

信号付き拡張バーガス・セル・オートマトンを用いた交通流の解析

著者 板垣 一成

指導教員 野村 保之

1. 研究背景

現代社会にとって、自動車交通システムは産業や生活を支え、国の根幹となりえる重要なインフラストラクチャーである。しかし、個人や法人による自動車の所有もはや一般的となり、増えすぎた自動車によって交通渋滞 (traffic jam) があらゆる場所で頻繁に発生するようになった。交通渋滞は人間の活動を妨げ、また不必要な排ガスによる大気汚染や地球温暖化などの環境問題をも引き起こし、交通渋滞による日本国の経済損失は 27 兆円にも上ると言われている。このように交通渋滞は経済、環境悪化など様々な形で我々に損失を与えるのである。従って、渋滞の仕組みを理解し、交通渋滞を予測できることが求められる。

交通流を解析するには、車両の動きをモデル化する必要がある。現在では、様々なモデルが考案されており、微視的なものから巨視的なもの、決定論的なものから確率論的なもの、離散的なものから連続的なものがある。その中でも、近年最も注目されているものがセル・オートマトン (以下 CA) である。

本研究では交通流モデルとして粘性をもつ流体方程式としてのバーガス方程式に着目して信号機を取り入れたモデルを考える。よってこのモデルを用いてシミュレーションを行い、車両がどのような動きをするか解析する。

2. 拡張バーガス・セル・オートマトン

基本的な BCA は Rule184CA と呼ばれる。このモデルは前方が空いていれば 1 セル進めるという単純なモデルである。これは、車の動きに非常に似ているモデルであり、車の渋滞表現を簡単ではあるが表現できる。しかし、高速道路で見られるような過飽和な状態を表現できないため、何らかの工夫が必要であった。そこで、Rule184CA を含む BCA を拡張した拡張バーガス・セル・オートマトン (EBCA) を用いて交通流を解析した。

BCA は 1 つのセルに入る車の容量 $L=1$ 、一度に動ける車の容量 $M=1$ 、最高速度 1 (車が単位時間あたりに移動できるセル数が 1) である。この BCA を最高速度 2 のモデルに拡張する。その時の速度は

$$a_j^t \equiv \min(U_j^t, L - U_{j+1}^t, L - U_{j+2}^t) \quad (1)$$

と定義する。そして、単位時間に動きうる車の最大数は

$$b_j^t \equiv \min(U_j^t, L - U_{j+1}^t) \quad (2)$$

と定義する。この条件下では、1 セルだけ動く車の数は $\min(b_j^t - a_j^t, L - U_{j+1}^t - a_{j-1}^t)$ で与えられる。

したがって、セル j における車の出入りの発展則は

$$\begin{aligned} U_j^{t+1} &= U_j^t + \min(b_{j-1}^t + a_{j-2}^t, L - U_j^t + a_{j-1}^t) \\ &\quad - \min(b_j^t + a_{j-1}^t, L - U_{j+1}^t + a_j^t) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。

今回、簡単化のために $M=\infty$ 、 $L=2$ とする。

3. 信号付き拡張バーガス・セル・オートマトン

本研究では信号機がついた道路での交通流を解析する。従って EBCA を元に信号機の信号が与える影響を考慮したモデルを考えなければならない。簡単のために信号機は単位時間を 1 ステップとしたときに 3 ステップに 1 回、信号を周期的に発するものとする。信号を発しているとき、車両は進めないものとする。信号機が影響を与える位置関係から 4 つのモデルに分けた。

- A) 信号機の 1 つ後ろのセルのモデル
- B) 信号機の 1 つ前のセルのモデル
- C) 信号機の 2 つ前のセルのモデル
- D) 上記以外のセルのモデル

A) の場合、信号によって 1 つ前の状態に関わらず、車が進むことはできない。これは 1 つ前のセルと 2 つ前のセルに車が最大値 L までであると考えられる。従って、③式より

$$U_j^{t+1} = U_j^t + \min(b_{j-1}^t + a_{j-2}^t, L - U_j^t + a_{j-1}^t) \quad (4)$$

B) の場合、信号によって 1 つ後ろの状態に関わらず、車が進んでこない。これは 1 つ後ろのセルと 2 つ後ろのセルに車が 1 台もないと考えられる。従って、③式より

$$U_j^{t+1} = U_j^t - \min(b_j^t + a_{j-1}^t, L - U_{j+1}^t + a_j^t) \quad (5)$$

C) の場合、2 つ後ろのセルに車が 1 台もないと考えられる。従って、③式より

$$U_j^{t+1} = U_j^t + \min(b_{j-1}^t, L - U_j^t + a_{j-1}^t) - \min(b_j^t + a_{j-1}^t, L - U_{j+1}^t + a_j^t) \quad (6)$$

D)の場合、信号機の影響を受けないため EBCA を用いる。

これらのモデルをまとめて SEBCA(Signal Extended Burgers Cellular Automaton:信号付き拡張バーガース・セル・オートマトン)と提案する。

4. 結果

SEBCA を用いて交通流シミュレーションを行った。

このときの車両密度の初期値は 0.6、信号機は 1 台、道路長は 50、単位時間は 20 ステップである。以下に結果の時空図（縦軸を時間、横軸を道路長の状態の図）を示す。

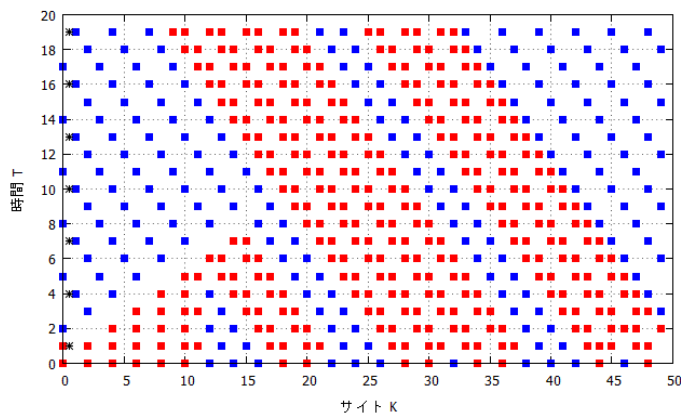


図 1 SEBCA の時間発展(自由相→渋滞相への相遷移)

青は 1 つのセルに車が二台、赤は 1 つのセルに車が 1 台、*は信号が発生していることを表している。

図 1 から車が信号機によって減速したことで渋滞化するという物理的な事実を表していることがわかる。次に車の位置を全体的にばらつくように乱数で決定し、車両密度と交通流量から基本図（縦軸を交通流量、横軸を車両密度）を表した。車両密度 p 、交通流量 q はそれぞれ

$$p \equiv \frac{1}{KL} \sum_{j=1}^K U_j^t$$

$$q^t \equiv \frac{1}{KL} \sum_{j=1}^K \min(b_{j-1}^t + a_{j-2}^t, L - U_j^t + a_{j-1}^t)$$

と定義する。

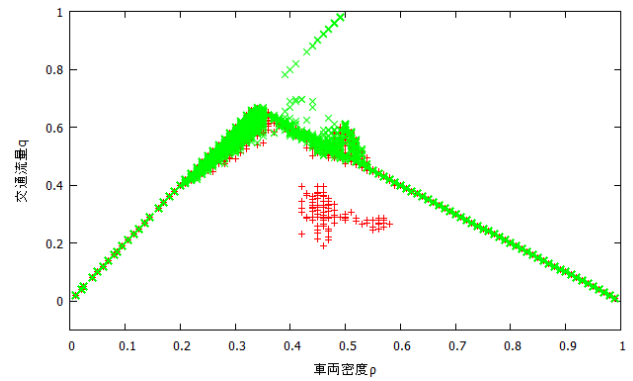


図 2 SEBCA の基本図
赤は EBCA、緑は SEBCA

図 2 を見ると EBCA では車両密度が約 $0.4 \leq p \leq 0.5$ の範囲内で多値性を示していたが、SEBCA では過飽和だった状態での交通流量が急激に低下した。これは過飽和な状態のときの道路の状態は均一な状態で安定していたが、信号機の導入により発生する擾乱で時間発展に従って 1 つの大きな渋滞流を形成した。他の交通流が信号機による影響を受けづらい理由としては小さな渋滞は複数発生するが全体の交通流量に影響は与えない、もしくは交通流率が大きいため大きな渋滞を形成してしまっていて信号機の影響が小さくなったからと考えている。

5. 結論

本研究では、SEBCA モデルを用いて信号機の数や車両密度の変化に対してどのような振る舞いを行うか解析した。解析を行うに当たって、シミュレーションを簡単にするためにサーキット状の道路に設定し、信号の周期を 3 ステップに 1 回にした。信号機を導入することによって主にセルに車が最大値 L まであるか、1 台も入っていないかのどちらかの状態に分かれた。そのため、信号機の数が増えると高密度の渋滞が発生しやすくなった。従って、信号機は特定の条件下で高密度の渋滞を発生させる要因であると考えられる。

6. 参考文献

- [1] 西成活裕：「交通流と超離散」、数理科学 9(1999)32.
- [2]：橋詰真美、志田篤彦、高橋大輔：「信号機付き Burgers Cellular Automaton」、非線形波動現象の理論と応用（研究集会報告 13ME-S4, 2002）6.
- [3] 西成活裕：「渋滞の研究：超離散的アプローチ」、物性研究（1999）、71（4）：564-572