

クルーズコントロール技術を考慮した交通流のモデル化と解析

Modeling and Analysis of traffic flow in consideration of the Cruise Control system

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

Abstract: In recent years, the vehicles equipped adaptive cruise control (ACC) have been increased with the development of the vehicle control technology. The vehicles equipped ACC can keep appropriate distance between two vehicles. Therefore, the ACC must improve traffic quantity. The speed ranges in which the ACC vehicles can follow automatically are the high-speed range of 40-100km/h, the low-speed range of 20-40km/h and the all-speed range of 0-100km/h. In this study, we construct the traffic-flow model that consists of the ACC vehicles working in the high-speed range and ordinary vehicles not equipped the ACC. Analyzing the model, we obtain the analytical solutions of traffic flow and average speed.

1. はじめに

現在の日本では、車両保有台数の増加により、交通渋滞の慢性化が生じている。渋滞の慢性化は、社会的損失の増大や排気ガス問題等、交通公害に直結するため、社会問題とされている。渋滞の主要な発生箇所の一つにサグ部がある。サグ部での渋滞要因として前方車両との車間距離の狭さが挙げられる。この渋滞要因の緩和・解消に有効な技術として、一定の車間距離で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)がある。

ACCは、低速域追従・高速域追従・全車速域追従と追従速度に応じて3種類に大別できる。自動追従機能は、交通流の改善効果だけでなく、事故の防止・軽減など安全性も向上するため、普及率の増加が期待されている。このことから、文献[1]で筆者らは、ACC機能を考慮した交通流モデルを提案した。しかし、同文献で扱う全車速域追従機能は、ACC車両の総生産台数に対し、20%にも満たない。一方、高速域追従機能は約75%と大部分を占めている。以上の背景から、本研究では高速域追従機能のACC車両と一般車両が混在する数理モデルを構築し、ACCが交通流に与える影響を明らかとする。

モデル構築には、Nagel-Schreckenbergモデル[2](以降NaSchモデル)を参考とする。構築した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

本研究では、セルオートマトンモデルに基づき、交通流モデルを構築する。対象モデルでは、Fig. 1に示すような道路に相当する L 個のセルがある。このセル上を合計 N 台のACC車両と一般車両が、矢印の方向に走行している。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。 L と N から交通密

度は $\rho = N/L$ である。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、 $d_n = x_{n+1} - x_n$ となる。

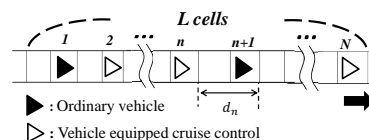


Fig. 1: Schematic diagram of analytical model

< 2・1 > 一般車両の更新ルール 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[2]。

- (1) 加速 $v_n < V_{max}$ 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 $v_n > 0$ のとき、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る舞いだけでなく、(3)の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。本研究では、一般車両はこのルールに基づき車両位置及び速度を更新するものとする。

< 2・2 > ACC車両の更新ルール 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 $\beta (= 1 - \alpha)$ とする。高速域追従のACC機能は、作動可能な最低速度 V_{lim} が予め設定されており、速度が V_{lim} から V_{max} の間であれば自動追従を行っているものとする。したがって、ACC機能作動時は、ルール(3)のランダム化は存在しない。以上より、車両位置の更新は、 V_{lim} に達していないACC車両はルール(1)~(4)により行い、 V_{lim} 以上で走行しているACC車両は、ルール(1)、(2)、(4)により行う。

1:日大理工・院・電気 2:日大理工・教員・電気

3. 解析

解析では、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 [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、本モデルでは速度や車種により追従動作が異なるため、後続車の車種と速度を考慮する必要がある。したがって、本モデルは、連続する 2 台の後続車の速度が i であり、かつ車間距離が $j (= 0, 1, \dots, L - N)$ セルである状態を状態 (i, j) とし、定常状態における状態確率を以下のように定義する。

- $P_{i,j}$; 2 台の一般車両が連続しており、状態 (i, j) である確率
- $Q_{i,j}$; 前方に ACC 車両、その後方に一般車両が追従しており、状態 (i, j) である確率
- $R_{i,j}$; 前方に一般車両、その後方に ACC 車両が追従しており、状態 (i, j) である確率
- $S_{i,j}$; 2 台の ACC 車両が連続しており、状態 (i, j) である確率

また、車両が次時点に前方セルへ進む確率を g とし、ACC 車両の場合を g_c 、一般車両の場合を g_n と定義する。ただし、現時点のセルに留まる確率を $\tilde{g} (= 1 - g)$ と表す。以上より、定常状態における $P_{i,j}$ と $R_{i,j}$ に関する状態方程式は、以下のように与えられる。

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

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

$$P_{0,j} = p\tilde{g}(P_{0,j} + P_{1,j}) + pg(P_{0,j-1} + P_{1,j-1}); j \geq 2 \quad (3)$$

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

$$P_{1,j} = qg(P_{0,j} + P_{1,j}) + q\tilde{g}(P_{0,j+1} + P_{1,j+1}); j \geq 1 \quad (5)$$

$$R_{0,0} = \tilde{g}(R_{0,0} + R_{1,0}) \quad (6)$$

$$R_{0,1} = g(R_{0,0} + R_{1,0}) + p\tilde{g}R_{0,1} \quad (7)$$

$$R_{0,j} = pgR_{0,j-1} + p\tilde{g}R_{0,j}; j \geq 2 \quad (8)$$

$$R_{1,0} = \tilde{g}(pR_{0,1} + R_{1,1}) \quad (9)$$

$$R_{1,j} = g(qR_{0,j} + R_{1,j}) + \tilde{g}(qR_{0,j+1} + R_{1,j+1}); j \geq 1 \quad (10)$$

また、状態確率 $Q_{i,j}$ に関する状態方程式は (1)~(5) 式の $P_{i,j}$ を $Q_{i,j}$ に置き換えた式、 $S_{i,j}$ に関する式は (6)~(10) 式の $R_{i,j}$ を $S_{i,j}$ に置き換えた式と同様となる。

次に、期待値の定義式から平均車頭間隔は、

$$\beta \sum_{i=0}^{V_{max}} \sum_{j=0}^{L-N} (j+1) \{ \beta P_{i,j} + \alpha Q_{i,j} \} + \alpha \sum_{i=0}^{V_{max}} \sum_{j=0}^{L-N} (j+1) \{ \beta R_{i,j} + \alpha S_{i,j} \} = \frac{1}{\rho} \quad (11)$$

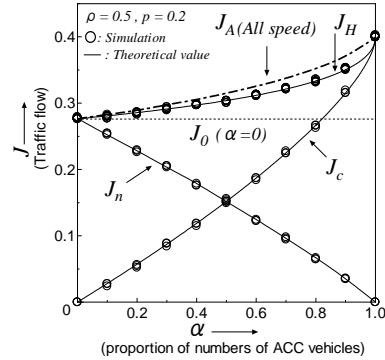


Fig. 2: Numerical examples 1

を満たす。ここで、ACC 車両と一般車両の混在する場合の流量を $J_H (= J_c + J_n)$ とすると、以上の式を用いて、

$$J_H = \frac{q \left\{ 1 - \sqrt{1 - 4\rho(1 - \rho)(\alpha + q\beta)} \right\}}{2(\alpha + q\beta)} \quad (12)$$

と求められる。また、一般車両及び ACC 車両それぞれの流量は、 $J_c = \alpha J_H$ 、 $J_n = \beta J_H$ 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 1 万 Δt 、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。図中の実線は理論値 ((12) 式) であり、○ はシミュレーション結果を示している。各 α の値に対して、シミュレーションは初期値を変えて、それぞれ 5 回ずつ行った。グラフから理論値とシミュレーション結果はよく一致しており、モデルの妥当性が確認できる。

グラフ中の破線で示す J_0 は、すべて一般車両の場合である。つまり、破線と実線の差が ACC 車両による流量の増加分である。 $\alpha = 0.5$ の場合、ACC 車両導入前に比べて約 10[%] 増加している。なお、一点鎖線は文献 [1] で示された理論値であり、同条件において、約 13.9[%] の増加が示されている。したがって、全車速追従と比較すると約 3.9[%] の減少が確認できる。全車速域追従は、ランダムブレーキや発進遅れによる減速は生じないのに対し、高速域追従は発進遅れが生じる場合がある。すなわち、これが流量の差となったと考えられる。

以上、ACC 車両が交通容量に与える影響を明らかにした。今後は、車両の最高速度である V_{max} を任意とした場合の数理モデルの構築・解析が課題である。

参考文献

- [1] 星野貴弘, 坪井一洋, 浜松芳夫: 「自動運転技術を考慮した交通流のモデル化と解析」, 電気学会 ITS 研究会資料集, pp.51 - 54(2012)
- [2] A.Schadschneider and M.Schreckenberg: "Car-oriented mean-field theory for traffic flow models", *J.PhysicsA: Math.Gen.*30, pp.L69 - L75(1997)