

# 変形移動体群の一方向流れでの凍結転移

桑島 涼太, 今西 康人, 益子 岳史, 長谷 隆  
静岡大学工学部機械工学科

## 概要

正方格子上を一方向に移動する変形移動体群のチャンネル流れに関するモデリングとシミュレーションを行う。3サイト以上の長さをもつ変形移動体流れでは密度がある臨界密度を越えると凍結転移を起こす。また8サイト以上の長さの変形移動体では自己絡み合いによって一個の移動体のみでも凍結する。変形移動体流れと非変形移動体流れの比較も行う。

## Freezing transition in unidirectional flow of deformable objects

Ryota Kuwajima, Yasuhito Imanishi, Takashi Mashiko, Takashi Nagatani  
Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University

## Abstract

We present the lattice gas model for the unidirectional flow of self-driven deformable objects. We study the dynamical states and transitions for the traffic flow of deformable objects. When the density is higher than the critical value, the freezing transition occurs for deformable objects with sizes 3-7. A deformable object with size over 8 makes a stationary cluster by self-entanglement. We compare the traffic flow of deformable objects with that of rigid objects

### 1 緒言

近年、通勤ラッシュや交通渋滞問題について多くの関心が持たれ、歩行者や車の挙動をシミュレーションする研究が行われてきた[1,2]。しかしながら、近年の機械技術の急速な発展に伴い、ロボット、フォークリフト等の移動機械群に関しても渋滞の回避が重要な問題となっている。

本研究ではへび型ロボット等を想定した変形移

動体を正方格子上でモデル化し、変形移動体群の一方向流れに関するシミュレーションを行い、変形移動体群の挙動並びに渋滞転移に関する研究を行う。また変形移動体群の流れを非変形移動体群の流れと比較する。

### 2 変形移動体モデル

変形移動体群として正方格子上を移動する変形可能な多粒子バイアスランダムウォークモデルを

用いる。一個の変形移動体は正方格子上で連結した複数個の粒子から構成される。変形移動体の先頭粒子は空の最近接格子点に移動し、それに続く後続粒子はそれぞれの前方粒子が占めていた格子点に移動することとする。先頭粒子の最近接サイトには少なくとも1つの粒子が存在するため、先頭粒子の移動可能な方向は最大でも3方向である。移動体群をxの正方向へ流すためにxの正方向にドリフトを与える(ドリフト係数をDとする)。

移動体の遷移確率は以下ようになる。

(a)移動体先頭粒子の最近接格子点のうちxの正方向を含めた3サイトが空いている場合

$$x \text{ の正方向への遷移確率: } \left( D + \frac{1-D}{4} \right) \left( \frac{1}{1 - \frac{1-D}{4}} \right),$$

$$\text{他方向への遷移確率: } \left( \frac{1-D}{4} \right) \left( \frac{1}{1 - \frac{1-D}{4}} \right).$$

(b)移動体先頭粒子の最近接格子点のうちxの正方向以外の3サイトが空いている場合の遷移確率は1/3。

(c)移動体先頭粒子の最近接格子点のうちxの正方向を含めた2サイトが空いている場合

$$x \text{ の正方向への遷移確率: } \left( D + \frac{1-D}{4} \right) \left( \frac{1}{1 - \frac{1-D}{2}} \right),$$

$$\text{他方向への遷移確率: } \left( \frac{1-D}{4} \right) \left( \frac{1}{1 - \frac{1-D}{2}} \right).$$

(d)移動体先頭粒子の最近接格子点のうちxの正方向以外の2サイトが空いている場合の遷移確率は1/2。

(e)移動体先頭粒子の最近接格子点のうち1サイトしか空いていない場合の遷移確率は1。

並進移動体が図1(a)の様に平行移動するのに対し、変形移動体は図1(b)の様に先頭粒子が空いている格子に移動して後続粒子がそれに追従することにより障害物を避けながら移動する。

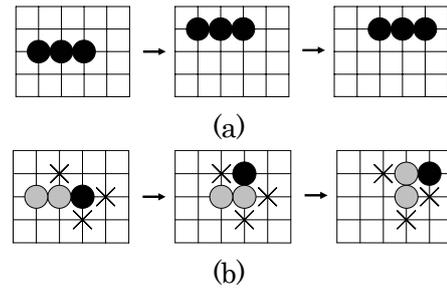


Fig.1. (a) Rigid object. (b) Deformable object.

### 3 シミュレーション方法

図2のような長さL(=100sites),幅W(20 sites)のチャンネル内に、先頭粒子を黒丸、後続粒子を灰色の丸とした移動体をランダムに配置し、移動規則に従って移動させる。周期境界条件を用い、移動体がチャンネル出口に到達した場合は入り口に再配置する。定常状態に到達するまでシミュレーションを繰り返し、流量・平均速度等を求める。移動体のサイズ、ドリフト等を変えてシミュレーションを行う。

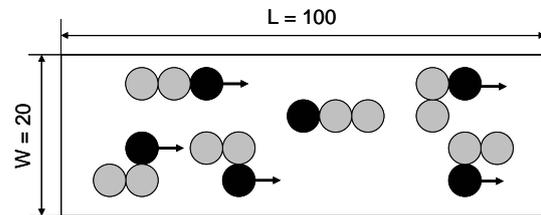


Fig.2. Unidirectional flow of self-driven deformable objects.

### 4 シミュレーション結果

変形移動体群の平均速度、流量を以下のように定義する。

$$\text{平均速度} = \left( \frac{\text{前進移動体数} - \text{後退移動体数}}{\text{移動体数} \cdot \text{時間}} \right)$$

$$\text{流量} = \left( \frac{\text{前進移動体数} - \text{後退移動体数}}{\text{通路面積} \cdot \text{時間}} \right)$$

シミュレーションから得られた流量を密度に対してプロットしたものを図3(a)、平均速度を密度に対してプロットしたものを図3(b)に示す。それぞれの曲線は移動体サイズが1, 2, 3, 4, 5, 6, 7,

8 での結果である。移動体のサイズが 1 と 2 の場合、移動体群の流動特性は変形を考慮しない移動体群流れの特性と一致し、凍結転移は起こらない。移動体サイズが 3 と 4 の場合は低密度領域において密度の増加に伴い流量が増加するが、密度 0.4 を越えると流量が急激に減少し、密度 0.5 で流量、速度がゼロになる。この転移密度より高い密度では、変形移動体が数個絡み合って静止クラスタを形成し、この静止クラスタを核として移動体群が凍結し始め、より大きなクラスタへと成長し、やがてチャンネルをせき止め、すべての移動体群は凍結する。移動体サイズが 5, 6, 7 の場合は 3, 4 の場合と同じような傾向を示すが、転移点密度がさらに低くなる。移動体サイズが 8 以上の場合はさらに転移点密度が小さくなる。

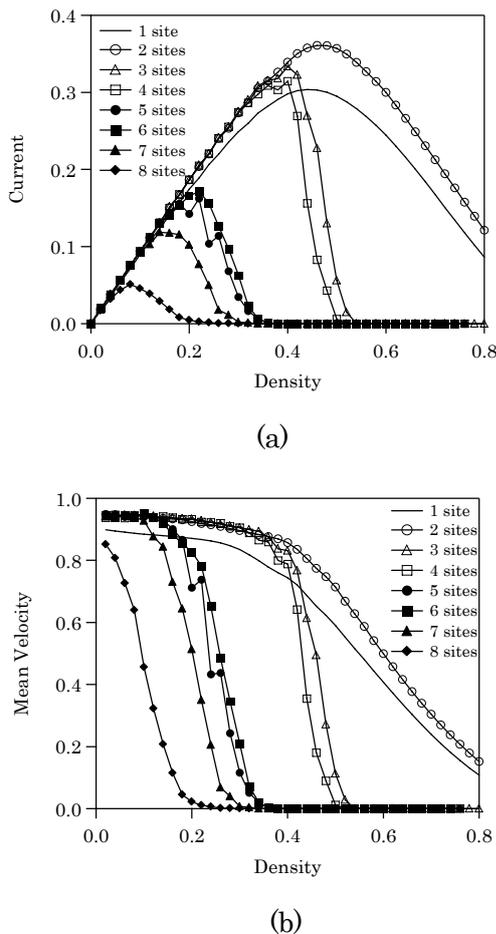
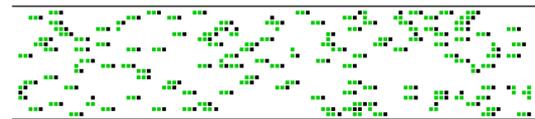


Fig.3. (a) Plots of current against density.

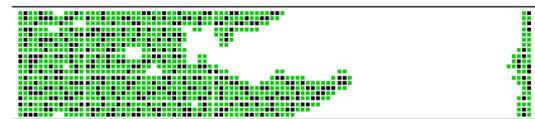
(b) Plots of velocity against density.

図 4 に移動体サイズ 3 におけるパターンを示す。

図 4(a)は密度  $\rho=0.2$ , 図 4(b)は密度  $\rho=0.5$  におけるパターンである。パターン(a)では移動体群はスムーズに流れているが、密度  $\rho=0.5$  のパターン(b)では、すべての移動体が静止して通路をせき止めている。図 5 に密度  $\rho=0.5$  におけるパターンの時間変化を示す。初期に形成された小さな静止クラスタが核となってより大きなクラスタを形成していく。

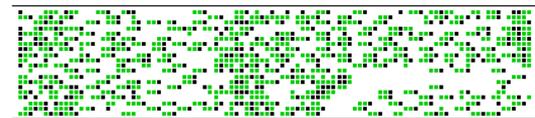


(a)  $\rho=0.2$   $t=30000$

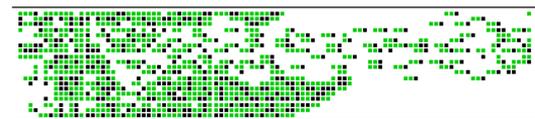


(b)  $\rho=0.5$   $t=30000$

Fig.4. Patterns at (a)  $\rho = 0.2$  and (b)  $\rho = 0.5$  at  $t=30000$ .



(c)  $t=2000$



(d)  $t=2500$



(e)  $t=3500$

Fig.5. Time evolution for pattern in Fig. 4(b).

## 5 初期静止クラスタ

凍結転移を引き起こす核となる初期静止クラスタの構造を調べる。まず、移動体サイズ 3 の場合、図 6(a)のように、粒子が 4 つ集まり卍型になるこ

とにより、静止クラスタを形成する。図 6(b)の移動体サイズ 4 の場合も 4 つの移動体で静止クラスタを形成する。次に、移動体サイズが 5 の場合、図 6(c)のように 2 つ以上の移動体で静止クラスタを形成する。図 6(d), 図 6(e)の移動体サイズ 6, 7 の場合も 2 つ以上の移動体で静止クラスタを形成する。

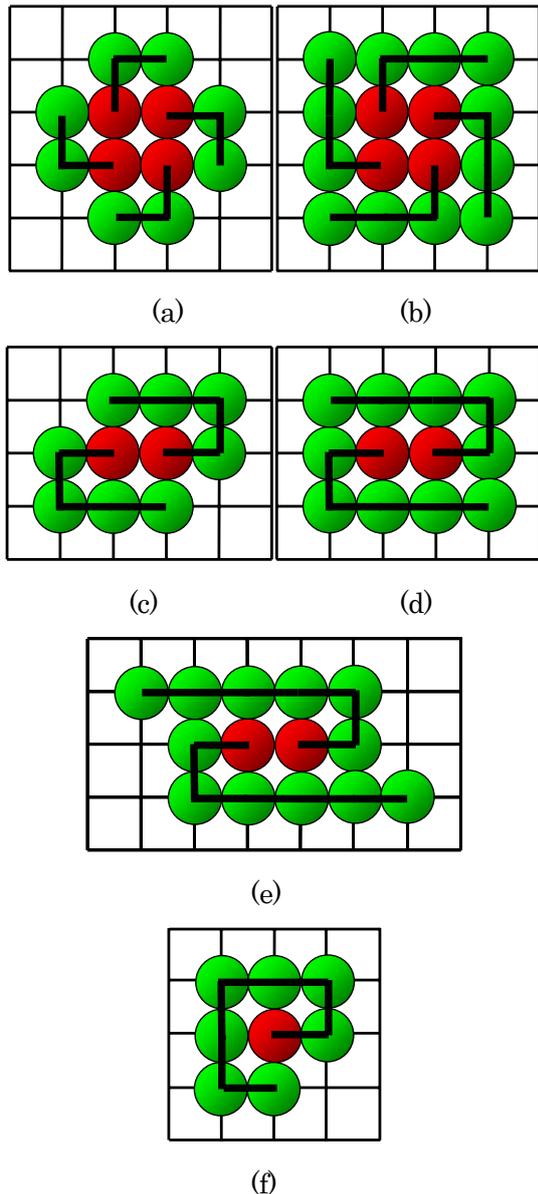


Fig.6. Static clusters for deformable objects with (a) size 3, (b) size 4, (c) size 5, (d) size 6, (e) size 7, and (f) size 8.

最後に移動体サイズ 8 の場合、図 6(f)のように 1 つの移動体で静止クラスタを形成する。このよう

に、静止クラスタを形成する移動体の数の違いによって凍結転移密度が変化するものと考えられる。

ドリフトの影響を調べる。異なるドリフトを与えた時の流量を密度に対してプロットしたものを図 7 に示す。ドリフトの値の増加と共に流量と転移点密度が大きくなる。

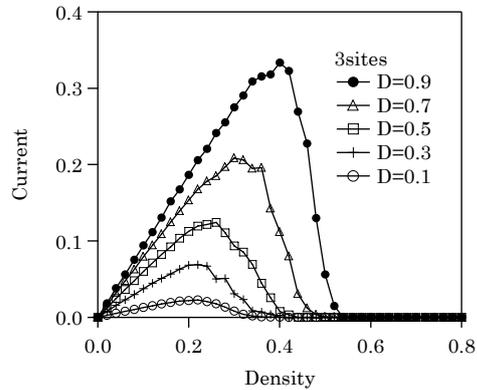


Fig.7. Plots of current against density for  $D=0.1-0.9$ ,

## 6 結言

変形移動体群の一方向流れのモデリングとシミュレーションを行い、以下の結論を得た。

- サイズ 3 以上の変形移動体群のチャンネル内流れにおいて、密度が臨界密度を越えると凍結転移が起こることを見出した。
- この凍結転移は変形移動体が数個絡み合っで静止クラスタを形成し、これが核となってクラスタ成長が始まり、チャンネル全体をせき止める事により起こることを明らかにした。

## 参考文献

- [1] 西成活裕 「渋滞学」 新潮選書 (2006)
- [2] R. Nagai, T. Nagatani, Physica A 366 (2006) 503.