

個体の変形性により大きく変化する集団の挙動

工学領域 機械工学系列 准教授 益子 岳史

はじめに

ニュートンの運動法則(※1)に従わずに運動する自己駆動体の集団は、自動車や歩行者の交通流、群衆避難、動物の群れなど、様々な系が盛んに研究されてきた。従来の研究では、各個体を剛体として(多くは排除体積効果のみを持つ粒子として、まれにサイズや形状の効果をも考慮した物体として)モデル化しており、変形性を持つ自己駆動体の集団はほとんど調べられていない(※2)。

本研究は、**個体のミクロな性質である変形可能性が集団のマクロな性質にどのような影響を及ぼし得るのか**を調べることを目的とし、単純なモデルに基づく数値シミュレーションを実施する。

※1)ニュートンの運動の3法則
 1) 第1法則(慣性の法則): 質点は外力が働かない限り静止または等速直線運動をする。 Cf. 信号が赤から青に変わると、停止していた自動車が外力を受けていないのに発進する。
 2) 第2法則(運動方程式): 質点の加速度は外力に比例し、質量に反比例する($a = F/m$)。 Cf. 外力を受けていなくても自動車が加速・減速したり、歩行者が歩く方向を変えたりする。
 3) 第3法則(作用・反作用の法則): 二つの質点間に相互に働く力は、大きさが等しく逆向きである($F_{12} = -F_{21}$)。 Cf. 警官を見かけた泥棒が脇道に隠れるのに、警官は泥棒に影響されずそのまま歩いてくる。
 ※2) 単一の変形可能な自己駆動体については、Reptation, SAW, TSAW, IGSAW, SKW, LRW, KGWなど多くのモデルにより研究されている。

モデル^[1]

本研究では**鎖状移動体(Flexible Chainlike Walker, FCW)モデル**を提案し、FCWの集団挙動を調べる。
 ・長さ l のFCWは/粒子の連結体で、先頭粒子が方向を確率的に選択して移動し、後続粒子が追従する(図1)。
 ・ $l=1$ のFCWはランダムウォーカーと等価、すなわち、FCWモデルはランダムウォークの拡張モデルである。
 ・ $l \geq 3$ の時に**FCWは変形性を持つ**($l=2$ では向きの要素を持つが変形性は持たない)。

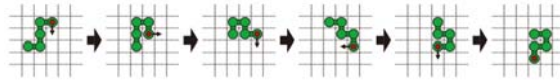


図1 FCWの移動例($l=5$)。

変形可能な自己駆動体にもみられる集団現象の例

1. 自発的で不可逆な凝集^[1]

【シミュレーション】

N 体のFCWを一辺 W 格子の正方形領域(周期境界)内のランダムな位置に初期分布した後、移動を開始する。
 ・粒子密度 $\rho = N/W^2$
 ・移動度 $M(t) = N_{\text{mov}}(t)/N$ ($N_{\text{mov}}(t)$: 時刻 t で実際に移動したFCW数)。

【結果】

$M(t)$ の $t \rightarrow \infty$ における漸近値 M_∞ の ρ 依存性は、FCWの長さ l により大きく異なる(図2)。

- ・ $l=1, 2$: M_∞ は ρ の増加とともに線形的に減少する。
- ・ $l=3, 4$: ある ρ において高 M_∞ の状態から $M_\infty \sim 0$ の状態へ急激に転移する。
- ・ $l \geq 5$: ρ によらず $M_\infty \sim 0$ の状態となる。

特に、**変形性のある場合($l \geq 3$)に限り $M_\infty \sim 0$ の状態が実現する(図3)**。この自発的で不可逆な凝集は、**従来のモデルによる凝集とは全く異なるメカニズムによる新たな現象(※3)**である。なお、FCW同士の絡み合いを考慮することにより、シミュレーションの結果を定性的に説明することが可能である。

※3) 従来のモデル(Eden, Ballistic Aggregation, Diffusion-Limited Aggregation他)は全て要素間の接着力を仮定しており、これが凝集の発生と不可逆性に不可欠である。本研究においてはFCW間に接着力を一切仮定しておらず、凝集は個体の変形性に起因する。

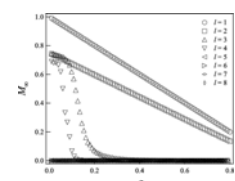


図2 移動度 M_∞ と粒子密度 ρ の関係。

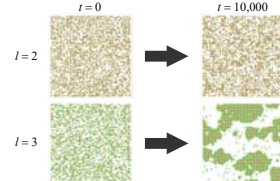


図3 FCW分布の時間変化。

2. 完全渋滞への凍結転移^[2]

【シミュレーション】

輸送系を実現するために、FCWの移動において、先頭粒子の移動方向の選択確率に**バイアス**を導入する。

$$p_{\pm x} = D + (1-D)/4, \quad p_{\pm y} = p_{\pm z} = (1-D)/4 \quad (0 \leq D \leq 1)$$

N 体のFCWを長さ L 、幅 W 格子の通路(周期境界)内のランダムな位置に初期分布した後、移動を開始する。

- ・粒子密度 $\rho = N/LW$
- ・平均速度 $v(t) = (n_+(t) - n_-(t))/N$ ($n_{\pm}(t)$: 時刻 t で $\pm x$ 方向に移動した粒子数)。
- ・正味流量 $Q(t) = \rho v(t) = (n_+(t) - n_-(t))/LW$

【結果】

変形性を持つ $l \geq 3$ のFCWの系では完全渋滞(速度・流量ゼロの状態が永続)が発生する一方、変形性を持たない $l \leq 2$ のFCWや棒状移動体(Rigid Rod-like Walker, RRW)では完全渋滞が観察されない(図4, 5)。ここで示す現象は、**最も単純な輸送系(正味一方向で障害物なし)では初めて報告された完全渋滞(※4)**である。

※4) 従来報告されていた完全渋滞は、複数の流れ(対向流、交差流)や障害物がある系についてのものである。

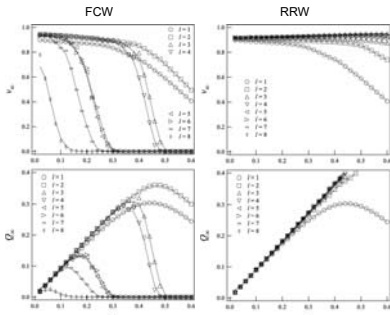


図4 平均速度 v_{avg} 、正味流量 Q_{net} と粒子密度 ρ の関係。

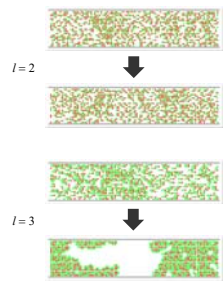


図5 FCW分布の時間変化。

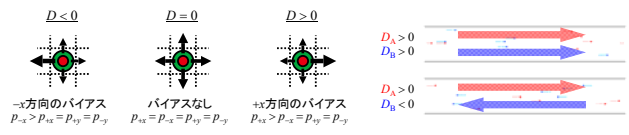


図6 バイアスとドリフト係数。

図7 同方向流(上)と逆方向流(下)。

3. 対向流による輸送促進^[3]

【シミュレーション】

ドリフトの方向と強度(D_A, D_B)の異なる2群A, Bの混合系($N_A = N_B, l_A = l_B$ とする)で上記2と同様に実施する。A群のバイアスは $+x$ 方向($0 < D_A \leq 1$)、B群のバイアスは $+x$ または $-x$ 方向($-1 \leq D_B \leq 1$)とする(図6, 7)。

【結果】

変形性を持つFCWの逆方向流系で、剛体系($l \leq 2$ のFCWやRRW)にはない特異な現象が観察された(図8)。

- ・ $D_B > 0$: 同方向流Bが強いほど($|D_B|$ が大きいほど)A群の流量 Q_A が大きい(剛体系と同じ結果)。
- ・ $D_B < 0$: 逆方向流Bが強いほど($|D_B|$ が大きいほど)A群の流量 Q_A が大きい(剛体系と逆の結果)。

→ **弱い同方向流と共存するより強い逆方向流と共存する方が流量 Q_A が大きい**。

なお、FCW同士の絡み合いを考慮することにより、この結果を定性的に説明することができる。

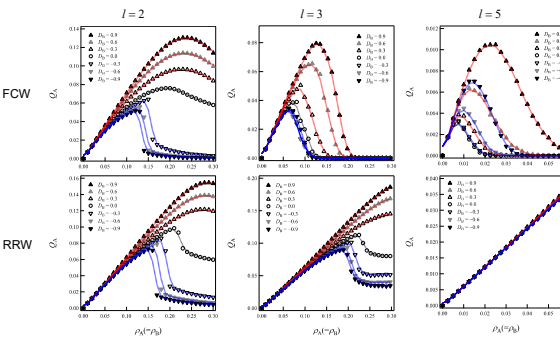


図8 正味流量 Q_{net} と粒子密度 ρ の関係。

まとめ・今後の応用

自己駆動体の多体系では、個体が変形性を持つだけで特異な集団現象が発生することを、単純なモデル系のシミュレーションで示した。このことは例えば、**ヘビ型ロボットのような変形性を持つロボットの群れが、通常のロボット群にはない特長を有する強力なシステムとなる可能性を示唆する(図9)**。また、FCWの両方向性の影響の調査(※5)や非格子空間における研究(※6)を進展させることにより、**高分子物理や化学・生物現象の解明につながる可能性がある**と考えている。

※5) FCWの先頭粒子と末尾粒子を可換とすると、自発的で不可逆な凝集は発生しなくなる^[4]。

※6) FCWモデルの非格子空間への拡張(図10)とシミュレーションで以下の結果を得ている^[5]。

- ・格子の除去により、個体の変形性がない場合にも不可逆凝集が発生し得る。
- ・柔軟度 F の増加に伴い、移動度 M_∞ は増加し、凝集しにくくなる。($F = Q_{\text{max}}/\pi$)
- ・摂動度 P の増加に伴い、移動度 M_∞ は低下し、凝集しやすくなる。($P = \rho_{\text{max}}/\pi$)

文献

[1] T. Mashiko, Phys. Rev. E 78, 011106 (2008).
 [2] T. Mashiko et al., Physica A 388, 3202 (2009).
 [3] T. Mashiko et al., Phys. Lett. A 380, 3490 (2016).
 [4] T. Mashiko, Open Transp. Phenom. J. 1, 3 (2009).
 [5] T. Mashiko et al., J. Comput. Sci. Comput. Math. 6, 45 (2016).

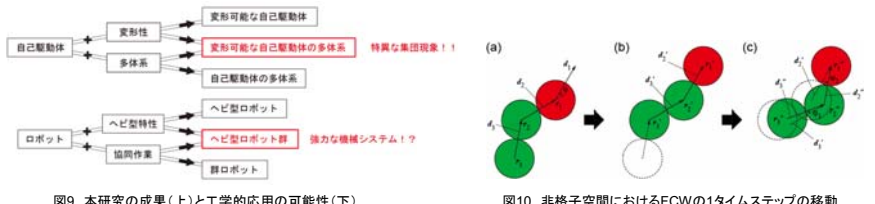


図9 本研究の成果(上)と工学的応用の可能性(下)。

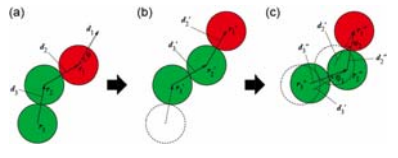


図10 非格子空間におけるFCWの1タイムステップの移動。

keyword: 自己駆動体, 集団現象, 変形性, 創発, 複雑系