

自動運転技術を考慮した交通流のモデル化と解析

Modeling and Analysis of the traffic flow in consideration of an automatic driving technology

○吉田 吏志¹, 星野 貴弘², 浜松 芳夫²*Satoshi Yoshida¹, Takahiro Hoshino², Yoshio Hamamatsu²

Abstract: In recent years, the adaptive cruise control (ACC) has been developed for the reduction of driver's fatigue on highways as an automatic driving technology. The ACC system is a function to automatically keep a constant distance between the two consecutive vehicles. In this study, we construct the traffic flow model in which ACC vehicles and vehicles not equipped ACC run on the single lane highways. We present the basic property of the traffic flow including the ACC vehicles.

1. はじめに

現在の日本では、モータリゼーションによる車の普及率の増加により、交通渋滞が社会問題となっている。交通渋滞発生要因として、前方車両との車間距離の狭さが挙げられる。このような背景から、近年、一定の車間距離追従が可能なアダプティブクルーズコントロール(以降、ACC)が開発された。ACC機能は、自動で車間制御を行うため、運転操作量の減少だけでなく、事故の防止・軽減が見込める。このことから、今後更なる普及増大が予想される。

これまでに、交通流を数理モデルにより再現する方法として、流体力学モデルや追従モデル等、様々な方法が提案されている。しかし、ACC搭載車と一般車両(ACC未搭載車)が混在する交通流の数理モデルの構築・解析の報告については、筆者らの知る限り見当たらない。これらの背景から、本研究ではACC車両と一般車両の混在する数理モデルの構築・解析を行う。

モデル構築には、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 モデル^[1](以降 NaSch モデル)を参考とし、ACC車両と一般車両の混在した交通流のモデル化を行う。数理モデルの解析結果と、モンテカルロシミュレーションにより得られた結果とを比較し、数理モデルの妥当性を評価・検討する。

2. 対象モデルの数学的記述

本モデルは、確率セルオートマトンモデルに基き、交通流のモデル化を行うことから、時間、位置、速度を離散値として扱う。対象モデルでは、Fig. 1に示すような道路に相当する L 個のセル上を合計 N 台の ACC 車両と一般車両が、矢印の方向に走行している。 L と N から交通密度は $\rho = N/L$ と表現でき、車両群中の n ($1 \leq n \leq N$) 番目の車両の速度を v_n ($0 \leq v_n \leq V_{max}$)、車両の位置は x_n とする。ここで、 V_{max} はシステムの最高速度とする。車両位置 x_n により、 n 番目の車両と $(n+1)$ 番目の車両

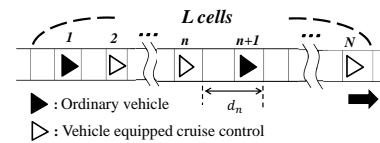


Fig. 1: Schematic diagram of analytical model
の車頭間隔 d_n は、 $d_n = x_{n+1} - x_n$ と表すことができる。

2.1 NaSch モデル

NaSch モデルは、以下の(1)~(4)のルールに従い、単位時間毎に車両の位置を更新する^[1]。

- (1) **加速** $v_n < V_{max}$ の時、 $v_n \rightarrow v_n + 1$ とする。
- (2) **減速** $v_n \geq d_n$ の時、前方車両との衝突を避けるため、 $v_n \rightarrow d_n - 1$ とする。
- (3) **ランダム化** $v_n > 0$ の時、確率 p で速度を 1 減少させる。つまり、 $v_n \rightarrow v_n - 1$ とする。
- (4) **車両移動** (1)~(3)より決定された速度 v_n により、車両の位置を $x_n \rightarrow x_n + v_n$ とする。

上記のルールは、(1),(2)のような一車線道路を走行する運転手の基本的な振り舞いだけでなく、(3)で表される前方車両に対する追従遅れ等の複雑な運転行動についても考慮されている。

2.2 ACC 車両の考慮

対象とするモデルでは、ACC車両と一般車両がランダムに存在するものとし、車両総数 N に対する ACC 車両の占める割合を α 、一般車両の占める割合を β ($= 1 - \alpha$) とする。ACC車両は、一定の車間距離で追従走行が可能のため、ルール(3)のランダム化の影響を受けないと考えることができる。したがって、車両位置の更新は、一般車両ではルール(1)~(4)により行い、ACC車両においてはルール(1),(2),(4)により行うこととする。

3. 解析

解析を行うにあたり、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[2]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

1:日大理工・院・電気 2:日大理工・教員・電気

め、前後の車両の車種を考慮しなければならない。よって、本モデルは、連続する 2 台の車種の組み合わせが i で、かつ車間距離が $j(=0, 1, 2, \dots, L-N)$ セルである状態を状態 (i, j) とする。具体的に i は、次の組み合わせに対応し、矢印は、始点側が後続車、終点側が先行車を表している。

- $i = 1$ 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

本研究では、時点 t における状態確率を $P_{i,j}(t)$ とし、定常状態での状態確率を $P_{i,j} := \lim_{t \rightarrow \infty} P_{i,j}(t)$ とする。また、一般車両が次時点に前方セルへ進む確率を g_o 、現時点のセルに留まる確率を $\tilde{g}_o (= 1 - g_o)$ とし、ACC 車両も同様に、 g_c 、 $\tilde{g}_c (= 1 - g_c)$ とする。即ち、 $V_{max} = 1$ の時は、 g_o と g_c は平均速度となる。以上より、定常状態における状態方程式は、次のように表される。なお、以下の式において、 $\tilde{p} = 1 - p$ とする。

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

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

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

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

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

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

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

$$P_{3,1} = g_o(P_{3,0} + P_{3,1}) + \tilde{g}_oP_{3,2} \quad (8)$$

$$P_{4,0} = \tilde{g}_c(P_{4,0} + P_{4,1}) \quad (9)$$

$$P_{4,1} = g_c(P_{4,0} + P_{4,1}) + \tilde{g}_cP_{4,2} \quad (10)$$

$$P_{3,j} = P_{4,j} = 0 \quad ; \quad j \geq 2 \quad (11)$$

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。一般車両の流量を J_o 、ACC 車両の流量を J_c とすると、 $J_c : J_o = \rho\alpha g_c : \rho\beta g_o = \alpha : \beta$ より $g_c = g_o$ となる。密度 ρ より、平均車頭間隔は $1/\rho$ と表されるので、

$$\beta \sum_{n=0}^{\infty} (n+1)(\beta P_{1,n} + \alpha P_{2,n}) + \alpha \sum_{n=0}^1 (n+1)(\beta P_{3,n} + \alpha P_{4,n}) = \frac{1}{\rho} \quad (12)$$

を満たす。以上の (1)~(12) 式を用いて、定常状態における流量 J は、

$$J = \frac{1 - \alpha p \rho - \sqrt{(1 - \alpha p \rho)^2 - 4\rho(1 - \rho)\tilde{p}}}{2} \quad (13)$$

と求められる。

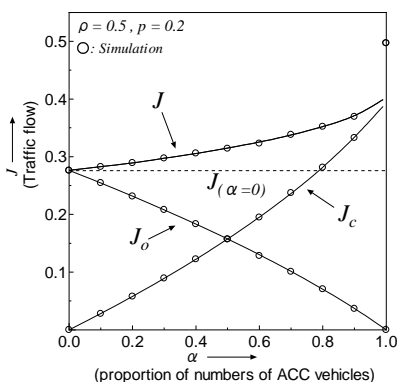


Fig. 2: Numerical examples

ここで (13) 式において、 $\alpha = 0$ (一般車両のみ) とすれば、

$$J = \frac{1 - \sqrt{1 - 4\rho(1 - \rho)\tilde{p}}}{2} \quad (14)$$

となり、文献 [1],[2] で示された NaSch モデルの流量と一致した結果となる。なお、一般車両及び ACC 車両それぞれの流量は、 $J_c = \alpha J$ 、 $J_o = \beta J$ で求められる。

4. 考察とまとめ

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との比較を行う。シミュレーション時間を $10^4 \Delta t$ 、道路長を $L = 5000$ セルとし、初期状態における各セルの車両の有無は乱数により決定した。

Fig. 2 に、 $\rho = 0.5, p = 0.2$ における α に対する流量の変化を表す。図中の実線は (13) 式の厳密解より得られる結果であり、○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、(13) 式より得られた理論値とシミュレーション結果はよく一致していることがわかる。 $\alpha = 1$ のとき、一般車両が存在しないことから、 $\rho \leq 0.5$ では、定常状態において流量の理論式は $J = \rho$ となり、(13) 式の理論式とは異なるため J は不連続点となっている。

グラフ中の破線は、 $\alpha = 0$ の流量であるため、破線と J の差が ACC 車両による流量の増加分である。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。以上、ACC 車両が交通容量に与える影響を明らかにすることができた。ただし、車両の最高速度を $V_{max} = 1$ と仮定したため、今後は V_{max} を任意とした場合での数理モデルの構築・解析が課題である。

参考文献

- [1] K.Nagel and M.Schreckenberg : "A cellular automaton model for freeway traffic", *J.Phys.I*, 2, 12, pp.2221-2229 (1992)
- [2] A.Schadschneider and M.Schreckenberg: "Car-oriented mean-field theory for traffic flow models", *J.PhysicsA : Math.Gen.*, 30, pp.L69-L75(1997)