L-59

車間制御及び定速走行機能を考慮した交通流モデルの解析

Analysis of Traffic Flow Model Considering Automatic Gap Control and Constant Speed Control

○久保　良介[1]，渡辺　一輝[1]，星野　貴弘[2]，浜松　芳夫[2]
Ryosuke Kubo[1], Kazuki Watanabe[1], Takahiro Hoshino[2], Yoshio Hamamatsu[2]

Abstract: In recent years, the number of vehicles with automatic gap control (AGC) and vehicles with constant speed control (CC) have increased with the development of vehicle control technology. AGC and CC mainly help to ease driver fatigue on highways. In this research, we develop a traffic flow model that considers AGC and CC equipped vehicles, and is based on the Nagel-Schreckenberg model, which is a probabilistic cellular automaton model. On analyzing the mathematical model for the traffic including AGC and CC equipped vehicles, we can obtain analytical solution of the traffic flow and the average velocity.

1. はじめに

現在，日本では，都心での慢性的な交通渋滞が問題となっている[1]．交通渋滞は，自動車の排気ガスによる地球温暖化，流通における経済損失など様々な問題の原因となっている．自然渋滞は，適切な速度と車間距離が維持されなかった結果，発生することが知られている．近年，ITS 技術の発展に伴い，定速制御機能及び車間制御機能を搭載する車両が増えつつある．このような車両の増加は，渋滞の低減に一定の効果があると考えられる．

本稿では，システム内に定速制御機能のみを備えた車両と車間制御付き定速制御機能を備えた車両，またこれらの機能を備えていない一般車両の 3 種類が混在する交通システムを対象とする．このシステム内の交通流に関するセルオートマトンモデルの時間的発展則とその数理モデルを提案する．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．また，定速制御機能及び車間制御機能が交通流に及ぼす影響について検討する．

2. 対象モデルの数学的記述

< 2.1 仮定 > 対象とする交通流を片道 1 車線の単路部とし，セルオートマトンモデルにより記述する．$n \leq 1$ システム内には，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 台の車両が一定走行し，後続の車両が前方の車両を追い越すことはないものとする．第 1 章で述べた通りヒューマンドライバーの知覚を頼りに走行する車両の他に定速制御機能により設定された速度を自動的に維持することのできる車両及び定速制御機能と自動的に車間距離を制御する装置を搭載している車両が存在するものとする．以降，本稿では定速制御機能を搭載する車両を CC 車両，定速制御機能及び車間制御機能を搭載する車両を AGC 車両，どちらの機能ももたない車両を一般車両と呼ぶことにする．

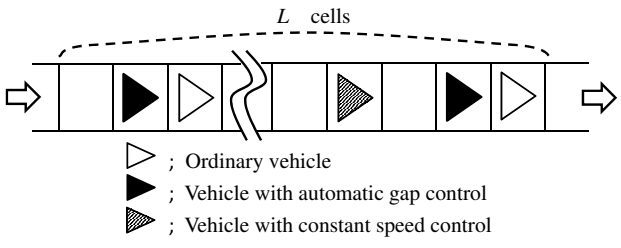

Fig. 1: Schematic diagram of analytical model

車両総数 N に対する AGC 車両の占める割合を α，CC 車両の割合を β，一般車両の割合を γ $(= 1 - \alpha - \beta)$ とし，その配置はランダムであるものとする．L と N により，システム全体の交通密度は $\rho = N/L$ と表される．車両群中の $n(1 \leq n \leq N)$ 番目の車両の速度を v_n，最高速度を V とすれば，v_n は $0 \leq v_n \leq V$ の範囲で整数値をとる．車両は，時点ごとに後述するルールに従い速度が決定される．時点 t から $t+1$ に，その速度のセル数分移動する．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 番目の車両と前方の $(n+1)$ 番目の車両の車等間隔 d_n は $d_n = x_{n+1} - x_n$ と表される．

本稿では，定速制御機能及び車間制御機能が交通流に及ぼす基本的な影響を検討するため，AGC 車両すべてのドライバーは，すべての速度において定速制御機能及び車間制御機能を利用するものとし，同様に CC 車両のすべてのドライバーは，$v_n = V$ であるときに定速制御機能を利用するものとする．

< 2.2 対象モデルの時間的発展則 > ヒューマンドライバーの発進遅れや過度の減速操作を確率セルオートマトンモデルにより表現した NaSch モデルを基に対象モデルの時間的発展則を STEP1 から 4 のように示す．

STEP1 加速　任意の車両の速度が $v_n < V$ のとき，$v_n \to v_n + 1$ とする．

1:日大理工・学部・電気　2:日大理工・教員・電気

STEP2 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 $v_n \to d_n - 1$ とする．

STEP3 ランダム化　一般車両は，$v_n > 0$ のとき，確率 p で速度を 1 減少させる．AGC 車両は，STEP2 での減速の有無に関わらず，速度をそのまま維持する．また，CC 車両は，STEP2 で減速が生じず，かつ速度が V ならば，無条件に速度 V を維持し，逆に STEP2 後の速度が V 未満ならば，一般車両と同様に，確率 p で速度を 1 減少させる．すなわち，

$v_n \xrightarrow{p} v_n - 1$ ；一般車両, $v_n < V$ の CC 車両

$v_n \to v_n$ ；AGC 車両, $v_n = V$ の CC 車両

とする．

STEP4 車両移動　STEP1 から 3 により決定された次時点の速度により車両の位置を $x_n \to x_n + v_n$ とする．

一般車両及び定速制御機能を使用していない ($v_n < V$) の CC 車両は，STEP3 により，前方車に対する追従の遅れや衝突回避時の過度な減速などヒューマンドライバー特有の減速が確率 p で発生する．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．速度 V で定速走行中の CC 車両及び AGC 車両は，自動運転の状態にあるため，上記のような減速は生じず，速度は維持される．

3. 数理モデルと解析

対象モデルの解析手法として，車両の速度と車間距離に着目した COMF(Car Oriented Mean Field) 近似 [2] を用いる．本章では，解析にあたり，具体的に $V = 1$ として推移確率行列や正規化条件式を示す．

対象モデルでは，任意の車両の現在の速度とその前方車との車間距離により，次の時点の速度と車間距離が決定される．任意の車両が速度 v，前方車との車間距離が d セルであるとき，本モデルの確率過程の状態を (v, d) とする．また，本モデルでは，追従動作の異なる 3 種類の車両が存在する．そのため，任意の一般車両が時点 t において状態 (v, d) となる確率を $P_v^d(t)$，同様に AGC 車両については $Q_v^d(t)$，CC 車両については $S_v^d(t)$，と表すものとする．

各車種の平衡状態における状態確率をそれぞれ P_v^d, Q_v^d, S_v^d と表し，それらを成分とする平衡状態確率分布を $\boldsymbol{P}$, $\boldsymbol{Q}$, $\boldsymbol{S}$ とする．また，状態の推移確率行列をそれぞれ $\boldsymbol{R_1}, \boldsymbol{R_2}, \boldsymbol{R_3}$ とする．各状態確率が平衡条件を満たすとき，以下の状態方程式が成立する．

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{P}\boldsymbol{R_1}, \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{Q}\boldsymbol{R_2}, \boldsymbol{S} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{R_3} \tag{1}$$

(1) 式を平均速度 g について解けば

$$g = \frac{\tilde{p}\left\{1 - \alpha p\rho - \sqrt{(1-\alpha p\rho)^2 - 4\rho(1-\rho)(\tilde{p}+\beta p)}\right\}}{2\rho(\tilde{p}+\beta p)} \tag{2}$$

となる．流量 J は $J = \rho g$ より求められる．

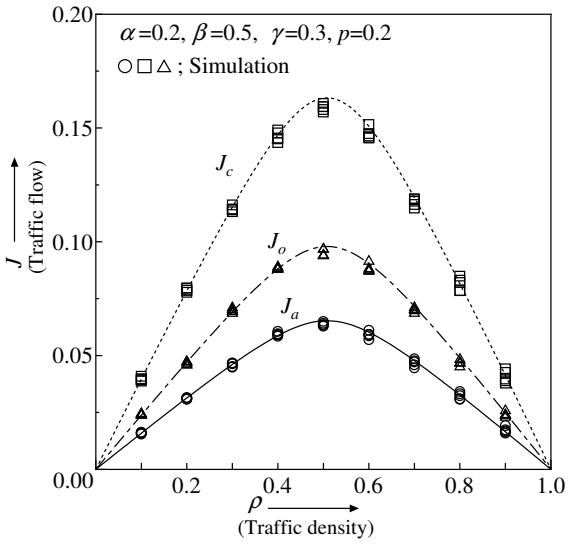

Fig. 2: Numerical examples of J versus ρ

4. 考察

数理モデルの妥当性を検討するために，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，疑似乱数により初期状態における各セルの車両の有無とランダムブレーキの発生を決定した．また，シミュレーション時間を $10{,}000\Delta t$ とし，道路長 $L = 10,000$ セルとした．

Fig.2 に $\alpha = 0.2, \beta = 0.5, \gamma = 0.3, p = 0.2$ における ρ に対する車種ごとの流量 $(J_a, J_c, J_o,)$ の数値計算結果を示す．図中の各線は，3 章で求めた J と $J_a : J_c : J_o = \alpha : \beta : \gamma$ により計算した結果である．記号 (○，□，△) はシミュレーションによる結果を示している．各 ρ の値に対して，シミュレーションは乱数の初期値を変えて，それぞれ 5 回ずつ行っている．グラフから，各流量の理論値とシミュレーション値は概ね一致していることがわかる．

5. むすび

本論文では，車間制御機能及び定速制御機能を考慮した交通流セルオートマトンモデルの提案を行った．さらに，交通流モデルの COMF 近似に基づく数理モデルを示し，車種ごとの流量及び速度を陽に導出した．今後は，セル上の各地点における車両の速度分布，またボトルネック区間を設け，その周辺における交通流の変化について解析を行う予定である．

参考文献

[1] 国土交通省：「全国道路・街路交通情勢調査報告書 (道路センサス)」，国土交通省道路局 (2010)

[2] A.Schadschneider and M.Schreckenberg : "Car-oriented mean-field theory for traffic flow models", J.Physics A, Math.Gen., Vol.30, pp.L69–L75 (1997)