデルは、実際の交通特性を良く再現することから、ドイツやアメリカを中心とした国の多数の高速道路網で大規模交通シミュレーションに適用されている。

本論文では、大規模道路交通シミュレーションに採用されている CA モデル、適用事例、開発動向等を紹介する。

## 2. セルオートマトン法による道路交通シミュレーション

### 2.1 セルオートマトン法の特徴

セルオートマトン (CA) 法では、平面を同じ大きさの正方形 (以下セルという) で基盤のように区切る。あるセルの状態は、隣りのセルの状態 (考慮する隣りのセルの代表的な二例を図 1 に示す) によって決まる単純な規則に従って、時間的に変化させる。このような操作を全

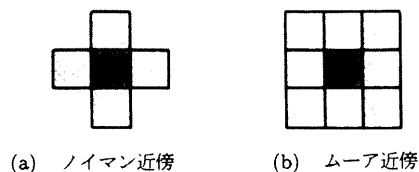


図 1 2次元セルオートマトン (CA) 法において考慮する隣りのセル

(a): 辺が接する上下左右の 4 個のセル, (b): さらに角が接する 4 個を加えた 8 個のセル。

てのセルについて繰り返すと、初期に白と黒のセルのランダムな配列から図 2 [Peitgen 92] に示す生体の組織のような複雑なパターンが生み出される。この手順が CA 法の原型である。

### 2.2 セルオートマトン法の適用分野

CA 法は、簡単なモデルと規則からは予想もできない複雑なパターンを生み出すことから、さまざまな分野に適用されてきた [加藤 98]。たとえば、生き物の生長 (生体組織、植物、バクテリアなど)、生態 (種の増減、種の住み分け、捕食関係など)、遺伝 (DNA 配列、進化など)、反応・拡散現象 (生物の紋様形成、神経の刺激伝達、化学反応など)、材料 (組織変化など)、フラクタル自然現象 (結晶成長、凝集など)、災害 (森林火災、地震、地滑りなど)、交通 (高速道路の車の流れ)、経済 (株価、景気の循環など) である。このなかで、森林火災や地震へは臨界自己組織化モデルとして用いられている。また、最近では高度集積回路の検査、暗号技術への応用が試みられている [Chaudhuri 97]。

### 2.3 高速道路の車の流れとセルオートマトン法

高速道路を走る多数の車の流れは、車同士が運転に影響し合うので、一台のみの場合とは異なり集団として振る舞う (車が等間隔で等スピードで走れば影響がなく一台の場合と同じとなるが、現実にはそのようなことは起きえない)。事故車線があったり、交通の取り締まりを行っている場合、交通渋滞が起きることはよく経験する。このようなものが何もない場合でも、高速道路を上空から見ると、車はまばらな箇所と密な箇所を作りながら流れている。前の車のブレーキランプがつくと、後続の車は衝突を避けるためブレーキを踏み、それを見た後ろの車もブレーキを踏み、……、ということが繰り返され、実際に最前列の車がブレーキを踏まなくても、ランプが点くだけで渋滞の原因になりうる。

車の流れの密なところは一般に後方に移動し、車はまばらな車線に移動するので、密な場所は常に変化する。車

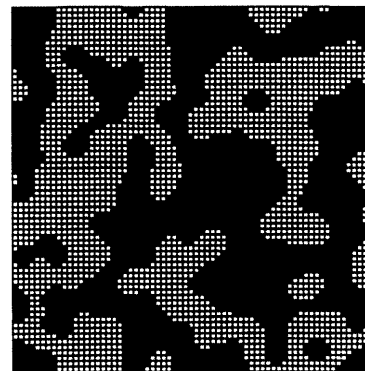


図 2 2次元 CA 法によって得られるパターンの例

の量が多いと、密なところがのろのろ運転となり、自然渋滞となる。交通信号があると、車の流れは悪くなるのが普通である。しかし、ニューヨークにおいて、トンネルの前で故意に車を止めるように交通信号を置くことで交通量が6%改善された例や、市街である通りの交通を規制することで全体の車の流れが改善されたことが報告されている。

このような車の流れを微分方程式で記述することは簡単ではないが、CA法を使えば車間の相互作用の規則と交通条件を入れるだけで、非常に簡単にシミュレーションできる。例えば、警察のスピード違反探知装置のまわりにおける渋滞の発生は、次の簡単なCA規則により、図3[Rensnick 95]に示すように再現される。

- 前方に車が近づくとスピードを落とす。
- 前方に車がない場合はスピードを上げる(スピード制限内で)。
- スピード違反探知装置を発見した場合はスピードを落とす。

図4では、自然渋滞の発生と渋滞位置が後方に移動する様子が再現されている。

コンピュータ上での交通シミュレーションは「シリコン交通」(silicon traffic)とも呼ばれ、現在では実際のさまざまな効果を取り入れられ、高速道路の計画などに活かされている。

### 2.4 セルオートマトン法の基本原理

CA法道路交通モデルの説明に入る前に、CA法の特徴と基本原理を1次元モデルを用いて説明する。

1次元モデルでは、あるセルの次の時間ステップにおける状態は横隣りのセルの状態によって決まる。その際、隣り合うセルとしてどこまで考慮するかが状態変化の規則を決める上で大きな要素となる。代表的なものとして、

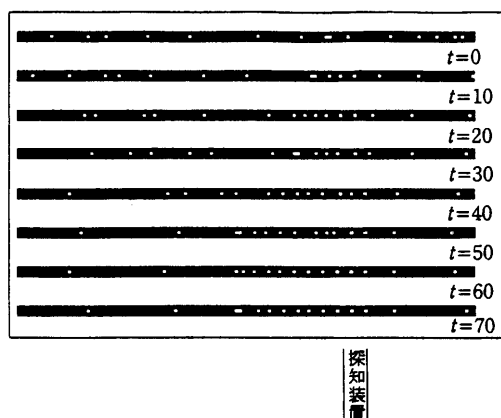


図3 スピード違反探知装置の設置による渋滞

車は左から右に流れている。スピード違反探知装置の手前で渋滞が発生し、時間とともに徐々に拡大する。

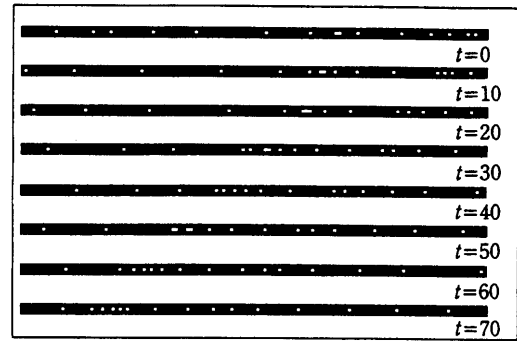


図4 自然渋滞

スピード違反探知装置がない場合でも、車の密度の濃淡が縞模様のようにできる。車の量が多くなると、自然渋滞となる。渋滞の位置は後方に移動する。

左隣りだけを考える場合：図5(a)、両隣りを考える場合：同図(b)および両隣りのさらに一つ先のセルまで考慮する場合：同図(c)などがある。

セルの位置座標を  $i$ 、時間ステップを  $t$  とする。位置  $i$  のセルの時間ステップ  $t$  での状態を  $a_t^i$  で表す。セル  $i$  の次の時間ステップ  $t+1$  の状態  $a_{t+1}^i$  は、隣りのセルとして、 $a_t^{i-r}$  から  $a_t^{i+r}$  までの  $2r+1$  個を考慮し、隣りのセルの状態を変数とする関数  $F$  によって与えられる。

$$a_{t+1}^i = F(a_t^{i-r}, a_t^{i-r+1}, \dots, a_t^i, \dots, a_t^{i+r-1}, a_t^{i+r}) \quad (2)$$

言い換えれば、セル  $i$  の時間ステップ  $t+1$  の状態は、近傍のセルの時間ステップ  $t$  の状態から決定される。

ここで、各セルのとり得る状態を白と黒とし、両隣りを考慮する場合を考える。セルの並び方と、次の時間ステップにおける中央セルの取り得る状態には図6に示す8パターンがある。

この規則はどのセルの位置でも同じであるため、CA計算を行う場合計算機に参照表として準備しておく。図6の場合、式(2)において  $r=1$  とし、次式で表される。

$$a_{t+1}^i = a_t^{i-1} + a_t^{i+1} \pmod{2} \quad (3)$$

$\pmod{2}$  は両隣りの状態値の和を2で割ったあまりを整数化して次の時間ステップでの値とすることを意味し、

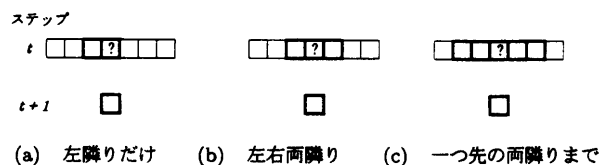


図5 1次元CA法において考慮する隣りのセル

ステップ  $t$  における?印のセルのセルは太線のセルの状態からステップ  $t+1$  における状態が決まる。



図 6 左右両隣りのセルを考慮する状態変化規則の例

時間ステップ  $t$  のセルの並び方と時間ステップ  $t+1$  の中央セルの状態の関係は以下となる。

$(t)$	<u>111</u>	<u>110</u>	<u>101</u>	<u>100</u>	<u>011</u>	<u>010</u>	<u>001</u>	<u>000</u>
$(t+1)$	0	1	0	1	1	0	1	0

1次元の CA モデルの性質を詳細に調べたウルフラムの方法にならない、この規則を下段の数字を並べた数字 01011010 と書くことにし、この数字を二進法から十進法に変換した数字を規則番号にする。すなわち、二進法の 01011010 は十進法の 90 に相当するので、式 (3) は 90 番の規則となる。この 90 番の規則を適用すると、時間ステップ  $t$  のセルの並びは次の時間ステップ  $t+1$  では次のようになる (184 番の規則を使用した道路交通シミュレーションモデルを次節で紹介する)。

時間ステップ $t$	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0		
時間ステップ $t+1$	*	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	*

規則の数は二進法の 8 桁の数字の組合せから  $2^8 = 256$  通りの規則が存在する。一般的には、 $k^n$  (ここで、 $n = k^{2r+1}$ ) 通りの規則が存在し得るが、規則から無意味なものを除くような制約条件を課すことで規則の数を減らすことができる。たとえば、以下の二つの制約条件を課すだけで 256 通りから 32 通りに減少する。

- 000 の状態からは変化しない。
- 鏡面对称とする (110 と 011 また 100 と 001 はそれぞれ同じ結果になる)。

両隣りのさらに一つ先のセルまで考慮する場合、位置  $i$  のセルの時間ステップ  $t+1$  における状態は、次式で表される。

$$a_{t+1}^i = F(a_t^{i-2}, a_t^{i-1}, a_t^i, a_t^{i+1}, a_t^{i+2}) \quad (4)$$

この場合、5 個のセルとの並び方として  $2^5 = 32$  種があり、セルは 0 と 1 の状態があるので、規則の総数は  $2^{32} \sim$  約 40 億通りとなる。この数の規則から得られるすべてのパターンを調査することは不可能なので、時間ステップ  $t+1$  におけるセルの状態は、時間ステップ  $t$  における 5 個のセル状態の和から決まるという次の規則を考える。

$$a_{t+1}^i = f(a_t^{i-2} + a_t^{i-1} + a_t^i + a_t^{i+1} + a_t^{i+2}) \quad (5)$$

セル状態の和は 0 から 5 までの 6 種類の値をとり、規則の総数は  $2^6 = 64$  通りとなる。このように状態和をとることで大幅に規則の数が削減され、64 通りの規則から生じるすべてのパターンを調べることが可能になる。

## 2.5 道路交通シミュレーションモデル

### § 1 CA 交通モデル

CA 法による道路交通モデルの概要を、MicroSim[Rickert 96] や TRANSIMS[Nagel 97, Rickert 97] に採用されているモデルに基づき紹介する。これらのモデルは多くの都市の交通シミュレーションに適用され、再現性と実用性が確認されている。

### § 2 単一車線モデル

道路は  $L$  個のセルが 1 次元円環状 (周期境界条件) につながっているとす。セルの長さは車の最小車間距離 (渋滞時のバンパー間距離) とし、例えば 7.5 m と設定される。一つのセルには速度が 0 から  $v_{max}$  (最高速度) までの速度 ( $v$ ) を持つ車が 1 台入ることができる。車の速度は  $0, 1, 2, \dots, v_{max}$  と整数化し、例えば、 $v_{max} = 5$  で 120 km/h のように実際の速度と対応させる。車の速度は、前に障害物がなければ、1 時間ステップで進むセルの数として表される。初期のモデルでは速度の種類は 1 種類であったが、1 種類ではトラックなどの乗用車以外の車との区別ができない。

車は前方向に障害物がなければ、1 時間ステップで  $v$  個前方のセルまで移動する。ここで、 $i$  を車を示す指標とし、その車の位置を  $x(i)$ 、速度を  $v(i)$ 、 $v_{sl}(i)$  を最高制限速度、 $pred(i)$  を先行車の指標、 $gap(i) := x(pred(i)) - x(i) - 1$  は先行車との車間距離である。最高制限速度は道路ごとに (市内では下げる等) 最高速度  $v_{max}$  の範囲内 ( $v_{sl} < v_{max}$ ) に設定される。各時間ステップごとに、車は次の規則で決まる新しい速度で進む。各車は 0 から  $v_{max}$  までの整数の速度を持つ。時間  $t$  の車の配置から時間  $t+1$  の車の状態を計算する。全て車は以下のように計算される。

- 加速: 車は最高速度 ( $v_{sl}$ ) になるまで加速される (もし、 $v < g$  であり、 $v < v_{max}$  であれば、1 だけ加速する ( $v = v + 1$ ))。
- 減速: 車間距離が小さくなりすぎると、追突しないように減速する ( $v > g$  であれば、 $v = g$  に減速する)。
- 揺らぎ: 運転速度は揺らぎを持つ ( $v > 0$  であれば、速度は確率  $p$  で 1 だけ減速する)。
- 走行: 車は目的地に向かって進行する (各時間ステップで車は  $v$  個前方まで移動する)。

図 7 はある地点での車の平均速度 (km/h) と交通量 (台/h) の関係について、シミュレーション結果とカルフォルニアの高速道路での実測データの比較を示している。両者が良く一致していることから、上記の単純なモデルで渋滞の自然発生が模擬できることが分かる。

上記モデルはランダム化確率  $p$  が入るので、確率論的道路交通 CA (STCA) モデルと呼ばれる [Nagel 96]。このランダム化確率  $p$  をゼロとすると、決定論的道路交通 CA モデルとなる。最大速度を  $v_{max} = 1$  とすれば、Wolfram の定義という CA 規則 184[Wolfram 94] とな

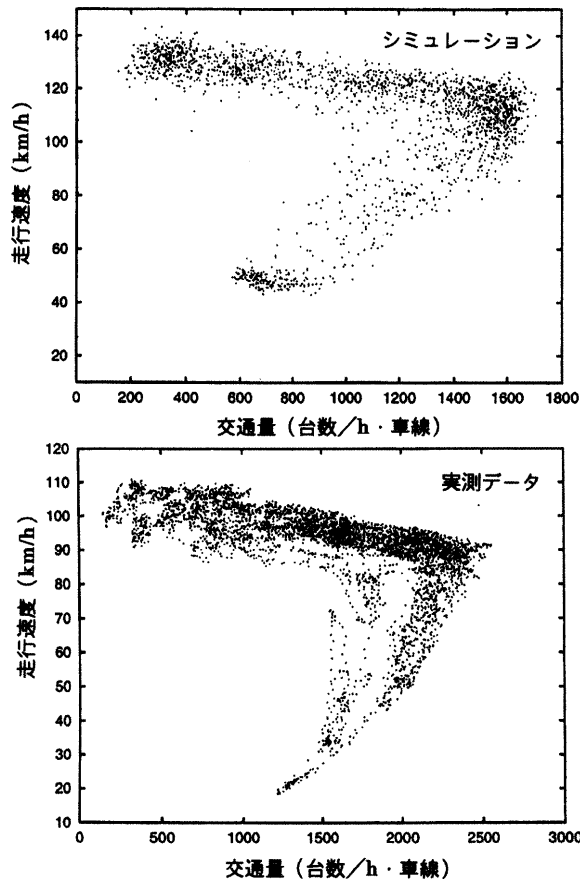


図 7 交通流のシミュレーションと実データとの比較

上段はカリフォルニアの高速道路で実測された交通密度と車の走行速度の関係（基本図）。下段はシミュレーション結果。

る。多くの CA 道路交通モデルはこの規則を用いている。

Takayasu らは実効的には CA 規則 184 と同じとなる別の CA 道路交通モデルを提案した [Takayasu 93]。かれらは最大速度を  $v_{max} = 1$  とし、次の短い規則を用いている。

- 前方が空いていれば ( $g \geq 1$ )，その車は 1 セルだけ進む。
- 停止している車は  $g \geq 2$  の時にのみ動くことができる。

車の移動について以下の確率論的な規則を取り込んだモデルは非対称確率論的排他過程 (ASEP) と呼ばれる。

- 1 個の粒子をランダムに取り出す。
- 右側のセルが空いていれば，粒子はそのセルに移動する。

CA-184 や STCA が全てのセルが一斉に更新されるのに対して，ASEP はランダムに行われることである。すなわち，ASEP では， $N$  個の粒子が更新されて平均的に各粒子が 1 回更新されることになる。そこで，一つの時間ステップは  $N$  個の粒子の更新で進むことになる。この更新の違いで交通流の動的な振舞いが大きく変

わる。ASEP におけるノイズの削減は，各々のセルにカウンターを置き， $k$  回で動くとすることで系統的に削減することができる。 $k$  を無限大にすると，ASEP は CA 規則 184 となる。

### § 3 複数車線モデル

単車線モデルは，次の車線変更規則を入れることでモデルを複数車線モデルとすることができる。

- 左車線に移動可：現在の車線の車間距離が小さく，左の車線に十分に大きな車間距離がある。
- 右車線に移動可：右の車線に十分に大きな車間距離がある。
- 左車線に移動不可：現在の車線の車間距離が小さく，左の車線に十分に大きな車間距離がある。

### § 4 道路網のモデル化

道路は，多数の道路が網の目のようにつながった道路網として存在し，その密度は大都市で高くなる。このような道路網の交通シミュレーションは道路の網の目構造を考慮した 2 次元空間で行われる。通常，道路データと個々の車の出発点，目的地，出発時間および走行計画を与えて，シミュレーションが開始され，シミュレーションは目的地に到着する車の割合が指定した値となるまで行う。その際，交差点は節点として，道路は交差点間を結ぶ二つの端点で表される。各節点は標識番号と位置の情報を持つ。二つの端点で表される道路は，つながっている節点の標識番号，名前，車線数，制限速度などの情報を持つ。節点の一つの道路だけとつながっていれば行き止まり，三つとつながっていれば三叉路，四つとつながっていれば普通の交差点（十字路）となる。二つとつながっていれば，高速道路に入ったり出たりする道路が表される。

CA 法では，図 8 [Rickert 96] の左に示す実際の立体交差点の道路構造は右図で示すように単純化される。

### § 5 データの扱い

CA シミュレーションを実行する際に必要な各車のデータは，1 ワードで書けるデータ（速度，標識番号，車線変更関係）と 1 ワードで書けない長いデータ（走行計画）を分けて扱われる。

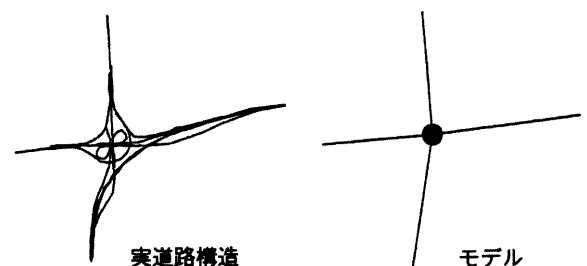


図 8 立体交差点のモデル化

§ 6 道路モデルの基本要素

道路は、次の8個の基本要素を表1に示す構成で用いて、行き止まり、ランプ、三叉路、十字路などがモデル化される。また、三叉路と十字路で8要素がどのように用いられているかを図9と図10[Rickert 96]に示す。

表1 道路網の構成要素の内訳

項目	TS	SRC	SNK	MR	DR	AR	ER	CN
行き止まり	0	1	1	0	0	0	0	1
ランプ	4	2	2	2	2	2	2	2
三叉路	4	0	0	4	4	2	2	2
十字路	8	0	0	8	8	8	8	4

- 車線変更 (TS = Transfer Segment) : 吸収帯から発進帯に車線を変更させる (長さは  $l_{transfer}$ ) .
- 流入 (SRC = Source) : 待機していた車を道路網に入らせる. 空きのセルが見つかるが一番長く待っていた車から順番に道路に入る.
- 流出 (SNK = Sink) : 走っていた車を道路網から出すことを定義する. 目的地のノードにきた車を探して, ノード点が一番近づいている車から順番に道路網より出していく.
- 書き込み (MR = Marking Range) : 道路網から出る時のために, 車が入った時にデータを書き込む機能を持つ.
- 吸収帯 (AR = Absorption Range) : 目的地の出口に近づいた車を探し, 車線変更車線に移動させる.
- 減速帯 (DR = Deceleration Range) : 出口近くに近づいた車と目的地とは異なる方向に進む車線の車を減速させる. 減速は1ずつステップ状に行われ, 減速, 道路網から出れない時や車線が変更できない場合は速度がゼロとなったところで止まる.
- 発進帯 (ER = Emission Range) : 車線変更区間で目的地へ向かう道路に空きがある場合, その道路に車を移す.
- 結合 (CN = Connector) : 目的地の区間で出て行く入って来る車の間の境界条件を受け渡す.

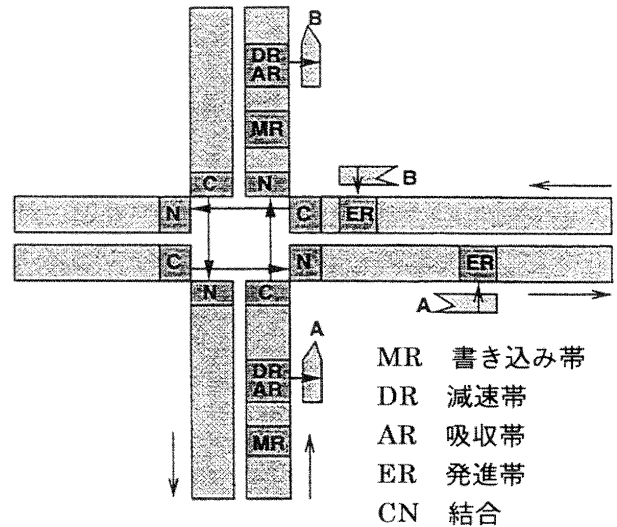


図10 十字路モデル

§ 7 遺伝的アルゴリズムの導入

交通信号の緑の点灯時間は、交叉点付近で渋滞が発生せず車がスムーズに流れるように、道路の進行方向の交叉点間で時間遅れを持たせて同期させている。また、交通量の多い道路側で長くし、少ない側で短くする。緑、黄色、赤の点灯時間の最適化は、多数の信号機を考慮して、遺伝的アルゴリズムを用いて行われる。最適化の目標関数の例として、道路網全体で信号により停止している車の総数を最小化 (動いている車の総数を最大化) がある [山本 98].

3. セルオートマトン法による道路交通シミュレーション事例

CA法を用いた大規模な交通シミュレーター MicroSim (独), PARAMICS (英), TRANSIMS (米) によるシミュレーション結果とわが国の現状を紹介する。

3.1 ドイツ (MicroSim) の事例

MicroSimは、道路網データと個々の車の出発点、目的地、出発時間および走行計画が与えられると、交通流のシミュレーションが行われる。シミュレーションは目的地に到着する車の割合が指定した値となるまで行う。また、ある密度のバックグラウンド交通流も出すことができる。この場合は、車は走行計画を持たず交差点では与えられた確率で方向を変える。

MicroSimは、都市 (デュイスブルグ [Esser 97], プッパータル [Nagel 96]), 地域 (ノルドライン-ヴェストファーリア = NRW) およびドイツ全土 (FRG) [Rickert 96] のシミュレーションに適用された。特に, NRW については, さまざまな分野の研究者 (計算機シミュレーション, 自動車開発, 都市計画, 公害研究等) から構成される研究体 (NRW-FVU) を作り, 州の予算によりこの地

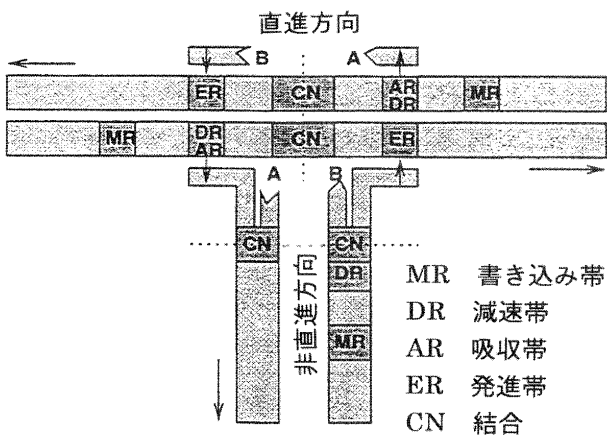


図9 三叉路モデル

域の効率の良い交通システムの開発と自動車排気ガス公害の削減に取り組んでいる [MicroSim].

表2に示す道路仕様のドイツ全体とノルドライン-ヴェストファーリアのシミュレーションが以下の2種類の計算機を用いて行われ、いずれも実時間以下で計算できた。特に、ドイツ全体では、道路総延長は約75,000 kmで、走行計画を持たせた1,000,000台(道路平均占有率=10%)の車を考慮して、MicroSimによる大規模交通シミュレーションの実用性が検証されたことになる。

- 12 CPU SUN SPARC-station
- 16 CPU SGI Challenger (SC 900 XI)

表2 道路交通網データ

項目	NRW	FRG
節 点	549	3,307
端 点	1,160	6,860
行き止まり	19	46
ランプ	349	1,568
三叉路	39	176
十字路	21	58
車線変更セグメント数	1,720	7,440
延べ道路長 (km)	11,712	74,844
セル数	1,561,600	9,979,200
平均端点間セル数	448	484

### 3.2 英国 (PARAMICS) の事例

英国のPARAMICSは1992年初めにクアッドストーン社が開発したCA法に基づくマイクロシミュレーションソフトに端を発する。このソフトは、サイアス社によりエジンバラ大学並列計算センターのシンキングマシンの並列計算機TMC CM-200上でMICSIMとなった。さらに、MICSIMはメッセージパッシングを使用し、CRAY-T3Dで稼働するPARAMICSとなった。PARAMICSは、現在、3次元CG表示などの周辺ソフトも備え、パソコン、ワークステーション、並列計算機(Cray-T3E, SGI Origin 2000)に移植された汎用プログラムとして、クアッドストーン社とサイアス社から販売されている。PARAMICSは、25万台以上の車を考慮した交通シミュレーションが実時間以下で可能であり、渋滞管理のためのシミュレーターおよび高度道路交通システムのツールとして利用される。PARAMICSは、英国、フランス、ドイツ、アメリカ、アルゼンチン、日本などの国で道路交通の企画立案に利用されてきている。日本では、東名高速道路での自動運転システムの実用性評価、首都高速道路との合流法の研究に使用された [PARAMICS].

### 3.3 米国 (TRANSIMS) の事例

MicroSimの基本モデルをドイツのケルン大学でSchreckenbergなどと開発し、1994年に同大学で学位を取得したNagel[Nagel 94]は、ロスアラモス国立研究所に移り、TRANSIMS (transportation- analysis simulation

system)を米国連邦高速道路庁の委託で開発している。このシステムは、新交通システムの導入、橋やレーンを増やすことなどの効果を検討することができる。1993年にはアルバカーキ市(ニューメキシコ州)の実際の交通をうまく再現でき、95年にはダラスとフォートワース間(テキサス州)3,600平方マイルの230万人の住民のいる地域についてのシミュレーションに適用された [Nagel 97, Rickert 97, Simon 98, TRANSIMS].

TRANSIMSの出力結果の上端にMicroSimと印字されていることから(図11参照)、TRANSIMSはMicroSimをベースにし、上記のシミュレーションが行えるように改良されたものと推測される。

TRANSIMSでは、制限速度は道路ごとに与えられ、交差点での直進や進路変更や信号待ちにおける運転規則もモデル化されている。道路は、市街地は住宅地の小さなものを除き、郊外から両市に向かう幹線道路が考慮されている。交差点は8,053箇所あり、道路の総延長距離は27,194 kmである。シミュレーションはサンスパークワークステーションを8台並列して行われ、渋滞の発生予測結果を図11に示す。

98年初頭にはポートランド市(オレゴン州)についてさらに詳細なシミュレーションが行われることになっている。このモデルでは車で列車の駅まで行き、列車に乗り、バスに乗り換えて職場まで通勤するというような人の実際の通勤パターンまでがシミュレーションされる予定となっている [Howard 97].

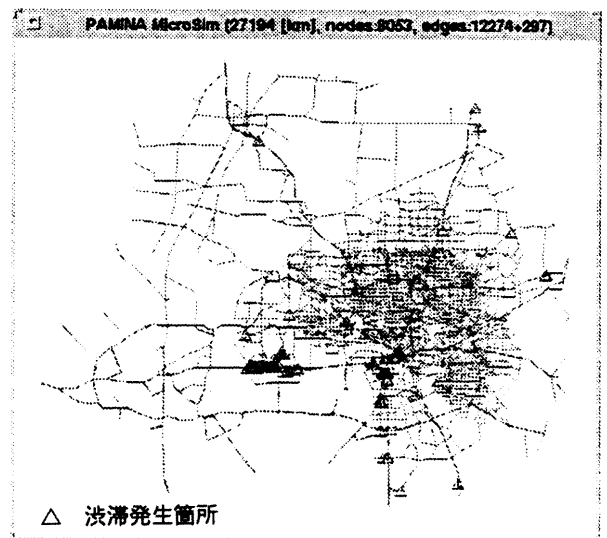


図11 米国高速道路の渋滞シミュレーション

CA法によるダラス/フォートワース間のシミュレーション。計算開始9分後の結果である。幹線道路の三角形で示す箇所では渋滞が発生している。128,000台の車が考慮されている。

### 3.4 日本の事例

わが国における CA 法による交通シミュレーションは 1993 年頃から Nagatani [Nagatani 93] などにより行われてきた。しかし、主要な関心は、交通流の静的および動的（交通密度波の移動、渋滞への遷移や解消など）な特性の再現性であったといえよう。

実際の道路交通シミュレーションは 4 箇所の交叉点を含む小規模な道路について行われた。このシミュレーションでは、遺伝学的手法を用いて、交通流の平均化が行われるように、十字路（3 箇所）と三叉路（1 箇所）の交通信号表示時間の最適化が行われている。最適化前と後で走行および信号待ちで停止している車の台数変化を図 12 と図 13[山本 98] に示す。

## 4. 開発動向と今後の課題

### 4.1 開発動向と課題

前章で紹介したように、海外（英、独、米）では、CA 法道路交通シミュレーターは 1990 年台初頭から開発され始め、現在では、政府や地方公共団体の都市計画部門において効率的な道路交通システムの開発や車の排気ガス公害の削減のために活用されている。

一方、わが国では、同じような時期に開発はスタートしているが、交通流の再現性や小規模のシミュレーションの段階にとどまっている。このような海外とわが国の状況との違いの原因は研究開発の進め方にあるものと考えられる。わが国では、ほとんどが大学の研究室で開発されているのに対して、海外では、大学（あるいは国立研究所）、企業、公共団体などが政府の大きな予算をもらい共同で開発を進めている。結果として、両者の間で利用のされ方に大きな差ができています。今後、高度道路

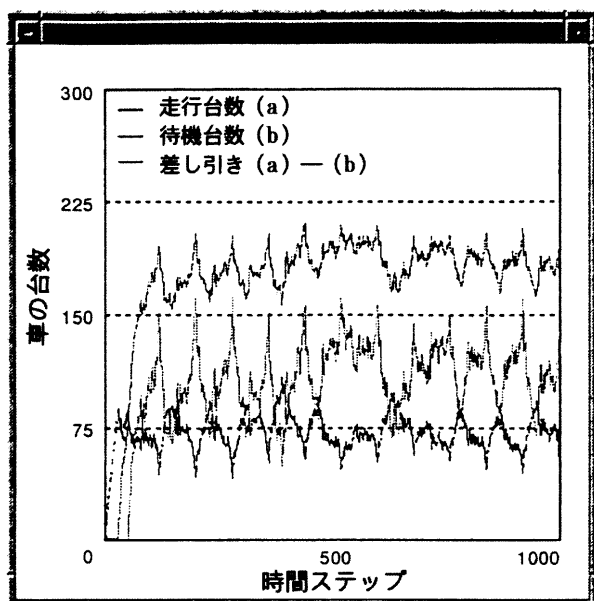


図 12 最適化前の車の台数

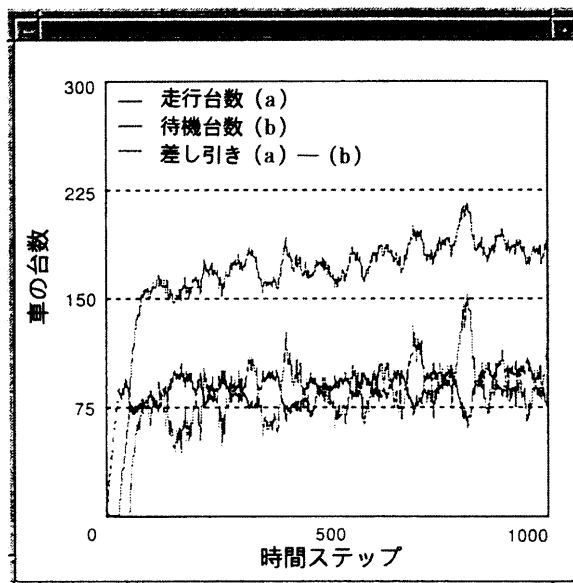


図 13 最適化後の車の台数

交通システムに役立つシミュレーターを開発するためには、わが国でも産・官・学で海外と同様な研究体制を構築する必要がある。

### 4.2 高度道路交通システムとしての可能性

微分方程式で交通流を記述する従来手法では、多数の道路が網の目のようにつながった道路網において合流や分岐を扱ったり、車線変更を考慮して多数の車の流れを記述することは本質的に困難である。多数の車の流れは、個々の車に前後左右の車との相互作用規則を適用して、この規則を全部の車に繰り返し適用することで集団としての振舞いを発生させる CA 法のような手段でしか記述できないものと判断される。

各道路の込み具合を外部から得て、CA 法シミュレーターを用いて最短時間で目的地に達するルートを探し、運転手に知らせたり、到達時間を予測できれば、運転時間が短縮されるだけでなく、道路全体としての込み具合は平均化され、渋滞の発生が緩和される。また、排気ガス放出量の削減にもつながる。この場合、運転手は目的地を携帯端末から入力して、高度道路交通サービス会社が所有するシミュレーターに衛星通信回線でアクセスし、シミュレーション結果として最短ルートなどの情報を得ることになる。

### ◇ 参 考 文 献 ◇

- [Bando 94] Bando, M., Hasebe, K., Nakayama, A., Shibata, A. and Sugiyama, Y. : Jpn. J. Ind. Appl. Math., Vol. 11, p. 203 (1994).
- [Biham 92] Biham, O., Middleton, A. and Levine, D. : Phys. Rev. A, Vol. 46, p. R6124 (1992).
- [Chaudhuri 97] Chaudhuri, P. P., et al.: Additive Cellular Automata - Theory and Applications, IEEE Computer So-



ciety Press (1997).

- [Cremer 86] Cremer, M. and Ludwig, J. : Math. Comput. Sim., Vol. 28, p. 297 (1986).
- [Esser 97] Esser, J. and Schreckenberg, M. : Int. J. Mod. Phys. C, Vol. 8, p. 1025 (1997).
- [Gerlough 56] Gerlough, D. L. : Proc. 35th Annual Meeting, edited by Burggrat, F. and Ward, E. M., p. 543, Highway Research Board, Wasington, DC (1956).
- [Howard 97] Howard, K. R. : Sci. Am., p. 86 (Oct., 1997).
- [加藤 98] 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, 森北出版 (1998).
- [Kühne 84] Kühne, R. : Proc. 9th Int. Symp. on Transportation and Traffic Theory, edited by Volmuller, J. and Hamerslag, R., VNU Science Press, Utrecht (1984).
- [Lighthill 55] Lighthill, M. J. and Whitham, G. B. : Proc. R. Soc. London Ser. A, Vol. 229, pp. 281 (1955).
- [MicroSim] <http://www.zpr.uni-koeln.de/Forschungsverbund-Verkehr-NRW/>
- [Musha 76] Musha, T. and Higuchi, H. : Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 15, p. 1271 (1976).
- [Nagatani 93] Nagatani, N. : J. Phys. Soc. Jpn, Vol. 62, p. 2625 (1993).
- [Nagel 92] Nagel, K. and Schreckenberg, M. : J. Phys. (France) I, Vol. 2, p. 2221 (1992).
- [Nagel 94] Nagel, K. : PhD thesis, University of Koeln (1994).
- [Nagel 96a] Nagel, K. : Int. J. Mod. Phys. C, Vol. 7, p. 883 (1996).
- [Nagel 96b] Nagel, K. : Phys. Rev. E, Vol. 53, p. 4655 (1996).
- [Nagel 97] Nagel, K. and Barrett, C. L. : Int. J. Mod. Phys. C, Vol. 8, p. 505 (1997).
- [Newell 61] Newell, G. F. : Oper. Res., Vol. 9, p. 209 (19861).
- [PARAMICS] <http://www.paramics.com/>
- [Payne 71] Payne, H. J. : Models of Freeway Traffic and Control, Mathematical Models of Public Systems, Simulation Council, La Jolla, CA, Vol. 1, p. 51 (1971).
- [Peitgen 92] Peitgen, H. O., Jürgens, H. and Saupe, D. : Fractals for the Classroom - Part Two, Complex Systems and Mandelbrot Set, Springer-Verlag (1992).
- [Prigogine 71] Prigogine, I. and Herman, R. : Kinetic Theory of Vehicular Traffic, Elsevier, New York (1971).
- [Resnick 95] Resnick, M : Turtles, Termites, and Traffic Jams - Explorations in Massively Parallel Microworlds, A Bradford Book, MIT Press (1995).
- [Rickert 96] Rickert, M. and Wagner, P. : Int. J. Mod. Phys. C, Vol. 7, p. 133 (1996).
- [Rickert 97] Rickert, M. and Nagel, K. : ibid, Vol. 8, p. 483 (1997).
- [Simon 98] Simon, P. M. and Nagel, K. : Phys. Rev. E, Vol. 58, p. 1286 (1998).
- [Takayasu 93] Takayasu, M. and Takayasu, H. : Fractals, Vol. 1, p. 860 (1993).
- [TRANSIMS] <http://www-transims.tsasa.lanl.gov/>
- [Whitham 90] Whitham, G. B. : Proc. R. Soc. London Ser. A, Vol. 428, p. 49 (1990).
- [Wolfram 84] Wolfram, S. : Physica D, Vol. 10, p. 1 (1984).
- [Wolfram 94] Wolfram, S. : Cellular Automata and Complexity - Collected Papers, Addison-Wesley (1994).
- [山本 98] 山本直史, 森下 信: 日本機械学会論文集, 投稿中 (1998).
- [Yukawa 95] Yukawa, S. and Kikuchi, M. : J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 64, p. 35 (1995).

1999年12月15日 受理

## 著者紹介



加藤 恭義

1966年3月静岡大学工学部合成化学科卒業。1968年3月東京工業大学大学院理工学研究科修士課程修了。1971年3月同大学院博士課程修了。工学博士。同年〔株〕日立製作所入社。1999年東京工業大学原子炉工学研究所教授。研究分野は分散エネルギー源としての革新的原子力システムおよび格子ボルツマン法による複雑流れの微視的シミュレーション手法の開発。原子力学会会員。