

# セルオートマトン法による 高速道路 ETC ゲートにおける交通渋滞解析

玉 城 龍 洋<sup>†</sup> 原 明 美<sup>††</sup> 北 英 輔<sup>†††</sup>

本研究では、料金所による交通渋滞を評価するために確率速度モデル法とセルオートマトン法を用いたシミュレーションについて述べる。最初に、車両行動のローカル・ルールなど解析モデルのアルゴリズムについて述べる。つづいて、提案手法を料金所が設置された 2 車線直線道路での交通流解析に適用する。

## Traffic Jam Estimation at ETC Toll Gate by Using Cellular Automata Simulation

TATSUHIRO TAMAKI<sup>†</sup>, AKEMI HARA<sup>††</sup> and EISUKE KITA<sup>†††</sup>

This paper describes traffic jam estimation at a toll gate by stochastic velocity model and cellular automata simulation. First, the mathematical model of the object under consideration and the local rules are defined. Next, the present scheme is applied to the traffic flow simulation on the two-lane road with toll gates road.

### 1. はじめに

近年の自動車の普及や道路の整備により、都市生活はより便利になってきた。しかし、その発展が同時に交通渋滞を引き起こし、大きな社会問題の一つとなっている。そこで、交通流の予測や解析を行うことのできる交通シミュレーションは、有効な手段として考えられている。

ところで、高速道路における渋滞発生の主な原因として、道路の勾配の変化で速度変化が起こるサグ地点や、速度を一度落とさなければならぬ料金所などが挙げられる。特に料金所付近での渋滞は渋滞発生原因の約 3 割を占めている。対処策として有料道路自動料金支払いシステム (Electronic Toll Collection System; 以下, ETC) が、高度道路交通システム (Intelligent Transport System; 以下, ITS) の重点分野の一つとして開発が進められた。

本研究では、セル・オートマトン法と確率速度モデル

ル<sup>1)</sup>を用いて ETC における交通渋滞の解析について述べる。解析対象として 2 車線道路を考え、料金所として各車線に通常料金所が設置される場合、各車線に ETC 料金所が設置される場合、2 つの車線にそれぞれ通常料金所と ETC 料金所が設置される場合を考える。

### 2. 提案するシミュレーション手法

#### 2.1 確率速度法について

本研究では確率を用いた速度概念を用いる。確率速度法では、車両速度  $v$  は次の式で表される。

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

ここで、 $v_{\max}$  は設定された車両の最大速度を示す。そして、速度  $v (< v_{\max})$  で走行する車両の移動は以下のようにして実現する。

(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)  $0 \sim 1$  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。

#### 2.2 ローカル・ルール

##### 2.2.1 車間距離と安全車間距離

本研究では、車両は予め与えられた距離に前方車両との車間距離  $G^i$  を保とうとすると仮定する。この車間距離のことを安全車間距離  $G_s^i$  と呼び、これは現在

<sup>†</sup> 名古屋大学人間情報学研究所  
Graduate School of Human Informatics, Nagoya University

<sup>††</sup> 名古屋大学情報文化学部  
School of Informatics and Sciences, Nagoya University

<sup>†††</sup> 名古屋大学情報科学研究科  
Graduate School of Information Sciences, Nagoya University

速度  $v$  から導出する．次に，前方車両との距離  $G_0^i$ ，右前方車両との距離  $G_r^i$ ，左前方車両との距離  $G_l^i$  を測定する．

安全車間距離は，実測データを最小 2 乗法で近似した，以下の式を用いて算出する<sup>2)</sup>．

$$G_s^i = 0.0029 \times v^2 + 0.3049 \times v \quad (3)$$

実際の車間距離  $G_0^i$ ， $G_r^i$ ， $G_l^i$  は，自車両の存在するセルと前方で最も近い位置にある車両が存在するセルの間の空白セルの数にセルの長さに乗じて算出する．評価する時に参照するセルの範囲の最大値を  $G_{def}^i$  で表す． $G_{def}^i$  以内に車両が存在しない場合は，車間距離は  $G_{def}^i$  とする．また，自セルの左右が道路でない場合は，その側の車間距離は 0 とする．

### 2.2.2 行動ローカル・ルール

行動ローカル・ルールは，車両行動の優先順位と各車両行動の可否を決定する規則である．車両が料金所手前 370m 以内を走行している場合か，それ以外の場合かによって場合分けをする．これは，車両が ETC 機器を積載しているかどうかで通過できる料金所が変わり，その車両に適した料金所を通過するように車線変更するためである．ここで，370m という数値は，文献<sup>3)</sup>の料金所モデルを元に設定している．

#### 2.2.2.1 直線道路における行動ローカルルール

- (1) 走行車線の前方車両との車間距離  $G_0^i$  と隣接車線の前方車両との車間距離  $G_l^i$ ， $G_r^i$  を評価する．
- (2)  $v$  から  $G_s^i$  を式 (3) 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． $G_0^i < G_s^i$  かつ  $G_r^i$  ( $G_l^i$ ) が最も大きいならば右 (左) 車線変更を行い， $G^i \leftarrow G_r^i$  ( $G_l^i$ ) とする．
- (4) 速度ローカルルールに進み，速度を変更する．
- (5) 2.1 節で示した確率速度モデルにしたがって前方へ進む．

#### 2.2.2.2 料金所手前における行動ローカル・ルール

- (1) 走行車線の料金所の種類を調べる．
- (2) 注目車両と料金所の種類が一致する場合，料金所まで車線変更は行わずに (3) に進む．注目車両と料金所の種類が異なる場合，前方車両との車間距離の大きさに関係なく車線変更を試み，車線変更できない場合は (3) に進む．
- (3) 速度ローカルルールに進み，速度を変更する．
- (4) 2.1 節で示した確率速度モデルにしたがって前方へ進む．

#### 2.2.2.3 料金所通過ローカル・ルール

- (1) 注目車両が一般車両の場合，料金所区間の中央で 12 秒間<sup>4)</sup> 停止する．ETC 車両の場合，料金所区間では最高速度を時速 20km/h として

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

|           |   |
|-----------|---|
| セルサイズ     | 3 (m)   |
| 1 タイムステップ | 0.1 (s)   |
| 車両配置      | 初期配置型   |
| 境界条件      | 周期境界条件  |
| タイムステップ数  | 40000 (Timestep)  |
| 最高速度      | 80(km/h) (通常道路)<br>20(km/h) (ETC 料金所区間)                               |
| 加速度       | $0.6 < \alpha < 2.4(m/s^2)$ (加速時)<br>$1.2 < \beta < 3.0(m/s^2)$ (減速時) |
| 通常料金所停止時間 | 12(s)   |

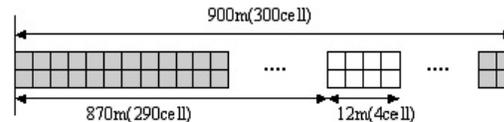


図 1 解析領域  
Fig. 1 Object domain

走行する．

- (2) 料金所を通過後は可能な最高速度を 80km/h に戻して走行する．

### 2.2.3 速度ローカル・ルール

速度ローカル・ルールは，近傍にある車両との位置関係による相対的な加減速と，料金所との位置関係による絶対的な減速を行う．前者を相対加減速ローカル・ルール，後者を絶対加減速ローカル・ルールとする．

#### 2.2.3.1 相対加減速ローカル・ルール

- (1)  $G_s^i = G^i$  の場合，現在速度を維持するが，前方車両が減速している場合は  $v^i \leftarrow v^i - \beta$  とする
- (2)  $G_s^i > G^i$  の場合， $v^i \leftarrow v^i - \beta$  とする (減速)
- (3)  $G_s^i < G^i$  の場合， $v^i \leftarrow v^i + \alpha$  とする (加速)
- (4)  $v^i > v_{max}^i$  の場合， $v^i \leftarrow v_{max}^i$  とする．また， $v^i < 0$  の場合， $v^i \leftarrow 0$  とする．

#### 2.2.3.2 絶対減速ローカル・ルール

- (1) 料金所までの距離  $G_g^i$  を評価する．
- (2)  $G_g^i < 370m$  の場合，注目車両が ETC 車両ならば  $\beta \leftarrow (v - 20)/G_g^i$ ，一般車両ならば  $\beta \leftarrow v/G_g^i$  とする．
- (3)  $v^i \leftarrow v^i - \beta$  として，減速を行う．

## 3. 解析例

片側二車線の高速道路を考える．対象領域は，300セル (900m) の直進道路を二本あわせたものとする (図 1)．また，道路の左端から 290 セル目から進行方向に 4 セル分を料金所と設定する．1 セルの大きさは  $3m \times 3m$  とし，車両は道路上の連続する 2 セルを用

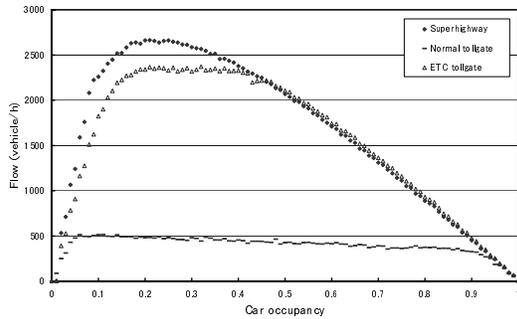


図 2 同種の料金所を設置した場合  
Fig. 2 Same kind gate setted at each lane

いて表す。

このシミュレーションで用いたパラメータを表 1 に示す。加速度は、文献<sup>2)</sup>にあるように、加速時には  $0.6 < \alpha < 2.4(m/s^2)$ ，減速時には  $1.2 < \beta < 3.0(m/s^2)$  の範囲の値をとる。

片側二車線道路に設置する料金所の種類として、各車線に通常料金所が設置される場合、各車線に ETC 料金所が設置される場合、2つの車線にそれぞれ通常料金所と ETC 料金所が設置される場合を考える。これに、料金所がない通常の 2 車線道路の結果を加えて議論する。

### 3.1 各車線に同種の料金所を設置した場合

各車線に通常料金所または ETC 料金所を設置した場合の解析結果を図 2 に示す。同図には、料金所がない場合の結果も示している。横軸には道路面積における車両の占有率を示す車両密度 (%)，縦軸には 1 時間あたりの走行車両台数である交通量 (台/時) を示す。

高速道路における交通量は、およそ 20% を頂点とした山形となっている。また、ETC 料金所の場合は、高速道路の場合とほぼ形状が一致しているが、一般的なボトルネックを含む基本図と同様に頂点の部分が平らに欠けた状態である。通常料金所の場合も同様に、高速道路の場合と形状が一致している部分があるが、頂点は更に欠けた状態になっている。これは、以下のように考えられる。まず、頂点に向かうまでの部分では、料金所へ向けた減速があるため、料金所の設定がある 2 つのデータは高速道路よりも少ない交通量となる。しかし車両台数自体が少ないので、減速しても他車両へ与える影響は微小であり、交通量の差はそれほど大きくない。頂点付近の頭打ちになっている部分では、料金所の処理能力による交通量差が出ている。これは、通過しようとする車両台数が増えても料金所の処理台数には限度があり、常に一定であるため車両通過台数も一定と考えられる。

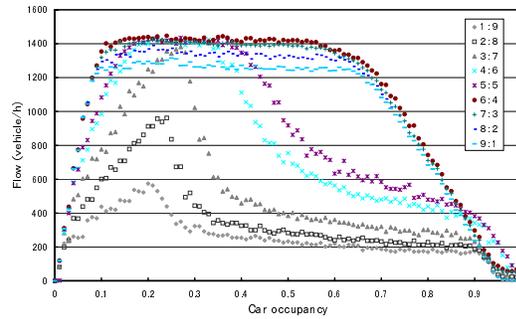


図 3 異なる料金所を設置した場合  
Fig. 3 Different kind gate setted at each lane

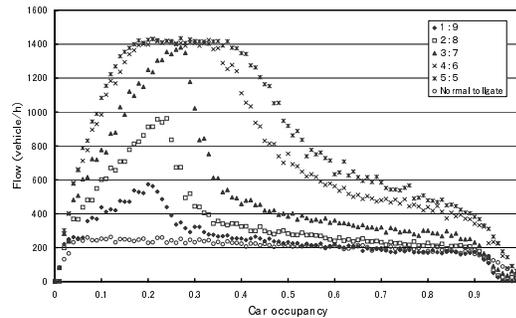


図 4 通常料金所を設置した 1 車線道路との比較  
Fig. 4 Comparison with one-lane road with normal gate

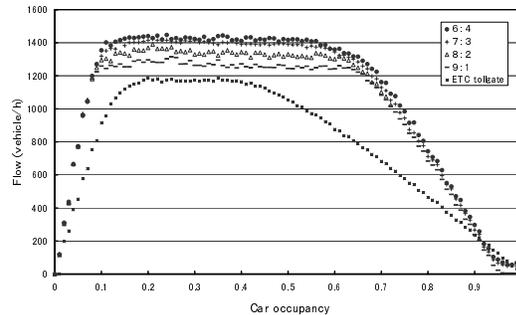


図 5 ETC 料金所を設置した 1 車線道路との比較  
Fig. 5 Comparison with one-lane road with ETC gate

### 3.2 各車線に異なる料金所を設置した場合

片方車線に通常料金所を、もう一方の車線に ETC 料金所を設置した場合の解析結果を図 3 に示す。

この図でも、ETC 車両の割合が多いほうが比較的交通量も多いという結果が導き出せる。しかし、これまで述べてきた結果と異なる点は、ETC 車両の割合が 50% 以下における車両密度ごとの交通量の変化と、ETC 車両の割合が 60% 以上における交通量の増減である。これらの現象は、以下のような理由によると考えられる。

始めに、ETC 車両の割合が 50%以下の場合を考える。車両密度が 0.2~0.4 の辺りで交通量は最大値を取っている。車両密度が小さい、即ち車両台数が少ないときは、ETC 車両と一般車両それぞれが各料金所へ向けて並んでも発生する渋滞は小さいため、交通量にはそれほど影響は無い。そのため、車両密度の増加につれて交通量も単純に増加している。その後、渋滞が発生すると交通量は急激に減少している。これは、車両がそれぞれ適した料金所へ進入するために車線変更を行わなければならないからである。本論文で作成したプログラムは、料金所へ向けて車線変更をする区間を一定距離 (370m) に定めている。大部分の車両は、その区間内で車線変更を行うので問題ないが、その車線変更区間を越えて料金所からの渋滞が伸びてしまうと、後続車は車線変更を始める前に、もう片方の車線に侵入してしまう。そして間違った車線にそのまま直進し、料金所が近くなったときに正しい車線へ無理やり車線変更を行うことになる。しかし車線変更を行う先の車線は渋滞している状態であり、すぐには車線変更ができないので、車線変更ができるまでその車両は停止して待つことになる。するとその車両の後方の車両も停止することになり、その時の交通流は 1 車線分となる。これが何度も繰り返されるため、交通量の減少が著しくなるのだと考えられる。また、この現象が起こっているのは ETC 車両の割合が低い時である。この場合一般車両が多いため、一般車両が通過する通常料金所のある車線で渋滞が発生しており、一般車両が ETC 料金所がある車線へ進入してしまう状況になる。以上より、実際に測定される交通量は、一般車両が通常料金所を通過する交通量に、割合の低い ETC 車両が少量通過する程度の交通量となっていくのである。通常料金所を設置した 1 車線道路の交通量と比較した結果を図 4 に示す。これにより、通常料金所を設置した 1 車線道路の最大交通量は 2 車線道路の交通量の下限界となっていることがわかる。

ETC 車両の割合が 60%以上の場合は、ETC 車両の割合が増加しても逆に交通量が減少している。これは、上述した「最大値を越えた後の交通量の減少」と同じ原因があると考えられる。この場合は、ETC 車両の割合が多いので ETC 車両が通過する ETC 料金所のある車線で渋滞が発生しており、ETC 車両が通常料金所がある車線まで進入している状況である。ETC 車両の割合が多いほど他車線へ進入する車両数が増え、その車両が車線変更をする間は他車線の交通量が 0 になる。従って、ETC 車両の割合が多いほうが全体として交通量が少なくなるのである。上述した場合と減

少率が違うのは、車線変更する先の車線にいる車両種類が ETC 車両であるためである。一般車両と違って料金所を通過する速度が速いので、その分車線変更をするために停止する時間も格段に短くなり、上述の場合と比べて、車線変更にともなう時間的ロスが少ないのである。ETC 料金所を設置した 1 車線道路の交通量と比較した結果を図 5 に示す。これにより、ETC 料金所を設置した 1 車線道路の最大交通量は 2 車線道路の交通量の下限界となっていることがわかる。

#### 4. 結 論

確率速度法による速度表現と車両移動を用いたセル・オートマトンモデルを用いて料金所付近の交通流のシミュレーションを行い、ETC 料金所と通常料金所による交通量の違いを述べた。その結果、交通量は、ETC 車両の密度と料金所の種類に大きく依存すると分かった。ETC 車両の割合が低い場合は、ETC の料金所を設置すると、一般車両が充満して ETC 料金所のある道路にも入ってしまい、その結果、車線変更を余儀なくされ渋滞を引き起こしてしまう。また、ETC 車両の割合が高い場合は、交通量は逆に減少していく様子が見られた。以上より、交通量を高い状態で維持するためには、ETC 車両の割合や車両の密度に注目しながら料金所の種類を定める必要があるということがわかった。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、21 世紀 COE プログラム「計算科学フロンティア」から援助を頂いた。ここに記して謝意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 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. 情報処理学会論文集, Vol. 45, No. 3, pp. 858-869, 2004.
- 2) 玉城龍洋, 安江里佳, 北英輔. 確率速度モデルを用いたセル・オートマトンによる都市交通シミュレーション. 情報処理学会 数理モデル化と問題解決, Vol. 48, pp. 19-22, 2004.
- 3) 省エネルギー走行技術特別委員会. 高速道路料金自動収受システムの省エネルギー効果の試算. [http://www.eccj.or.jp/fuel/95/chapter\\_3/index.html](http://www.eccj.or.jp/fuel/95/chapter_3/index.html).
- 4) 国土交通省/国土交通省道路局 ITS. <http://www.mlit.go.jp/road/ITS/j-html/index.html>.