

セルオートマトン(CA)モデルによる交通状態推定に関する研究

Simulation-based for Cellular Automaton for Simultaneous Estimation of Traffic State

北海道大学大学院工学研究科 ○学生員 秋谷 真 (Makoto Akiya)

北海道大学大学院工学研究科 正員 中辻 隆 (Takashi Nakatsuji)

1. 本研究の背景と目的

現代社会において自動車交通は経済活動や日常生活を支える重要な役割を担っている。しかしその弊害である交通渋滞によって多大な時間的損失や環境問題が引き起こされ、それらの問題は多くの主要都市において深刻な問題となっている。渋滞問題の解決においては、交通流特性を表現する基本変量（速度 v 、密度 k 、流量 q ）、またそれら変量の相互関係を把握する事が重要であり、その上でのリアルタイムの OD 交通量の推定が求められる。その解決に向け、過去に多くの交通流モデルにより研究がなされてきたが、未だ日本国内における決定論的手法は確立されていない。

交通流モデルは、交通流を流体として捉えるマクロモデル、車1台1台の挙動を扱うマイクロモデルに大別され、また近年ではその2つのモデルの間とされるメソモデルがある。そのマイクロモデルの中でも本研究で扱うセルオートマトン(CA)モデルは、計算負荷のかからない簡潔なモデルでありながら、渋滞発生を相転移現象として捉える際の表現に長けたモデルであり、その計算負荷の少なさから動的なシミュレーションまでを視野に入れたモデルとして、ヨーロッパを中心として研究が進められているモデルである。

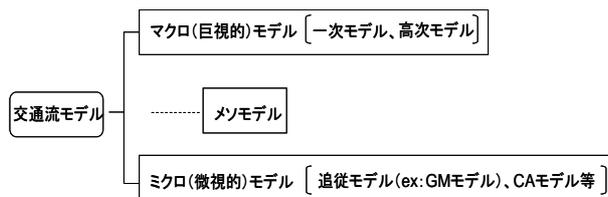


図1 交通流モデルの分類

本研究では、この CA 理論に基づく既存の交通シミュレーションモデルと現実交通との乖離部分を修正し、より現実的な交通流の再現を目的とする。

2. CA 理論

(1)CA 理論に基づく交通流モデル

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。計算可能性理論、数学、理論生物学などの研究で利用され、非常に単純化されたモデルであるが、生命現象、

結晶の成長、乱流といった複雑な自然現象を表現できるモデルとして様々な分野で研究の対象となっている。

以下、この CA 理論による交通流表現について説明する。

CA 理論に基づく交通流モデルとしての最も基本的なモデルは次の2つのルールのみからなるルール 184 モデルである(図2)。

初期設定：横並びの箱(セル)を用意し、適当に幾つかの箱に玉(粒子)を入れておく

ルール 1：単位時間ごとに、玉を右の箱へ移す

ルール 2：右隣の箱に既に玉が入っていれば動けない

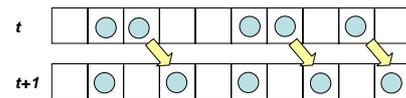


図2 ルール 184 に基づく玉の挙動(進行方向：右)

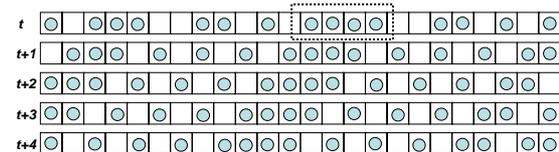
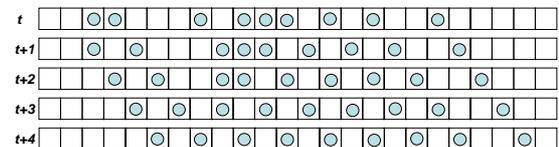


図3 車の挙動 (上)低密度時 (下)高密度時

図3(上)の様に初期状態が低密度時は、操作を繰り返す度に次第に玉はばらけて自由に動くようになり、図3(下)の様な高密度時では、中央部の4つの玉からなる渋滞部が実際の交通流の様に進行方向逆に伝播していくのがわかる。この様に、ルールに従い玉を順次動かしていくわけだが、この玉を車と見立てると、交通流の一般的特性を表現できている事がわかる。

(2)既存モデル

代表的既存モデルとその特徴は以下の通りである。

(i)Rule-184[1]

：前方に車がいる→止まる，前方に車がない→進む

(ii)Fukui-Ishibashi (FI) モデル

：高速度(単位時間に2セル以上進む)に対応

- (iii) Nagel-Schreckenberg (NS) モデル
: 高速度に対応, ランダムブレーキ効果に対応
- (iv) Quick-Start (QS) モデル
: 運転手の見通しに対応
- (v) Slow-to-Start (SIS) モデル
: 車の慣性 (加速が遅れる効果) に対応

Rule-184 は上述の様に、CA 理論を用いた交通流モデルの中では一番単純なモデルであり、FI モデルは、一度に2セル以上進むことができるモデルである。NS モデルは、ほぼFIモデルにランダムブレーキ効果がかかったものであると考えてよい。ランダムブレーキ効果とは、前に障害物がなくてもある確率で1だけ減速するものである。QS モデルは、運転手が直前の前方車だけでなく、2台先を見てある程度前方の車の動きを予測している効果を取り入れたものである。SIS モデルは、一度停止した車が1ステップ待って動き出すというものである(加速の遅れ)。

そして2007年、西成らによって、パラメータを変化させる事で、(i)~(v)のモデルの特徴を説明可能なモデル、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。

S-NFS 車両挙動ルール

加速	$v_i^{(1)} = \min\{V_{\max}, v_i^{(0)} + 1\}$	
慣性	$v_i^{(2)} = \min\{v_i^{(1)}, x_{i+S}^{t-1} - x_i^{t-1} - S\}$	with the probability q
減速	$v_i^{(3)} = \min\{v_i^{(2)}, x_{i+S}^t - x_i^t - S\}$	
ランダムブレーキ	$v_i^{(4)} = \max\{0, v_i^{(3)} - 1\}$	with the probability $1-p$
衝突回避	$v_i^{(5)} = \min\{v_i^{(4)}, x_{i+1}^t - x_i^t - 1 + v_{i+1}^{(4)}\}$	
車の移動	$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{(5)}$	

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 $v_i^{(0)}$ を与えると、次の時間ステップの速度 $v_i^{(4)}$ 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。

本研究では、様々な既存研究との比較を行いやすく、渋滞相転移部の特性を表現可能なS-NFSモデルをベースとして、新たなモデルを作成した。

3.本研究におけるモデル

本研究における、S-NFSモデルからの変更点は大きく以下の2つである。

- ・見通し範囲の設定
- ・衝突回避ルールの変更

(1) 見通し範囲の設定

S-NFSモデルは各既存モデルの特性を含んでおり、この見通しの概念はQSモデルに関連する。

今、確率rの下にS=2(自車挙動は2台前の車からも影

響)となった場合において、2台前の車両が図4の様自車から相当距離離れていた状況を想定する。S-NFSモデルではこの場合でも2台前の車の位置、速度により自車の動きを決定するが、それがモデルにおいて悪影響を及ぼす場合があるのではないかと仮定した(2台前の車が渋滞最後尾であった場合等)。

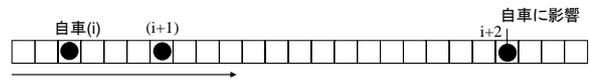


図4 S-NFSモデルでの2台前の車の扱い

そこで、本研究ではドライバーの運転に影響を与えるであろう見通し範囲を設定し、その範囲内に2台前の車が存在しない場合、S=1(直前車両の状況のみで自車挙動を決定)へ変更し、2台前の車は自車の動きに影響を与えないとする(図5)。

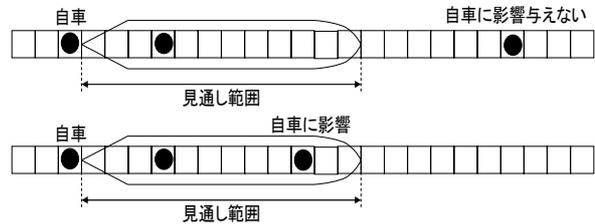


図5 S-NFSモデルでの2台前の車の扱い

(2) 衝突回避ルールの変更

S-NFSモデルにおける衝突回避のルールを再掲する。

$$\text{衝突回避 } v_i^{(5)} = \min\{v_i^{(4)}, \frac{x_{i+1}^t - x_i^t - 1 + v_{i+1}^{(4)}}{2}\} \quad (1)$$

(a) (b)

(a),(b)はそれぞれ時刻tにおける前方車との車頭間隔、前方車の速度を表す。この条件では、パラメータ次第では、ルール上では図6の様な現実交通では考えづらい車頭間隔での走行(図6[右])や、急減速を引き起こす(図6[左])ケースがあり得る(色がついているセルはそのセルに車が存在している事を示し、セル内の数字はその車が時刻tでもつ速度である)。

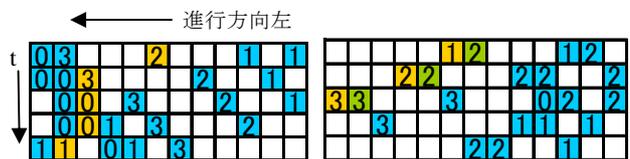


図6 現実交通流との乖離

本来であれば、図6(左)のケースであれば、急減速を避けるために、停止車両から更に離れた地点より減速を段階的にするべきであり、図6(右)のケースであれば、速度に見合う車間を確保するための減速が必要はなはずである。

この問題点を修正するために、本研究では車の持つ速度に対応した制動距離、空走距離の概念を衝突回避のル

ールに組み込む事とした。

自転車の次ステップでの速度を決めるにあたり、先行車の速度 v_{i+1} 、及び先行者との車間距離 gap から考えるが、式(2)を満たす最大の速度 v_{ix} を求め、その速度 v_{ix} と(1)式での $v_i^{(4)}$ とを比較し、最終的な自転車の次ステップでの速度 $v_i^{(5)} (= \min(v_i^{(4)}, v_{ix}))$ とする。

$$\begin{aligned} & \text{先行車制動距離}(D(v_{i+1})) + \text{車間距離}(gap) > \\ & \text{追従車(自転車)の空走距離}(DD(v_{ix})) + \text{追従車制動距離}(D(v_{ix})) \quad (2) \end{aligned}$$

v_{ix} の v 導出に際し、制動距離、空走距離と速度の持つ関係を次の式で表す。

$$\text{空走距離 } DD(v) = \text{速度}(v) \text{ km} / 3600 \times 0.75$$

$$\text{制動距離 } D(v) = \text{速度}(v)^2 / (2 \times 9.8 \times 0.7 (\text{摩擦係数}))$$

モデル上での速度は $v(\text{cell/step})=0,1,2,\dots,6$ までの7段階とするが、この速度を上式に入力するため、 $v=1(\text{cell/step})$ が現実交通では速度 21.6km/h に相当するとして換算する。この換算値に対応する制動距離 DD、空走距離 D と速度の関係は表 1 の通りである。例えば、先行車速度 $3(\text{cell/step})$ 、車間距離 $2(\text{cell})$ の場合、 v_{ix} は $3(\text{cell/step})$ となる。上記のルールを組み込む事で、急減速発生確率は低下し、現実交通流の様な、段階的な減速を実現している。

表 1 停止距離

	DD	D
V=0	0	0
V=1	1	0
V=2	1	1
V=3	1	3
V=4	2	5
V=5	3	8
V=6	3	12

4.分析結果

(1)基本量定義

ある時刻 t における3つの基本量、流量 q 、密度 k 、(平均)速度 v を本研究では次の様に定義する。

密度 k : (ネットワーク内の車両台数)/(セル長:200セル)

速度 v : (ネットワークに存在する車両台数の速度の総和)/(ネットワーク内に存在する車両台数)

流量 q : 密度×速度

尚、本研究における最大速度は $6(\text{cell/step})$ として行う。

(2)分析条件

S-NFS モデルと、本研究で作成した修正モデルにおいて両者の比較を行う事とする。扱うパラメータはランダム減速の発生確率 p 、挙動ルールに慣性に関するルールを導入する確率 q 、対象車より2台先の車の影響を受ける確率を r とし、修正モデルでは見通し範囲(VA)が加わる。本研究ではランダム減速確率は0.05で固定して扱い、①S-NFS モデル($r=q=0.2$)、②S-NFS モデル($r=q=0$)、③修正モデル($r=q=0.2$)、④修正モデル($r=q=0$)の4パターンでの比較を行う。

対象ネットワークはセル長 200 セルの単路とし、出口地点に到達した車は、出発地点に戻るという循環型の境界条件を設定している(図7)。また、ネットワーク上に流入ランプ、流出ランプを1ヶ所ずつ設定しており、ネットワーク内の密度を制御する。

本研究では初期密度を 1(200セル全てに車が埋まっている状態)とし、流入確率 0、流出確率(流出地点を通り過ぎる車がネットワーク外へ流出する割合)0.2とし、パラメータを変化させたそれぞれの場合での時間毎の密度、平均速度、流量を出力し、全ての車が流出した状態(密度0)まで繰り返す。

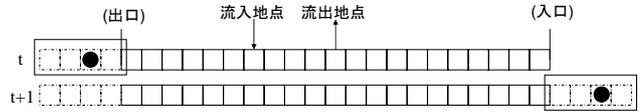


図7 循環型境界条件

(3)基本図比較

図8,9は4パターンそれぞれの場合のQ-V曲線である。図8において、最大流量が修正モデルの方が低い結果となったが、これは密度が低下した際に最大速度6で自由走行する場合において、上述した衝突回避ルールの変更により、修正モデルでは自由走行時の車頭間隔をS-NFSモデルに比べ大きく取る様に設定しているため、その結果渋滞流から自由流へ移行する際の密度が低下している事が影響したと考えられる。

また、図8,9を比較した際、修正モデル、S-NFSモデル双方で流量が減少しているが、これはパラメータ q の効果により、SISモデルの特徴である加速が遅れるという現象が発生しているためである。

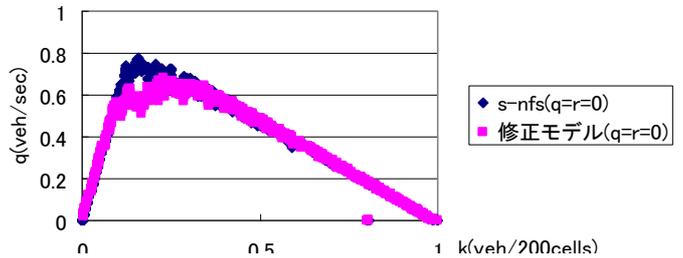


図8 q-v 曲線($q=r=0$)

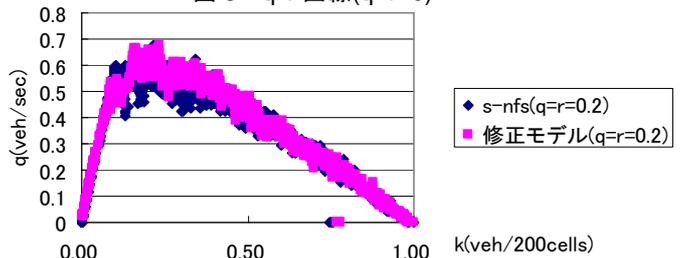


図9 q-v 曲線($q=r=0.2$)

(5)急減速確率

ある時刻 t における車 x_i が持つ速度 $v^t(x_i)$ と、 x_i が次の時刻 $t+1$ において持つ速度 $v^{t+1}(x_i)$ から加速度を求め、比較する4パターンにおいて、急減速がどの程度の割合で発生しているかを調べた。表2は4パターンそれぞれの減速度毎の回数である。

表2より、修正モデル($q=r=0.2$)の場合、全ての車両が

流出完了するまでに発生する減速の総回数は 19336 回あり、そのうち $v^i(x_i)$ から $v^{i+1}(x_i)$ へ速度 2 以上の減速が起こった回数は 1606 回という事になる。この表より、減速回数は、修正モデルに比べ S-NFS モデルでは少ないが、急減速 ($\alpha \leq -2$ の場合とする) の起こる回数は、圧倒的に S-NFS モデルのほうが多い事がわかる。これは、修正モデルの方が段階的に減速を行うのに対し、S-NFS モデルでは大きな減速が頻繁に起こっているという事を示唆する。図 10,11 に前方が渋滞していた際の両モデルの減速イメージを記載する。

表 2 減速回数

	$\alpha \leq -1$	$\alpha \leq -2$	$\alpha \leq -3$	$\alpha \leq -4$
修正モデル($q=r=0.2$)	19336	1606	19	0
修正モデル($q=r=0$)	17673	671	10	0
S-NFSモデル($q=r=0.2$)	16487	4156	1384	448
S-NFSモデル($q=r=0$)	13430	1868	608	217

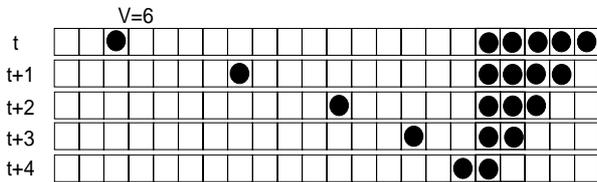


図 10 修正モデルの段階的減速

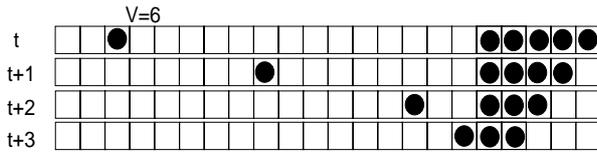


図 11 S-NFS モデルの急減速

図 12,13 は急減速が起こった際に、その時刻に生じた減速回数のうち、何回を急減速が占めていたかを表すグラフである。横軸のステップ数であるが、実際は 4 パターン全て、全車両がネットワークから流出するのに 1600 ~ 1800 ステップを要すが、1200 ステップ以降はネットワーク内の車両台数が低くなり、減速回数が大きく減るため 1200 ステップまでのグラフを記載している。図 12,13 からも、急減速を示す割合は修正モデルの方が低いという事が読み取れる。

図 8,9 より、 $q-k$ 曲線においては修正モデルと S-NFS モデルにおいて大きな差は見られなかったが、個々の車の動きに着目し、ステップ毎の速度、加速度を確認していくと、両者には大きな違いがあることがわかる。

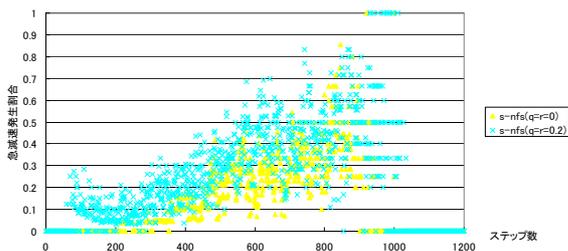


図 12 急減速発生割合

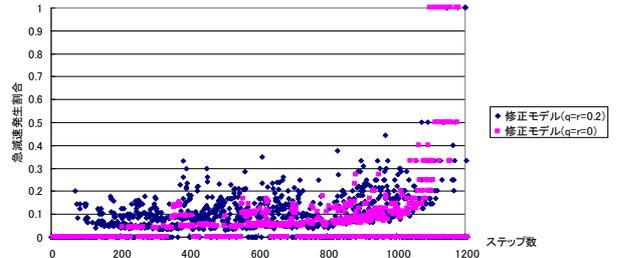


図 13 急減速発生割合

6. おわりに

本研究では、交通状況の解明において近年注目される CA 理論による交通流モデルの作成に取り組み、既存研究の問題点の解消について扱った。

従来の CA 理論による交通流モデルにおける既存研究は、渋滞相から自由走行流への相転移に着目する研究が広く行われており、その点で一定の評価を受けていると言える。ただ、本研究において、車両一台一台の速度、加速度に着目して行くと、現実交通流と大きな隔たりがあるという事が示される。そうした問題点の中でも、本研究では、衝突回避の新ルールを組み込む事で、これまでに指摘されてきた急減速の発生抑制を達成する事ができた。

今後の課題として、本研究では見通し範囲を一定値として扱ったが、実際各ドライバーによって見通し範囲は異なる。また、密度によって見通し範囲も変わるはずである。今後はそれらの点を精査していきたい。更に、本研究ではコンピュータ上のシミュレートに留まったが、今後は実データを用いて、本研究で利用したモデルの検証実験を、見通し範囲の精査と併せて行うことで、より現実的交通流を再現できるモデルに改良していく予定である。

7. 参考文献

1. 酒井聡士・西成活裕・飯田晋司、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、2007
2. 林洋、自動車事故鑑定学入門
3. 杉山雄規、交通流の物理、名古屋大学大学院、2003
4. 加藤恭義・光成友孝・築山洋、セルオートマトン法、森北出版、1998
5. K.Nagel and M.Schreckenberg, A cellular automaton model for freeway traffic、1992
6. 友枝明保、超離散化法及び CA モデルによる交通流の研究、平成 18 年大阪大学大学院
7. 近藤竜平、マイクロ交通流モデルを組み込んだ OD 交通量の動的推定に関する研究、平成 18 年度北海道大学
8. 交通工学研究会、交通流シミュレーションの標準検証マニュアル、平成 14 年