

確率セルオートマトンモデルによる自動車のインテリジェント化を考慮した交通流解析

Analysis of Traffic Flow Considered Intelligent Vehicles

by a Probabilistic Cellular Automaton Model

○星野 貴弘¹, 浜松 芳夫¹* Takahiro Hoshino¹, Yoshio Hamamatsu¹

Abstract: In recent years, vehicles equipped adaptive cruise control (ACC) are developed in order to reduce driver fatigue across highways. Automatically controlling the throttle and brake, ACC helps to maintain a constant following distance between vehicles. Therefore, traffic flow may increase with increasing vehicles equipped ACC. We analyze a traffic flow model considered vehicles equipped ACC by using Nagel-Schreckenberg model, one of the probabilistic cellular automaton model in this research. Nagel-Schreckenberg model can reproduce basic features of traffic flow.

1. はじめに

自動車のインテリジェント化に伴い、運転支援のための様々な走行制御システムが開発されてきた。その中でも、クルーズコントロールシステムは、ドライバーの設定した速度での定速走行を可能とする装置あり、高速道路などにおける負担軽減を目的としている。また、クルーズコントロールシステムの1つであるアダプティブクルーズコントロール(以降、ACC)^[1]は、車間制御機能付きのクルーズコントロールである。ACCにより、ドライバーは指定した車間時間(距離)で前車を追従走行することが可能となり、更なる利便性と快適性の向上が期待できる。本研究では、このようなACC機能を搭載した車両(以降、CC車両)が、交通流に与える影響を定量的に明らかにする。

確率セルオートマトン(CA)モデルの1つであるNagel-Schreckenberg(NaSch)モデルは、信号機などのボトルネックのない道路上での自然渋滞形成過程をよく再現することが知られている。そこで、本研究ではNaSchモデルを基にCC車両およびACCを装着していない一般車両が混在した交通流のモデル化を行う。

2. 対象モデルの数学的記述

CAモデルでは、時間および状態変数を離散値としているため、NaSchモデルにおいてもこれらを離散値としている。解析対象のモデルを説明するにあたり、NaSchモデルの車両挙動について述べる。NaSchモデルでは、図1に示すような道路に対応する L 個のセル上を合計 N 台の車両が決まった方向に進む。 L と N により、交通密度は $\rho = N/L$ と表される。車両群中の $n(1 \leq n \leq N)$ 番目の車両速度は、 $v_n = 0, 1, \dots, v_{\max}$ と表し、車両位置は、 $x_n = 1, 2, \dots, L$ と表される。ただし、 v_{\max} はシステム内の最高速度であり、速度は時点 t から $t+1$ において、車両が移動するセル数とする。また、 n 番目の

車両と $(n+1)$ 番目の車両の車頭間隔を $d_n = x_{n+1} - x_n$ とする。

次に、文献[2]で示されたNaSchモデルにおける車両位置の更新ルールについて述べる。各車両は、次の(1)から(4)のルールに従い、時点 t から $t+1$ における車両位置を更新する。

- (1) **加速** 任意の車両の速度が $v_n < v_{\max}$ のとき、 $v_n \rightarrow v_n + 1$ とする。
- (2) **減速** $v_n \geq d_n$ となるとき、前方の車両との衝突を避けるために $v_n \rightarrow v_n - 1$ とする。
- (3) **ランダム化** $v_n > 0$ のとき、確率 p で速度を1減少させる。すなわち、 $v_n \rightarrow v_n - 1$ とする。逆に確率 $\bar{p}(=1-p)$ のときには、速度は変化しない($v_n \rightarrow v_n$)。この効果は、追従遅れや衝突回避時の過度な減速などのドライバーの運転行動に相当する。
- (4) **車両移動** (1)から(3)で決定された速度により、車両の位置を $x_n \rightarrow x_n + v_n$ とする。

すべての車両に対して、以上(1)から(4)のルールを(1)→(2)→(3)→(4)の順で適用することにより、次の時点の車両位置を決定する。

<NaSchモデルからの変更点> 対象とするモデルでは、図1のようにCC車両と一般車両がランダムに配置されているものとする。車両総数 N に対するCC車両の占める割合を α 、一般車両の割合を $\beta(=1-\alpha)$ とする。

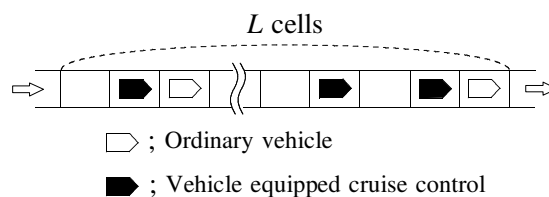


Fig. 1: Schematic diagram of analytical model

CC 車両は、一定車間距離での追従制御が可能であるため、ルール (3) のランダム化の影響を受けないものと仮定する。したがって、先ほどの車両位置の更新ルールは、CC 車両に対しては、(1),(2),(4) のみが適用される。

3. 解析

ここでは、車間距離に着目し、CC 車両が混在した場合の車両挙動の解析を行う。また、得られた数理モデルより、定常状態における交通流量を求める。本研究では、対象モデルの基本的特性を評価するため、 $v_{\max} = 1$ とした。

対象とする確率モデルの状態 (i, j) を n 番目と $(n+1)$ 番目の連続する 2 台の車間距離が $j (= 0, 1, \dots)$ セルである状態と定義する。また、 i は連続する車両の組み合わせであり、矢印の始点側を後続車、終点側を先行車として、それぞれ以下のように定義する。

- $i = 1$ 一般車両 \implies 一般車両
- $i = 2$ 一般車両 \implies CC 車両
- $i = 3$ CC 車両 \implies 一般車両
- $i = 4$ CC 車両 \implies CC 車両

定常状態において、状態 (i, j) となる確率を $P_{i,j}$ と表す。また、任意の一般車両が次時点で 1 セル進む確率を g_o 、CC 車両に関しても同様の確率を g_c とする。 g_o, g_c は $v_{\max} = 1$ のとき、平均速度と等しい。定常状態では、状態 (i, j) からの推移量と状態 (i, j) への推移量が等しいことから、次の平衡方程式が成り立つ。

$$P_{1,0} = \tilde{g}_o (P_{1,0} + \tilde{p}P_{1,1}) \quad (1)$$

$$P_{1,1} = g_o P_{1,0} + (\tilde{p}g_o + p\tilde{g}_o) P_{1,1} + \tilde{p}\tilde{g}_o P_{1,2} \quad (2)$$

$$P_{1,j} = pg_o P_{1,j-1} + (\tilde{p}g_o + p\tilde{g}_o) P_{1,j} + \tilde{p}\tilde{g}_o P_{1,j+1}; j \geq 2 \quad (3)$$

$$P_{2,0} = \tilde{g}_c (P_{2,0} + \tilde{p}P_{2,1}) \quad (4)$$

$$P_{2,1} = g_c P_{2,0} + (\tilde{p}g_c + p\tilde{g}_c) P_{2,1} + \tilde{p}\tilde{g}_c P_{2,2} \quad (5)$$

$$P_{2,j} = pg_c P_{2,j-1} + (\tilde{p}g_c + p\tilde{g}_c) P_{2,j} + \tilde{p}\tilde{g}_c P_{2,j+1}; j \geq 2 \quad (6)$$

$$P_{3,0} = \tilde{g}_o (P_{3,0} + P_{3,1}), P_{3,1} = g_o (P_{3,0} + P_{3,1}) \quad (7)$$

$$P_{4,0} = \tilde{g}_c (P_{4,0} + P_{4,1}), P_{4,1} = g_c (P_{4,0} + P_{4,1}) \quad (8)$$

$$P_{3,j} = P_{4,j} = 0; j \geq 2 \quad (9)$$

ただし、 $\tilde{g}_o = 1 - g_o, \tilde{g}_c = 1 - g_c$ とする。

以上の関係式を用いて、 $g_c(g_o)$ について解くことにより、定常状態における流量 J は、

$$J = \rho g_c = \rho g_o = \frac{1 - \alpha p \rho - \sqrt{(1 - \alpha p \rho)^2 - 4 \rho \tilde{p} \tilde{p}}}{2} \quad (10)$$

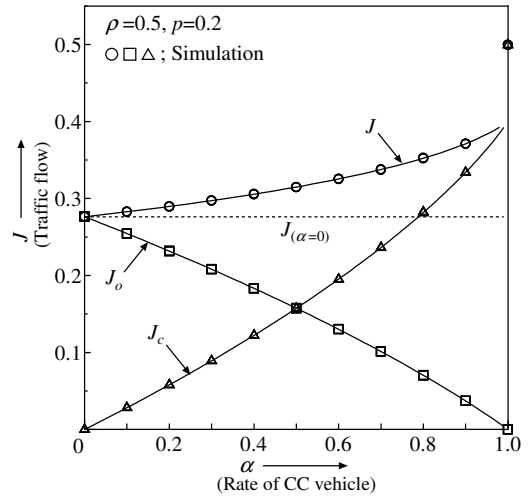


Fig. 2: Numerical examples

と求められる。ただし、 $\tilde{p} = 1 - \rho$ である。また、一般車両および CC 車両の流量はそれぞれ、

$$J_c = \alpha J, J_o = \beta J \quad (11)$$

により求められる。

4. 考察とまとめ

数理モデルより得られた結果の妥当性を検討するため、モンテカルロシミュレーションの結果との比較を行う。図 2 に $\rho = 0.5, p = 0.2$ のときの α に対する流量の数値計算結果を示す。図中の実線は (10),(11) 式の計算結果、記号はシミュレーション値を示している。シミュレーションは乱数の初期値を変え、同じ α の値に対して、それぞれ 5 回ずつ行っている。

グラフから、 $\alpha < 1$ において、理論値とシミュレーション値はよく一致していることがわかる。 $\alpha = 1$ のときの J は不連続点となっている。(10) 式より得られる、 $\alpha = 1$ とした流量は、 $J|_{\alpha=1} = (1 - p)\rho$ となるが、一般車両が存在しないため、流量はランダム化の確率 p に依存しない。したがって、グラフ中の $\alpha = 1$ では、 $p = 0$ であるため、 $J|_{\alpha=1} = \rho$ となっている。

また、グラフ中の破線は $\alpha = 0$ の流量であり、これは、CC 車両が存在しない場合の流量である。すなわち、破線と J の差は流量の増加分である。CC 車両の割合の増加と共に、流量も増加している。以上のことから、CC 車両がシステム全体に及ぼす影響を定量的に明らかにすることができた。

参考文献

[1] 宮越博規, 古居信之, 宮越恒雄, 野田雅之, 大杉啓治, 宮内邦宏, アダプティブクルーズコントロールシステムの開発, トヨタ技術, **48**, 2, pp. 88-93 (1998)
 [2] A. Schadschneider, Traffic flow: a statistical physics point of view, *Physica A*, **313**, pp. 153-187 (2002)