

## 2 車線交通流における車線の自発的役割分化

粟津暁紀 (茨城大理工)

### 1 はじめに

交通流の問題は社会的にも物理的にも非常に興味深く、これまで非常に多くの研究がなされてきた。とくに1車線道路の交通流モデルは様々なモデルが提案され、多くの成果が得られている。([2]~[11]) 一方、実際の交通流の観測は、主に高速道路等、車線が複数ある道路に関するものである。しかしながら、車線が複数ある道路における交通流の研究はあまりなされていない。ようやく最近になって走行車線と追い越し車線が存在するモデルや、確率的に車線変更させるモデルなどが研究されはじめてきた。([12] 等)

今回我々は簡単なルールに従って走る車からなる2車線の交通流モデルを提案し、特に自由流と渋滞流との間の相転移が起こる車の密度領域における系の振舞に注目した。その結果をここに報告する。

### 2 モデル

Nagel らが提案した1車線セルオートマトンモデル ([7][8][9]) を参考にして、次のような2車線の交通流モデルを考える。空間、時間、速度は離散的で、車は1~5の5段階の速度を持つ。車線は2車線で、ルールは車線間で平等とする。初期条件として、ランダムに速度を持たせた車をランダムに配置する。また周期境界条件を課す。

ルールの説明の為、以下の事を定義する。 $i$  を注目する車の番号 ( $i+1, \dots$  その前にいる車の番号)、 $j$  を隣の車線を走っている車の番号とする。 $x_n^i$  を時間  $n$  における車  $i$  の位置、 $v_n^i$  を時間  $n$  における車  $i$  の速度、 $X_n^j$  を時間  $n$  における車  $j$  の位置とする。また  $d_n^i = x_n^{i+1} - x_n^i - 1$  を時間  $n$  における車  $i$  と車  $i+1$  との車間距離とする。ただし車の長さを1として、車は右に向かって走るとする。時間更に加速確率  $P$  を定義する。

時間  $n+1$  における各車の位置  $x_{n+1}^i$ 、速度  $v_{n+1}^i$  は上の  $x_n^i$ 、 $v_n^i$ 、 $X_n^j$ 、 $d_n^i$  を用いて以下のルールに従って決定される。

#### ● 車の位置の変化

- $v_n^i \leq d_n^i$  の時、 $x_{n+1}^i = x_n^i + v_n^i$ 。
- $v_n^i > d_n^i$  の時、 $x_{n+1}^i = x_n^i + d_n^i$ 。

#### ● 車の速度の変化

- $v_n^i < d_n^i$  の時、  
\*  $v_n^i \neq 5$  の時、 $v_{n+1}^i = v_n^i + 1$ 。  
\*  $v_n^i = 5$  の時、 $v_{n+1}^i = v_n^i$ 。

#### 2. $v_n^i = d_n^i$ の時、

- $v_n^{i+1} > v_n^i$ 、  
\*  $v_n^i \neq 5$  の時、確率  $P$  で  $v_{n+1}^i = v_n^i + 1$ 。確率  $1-P$  で  $v_{n+1}^i = v_n^i$ 。  
\*  $v_n^i = 5$  の時、 $v_{n+1}^i = v_n^i$ 。
- その他の時  $v_{n+1}^i = v_n^i$ 。

#### 3. $v_n^i > d_n^i$ の時、

- $v_n^{i+1} < v_n^i$  の時、  
\*  $x_n^{i+1} = X_n^j$ 、又は  $X_n^j \leq x_n^i < X_{n+1}^j$  を満たす車  $j$  が存在する時、 $v_{n+1}^i = v_n^i - 1$ 。  
\*  $x_n^{i+1} = X_n^j$ 、又は  $X_n^j \leq x_n^i < X_{n+1}^j$  を満たす車  $j$  が存在しない時、 $v_{n+1}^i = v_n^i$ 。更にこの時車  $i$  は車線変更する。
- $v_{n+1}^i = v_n^i$  の時、 $v_{n+1}^i = v_n^i - 1$ 。
- $v_{n+1}^i > v_n^i$  の時、 $v_{n+1}^i = v_n^i$ 。

### 3 シミュレーション結果と解析

今回、 $P=0$ 、 $P=0.5$ 、の場合についてシミュレーションした。まず  $P=0$  の場合、特に興味深い結果の得られた密度領域  $0.1 \leq \rho \leq 0.2$  における、系の定常状態に注目する。

Fig1 は定常状態における、二つの典型的な系の時間発展を示している。ここで点1つが1台の車を表している。定常状態は、全ての車が速度  $v = v_{max} = 5$  で走っている「自由流相」と、全ての車が等しい速度  $v = v_c = d$  で走っている一種類の「クラスター」から構成されている。(この「クラスター」を構成している車の速度が小さい時、これは渋滞と見なせるだろう。) またクラスターは、それを構成している車の速度  $v_c$  を用いて、 $v_g = \frac{v_c - 1}{2}$  という関係を満たす、固有の群速度  $v_g$  を持つ。また、そのクラスターの前方に存在する自由流相の車間距離  $d$  は、 $d = 2v_g - v_c$  となっていることが分かる。

Fig2 は、様々な初期状態から 50000step 緩和させた後の、密度と flow との関係を表している。この図の  $0.1 \leq \rho \leq 0.2$  の領域において、 $f = 5\rho$  から幾つかの「枝」が伸びている。これは flow は密度に対し一意に決定されない事を示す。また、それぞれの「枝」によって、定常状態の時間発展の特徴が異なる。例えば、密度と flow の関係が一番下の「枝」に従っている時、Fig1(a) のように、速度1で走っている車から構成されるクラスターが、両方の車線で対称に存在しているような状態が実現される。同じように、密度と flow の関係が一番上の「枝」にしたがっている時、Fig1(b) のよ

うに、速度3で走っている車から構成されるクラスターが片方の車線に存在し、隣の車線は完全に自由流相になるような状態が実現される。更に(a)と(b)は密度は等しく、違いは車の初期配置のみである。

このように、時間発展のルールは車線の間で平等であるにも関わらず、定常状態では次のような2種類が存在する。一つめは、Fig1(a)のように車の分布が車線間で対称になっている状態 (symmetric state)、二つめは、Fig1(b)のように一方の車線にだけクラスターが存在し、隣の車線は完全に自由流相になっている状態、つまり自発的に速い車線と遅い車線が存在する状態 (asymmetric state) である。また Fig3 は Fig2 と同じ条件で、密度と二つの車線間の平均速度の差の関係を表したものである。この図の中の  $0.1 \leq \rho \leq 0.2$  の領域で、両車線間の平均速度の差は、一つの密度に対し多様な値をとっている。当然、symmetric state に対して、asymmetric state の方が車線間の平均速度の差は大きな値をとる。よってこの図から、実現される定常状態は密度だけでは決定しない事が分かる。さらに Fig4 は、この時の flow と車線間の平均速度の差の関係を示したものである。この図より、symmetric state が実現される時よりも asymmetric state が実現される時の方が、大きな flow が実現されることが分かる。

更に Fig2 の各「枝」は、実現されている定常状態に存在するクラスターの群速度  $v_g$  に依存した、以下の関係式を満たしている。(Fig5)

- symmetric state が実現している時

$$f = \frac{1}{2} + v_g \rho \quad (1)$$

- asymmetric state が実現している時

$$f = \frac{3}{4} - \frac{1}{2(v_f + 1)} + v_g \left( \rho - \frac{1}{2(v_f + 1)} \right) \quad (2)$$

実現されるクラスターの種類は密度には依存せず、 $v_g$  は初期条件の僅かな違いに対し様々な値をとり得るの。よって flow は密度に関して一意的には決まらない。

次に、なぜ symmetric state と asymmetric state とが実現し得るのか考えるために、緩和過程におけるクラスター間の相互作用に注目する。

Fig6(a)は複数のクラスターが、同じ車線内に存在している時の、クラスター間の相互作用の様子を示している。ここでは、始め速度1で走っている車から構成されているクラスターと、速度2で走っている車から構成されているクラスターが、幾つか存在している。しかし時間がたつにつれて、速度2で走っている車から構成されているクラスターが消滅し、最終的には、速度1で走っている車から構成されているクラスターのみが存在している。このように、同じ車線内に群速度の異なるクラスターが存在する時、速いクラスターは消滅し、遅いクラスターだけが生き残る。

Fig6(b)は、車線をはさんで隣り合っている、二つのクラスター間の相互作用のを示している。ここでは、始め速度2で走っている車から構成されている大きなクラスターと、速度3で走っている車から構成されている小さなクラ

スターが存在している。しかし時間がたつにつれて、速度2で走っている車から構成されているクラスターが減少、消滅し、速度3で走っている車から構成されているクラスターは大きくなる。(二つのクラスターの群速度が等しい時は、symmetric state が実現している状態である。)つまり、二つのクラスターの群速度が異なる時、遅いクラスターが消滅し速いクラスターが生き残る (Fig6(b))。この様にして、asymmetric state が実現される。更に、遅いクラスターが消滅し速いクラスターが生き残るので、asymmetric state が実現される時は、より大きな flow が実現する事が分かる。

ここまでは、 $P = 0$  の場合についてのみ議論してきたが、 $P = 0.5$  の場合についても、定性的には同じである。(Fig7, Fig8)  $P = 0$  の場合では、クラスターの群速度は0以上の値しかとらななかったが、 $P = 0.5$  の場合、特に  $v_c = 1$ ,  $v_c = 2$  の時には負の群速度も実現される。一般的に、渋滞相は負の群速度を持つと言われているので、 $P = 0.5$  の場合の方がより現実に近い結果である。

## 4 結果

今回、簡単な2車線交通流モデルを構成し、シミュレーションする事により以下の事がわかった。

- 定常状態としては、車線間で車の分布が対称になる symmetric state と、速い車線と遅い車線が自発的に形成される asymmetric state の、大きく分けて二種類の状態が実現する。
- flow は密度だけでは決定されず、その時存在しているクラスターの群速度、状態の対称性等に大きく依存する。
- 同じ密度であっても、symmetric state が実現される時より、asymmetric state が実現される時の方が大きな flow が実現する。

これらの結果は従来のモデルに比べて、実際の観測により近い結果である。またモデルの簡単さより、比較的容易に他のモデルへの拡張が可能で、例えば粉体のダイナミクスへの応用なども期待できる。

## References

- [1] A.Awazu, Self Organization of Slow and Fast lanes in Two Equivalent Lane Traffic Flow Model (preprint).
- [2] S.Yukawa, M.Kikuchi and S.Tadaki, J.Phys.Soc.Jpn.63 (1994) 3609.
- [3] S.Yukawa and M.Kikuchi, J.Phys.Soc.Jpn.64 (1995) 35.
- [4] M.Kikuchi and S.Tadaki, Phys.Rev.E50 (1994) 4564.
- [5] M.Kikuchi and S.Tadaki, J.Phys.Soc.Jpn.64 (1995) 4504.

- [6] M.Takayasu and H.Takayasu, *Fractals* 1 (1993) 860.
- [7] K.Nagel and M.Schreckenberg, *J.Phys.I.France* 2 (1992) 2221.
- [8] K.Nagel and H.J.Herrmann, *Physica A*199 (1993) 254.
- [9] K.Nagel and M.Paczuski, *Phys.Rev.E*51 (1995) 2909.
- [10] T.Nagatani, *Phys.Rev.E*48(5),(1993) 3290 .
- [11] M.Bando, K.Hasebe, A.Nakayama, A.Shibata, and Y.Sugiyama, *Phys.Rev.E*51, 1035 (1995).
- [12] M.Rickert, K.Nagel, M.Schreckenberg and A.Latour, *Two Lane Traffic Simulations using Cellular Automata* (preprint,1996).
- [13] D.Helbing, *Phys.Rev.E*55 (1997) R25.
- [14] (社) 交通工学研究会、藤田大二：交通現象と交通容量 (技術書院、1987).

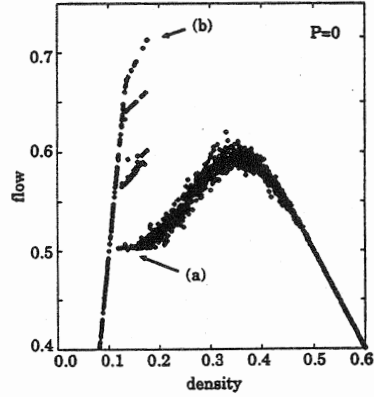


Figure 2:  $P = 0$  の場合における基本図。密度  $0.1 \leq \rho \leq 0.2$  の領域で幾つか枝が存在している。これは flow が密度に対し一意に決まらない事を示している。

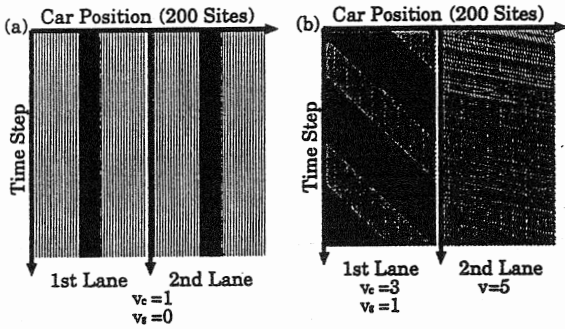


Figure 1:  $P = 0$  の場合における二つの典型的な定常状態。(a) 二つのクラスターからなる symmetric state。(b) 自由流車線とクラスターを含む車線からなる asymmetric state

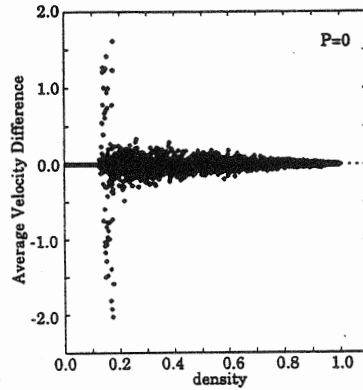


Figure 3:  $P = 0$  の場合における密度と車線間の平均速度の差の関係。一つの密度に対し車線間の平均速度の差は様々な値をとる。これは一つの密度に対し symmetric、asymmetric の両方の state が実現される事を示している。

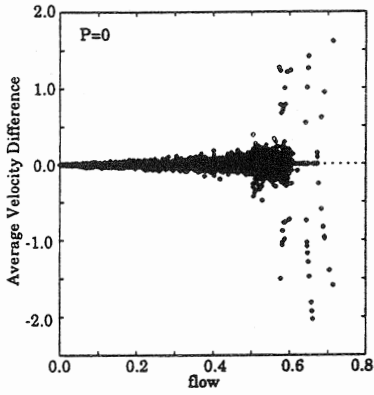


Figure 4:  $P = 0$  の場合における flow と車線間の平均速度の差の関係。平均速度の差が大きいくらいより大きな flow が実現される。

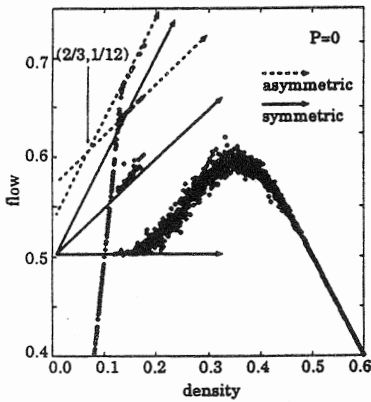


Figure 5:  $P = 0$  の場合における基本図 (Figure 2) の各枝は、state の種類によって方程式 (1) もしくは (2) で表される。

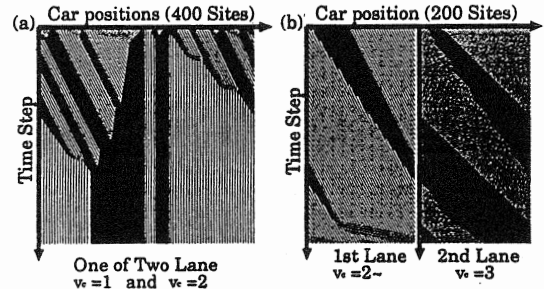


Figure 6:  $P = 0$  の場合の緩和過程におけるクラスターの相互作用。(a) 同じ車線に幾つかクラスターが存在する時。(b) 速度の異なる二つのクラスターが車線をはさんで隣り合っている時。

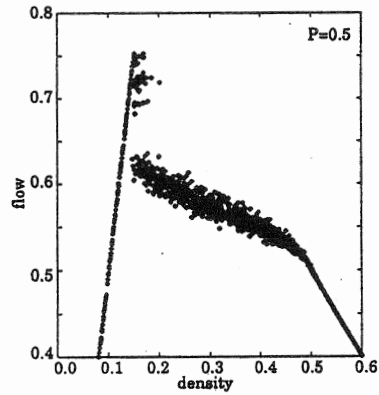


Figure 7:  $P = 0.5$  の場合における基本図。 $P = 0$  の時同様、flow は密度に対し一意に決まらない。

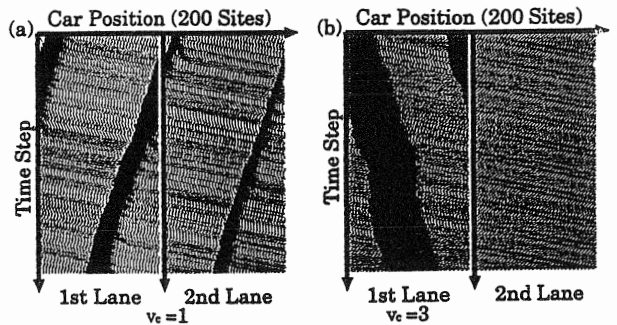


Figure 8:  $P = 0.5$  の場合における典型的な定常状態。 $P = 0$  の時同様二種類の定常状態が実現される。