

## 異方的散逸を持つ粒子系の対向流モデルにおける レーン形成とその不安定性

京都大学 基礎物理学研究所 池田 昌浩, 和田 浩史, 早川 尚男

互いに対面する二方向の流れが共存するとき, 同じ方向に流れるもの同士が進行方向に列を作るレーン形成という現象が知られている. この現象は歩行者の流れや電荷を帯びたコロイドの運動などで見ることができる.[1] ところが, 異方的な散逸を持ち対向した駆動力が働くモデルを用いて分子動力学シミュレーションを行った結果, 駆動力に対して垂直な成分の散逸が小さいあるいは駆動力を十分に大きく取る時, 対面する二方向の流れが共存するにもかかわらず, 安定したレーンは形成されず不安定な振る舞いを見せる事が分かった. 本発表では, 駆動力や駆動力と垂直な散逸を変化させオーダーパラメーターを測定することによりレーン形成についての相図を作成し, レーンの不安定化について議論を行った.

本研究では二次元平面内の二種類の粒子が対向する二方向に駆動されるモデルを用いている. 駆動力方向を  $x$  軸にとると駆動力は  $a_x(\pm V_0 - u_i)e_x$  と表される. この駆動力によって一方の粒子は  $x$  軸正方向に  $V_0$  の速さで進むように, もう一方の粒子は  $x$  軸負の方向に  $V_0$  の速さで進むように駆動される. それに対して駆動力と垂直な  $y$  方向には散逸力  $-a_y v_i e_y$  が働く. さらに粒子間には Weeks-Chandler-Andersen ポテンシャル  $\phi(r_{ij})$  による相互作用も働くので粒子  $i$  の運動方程式は

$$\frac{dv_i}{dt} = -a_x(u_i - \pm V_0)e_x - a_y v_i e_y - \sum_{j \neq i} \frac{\partial \phi(r_{ij})}{\partial \mathbf{x}}, \quad (1)$$

と書かれる. ここで  $u_i, v_i$  は粒子  $i$  の速度の  $x$  成分,  $y$  成分である. この運動方程式に表れる項の  $-a_x u_i e_x$  と  $-a_y v_i e_y$  はそれぞれ速度に比例した摩擦力の形をしているがこのモデルでは  $a_x, a_y$  は一般的には  $a_x \neq a_y$  である. そのためこのモデルは散逸が異方的であるという特徴を持っている. また境界条件は  $x, y$  方向共に周期境界条件であり, 粒子数は両種類とも同じ数だけあるとしている.

またオーダーパラメーターは次のように定義している. まず粒子直径の長さの間隔で  $x$  軸と平行に引いた直線によって空間を  $N$  個に分割する. 分割された領域  $i$  内に存在する  $x$  軸の正方向に駆動される粒子数  $n_i^+$  と負方向に駆動される粒子数  $n_i^-$  から各時刻での  $\phi(t)$  とその時間平均  $\Phi$  を

$$\Phi = \langle \phi(t) \rangle_t, \quad \phi(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|n_i^+(t) - n_i^-(t)|}{n_i^+(t) + n_i^-(t)}, \quad (2)$$

と定義している. このようにオーダーパラメーター  $\Phi$  は 0 から 1 までの値をとりレーンが形成されるときに 1 に近づくよう定義されている.

$a_x = 1.0$  で area fraction が 0.79 の時,  $a_y$  を 0 から 1 まで,  $V_0$  を 1.0 から 30.0 までの間で測定したオーダーパラメーター  $\Phi$  を図 1 に示す.  $V_0$  が 2 以下の部分など図 1 の背景を暗くしている部分は粒子の動きがせき止められた結果  $\Phi$  が小さな値となっている部分を示している. 一方, 粒子の動きがせき止められることなく運動している場合についてみると,  $V_0$  が小さく  $a_y$  が大きいときにレーンが形成され,  $V_0$  を増加させたり  $a_y$  を減少させることにより  $\Phi$  が減少しレーンが形成されなくなっていることが分かる. また  $a_y = 4.0$  と  $a_y = 1.0$  の部分を取り出した図 (図 2) に見られるように  $a_y = 1.0$  のときには  $\Phi$  は  $V_0$  を増加させるにしたがって徐々に減少しているが  $a_y$  がある程度小さくなると  $V_0$  の増加に対して  $\Phi$  が急激に減少する部分が現れる.

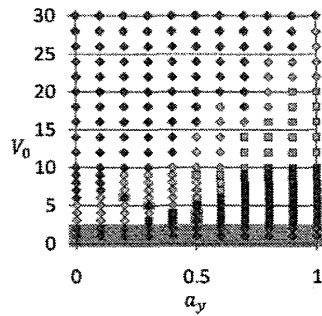


図 1:  $V_0, a_y$  を変化させたときの  $\Phi$ . それぞれの点は  $\Phi$  の値  $\diamond$ :0.00-0.25,  $\diamond$ :0.25-0.50,  $\square$ :0.50-0.75,  $\square$ :0.75-1.00 を表している.  $a_x = 1.0$ , area fraction は 0.79

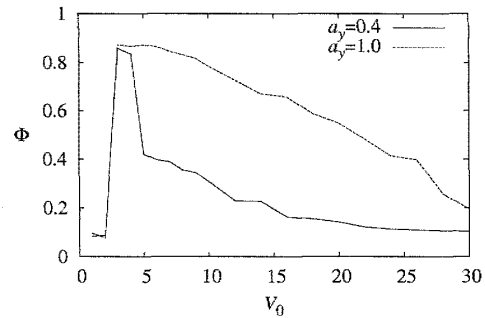


図 2:  $a_y = 0.4$  および  $a_y = 1.0$  のときの  $\Phi$ .  $a_y = 0.4$  では  $V_0 = 4.0$  から  $5.0$  の間で  $\Phi$  の急激な変化が見られる.

$\Phi$  の緩やかな減少が見られた  $a_y = 1.0$  での  $V_0 = 4.0$  と  $V_0 = 16.0$  の時に形成されるレーンの様子を比べると  $V_0$  が増加に伴ってレーン境界の粒子の混ざり合う部分が広がっている事が分かる. このように  $a_y = 1.0$  の時にはレーン境界の粒子の混ざり合う領域の広がりに応じて  $\Phi$  が減少している. 粒子の混ざり合う領域は  $V_0$  の増加に伴って徐々に広がっていくので  $\Phi$  の減少も緩やかになっている. また粒子が混ざり合う領域が広がりレーンが維持できなくなるほどレーン部分の幅が狭くなるとレーンが形成されず全体的に混ざった状態に移行する.

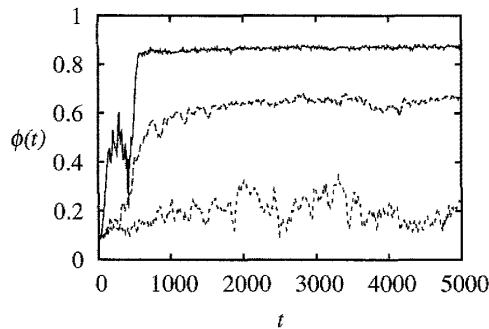


図 3:  $a_y = 1.0$  で  $V_0$  が上から順に  $4.0$ ,  $16.0$ ,  $30.0$  の時の  $\phi(t)$ .  $V_0$  の増加に伴って  $\phi(t)$  は全体的に減少している.

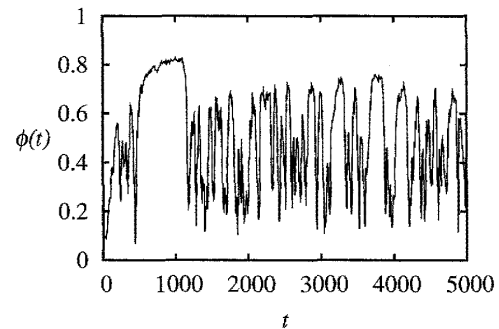


図 4:  $a_y = 0.3$ ,  $V_0 = 4.0$  の時の  $\phi(t)$ . 一定時間  $\phi(t)$  が大きめの値をとる部分が何箇所も見られる.

$a_y = 1.0$  の時のように粒子の混ざり合いの効果で  $\Phi$  が減少している時には図 3 のように  $\phi(t)$  は時間に寄らず全体的に減少している. ところが  $a_y = 0.3$ ,  $V_0 = 4.0$  の時 (図 4) のように  $\Phi$  が急激に減少していた辺りでの  $\phi(t)$  の時間変化を見ると  $\phi(t)$  が一時的に大きな値を維持している部分と  $\phi(t)$  が激しく変化している部分がある. これは一時的にレーンが形成されても安定化せずに壊れてしまう現象が起こっているからである. このように  $\Phi$  の値の変化がレーンの不安定性による場合にはレーンが安定な領域と不安定な領域との間で  $\Phi$  の急激な変化が見られることが分かった.