

# TTC を考慮した交通流セルオートマトンに関する研究

谷口洋平<sup>1</sup>      鈴木秀幸<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 東京大学大学院 工学系研究科 先端学際工学専攻

<sup>2</sup> 東京大学大学院 情報理工学系研究科 数理情報工学専攻

## 概要

本稿では、前方車に衝突するまでの時間 (Time to Collision : TTC) を主軸に据えた新しい交通流セルオートマトンモデルを提案し、特性としてどのようなものを得ることが出来るかをシミュレーションを通して考える。シミュレーションは開放系で行い、各車両の更新は平行で行われる。シミュレーションによって、交通流の基本図を作成したところ、基本図の中に自由走行流や渋滞流だけでなく、2次元平面上に点が幅広く分布している領域が見られた。この領域が出たことから、TTC の考え方を盛り込むことによって、渋滞流の一部である synchronized flow についても再現している可能性が伺える。

## A Traffic Cellular Automaton Containing Time to Collision

Yohei Taniguchi<sup>1</sup>      Hideyuki Suzuki<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Advanced Interdisciplinary Studies (AIS)  
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

<sup>2</sup> Mathematical Informatics, Graduate School of Information  
Science and Technology, The University of Tokyo

## Abstract

We present a new traffic CA model centered on the time with which a car catches up with the forward one ( it is called Time to Collision : TTC ) , and investigate how characteristics the model has with the simulation. The model is simulated under open boundary conditions and each car is parallel-updated. We draw the figure of fundamental diagram of the traffic flow with the simulation. We find free flow and wide moving jam and the region where the dots are widely located on the fundamental diagram of the two dimensional map. It is thinkable that TTC also enable to reproduce synchronized flow due to the result.

## 1 序論

交通流現象は、1960 年ごろからこれまで、統計物理の観点からあらゆるモデルが提案され研究がなされてきた。90 年ごろになると、計算機の発達により、交通流を CA をベースにしたモデル [1, 2, 3] で表現することが盛んになってきた。CA は、特に交通流のような複雑系の現象においては、連続量の変数を微分方程式で記述する手法に比べ、コンピュータに

よる計算が容易になるという利点がある。変数が離散量なので、現象を完全に再現することは不可能であるが、シンプルなルールをいくつか加えるだけで、現象を大雑把に表現ができる。CA では、1992 年に、速度を可変にすることで自由走行流と渋滞流を再現した NaSch モデル [1]、1998 年にスロースタート効果を入れてメタ安定現象を再現した VDR モデル [2] が提案され、2006 年にはドライバーの見通しの効果も含めてより鮮明にメタ安定を出した S-NFS モデ

ルが提案された [4] . その後これらのモデルでは表現できない交通流の性質を表現するべく多種多様なモデルが作られてきた .

2002 年に Kerner[5, 6, 7] は, 交通流は, free flow, synchronized flow と wide moving jams の 3 種類の相からなっていると”Three phase theory”を唱え, 実測データからその存在を確かめ, それらが表現できるモデルの提案も行っている [8] .

Synchronized flow は, 密度と流量で表す 2 次元平面上, いわゆる基本図上において, 他の 2 相と違い広く広がって分布する . よって密度と流量が大きく揺らぎ, 平均速度も 20km/h から 60km/h の間の値で, 大きく揺らいでいる . 実際は, synchronized flow は, 道路上での短い渋滞が形成されている部分とそうでない部分が混在し, それが波打つように後方に伝わっていくような現象として観察される .

車が前方の車に衝突するまでの時間 (Time to Collision : TTC) は, 1976 年に Lee[9] によって発案され, 交通流モデルの衝突危険性を図る指標として, よく用いられている . TTC は交通流の安全性評価の研究ではよく使われているが [10, 11], TTC の考え方をドライバーの運転基準として採用しているモデルは殆ど見かけない . また, TTC に関連して, 前方車との衝突を避けるために, 走行車の制動距離 (急ブレーキをして停止するまでの距離) を計算し, 自分と前方車の制動距離の差が車間距離を超えないように自分の速度を調整するというモデル [12] はある . [12] のモデルは前方車の速度変化をある程度の時間ステップまで考慮した上で現在の速度を決定しているため, アルゴリズムも複雑になっている . TTC は前方車の速度変化, すなわち加速度は考慮していないため, アルゴリズムは異なる . ただ, TTC は前方車に追い付くまでのドライバーの時間的な余裕ととることができる . ドライバーにとって, TTC は比較的見積みり安いいため, 安全運転の際に, ドライバーがこの TTC をペースメーカーすることは, ドライバーの運転心理において自然な仮定であるように思われる .

本稿では, 2 節で, CA をベースに TTC の考え方を考慮したモデルを提案し, それに基づく車両の振る舞いを数値シミュレーションで観察する . また, シミュレーションで得られた基本図と, 密度と流量の 2 次元平面から, synchronized flow の再現性について考察も行う . 3 節で, 結果に対するまとめと, 今後考えるべきことについて述べる .

## 2 提案モデル

以下に提案モデルにおける車両の移動規則を記す .

R0 ランダムブレーキの決定:

$$p = \begin{cases} p_0 & (d_n^{t-1} = 0) \\ p_d & (d_n^{t-1} > 0 \text{ and } v_n^t < v_{\max}) \\ p_s & \text{otherwise} \end{cases}$$

R1 加速:  $v_n^{t+1} \leftarrow \begin{cases} v_n^t + 1 & (v_n^t < v_{\max}) \\ v_n^t & \text{otherwise} \end{cases}$

R2 目標速度設定:  $\tilde{v}_n^{t+1} = v_{n+1}^t + \lfloor \frac{d_n^t}{c} \rfloor$  とし  
確率  $\frac{d_n^t}{c} - \lfloor \frac{d_n^t}{c} \rfloor$  で  $\tilde{v}_n^{t+1} \leftarrow \tilde{v}_n^{t+1} + 1$  を実行 .

R3 減速:  $v_n^{t+1} \leftarrow \min(v_n^{t+1}, \tilde{v}_n^{t+1})$

R4 ランダムブレーキ: 確率  $p$  で

$$v_n^{t+1} \leftarrow \max(v_n^{t+1} - 1, 0) \text{ を実行}$$

R5 移動:  $x_n^{t+1} \leftarrow x_n^t + v_n^{t+1}$

R0 で  $p$  を 3 段階に分けているのは, スロースタート効果 [2, 4, 13] を考慮してのことである . R1 で, 制限速度を超えない程度に徐々に加速をしていく . R2 の目標速度を設定する項であるが, ここで TTC の考え方が盛り込まれている . 前の車両に追い付くための時間を  $t_{TTC}$  とおくと, 現在の  $n$  台目の車間距離  $d_n^t = x_{n+1}^t - x_n^t$  と, 車の相対速度  $v_n^t - v_{n+1}^t$  を用いて, 関係式

$$(v_n^{t+1} - v_{n+1}^t) t_{TTC} = d_n^t \quad (1)$$

が表せる . この式で,  $t_{TTC}$  が  $c$  以上になるような  $v_n^{t+1}$  の範囲は,

$$v_{n+1}^t \leq v_n^{t+1} \leq v_{n+1}^t + \frac{d_n^t}{c} \quad (2)$$

となるので, この範囲を越えないように車は速度を調整しようとする . ただし, 注意すべき点として, ここでは前の車両の速度が 1 つ前の時刻のものを用いている . このようにしているのは, ドライバーには認知の時間遅れがあり, リアルタイムに前方車の速度を認知することはできないという考えによるものである . 実際, ドライバーの反応遅れは 1 秒弱と言われており, そのため, 提案モデルにおいても 1 秒前の値を参照している . 以上のようにして, ドライバーは最適な速度を  $v_n^{t+1} = v_{n+1}^t + \frac{d_n^t}{c}$  と設定することができる . このモデルは速度を整数値しかと

らないので、 $\frac{d_n^t}{c}$  はその値に近い整数値になりやすいようにしている．なおここで最適速度  $v_n^{t+1}$  を、四捨五入ではなく確率で決定しているのは、ドライバーが常に最適速度をきちんと設定できるとは限らないことを考慮してのことである．このようにして、R2では前方の車両との適切な距離を保つように速度を決定している．

R3で減速の際にはR2の $\tilde{v}_n^{t+1}$ を適応している． $\tilde{v}_n^{t+1}$ は $v_n^t$ の値を超えることもあるが、R3では、その分については考慮していない．その理由は、車両の加速度の上限は、R1で見られるように1cell/1step(7.5m/s<sup>2</sup>)としており、それより大きな加速度は、例え最適速度 $\tilde{v}_n^{t+1}$ が1cell/1stepを超える加速度を必要としても、実際に出すことはできないという考え方から来ている．R4でランダムブレーキを行い、R5で移動を行う．

この提案モデルを用いて、交通流のシミュレーションを行った．各パラメータの値としては、道路長 $L$ は2000cells = 15km、開放系とし、流入率 $\alpha$ は0.5、流出率 $\beta$ は0.98、 $v_{\max} = 5 (= 135\text{km/h})$ 、 $p_0 = 0.75$ 、 $p_d = 0.375$ 、 $p_s = 0.05$ 、TTCの目標値 $c = 6$ とした．また系の1stepは1秒とし、54000step計算を行った．このような状況下で、道路の密度と流量を測定し、2次元平面上にプロットした．道路上の車両の密度と流量は、100cellごとに等間隔に観測点(セルの位置を $l$ とおく)を設け、それぞれ $T = 300$ 秒間で位置 $l$ 上にいた車両の数と、セルを通過した車両の数をカウントして、その値を $T$ で割ることで算出している．数式で表すと、

$$\text{Density: } \frac{1}{T} \sum_t^T \sum_n \mathbf{1}(x_n^t = l)$$

$$\text{Flow: } \frac{1}{T} \sum_t^T \sum_n \mathbf{1}(x_n^t \leq l \cap x_n^{t+1} > l)$$

となる．式中の $\mathbf{1}(A)$ は、条件 $A$ が真ならば1、偽ならば0をとる関数である．なお、この系はどのような状況でも車の衝突は起きないことが分かっている([16]のAppendixを参照のこと)．

図1、図2は、それぞれシミュレーションで得られた基本図(Density[veh/cell] - Flow[veh/s])との時間と空間の2次元プロット(Space[cell] - Time[s])である．まず図1を見ると、自由走行流領域が直線的に、渋滞流領域が2次元上に広がっている様子が見て取れる．また一般にsynchronized flowの平均速度は20km/hから60km/hの間の値であるが、図1中の2次元上に広がっている各点における平均速度(各点と原点を結んだ直線の傾き)を見ると、例えば

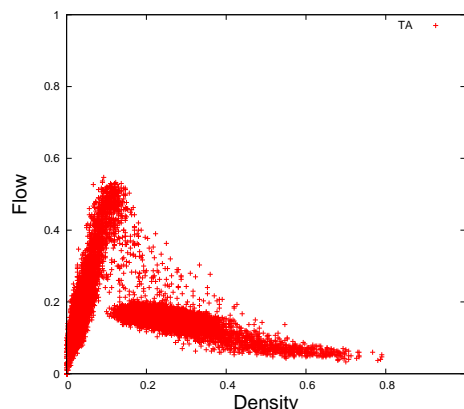


図1: 提案モデルでの基本図．

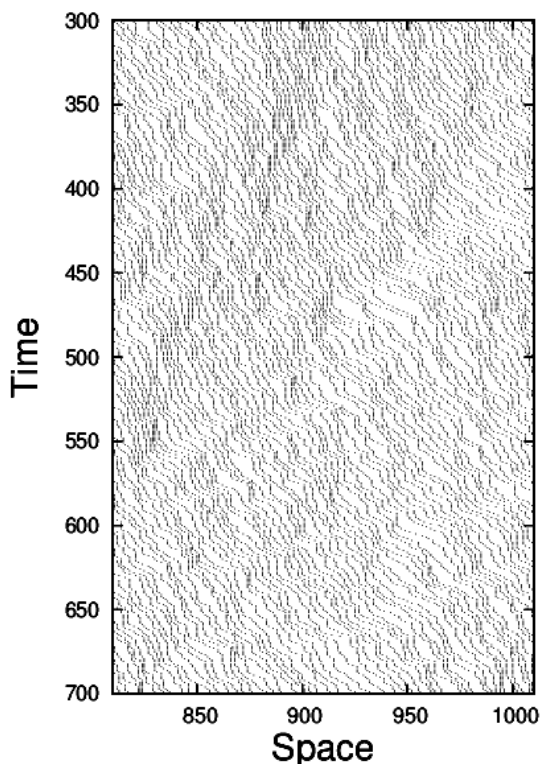


図2: 提案モデルでの車の時空間プロット．

図中の  $[0.15, 0.2] \times [0.3, 0.4]$  の範囲内の点などは、平均速度は 20km/h から 60km/h の間の値を取っていることが分かる。このような点は微量ではなくある程度の量でもって存在しており、synchronized flow の存在を伺うことができる。また、メタ安定もはっきりと観察されている。メタ安定はスロースタート効果によるものである。

次に、図 2 では車の速度に揺らぎが見られる。また、道路によって車両の間隔が詰まっているところとそうでないところの両方が混在している。この状態は車両の密度と流量の 2 次元平面上の点が、場所や時刻によって様々な位置に分布している状態であり、図 1 における free flow から wide moving jam に転移する間の領域に対応すると考えられる。

### 3 おわりに

TTC をある時間以上保つという要素を盛り込んだ CA モデルは、交通流の基本的な性質である自由走行流と渋滞流をはっきりと確認できた。また基本図から、その 2 層とは異なる領域を確認した。今後は、その領域が synchronized flow であるかどうか、より詳しく調べていくことが必要であると考えられる。そのためには、synchronized flow の特徴である、密度の流量の間の相関がないということをもまずは確かめる必要がある。また ( Brake Light ) BL モデル [13] をベースにしたモデルで、synchronized flow 相が表現できているという報告 [14] がある。BL モデルは TTC を用いていないが、このモデルと提案モデルの関係性について調べてみることも考えている。更に、連続モデルで TTC の考え方をドライバーの運転ルールに組み込み渋滞現象を観測している研究 [15] もあり、このモデルと比較することも必要である。

### 参考文献

- [1] K Nagel, M Schreckenberg: A cellular automation model for freeway traffic, *J. Phys. I France* **2** (1992), pp. 2221-2229.
- [2] R Barlovic, L Santen, A Schadschneider, M Schreckenberg: Metastable states in cellular automata for traffic flow, *J. Phys. B* **5** (1998), pp. 793-800.
- [3] E Brockfeld, R Barlovic, A Schadschneider, M Schreckenberg: Optimizing traffic lights in a cellular automaton model for city traffic, *Physical Review E* **64**(2001).
- [4] S Sakai, K Nishinari, S Iida: A new stochastic cellular automaton model on traffic flow and its jamming phase transition, *J. Phys. A: Math. Gen.* **39** (2006).
- [5] BS Kerner, SL Klenov, DE Wolf: Cellular automata approach to three-phase traffic theory, *J. Phys. A: Math. Gen.* **35** 9971 (2002).
- [6] BS Kerner: Three phase traffic theory, *Traffic and Granular Flow'01* (2003).
- [7] BS Kerner: Three-phase traffic theory and highway capacity, *Physica A: Statistical and Theoretical Physics* **333** (2004), pp. 379-440.
- [8] BS Kerner: Empirical macroscopic features of spatial-temporal traffic patterns at highway bottlenecks, *Physical Review E* **65** 046138 (2004).
- [9] DN Lee: A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision, *Perception* **5** 4 (1976), pp.437-459.
- [10] M Minderhoud, P Bovy: Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment, *Accident Analysis and Prevention* **33** (2001), pp. 89-97.
- [11] K Vogel: A comparison of headway and time to collision as safety indicators, *Accident analysis and prevention* **35** (2003), pp. 427-433.
- [12] S Krauss, P Wagner: Metastable states in a microscopic model of traffic flow, *Physical Review E* **55** (1997).
- [13] L Neubert, L Santen: A Schadschneider and M Schreckenberg: Towards a realistic microscopic description of highway traffic, *J. Phys. A: Math. Gen.* **33** (2000), pp. L477.
- [14] HK Lee, R Barlovic, M Schreckenberg, D Kim: Mechanical restriction versus human overreaction triggering congested traffic states, *Phys. Rev. Lett.* **92** 23 (2004).
- [15] S Jin, Z Huang, P Tao, D Wang: Car-following theory of steady-state traffic flow using time-to-collision, *J. Zhejiang Univ - Sci A* **12** (2011), pp. 645-654.
- [16] 谷口洋平: 緩やかな減速を考慮した交通流セルオートマトンに関する研究, *master thesis* (2011).