

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 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、解析モデルのアルゴリズムについて述べる。そして、提案手法を片側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する。最後に、最高速度、車間距離の取り方、加速度、車両の初期配置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 the simulation algorithm is explained. Then, the application of the present scheme to the traffic flow simulation on a two-lane freeway shows that it can simulate well the traffic phenomenon. Finally, one discuss the effect to the traffic flow of maximum velocity, car distance, the acceleration/deceleration and the initial car distribution.

1. はじめに

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¹⁾。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、現実の交通現象の解明には個々の車両の挙動特性を考慮・評価する必要があることが指摘されている²⁾。そこで、本研究では、個々の車両の挙動を記述できるマイ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・オートマトンを用いた自動車専用道路の交通シミュレーションはルール 184 モデルが最初である³⁾。この他には、ルール 184 モデルに速度変化を加えた NaSch モデル⁴⁾ や、速度を車両と前方車両の距離関数とする車両追従モデルなどが提案されている⁵⁾。これに対して、本研究では確率変数による車両速度表現を用いた確率速度モデルを提案する。この方法では、

タイムステップごとに車両が移動する最大距離は1セルなので、NaSch モデルのように1タイムステップで複数セル移動するモデルと比べて、自車両の行動ローカル・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。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対する影響を検討する。

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 $3(m) \times 3(m)$ 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。

2.2 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

[†] 名古屋大学人間情報学研究科
Nagoya University, Graduate School of Human Informatics

^{††} 名古屋大学情報科学研究科
Nagoya University, Graduate School of Information Sciences



図 1 1 車線道路
Fig. 1 one lane road

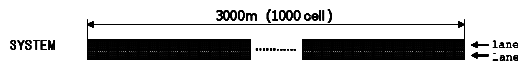


図 2 2 車線道路
Fig. 2 Two lane road

P により表現される。

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

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 $\bar{v} (< v_{\max})$ で走行する車両の移動は以下のようにして実現する。

- (1) $P_0 = \bar{v}/v_{\max}$ を求める。
- (2) $0 \sim 1$ の範囲で一様乱数 $P(x)$ を発生する。
- (3) $P(x) < P_0$ のとき 1 セル進む。

2.3 ローカル・ルール

2.3.1 安全車間距離

車両は前方車両との車間距離 G を安全車間距離 G_s に保とうとすると仮定する。まず、車両速度 v の車両がとるべき車間距離 G_s^0 は、自動車検査業務実施要領で次式と定められている。

$$G_s^0 = 0.15 \times v + 0.0097 \times v^2 \quad (2)$$

実際には G_s の最小値 G_s^{\min} は車両特性等に依存し、車両停車時 $v = 0$ においては $G_s = 0$ となる。まとめると、安全車間距離 G_s は次式で与えられる。

$$G_s = \begin{cases} \max(G_s^0, G_s^{\min}) & (v > 0) \\ 0 & (v = 0) \end{cases} \quad (3)$$

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

2.3.2 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 を評価する。
- (2) v から G_s を式 (3) により計算する。
- (3) 速度ローカル・ルールに進み、速度を変更する。
- (4) 確率速度モデル (2.2 節) に従って前方へ進む。

片側 2 車線道路の場合

- (1) 走行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 を評価する。
- (2) v から G_s を式 (3) により計算する。
- (3) $G_0 > G_1$ ならば、 $G \leftarrow G_0$ とする。 $G_0 < G_1$ ならば車線変更を行い、 $G \leftarrow G_1$ とする。
- (4) 速度ローカル・ルールに進み、速度を変更する。
- (5) 確率速度モデル (2.2 節) に従って前方へ進む。

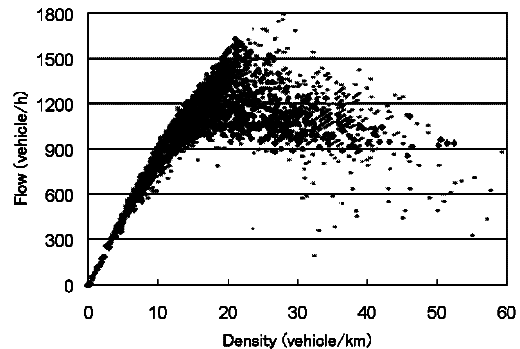


図 3 車両密度と交通量の関係図
Fig. 3 Traffic flow and density

2.3.3 速度ローカル・ルール

- (1) $G_s = G$ の場合、現在速度を維持する。
- (2) $G_s > G$ の場合、 $v \leftarrow v - \alpha$ とする。(減速)
- (3) $G_s < G$ の場合、 $v \leftarrow v + \alpha$ とする。(加速)
- (4) $v > v_{\max}$ の場合、 $v \leftarrow v_{\max}$ とする。

ここで、 v_{\max} 、 α は設定された最大速度と加速度を示す。

2.4 車両配置と端点条件

最初解析領域にランダムに車両を配置し、端点において周期境界条件を用いる。周期境界条件では、出口から流出した車両が反対側の流入点から進入する。

3. 解析例

3.1 実データとの比較

東名高速道路下り岡崎・豊田間の交通量を比較に用いる。1999年8月の1ヵ月分のデータについて、5分ごとの平均値を計算して用いる⁸⁾。比較のために、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、解析開始時に平均0.06、標準偏差0.03の正規乱数に従った車両密度で車両を配置する。1タイムステップ0.1s、最大速度 $75.6 < v_{\max} < 108 \text{ Km/h}$ 、加速度 $0.6 < \alpha < 0.9 \text{ m/s}^2$ 、最小安全車間距離 $6 < g_s < 21 \text{ m}$ として解析を行う。最大速度、加速度、最小安全車間距離は各車両で一様乱数により範囲内から値を設定する。十分な時間が経過した後の交通量を図3に示す。横軸には車両密度(車両台数/km)を、縦軸には道路の終端(右端)での交通量(通過車両台数/h)をとる。灰色点が実データ、黒色点が解析結果を示す。交通量は車両密度20台/km付近で最大値を示し、車両密度20~40台/kmでは車両密度0~20台/kmに比べてばらつきが大きく、同一の車両密度で異なる交通量の交通流が生じている(メタ安定分岐現象)。

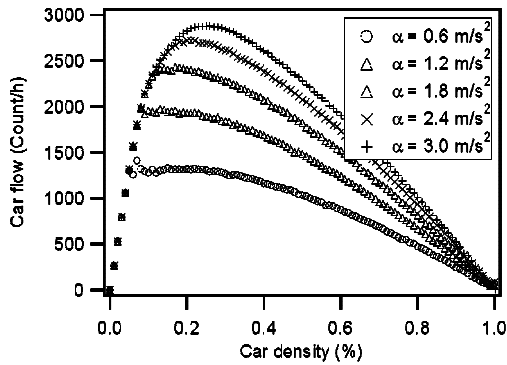


図4 交通量に対する加速度の影響
Fig.4 Effect of acceleration for traffic flow

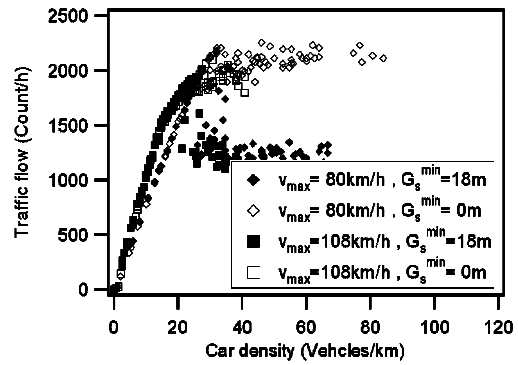


図6 交通量に対する最高速度の影響
Fig.6 Effect of maximum velocity for traffic flow

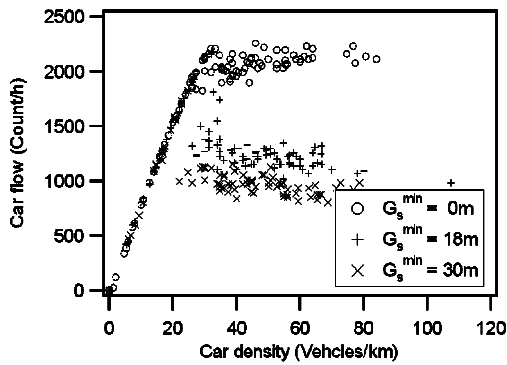


図5 交通量に対する最小安全車間距離の影響
Fig.5 Effect of minimum safety gap for traffic flow

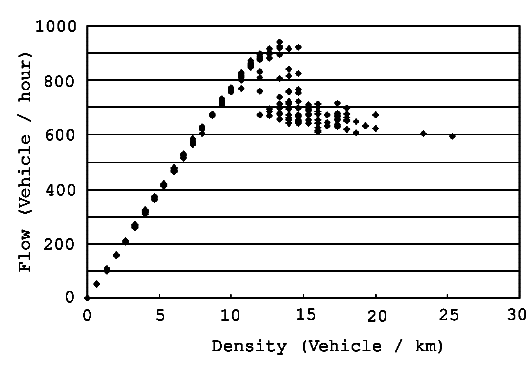


図7 車両密度と交通量の関係図 (1 レーン道路)
Fig.7 Traffic flow and density (1 lane freeway)

3.2 加速度の影響

1 タイムステップを 0.1s、解析回数を 36000 タイムステップ (1h)、最大速度 $v_{max} = 80 \text{ Km/h}$ 、加速度 $\alpha = 6, 12, 18, 24, 30 \text{ m/s}^2$ 、最小安全車間距離 $G_s^{min} = 0 \text{ m}$ として解析を行う。図4に車両密度と交通量の関係を示す。横軸には車両密度 (車両で占められたセルの割合%) を、縦軸には (通過車両台数/h) を示す。車両密度の増加に伴い交通量は徐々に増加し、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、徐々に減少していることがわかる。

3.3 最小安全車間距離の影響

1 タイムステップを 0.1s、解析回数を 36000 タイムステップ (1h)、最大速度 $v_{max} = 80 \text{ Km/h}$ 、加速度 $\alpha = 1.2 \text{ m/s}^2$ 、最小安全車間距離 $G_s^{min} = 0, 18, 30 \text{ m}$ として解析を行う。図5に車両密度と交通量の関係を示す。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り、 $G_s^{min} = 0 \text{ m}$ 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が、これに対して、 $G_s^{min} = 18, 30 \text{ m}$ の場合では最大交通量は急に減少し、減少の程度は $G_s^{min} = 30 \text{ m}$ のほうが大きい。

3.4 最高速度の影響

1 タイムステップを 0.1s、解析回数を 36000 タイムステップ (1h)、最大速度 $v_{max} = 80, 108 \text{ Km/h}$ 、加速度 $\alpha = 1.2 \text{ m/s}^2$ 、最小安全車間距離 $G_s^{min} = 0, 18 \text{ m}$ として解析を行う。図6に車両密度と交通量の関係を示す。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 30 台/km 以上では、交通量は v_{max} よりも G_s^{min} に強く依存し、特に $G_s^{min} = 18 \text{ m}$ では極端に少なくなる。

3.5 車両配置の影響

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)。1 タイムステップを 0.1s、解析回数を 36000

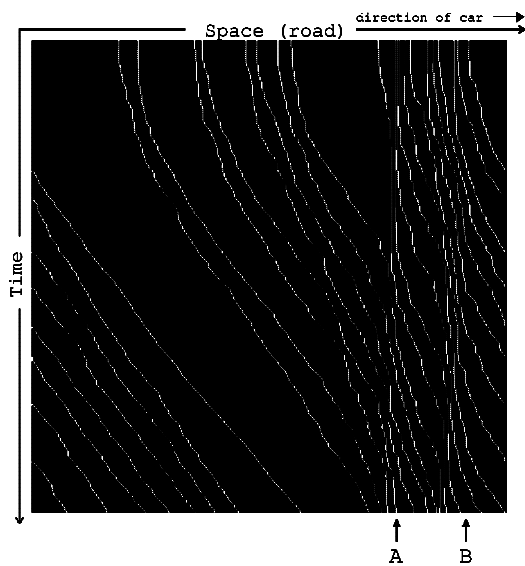


図 8 道路状態時間遷移図 (低速流)
Fig. 8 Road state transition (Low flow)

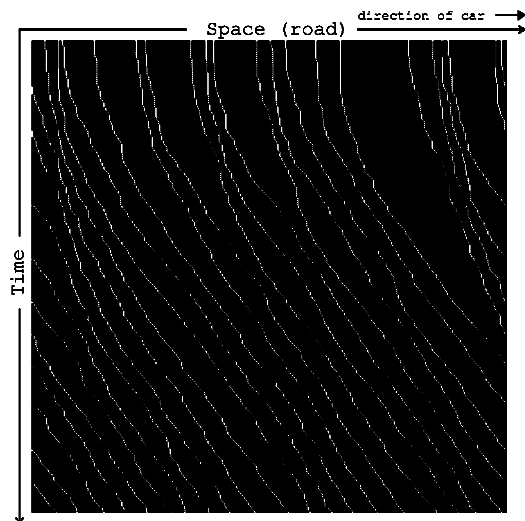


図 9 道路状態時間遷移図 (高速流)
Fig. 9 Road state transition (High flow)

タイムステップ (1h)、設定最大速度 $v_{\max} = 80 \text{ Km/h}$ 、加減速度 $\alpha = 0.6 \text{ m/s}^2$ 、最小安全車間距離 $g_s = 18 \text{ m}$ として解析を行う。車両密度を変化させて十分な時間が経過した後の交通量を図 7 に示す。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、車両密度 10.6 台/km~14.6 台/km にかけ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いる (メタ安定分岐現象)。そこで、車両密度を 13.4 台/km に固定して 50 回の試行を行い、交通量が最小

と最大の交通流 (低速流と高速流) での状態遷移図を図 8 と図 9 に示す。図は横方向に車両位置を、縦方向にタイムステップを取っており、黒い部分が車両のない道路を、白い部分が車両を示している。図 8 においては地点 A および B において渋滞が発生し、それが平均速度の低下を招いていると予想できる。

4. ま と め

確率速度モデルと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、片側 2 車線道路の交通流シミュレーションを行ったところ、結果は実データとよく一致した。そこで、いくつかの条件を変更して交通現象の挙動を評価し、以下の結果を得た。

- 加速度が大きいほど最大交通量が大きくなる。
- 最大交通量を示す車両密度を超えると、最小安全車間距離が大きいほど交通量は小さくなる。
- 最大速度は最大交通量に影響しない。
- 初期配置で部分的に車両密度の高いところが存在すると、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。

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) 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.
- 2) 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, 第 9-2 巻, pp. 9-14, 2002.
- 3) S. Wolfram. *Cellular Automata and Complexity*. Addison-Wesley Publishing Company, 1 edition, 1994.
- 4) K. Nagel and M. Schreckenberg. Cellular automaton model for freeway traffic. *Journal of Physics I france*, Vol. 2, pp. 2221-2229, 1992.
- 5) 杉山雄規. 交通流の物理. ながれ, Vol. 22, pp. 95-108, 2003.
- 6) O. Biham, A. A. Middleton, and D. Levine. Self-organization and a dynamical transition in traffic-flow models. *Physical Review A*, Vol. 46, No. 10, pp. R6124-R6127, 1992.
- 7) 国土交通省. 自動車燃費一覧について. 2002.
- 8) 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.