

自動運転技術を考慮した交通流のモデル化と解析

星野 貴弘* (日本大学), 坪井 一洋 (茨城大学), 浜松 芳夫 (日本大学)

Modeling and Analysis of Traffic Flow Considering Automatic Control System

Takahiro Hoshino (Nihon University)

Kazuhiro Tsuboi (Ibaraki University)

Yoshio Hamamatsu (Nihon University)

In recent years, vehicles equipped adaptive cruise control (ACC) are developed in order to reduce driver's fatigue on highways. The ACC helps to maintain a constant following distance between vehicles by automatic accelerating and braking. Therefore, it is expected the traffic flow rate increases with increasing vehicles equipped the ACC. We construct a new traffic flow model considered the ACC vehicles by modifying the rule of behavior in the Nagel-Schreckenberg (NaSch) model, because the standard NaSch model cannot reproduce the traffic flow existing the ACC vehicles. In this research, we present the traffic flow model considered the ACC and show successfully features in the traffic flow.

キーワード：アダプティブクルーズコントロール，確率セルオートマトンモデル，Nagel-Schreckenberg モデル
(adaptive cruise control, probabilistic cellular automaton model, Nagel-Schreckenberg model)

1. 緒言

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自動運転技術が開発されてきた⁽¹⁾⁽²⁾。その中でも，クルーズコントロールシステム⁽³⁾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システムあり，高速道路などにおける負担軽減を目的としている。しかし，交通量の多い道路において，一定の速度で走行を続けることは困難であり，ドライバーは頻繁に設定速度の変更や自動運転から手動運転への切り替えといった操作をしなければならなかった。そこで，クルーズコントロールに車間制御機能を付加したアダプティブクルーズコントロール(以降，ACC)⁽⁴⁾⁽⁵⁾が開発された。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，運転時の利便性と快適性が更に向上した。

ACCの導入は，適切な車間距離が保たれることで交通流量や容量が増加するため，交通システムの管理・運用側のメリットも挙げられる。実際に，文献(6)では，シミュレーション結果からACC機能を搭載した車両の割合が増加することにより，交通容量が増加することを定量的に示している。

これまでに，交通流を数理モデルによって再現する方法として，様々な方法が提案されてきている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかし，前述したようなACC機能を搭載した車両(以降，ACC車両)の影響を考慮した数理モデルの構築手法やその解析に関する報告は筆者らの知る限り見あたらない。以上の背景から，本研究では，ACC車両の挙動に着目した交通流モデルを構築し，さらにモデルから流量や速度といった理論解

を導出する。

数理モデルの構築に際には，信号機などのボトルネックが存在し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 Nagel-Schreckenberg (NaSch) モデル⁽⁹⁾を参考にする。本研究では NaSch モデルを基に ACC 車両および ACC 機能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。また，数理モデルより得られた結果とモンテカルロシミュレーションにより得られた結果との比較を行い，数理モデルの妥当性について検討する。

2. 対象モデルの数学的記述

NaSch モデルは確率セルオートマトンモデルに基づき，交通流のモデル化を行っているため，時間および状態変数を離散値としている。本モデルも同様にこれらを離散値として扱う。

対象モデルでは，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 ACC 車両と一般車両が一定方向に進む。 L と N により，交通密度は $\rho = N/L$ と表される。

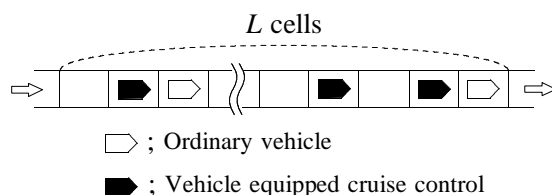


図1 対象モデルの概略図

Fig. 1. Schematic diagram of analytical model

車両群中の $n(1 \leq n \leq N)$ 番目の車両の速度を v_n とし、 $0 \leq v_n \leq V_{\max}$ の範囲の整数値をとるものとする。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に相当する。また、車両の位置は、 x_n とし、 $1 \leq x_n \leq L$ の整数値をとるものとする。車両位置 x_n により、 n 番目の車両と $(n+1)$ 番目の車両の車頭間隔 d_n は $d_n = x_{n+1} - x_n$ と表され、車間距離についても同様に l_n とすれば $l_n = d_n - 1$ と表せる。

2・1 NaSch モデル 解析対象のモデルの時間発展則について示す前に、その基となる NaSch モデルの車両挙動について述べる。NaSch モデルにおいて、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⁽⁹⁾。

- (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 $v_n \geq d_n$ となる時、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。
- (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。

ルール (1) は、ドライバーのできるだけ早く移動したいという欲求を表し、ルール (2) は、前方車両との衝突を回避するための減速操作に相当する。またルール (3) により、前方車両に対する追従の遅れや衝突回避時の過度な減速が確率 p でランダムに発生する。これは、ヒューマンドライバーの複雑な運転行動に相当し、自然渋滞形成の要因となっている。逆に確率 $\tilde{p}(=1-p)$ のときには、このような遅れや減速は起こらない ($v_n \rightarrow v_n$)。最後にルール (4) では、すべての車両に対して、(1) から (3) により決定された速度を時点 t における車両位置に加えることで、次の時点 ($t+1$) の車両位置を決定している。

2・2 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 ACC 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 ACC 車両の占める割合を α 、一般車両の割合を $\beta(=1-\alpha)$ とする。ACC 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は、一般車両に対しては、NaSch モデルと同様にルール (1) から (4) により決定するが、ACC 車両に対しては、(1),(2),(4) のみで決定される。

3. 解析

ここでは、文献 (10) で示された車間距離に着目した解析手法を参考に、対象モデルの解析を行い、定常状態における流量及び速度を導出する。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。

文献 (10) では、連続する 2 台の車間距離を確率過程の状態としている。しかし、本モデルでは、追従動作の異なる 2 種類の車両が存在するため、この組み合わせを考慮する必

要がある。そこで、本モデルの状態 (i, j) を以下に示す組み合わせ i の連続する 2 台の車間距離が $j(j=0, 1, \dots, L-N)$ セルである状態と定義する。具体的に、 i は次の組み合わせに対応している。

- $i = 1$ 一般車両 \Rightarrow 一般車両
- $i = 2$ 一般車両 \Rightarrow ACC 車両
- $i = 3$ ACC 車両 \Rightarrow 一般車両
- $i = 4$ ACC 車両 \Rightarrow ACC 車両

ただし、矢印は車両の進行方向に対して始点側が後続車、終点側が先行車を表している。

時点 t において、状態 (i, j) である確率を $P_{i,j}(t)$ と表す。任意の一般車両が次時点で前方のセルへ進む確率を g_o 、ACC 車両についても同様の確率を g_c とする。 g_o, g_c は $V_{\max} = 1$ のとき、平均速度と等しい。時点 ($t+1$) の状態確率は、時点 t の状態確率および g_o, g_c, p を用いて次のように表される。

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

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

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

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

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

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

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

$$P_{3,1}(t+1) = g_o (P_{3,0}(t) + P_{3,1}(t)) + \tilde{g}_o P_{3,2}(t) \dots\dots (8)$$

$$P_{3,j}(t+1) = g_o P_{3,j}(t) + \tilde{g}_o P_{3,j+1}(t); j \geq 2 \dots\dots (9)$$

$$P_{4,0}(t+1) = \tilde{g}_c (P_{4,0}(t) + P_{4,1}(t)) \dots\dots\dots (10)$$

$$P_{4,1}(t+1) = g_c (P_{4,0}(t) + P_{4,1}(t)) + \tilde{g}_c P_{4,2}(t) \dots\dots (11)$$

$$P_{4,j}(t+1) = g_c P_{4,j}(t) + \tilde{g}_c P_{4,j+1}(t); j \geq 2 \dots\dots (12)$$

定常状態における状態確率を $P_{i,j}$ とすれば、(1) から (12) 式は、“ (t) ”と“ $(t+1)$ ”を除いた式となる。定常状態における (9) 式より、

$$P_{3,j} = P_{3,j+1}; j \geq 2 \dots\dots\dots (13)$$

となる。ここで、 $\sum_{j=0}^{\infty} P_{3,j}$ が有限であることを考慮すれば、

$$P_{3,j} = 0; j \geq 2 \dots\dots\dots (14)$$

が得られる。(12) 式の $P_{4,j}$ についても同様に、

$$P_{4,j} = 0; j \geq 2 \dots\dots\dots (15)$$

となる。これは、ACC 車両前方の車間距離が 2 セル以上にならないこと、すなわち、追従の遅れが生じないことに相当している。(14),(15) 式により、定常状態における (8),(11) 式は、

$$P_{3,1} = g_o (P_{3,0} + P_{3,1}) \dots\dots\dots (16)$$

$$P_{4,1} = g_c (P_{4,0} + P_{4,1}) \dots\dots\dots (17)$$

と書き直せる。

次に、定常状態における g_o と g_c の関係について考える。(14),(15) 式より、ACC 車両は、先行車両を車間距離 1 セル以内で追従走行している。1 台の一般車両あたり、平均 α/β 台の ACC 車両が追従していることから、一般車両の流量を J_o 、ACC 車両の流量を J_c とすれば、

$$J_c : J_o = \alpha : \beta \dots\dots\dots (18)$$

の関係が成立する。また、 g_o, g_c は、 $V_{\max} = 1$ としているため、平均速度と等しい。したがって、一般車両および ACC 車両の交通密度 $\rho\beta, \rho\alpha$ と平均速度を用いて、上式を書き直せば、

$$\begin{aligned} \rho\alpha g_c : \rho\beta g_o &= \alpha : \beta \\ g_c &= g_o \dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

の関係が得られる。また、密度 ρ より、平均車頭間隔は $1/\rho$ と表されることから、

$$\begin{aligned} \beta \sum_{n=0}^{\infty} (n+1) (\beta P_{1,n} + \alpha P_{2,n}) \\ + \alpha \sum_{n=0}^1 (n+1) (\beta P_{3,n} + \alpha P_{4,n}) &= \frac{1}{\rho} \dots\dots (20) \end{aligned}$$

を満たす。

以上の関係式を用いて、平均速度 g_c (または g_o) について解くことにより、

$$g_c = g_o = \frac{1 - \alpha p \rho - \sqrt{(1 - \alpha p \rho)^2 - 4 \rho \tilde{\rho} \tilde{p}}}{2 \rho} \dots\dots (21)$$

が得られる。ただし、 $\tilde{\rho} = 1 - \rho$ である。また、定常状態における流量 J は、

$$\begin{aligned} J &= \rho g_c = \rho g_o \\ &= \frac{1 - \alpha p \rho - \sqrt{(1 - \alpha p \rho)^2 - 4 \rho \tilde{\rho} \tilde{p}}}{2} \dots\dots (22) \end{aligned}$$

と求められる。ここで、上式において $\alpha = 0$ とすれば、

$$J = \frac{1 - \sqrt{1 - 4 \rho \tilde{\rho} \tilde{p}}}{2} \dots\dots\dots (23)$$

となり、文献 (9) (10) などで示された NaSch モデルの流量と同様の結果が得られる。また、 $\alpha = 1$ のとき、一般車両が存在しないため (22) 式は成立しない。 $\alpha = 1, \rho \leq 0.5$ ならば、定常状態において $g_c = 1$ となることは自明であるため、 $J = \rho$ となる。逆に $\rho > 0.5$ ならば、(10) から (12) 式および (20) 式により、 $J = \tilde{\rho}$ と与えられる。すなわち、

$$J = \begin{cases} \rho & ; \rho \leq 0.5 \\ \tilde{\rho} & ; \rho > 0.5 \end{cases} \dots\dots\dots (24)$$

と表される。

一般車両および ACC 車両の流量は、(18) 式の関係から、

$$J_c = \alpha J, \quad J_o = \beta J \dots\dots\dots (25)$$

とそれぞれ求められる。

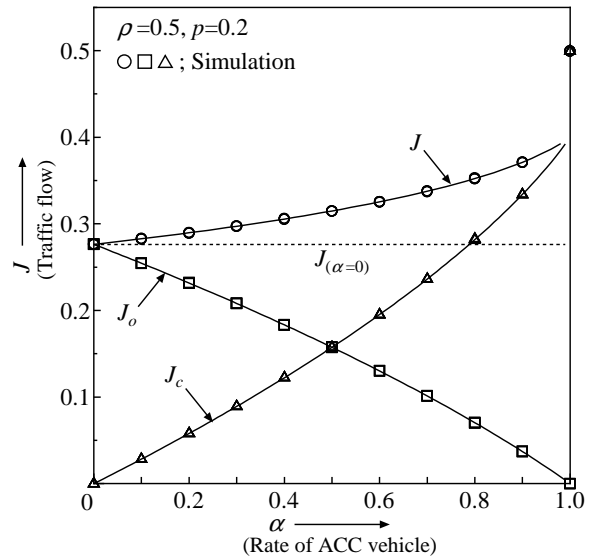


図 2 数値計算例 1
Fig. 2. Numerical examples 1

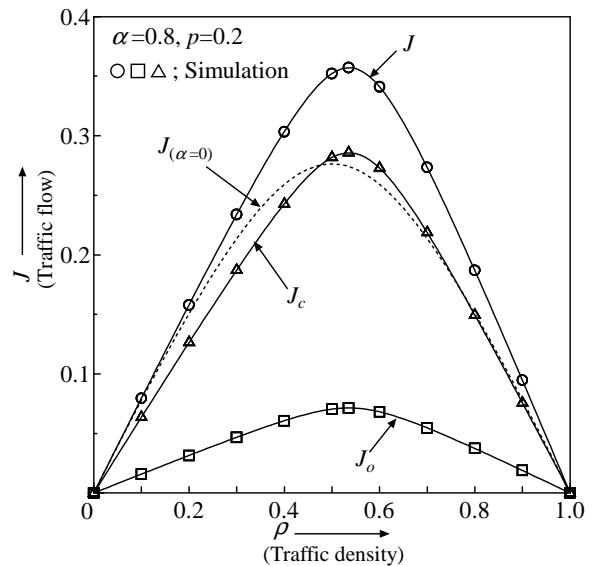


図 3 数値計算例 2
Fig. 3. Numerical examples 2

4. 考 察

数理モデル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。シミュレーションは、Mersenne Twister 法⁽¹¹⁾を用いて乱数を生成し、乱数により初期状態における各セルの車両の有無を決定した。また、シミュレーション時間を $1 \text{万 } \Delta t$ とし、道路長 $L = 5000$ セルとした。

図 2 に、 $\rho = 0.5, p = 0.2$ における α に対する全体の流量および車種ごとの流量の数値計算結果を示す。図中の実線は (22), (24) 式の厳密解より得られる結果であり、記号はシミュレーションによる結果を示している。各 α の値に対して、シミュレーションはそれぞれ 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。これは、第3章で示した通り、 $\alpha = 1$ の流量 J の理論式 ((24) 式) と $0 \leq \alpha < 1$ の理論式 ((22) 式) が異なるためである。

また、グラフ中の破線は $\alpha = 0$ (NaSch モデル) の流量であり、これは、ACC 車両が存在しない場合の流量である。したがって、破線と J の差が流量の増加分である。ACC 車両の割合の増加と共に流量も増加し、例えば $\alpha = 0.5$ とした場合、ACC 車両導入前に比べて約 13.9[%] 増加している。

図3に、 $\alpha = 0.8, p = 0.2$ における ρ に対する流量の変化を示す。図より、各 ρ の値において、(22) 式より得られた理論値とシミュレーション結果は良く一致していることがわかる。破線の NaSch モデルにおける流量は、 $V_{\max} = 1$ とした場合、 $\rho = 0.5$ が臨界密度であることが知られている。しかし、本モデルの臨界密度は $0.5 \leq \rho < 1$ の範囲にあり、図3の数値計算例においては、 $\rho \cong 0.536$ が臨界密度となっている。これは、ACC 車両が適切な車間距離を保つことにより、交通流の中で緩衝材の様な役割を果たすため、車両台数の増加に対する混雑度の増加が抑えられたと考えられる。

最後に、図4に $\alpha = 0.3, \rho = 0.5$ における p に対する流量の変化を示す。グラフから、 $p = 0$ における NaSch モデルと本モデルの流量が等しくなっているが、これは、 $p = 0$ のとき、ランダム化の影響が無くなるためである。また、どちらのモデルも p に対して、単調減少となっているが、ACC 車両の導入により、本モデルの変化の方が緩やかな減少曲線となっている。流量の改善量に関しては、ある一定量の p の大きさまでは増加傾向にあるが、それを超えると改善量は減少する。図4の計算条件においては、 $p \cong 0.260$ を境に改善量は増加から減少傾向に変化している。

5. 結 言

本研究は、ACC 機能を搭載した車両と搭載していない一般車両が混在する交通流のモデル化を行った。得られた数理モデルを基に定常状態における車種ごとの流量および速度を陽に導出した。得られた理論解において ACC 機能を搭載した車両数の割合 $\alpha = 0$ とすることにより、NaSch モデルの流量と同様の結果が得られた。数理モデルの解析において、 $V_{\max} = 1$ と仮定したものの、数値計算結果から文献(6)で示された ACC 車両の増加に伴い、流量(交通容量)が増加するといった基本的性質を観測することができた。

近年、ITS 技術の普及と高度化に伴い ACC をはじめとする自動運転技術を搭載した車両数は年々増加している。したがって、自動運転技術を搭載した車両の割合が対象となる道路における交通流の性質を決める上で重要な要素となっている。このことから、道路の新設や既設道路の拡張、また渋滞情報などの予測精度の向上において、ACC 車両をはじめとする自動運転技術を搭載した車両の影響を考慮することは今後更に重要となる。本研究の成果は、以上のような自動運転技術の発達に伴う交通流の変化を検討する上での重要な基礎資料となり得る。

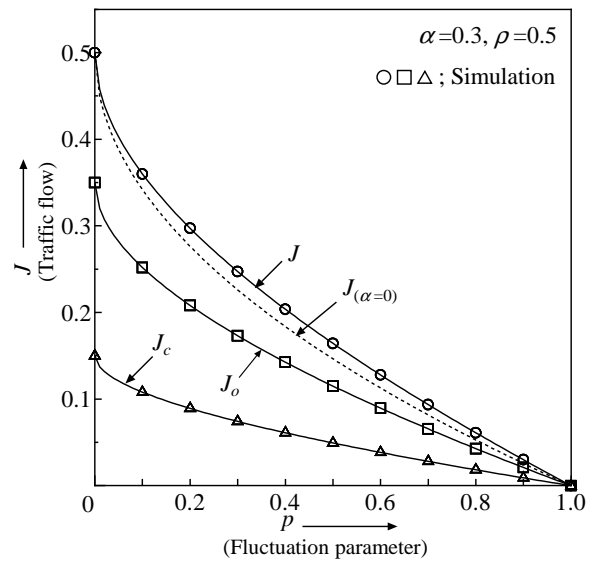


図4 数値計算例3

Fig. 4. Numerical examples 3

参考文献

- (1) 橘彰秀, 青木啓二:「トヨタの高速道路自動運転システム」, TOYOTA Technical Review, **43**, 1, pp. 20-25 (1993)
- (2) 上村吉孝, 中村誠秀, 瀬戸陽治, 井上拓哉, 田村実, 田志光:「インテリジェントクルーズコントロール(ナビ協調機能)の開発」, NISSAN Technical Review, **63**, pp. 15-18 (2008)
- (3) 寺谷達夫, 村田公利, 宮田博司, 原田幸典:「クルーズコントロールシステムの現状と将来」, 自動車技術, **46**, 2, pp. 5-11 (1992)
- (4) 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)
- (5) R. Bosch: "Bosch Acc Adaptive Cruise Control", Bentley Pub, (2003)
- (6) (財)自動車走行電子技術協会:「燃料消費効率化改善に関する調査報告書(自動車省エネルギー走行技術と将来の展望)」, (財)省エネルギーセンター, (1997)
- (7) R. E. Chandler, R. Herman, and E. W. Montroll: "Traffic dynamics: studies in car following", *Operations research*, **6**, pp. 165-184 (1958)
- (8) M. Bando, K. Hasebe, A. Nakayama, A. Shibata, and Y. Sugiyama: "Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation", *Physical review E*, **51**, pp. 1035-1041 (1995)
- (9) K. Nagel and M. Schreckenberg: "A cellular automaton model for freeway traffic", *J. Phys. I*, **2**, 12, pp. 2221-2229 (1992)
- (10) A. Schadschneider and M. Schreckenberg: "Car-oriented mean-field theory for traffic flow models", *J. Physics A: Math. Gen.*, **30**, pp. L69-L75 (1997)
- (11) M. Matsumoto and T. Nishimura, Mersenne Twister: "A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator", *ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation*, **8**, 1, pp. 3-30 (1998)