

# 交通流シミュレーションモデル セルオートマトンの追従安定性に関する研究

Stability of the cellular automaton in traffic flow simulation modeling

北海道大学工学研究院 ○学生員 鈴木 崇史(Takahito Suzuki)  
北海道大学工学研究院 正員 中辻 隆(Takashi Nakatuji)

## 1. 背景と目的

モータリゼーションの発展による自動車交通の拡大は、利便性と共に様々な交通問題を生じてきた。問題の解決には交通現象の理解が必要であり、交通流モデルが広く活用されている。

近年、ミクロ的なアプローチによる自動車の交通や安全の説明が重要なものとなってきている。これによる交通シミュレーションを用いて、自動車交通の管理を効率的に運用することができれば、様々な問題にアプローチすることが可能になってくる。

ミクロモデルは車両1台1台を個々に表現するモデルであり、大きく分けて追従モデルやセルオートマトン(CA)モデルなどがある。この2つのモデルの大きな違いは空間、時間、速度に対し、連続であるか、離散的であるかの違いがある。

追従モデルは車両の運動を連立微分方程式で扱い、交通流シミュレーションにおいて計算負荷が高いモデルであり、CAモデルはルール設定が行いやすく、計算負荷がかからない簡単なモデルでありながら渋滞現象など複雑な現象を扱える所に特徴がある。

また、追従モデルにおいて、推定精度を検証する上で最も重要な問題は、局所安定性および漸近安定性などの安定性評価である。近年、安定性評価はPrakashら[1]によって、実験データを用いて行われてきた。そのなかで、反応時間、感応度は個人のドライバーにより異なる変数であり、実験データから車群の追従不安定性を指摘している。Wolfgangら[2]はCAモデルに確率を取り入れたNagel[3]らのモデルの中で安定性評価のための重要な要因である反応時間は適切な離散化のための時間として暗黙のうちに導入されており、それはドライバーの反応時間ではないと指摘している。

そこで、本研究ではCAモデルにおいて反応時間の導入を考え、追従不安定性を現すことを目的とする。

本論文の構成は以下のようになっている。第2節で追従モデルの安定性について述べ、第3節では、CAモデルと安定性を述べる。第4節はまとめである。

## 2. 追従モデルの安定性

追従モデルでは、「自車両の速度変化は先行車からの刺激と、それに対する運転者の反応感度によって決まる」と考えられている。この考えに基づき、Chandlerら[4]によって遅れ時間を考慮したモデルの一つが次式で与えられている。

$$\dot{x}_n(t+T) = \lambda[\dot{x}_{n-1}(t) - \dot{x}_n(t)] \quad (1)$$

ここで、 $\dot{x}_n$ はn番目の速度である。 $\lambda$ は感応度と呼ばれ、速度差に対してどのくらい鋭敏に応答するかを与える。 $T$ は応答時間の遅れを表し、反応時間と呼ぶ。

多数の車両が追従運動を行っているとき、列の途中で何らかの乱れが生じたなら、その乱れは後方走行車両に次々と伝播していく。追従理論ではこの時の交通流の安定性が主要な関心となり、交通流の安定性は次の2つの観点から分析される。Hermanら[5]は局所的安定性の基準を確立し、Chandlerら[4]は漸近的安定性の基準を確立した。交通流の安定性は次の2つの観点から分析される。

局所的安定性はある車両で生じた速度変化が、その後続車両に伝播する際、後続車両の速度変化が時間とともにどのような経過をたどるかという安定性の問題である。

漸近的安定性はある車両で生じた速度変化が、その後続車両に次々と伝播していくとき、その速度変化の大きさがどのように変わっていくかという安定性の問題である。

そして、安定性解析において、安定状態であるか、不安定状態であるかは $\lambda T$ の値により決まり、 $\lambda T < 1/2$ 以内なら安定状態である。

Prakashら[1]は実験的検証により反応時間、感応度を求めており、基本的な運転者の反応は局所的にも漸近的にも不安定であると述べている。

安定性解析には反応時間、感応度は非常に重要な要因である。

しかし、CAモデルの中では反応時間、感応度が曖昧なものとなっている。

## 3. セルオートマトン(CA)モデル

### 3.1 CA理論に基づく交通流

セルオートマトン(Cellular automaton, CA)とは、格子状のセルと単純な規則からなる、離散的計算モデルである。近年、CAに関する研究が進められ、1992年に交通流におけるCAモデルの基盤として確率を導入して、ランダム性を取り入れた確率CAモデルがNagel[3]らによって提案された。このモデルでは、加速、減速、ランダム減速、移動に関するルールを確率で表している。ランダム減速とは、本来であれば減速する必要がない地点において、減速するという事を意味する。

そして、2007年に西成ら[6]によって、パラメータの変化により、全ての既存のモデルを説明可能なモデルとしてS-NFSモデルが発表されている。

このモデルは下記のルールに従って次ステップにおける車両の速度、位置を決定している。

表1 S-NFS 車両挙動ルール

1.加速	$V_i^{(1)} = \min\{V_{max}, V_i^{(0)} + 1\}$
*Sの決定	$S=1 \text{ or } 2$
2.慣性	$V_i^{(2)} = \min\{V_i^{(1)}, -X_{i-s}^{t-1} + X_i^{t-1} - S\}$
3.減速	$V_i^{(3)} = \min\{V_i^{(2)}, -X_{i-s}^t + X_i^t - S\}$
4.ランダムブレーキ	$V_i^{(4)} = \max\{0, V_i^{(3)} - 1\}$
5.衝突回避	$V_i^{(5)} = \min\{V_i^{(4)}, -X_{i+1}^t + X_i^t + 1 + V_{i+1}^{(4)}\}$
6.車の移動	$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{(5)}$

ここで、 $x_i^t$ は時刻  $t$  における車  $i$  の場所、 $S$  は見通しの台数を表している( $S=1$ :直前車両により自車の動きを決定、 $S=2$ :更に一台前の車の状況も、自車挙動に影響)。確率  $r$  で  $S=2$ 、 $1-r$  で  $S=1$  とする。現在の速度  $v^{(0)}$  を与えると、次の時間ステップの速度  $v^{(4)}$  が求まり、その速度で全ての車を同時に動かす。次の時間ステップでは、 $v_i^{(0)} \leftarrow v_i^{(4)}$  として同様にルールを適用する。

### 3.2 CA モデルでの安定性

Wolfgang ら[2]は Nagel[3]ら CA モデルの中で反応時間は適切な離散化のための時間として暗黙のうちに導入されており、それはドライバーの反応時間ではないと指摘し、反応時間にしては短いとしている。その時間は刺激と車両の実際の反応との間の時間であると述べている。その値はモデルの都合上、渋滞の典型的な上流での速度を再現する上で導入されたとしている。

また、Nagel[3]らの CA モデルの中では、速度変化の伝播は再現できないとしている。つまり、Nagel[3]らの確率論的な CA モデルの中で反応時間は導入されていないことを意味する。

しかし、Nagel[3]らより前に提案された慣性ルールの部分でなら反応時間について導入、つまり安定性解析への可能性を示唆している。

さらに、2007年に提案された S-NFS モデルにおいて慣性のルールを確率で示している。

慣性ルールとは、動いている車は次のステップにおいても動きやすく、止まってしまった車は、発進が鈍いという、状態を維持し続けようとする性質である。つまり、一度停止した車は前が空いて動けるようになっても、1ステップ待ってから動き始めるというものである。この動きこそが追従挙動の中の前方車の速度が加速、減速したら、後方車の行動は遅れて、次の行動に移るのに時間がかかるというドライバーの反応特性を示している。

現状の S-NFS モデルでの慣性ルールでは単純すぎてこの特性を説明することができない。慣性ルールの変更により、ドライバーの反応特性である反応時間の導入が可能で、それにより追従不安定性の説明できるだろう。

また、Prakash ら[7]は実験的検証から、車群安全性についても述べている。車群の漸近的安定性は不安定な状況でさえ、車群の後方の位置の車両は最少間隔を広げる傾向にある。速度と車間距離変動がだんだん後方へ伝播していくが、変動が大きくなっても、安全のための最低線としての最少間隔は同じである。車両は漸的に不安定でも潜在的に安全な状態を維持することができること

を述べた。

このことは人間の心理的な行動としては当たり前のことである。人は危険を避けるものである。この追従不安定な中の安定性について、衝突回避ルールへの導入を検討する必要がある。

### 4. おわりに

本研究では、まず既存研究により、追従モデルでは安定性評価が重要であり、反応時間と感応度が安定状態と不安定状態を区別するパラメータであることを述べた。

そして、Prakash ら[1]は実験的検証からドライバーにより反応時間、感応度が違うことから反応時間、感応度は変数であるとし、基本的な運転者の反応は局所的にも漸近的にも不安定であることを確認した。

第3節ではまず、同じように追従挙動を表現するモデルとして発展したセルオートマトンモデルの確率論的手法である S-NFS モデルについて記した。

次に、Wolfgang ら[2]は Nagel[3]ら CA モデルの中で反応時間は導入されていないことを述べ、慣性ルールでの反応時間導入の可能性について述べた。

さらに、S-NFS モデルは慣性ルールを確率で表しているので、そこに反応時間の導入の可能性を述べた。

そして、それがセルオートマトンモデルへの追従不安定性の導入につながるとした。

今後の課題としては、反応速度、感応度の交通流への影響をさらに検討しながら、確率的セルオートマトンモデルとして反応時間、感応度を導入した新たなモデルの構築があげられる。

セルオートマトンに細かな追従挙動の導入がなされ、追従不安定性の説明が可能になれば、様々な場面で利用が可能になり、ミクロ交通流モデルとしてますます研究が進んでいくだろう。

### 5. 参考文献

[1] Prakash Ranjitkar et. All: Stability Analysis Based on Instantaneous Driving Behavior Using Car –Following Data, Transportation Research Record, No 1852, pp140-151, 2003  
 [2] Wolfgang Knospe et. All: Empirical test for cellular automaton models of traffic flow, Physics Review E70, 016115, 2004  
 [3] K. Nagel et. All: Cellular automaton model for freeway traffic, Journal of Physics I france, Vol. 2, pp. 2221–2229, 1992  
 [4] Chandler et. All: Dynamics ; studies in car-following, Operation Research, Vol. 6, pp. 165–184, 1958  
 [5] Herman et. All Traffic Dynamics: Analysis of Stability in Car Following, Operations Research, Vol. 7, pp. 86–106, 1959  
 [6] Nishinari et. All 確率的に拡張された交通流セルオートマトンの相転移ライン導出, 応用力学研究所研究集会報告 NO.18ME-S5  
 [7] Prakash Ranjitkar et. All: Asymptotic Stability and Vehicle Safety in Dynamic Car-Following Platoon, transportation Reaearch Record, No 2088 pp198-207, 2008