

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800216

研究課題名(和文)非格子鎖状移動体モデルによる変形可能な自己駆動体の集団現象の研究

研究課題名(英文)Study of the collective behavior of deformable self-driven objects based on the off-lattice flexible chainlike walker model

研究代表者

益子 岳史(Mashiko, Takashi)

静岡大学・工学部・准教授

研究者番号：70415917

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：自己駆動体の多体系において個体の変形性が集団現象に及ぼす影響を解明するため、研究代表者が先に提案した鎖状移動体モデルを非格子空間に拡張し、数値シミュレーションを実施した。その結果、空間格子の除去により変形性のない場合にも変形性のある場合と同様の不可逆凝集現象が発生するようになること、変形そのものの大きさを増すと個体の移動が促進されること、形状の揺らぎを増すと個体の移動が抑制されることなどを見出し、これらのメカニズムを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To clarify the effect of the individual deformability on the collective behaviors in a multi-body system of self-driven objects, the flexible chainlike walker model, which the principal investigator proposed earlier, has been extended to an off-lattice space, and numerical simulations have been conducted. It has been found that the elimination of the lattice causes non-deformable objects to aggregate irreversibly as deformable objects do, that the increase in the degree of deformation enhances the mobility of individuals, and that the increase in the fluctuation of form reduces the mobility. Also, the mechanisms of these phenomena have been elucidated.

研究分野：非線型物理学

キーワード：自己駆動体 多体系 非格子

1. 研究開始当初の背景

ニュートンの運動法則によらずに運動する自己駆動体が多数集まった集団には、歩行者、自動車をはじめ様々な例があり、それらの挙動については、近年の活発な研究により多くの知見が得られてきた。しかし、従来の研究では、各個体を最小の排除体積効果のみを持つ「粒子」か、サイズや形状を考慮しても「剛体」として扱うのが普通であった。

研究代表者は 2008 年に、変形性を持つ自己駆動体の簡単なモデルとして鎖状移動体モデルを提案し、自己駆動体の集団における個体の変形性の影響を調査した。その中で「自発的で不可逆な凝集」(引用文献)や「完全渋滞への凍結転移」(引用文献)など、個体の変形性を持つ場合にのみ発生する特異な現象があることを数値シミュレーションにより見出し、個体の変形性が集団現象に大きく影響を及ぼすことを示した。

しかし、上述の研究には、現象が空間格子の異方性や束縛の存在下で発生したものであること、変形は「する」か「しない」かであり変形性の影響を詳細に検討できていないこと、移動の自由度に必然性のない制限があることが問題点として挙げられる。そこで、こうした制約を除去した状況下で、個体の変形性が集団現象に及ぼす影響を詳細かつ系統的に調べることが求められていた。

2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、本研究では、自己駆動体の集団現象において個体の基本特性の一つである変形性が集団現象に及ぼす影響を、空間格子の存在しない状況下で解明することを目的とした。

3. 研究の方法

まず、鎖状移動体モデルを非格子空間に拡張した。鎖状移動体は l 個の粒子の連結体であり、格子系では片端の粒子が移動方向を上下左右からランダムに選択し、他粒子との干渉がなければ後続粒子がそれに追従する形で移動を行う(図1左)。長さが $l=1$ の時、本モデルはランダムウォークモデルに帰着し、また $l=2$ では向きが要素が、さらに $l \geq 3$ で変形性が導入されることがモデルの特徴として挙げられる。ここでは、本モデルを自然な形で非格子空間に拡張し(図1右:上→中)、さらに形状を揺らがせる(図1右:中→下)。この時、変形の大きさの指標として「柔軟度」(図1の θ の最大値を用いて定義)を、また形状の揺らぎの指標として「揺動度」(図1の ϕ_2, ϕ_3 の最大値を用いて定義)をパラメーターとして導入した。

次に、拡張したモデルに基づき、2次元空間において鎖状移動体の非格子シミュレーションを実施した。柔軟度および揺動度をパラメーターとして変化させながら発生する集団現象を観察し、変形性が集団現象に及ぼす影響を調査した。

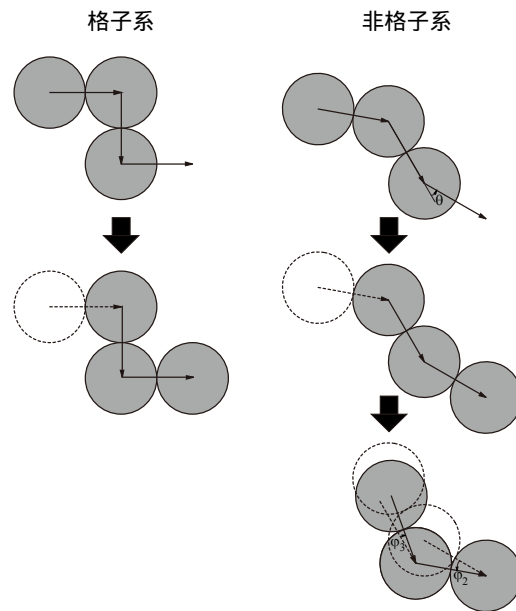


図1 鎖状移動体モデル。
 $l=3$ の場合の一単位時間での移動例。

4. 研究成果

本研究の主な成果は以下のとおりである。

(1) 非格子系での鎖状移動体の基礎的挙動の解明: 非格子空間に拡張した鎖状移動体モデルに基づき数値シミュレーションを実施し、次のことを明らかにした。

格子の除去の影響: 格子の除去により、個体の変形性を持たない場合 ($l \leq 2$) にも、移動体密度 ρ が高い時に自発的で不可逆な凝集が発生し、移動率(移動した個体数の全体に対する比率) M_{∞} がゼロとなる。これは、格子系では個体の変形性がある場合 ($l \geq 3$) のみに凝集が発生していたのと対照的な結果である(図2)。また、この現象は、格子の除去によって移動体同士がより近距離まで接近することが可能となり、その結果、相互に進路を妨害する「阻みあい」の効果が高まるためであることを議論した。

柔軟度の影響: 変形の大きさの指標である柔軟度を増加させると、移動度 M_{∞} が増加して凝集が発生しにくくなる。これは、変形性(図1右の移動方向の転換角 θ) が大きくなることで、移動体同士が正面から接近した際の相互回避が起こりやすくなり、阻みあいが起こりにくくなるためである。

揺動度の影響: 個体の形状の揺らぎの指標である揺動度を増加させると、移動度 M_{∞} が減少して凝集が発生しやすくなる。これは、揺らぎによって再度正面から向き合う可能性が高まり、結果的に阻みあいが発生する確率が高くなるためである。

以上の成果は、非格子系を対象とする本研究の主要な成果であり、招待講演を含む学会発表の他、査読付き論文(採録決定)として発表した。

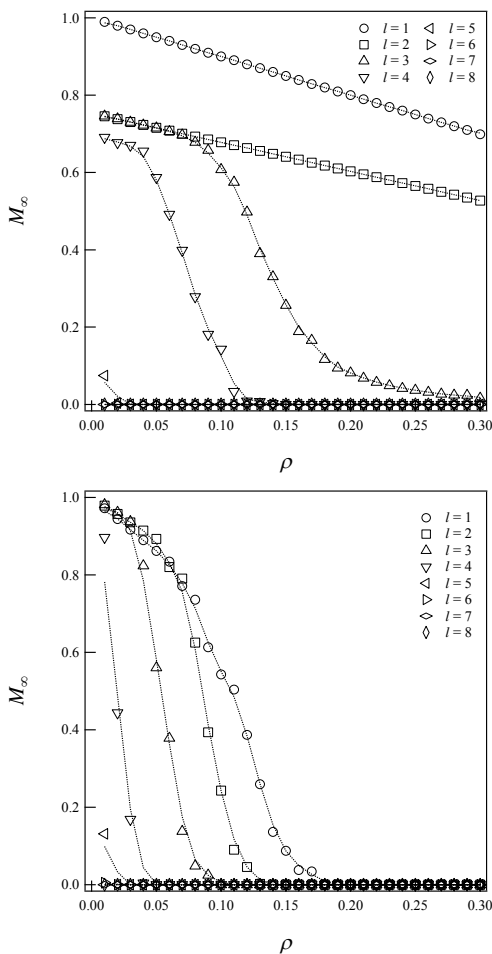


図2 移動度 M_ρ と移動体密度 ρ の関係．格子系（上）と非格子系（下）の結果．

(2) 格子系での鎖状移動体の対向流の特異現象の発見：格子系の現象ではあるが、今後非格子系との比較対象として注目すべき現象を見出した．

ここでは、各個体の移動方向を上下左右から等確率に選択するのではなく、右（あるいは左）を高確率で選択することで、全体として右（あるいは左）への正味の輸送を発生させる．その際、ドリフト係数 D ($-1 \leq D \leq 1$) がこのバイアスの強度を表すものとする ($D = 1, -1$ がそれぞれ右、左向きのもっとも強いバイアス $D = 0$ がバイアスなしの場合に対応)．それぞれドリフト係数 D_A, D_B で特徴づけられる A, B 二群の鎖状移動体を用意し、 D_A は正、 D_B は正または負とすることで、同方向流または逆方向流を実現する (図3)．左右方向に伸びた流路上で A, B 両群の混合系の輸送シミュレーションを実施し、変形性を持たない棒状移動体群の場合と比較したところ、以下のような知見を得た．

まず、同方向流 ($D_A, D_B > 0$) については、棒状移動体でも鎖状移動体でも、A 群の流量 Q_A は、B 群の駆動力の強さ D_B が大きいほど大きくなる．これは、共存する同方向流の駆動力が強いほど流量が増加することを意味しており、直感的に理解しやすい結果である．

一方、逆方向流 ($D_B < 0 < D_A$) については、棒状移動体の場合には、A 群の流量 Q_A は B 群の駆動力の強さ $|D_B|$ が大きいほど小さくなるのに対し、鎖状移動体の場合には、 Q_A は $|D_B|$ が大きいほど大きくなる．さらに、 D_B が正で絶対値が小さい時よりも D_B が負で絶対値が大きい時の方が、 Q_A が大きくなる傾向も見られる (図4)．これは、個体が変形性を持つ場合、弱い逆方向流より強い逆方向流と共存する時の方が、さらには弱い同方向流より強い逆方向流と共存する時の方が、自己駆動体の輸送量は大きくなることを意味する結果である．

また、移動体同士の絡み合いの観点からシミュレーション結果を解析し、観察された現象を次のように説明した．すなわち、A 群の立場から見ると、共存する B 群の流れが同方向か逆方向かによらず、その輸送駆動力が強い ($|D_B|$ が大きい) 場合には、各個体が流路方向に「伸びた」形状を取りやすいために自群 (A 群) の個体との絡み合いが起こりにくく、輸送が円滑に進む．逆に輸送駆動力が弱い ($|D_B|$ が小さい) 場合には、個体同士の絡み合いが起こりやすくなって輸送が阻害され、また一旦絡み合いが発生するとそれが核となって凝集が進行する．したがって、共存流の駆動力が強いほど (その方向によらず)、変形可能な自己駆動体の流量が増加するのである．

この結果は、自発的で不可逆な凝集 (引用文献) や完全渋滞への凍結転移 (引用文献) に加え、変形可能な自己駆動体のみの特異的に発生する集団現象を新たに見出したものであり、結果は論文にまとめ投稿済み (査読中) である．また、今後、非格子系でも同様の輸送系シミュレーションを実施し、(1) で述べた知見と合わせて、変形可能な自己駆動体の集団現象についてさらに追究する予定である．

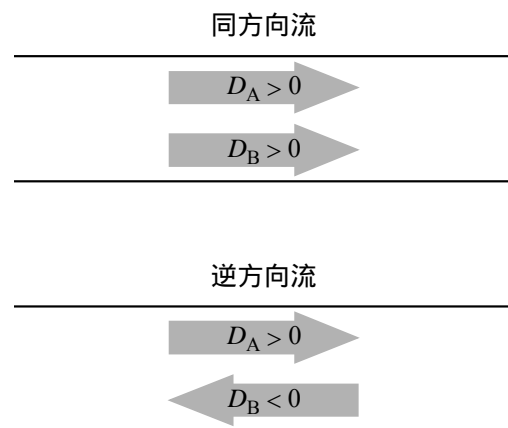


図3 同方向流と逆方向流． D_A を正として A 群の輸送は右方向とする．B 群の輸送は D_B が正なら右、負なら左方向．

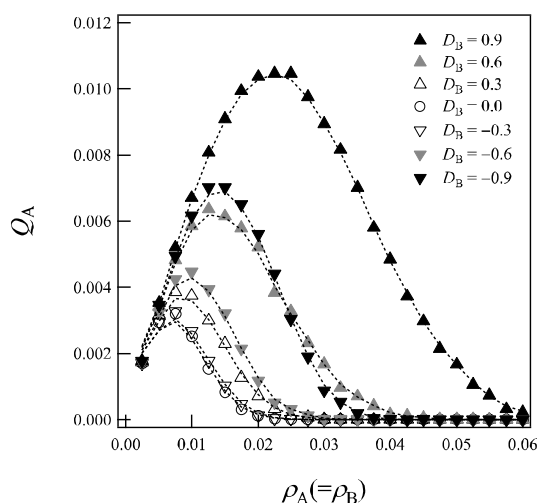


図4 A 群の流量 Q_A と移動体密度 ρ_A の関係。
 $D_A = 0.6$ の場合のシミュレーション結果。

引用文献

Takashi Mashiko, Irreversible aggregation of flexible chainlike walkers without adherence, *Physical Review E* **78** (1), 011106 (2008).

Takashi Mashiko *et al.*, Hardening by softening in a flow of chainlike self-driven objects, *Physica A* **388** (15-16), 3202 (2009).

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Takashi Mashiko and Yasuhiro Fujii, Off-Lattice Behavior of Flexible Chainlike Walkers, *The Journal of Computer Science and Computational Mathematics*, (to appear in June, 2016) <http://www.jcscm.net/cms/> (査読あり, DOI未定).

〔学会発表〕(計5件)

益子岳史, 藤井保宏, 非格子空間における鎖状移動体の凝集現象, 日本物理学会 第71回年次大会, 2016年3月20日, 東北学院大学(宮城県仙台市).

T. Mashiko, On-Lattice and Off-Lattice Behaviors of Flexible Chainlike Walkers, The 3rd International Conference on Mathematical Sciences and Computer Engineering, 2016年2月5日, ランカウイ(マレーシア)【招待講演】.

益子岳史, 藤原敬志, 変形可能な自己駆動体の対向流, 日本物理学会 2015年秋季大会, 2015年9月16日, 関西大学(大阪府吹田市).

T. Mashiko, Peculiar behaviors of deformable self-driven objects, The 14th International Young Scientists Conference Optics and High Technology Material Science, 2013年10月25日, キエフ(ウクライナ)【招待講演】.

T. Mashiko and T. Fujiwara, Mixed flows of deformable self-driven objects, The 12th International Conference on Global Research and Education, 2013年9月23日, ソフィア(ブルガリア).

〔その他〕
 ホームページ等
<http://www.ipc.shizuoka.ac.jp/~ttmasik/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

益子 岳史 (MASHIKO, Takashi)
 静岡大学・工学部・准教授
 研究者番号: 70415917