

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740257

研究課題名(和文)粉粒体層中の泳ぎについてのシミュレーション研究

研究課題名(英文)Simulation study of the swimming in a granular bed

研究代表者

島田 尚 (Shimada, Takashi)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90431791

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：粉体の一番の特徴は、砂時計に代表されるように状況に応じて固体としても流動体としても振る舞う事である。本研究では、このような粉体層中に自発的な変形を繰り返す物体(スイマー)を入れた場合のその物体の推進運動について計算機シミュレーションによって調べた。

特に(1)粉体中でのスイマーの推進方向を変化させるのに最適な形状があることと(2)スイマーが2つ近接している場合に斥け合う向きの相互作用が働く事を発見し、その原因についてある程度の理解を得た。

研究成果の概要(英文)：The motion of a "swimmer" in a granular bed, which sometimes behaves as a solid and sometimes as a fluid, is studied using a molecular dynamics simulation. In particular, it is found that there is an optimum shape of the swimmer to change its swimming direction. It is also found that an effective repulsive interaction acts between the two swimmers moving next to each other. This interaction strongly depends on whether the motions of the two swimmers are in synchronization.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 数理物理・物性基礎

キーワード：粉体 分子動力学シミュレーション 集団現象 レオロジー 非線型 国際情報交換(スイス)

1. 研究開始当初の背景

砂や粉に代表される粉体の最も著しい性質は条件に応じて固体的にも流体的にも振る舞うことであり、この性質により時空間的に非常に不均一な構造をとることが系全体の多様な応答のもととなっている。この基礎となる特異なレオロジーの物理的理解のため、系が比較的均一な場合の研究が着実に進められている。一方で、系内に不均一性があるような場合の多様な現象の各々と向き合うことが重要である。

我々はこのような取り組みの一例として、「粉体中での泳ぎ」という問題に着目してきた。「泳ぎ」については、細菌の泳ぎの様な一見奇妙な泳ぎ方にはそうではなならない物理的理由がある(この場合は低レイノルズ数条件下であること)こと等を鮮やかに問題提起した Purcell のレビュー(1976)以来物理分野において連綿とした研究がある。これらの研究では、流体中に様々な簡単なスイマーモデルを置いた場合の推進方向や効率が必要な研究対象となってきた。実際、上の2つの量はどちらも予見することが簡単ではない。このような“泳ぎの物理”について、周囲の物質が粉体である場合について考えることは新たな挑戦である。

一方でこれまでの粉流体研究に照らせば、このような“泳ぎ”運動はブラジルナッツ効果や反ブラジルナッツ効果等に代表される、「加振条件下での粉体に比べて大きな物体の偏析や運動の問題」等と関係することが予想されながら、粉体層の擾乱が大域的でなくスイマー近辺の局所的であることから新たな発見も期待される興味深い問題と言える。さらには粉体層の中で日常的に“泳ぐ”動物(俗名を sand swimmer という砂漠に住むトカゲの一種)が知られており、“粉体中の泳ぎ”は現実の生物学の対象としてもロボット工学的な問題としても机上の空論でない問題である。しかしながらその物理的な理解についての研究は甚だ不十分であった。

この様な背景のもと、我々は簡単な2次元スイマーモデルを採用して研究を進めてきた。このスイマーは元々ワムシのモデルとして提案されたもので、流体中で効率良く泳ぐ事が示されている。このモデル系において、これまでは主に泳ぎの速度とエネルギー効率という定量的側面に注目した解析を行ってきた。それらの解析から、非自明な最適動作速度が存在する事を発見する事ができた。一方で、方向の制御等のより難しくも興味深い問題が残されていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、粉体層中に置かれた物体に自律的な変形運動を繰り返させたときのその物体の推進運動について基礎的理解

を得ることである。

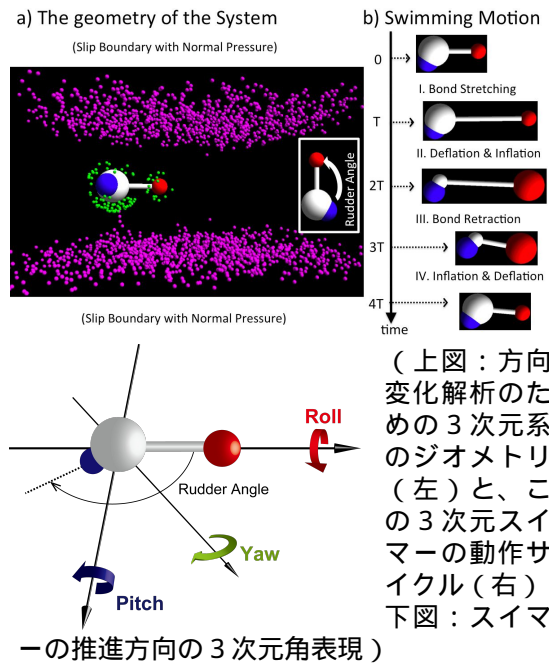
従来の研究では系が2次元であったことが最大の不満足点であるので、三次元系の系統的シミュレーションによりこの課題に取り組む。具体的には、

- (1) 粉体中での推進運動の方向変化の最適な方法(曲率とエネルギー効率の観点から)
- (2) スイマーが複数個存在する場合のスイマー間相互作用

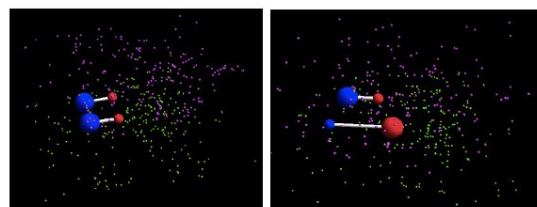
の2点について基礎的な理解を得ることを目的とした。

3. 研究の方法

(1)「最適な方向変化の研究」については、下図のような3次元スイマー系を用いた。このスイマーは以前からの研究で用いてきたモデルに舵(青色部分)を持たせたもので、この舵部分の大きさと取り付け角(Rudder Angle)を系統的に変えて望みの変化方向であるYawの変化について最適なものを探した。



(2)「スイマー間の相互作用」については、下図のような舵の無いスイマー2体を並べた系について系統的なシミュレーションを行った。その際、両スイマーの変形運動の位相が揃っている場合(左)と互いにずれている場合(右)があり得るのでこれらの各場合について調べた。

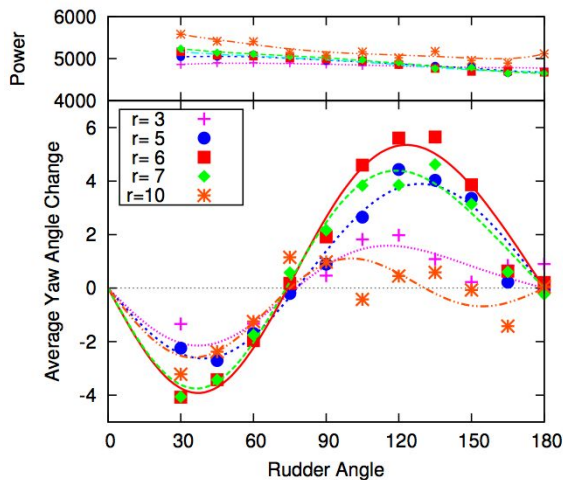


(スイマー間相互作用解析のための、2体スイマー系の配置図)

4. 研究成果

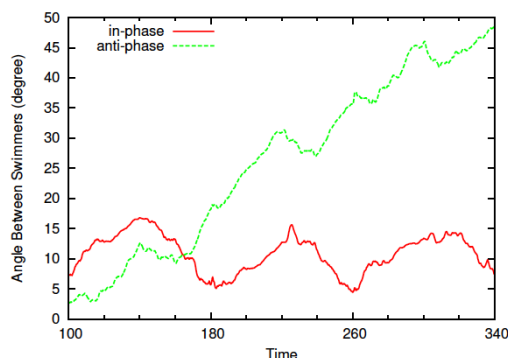
本研究期間中に挙げた成果は以下の通りである。

- (1) 粉体中での方向変化のための最適形状については、3 項(1)で説明したシミュレーション系の解析結果より下図に示す様な Rudder Angle と実際の角度変化率との関係を得る事が出来た。この結果から、例えば、最急に方向を変化させるためには舵の角度を 120 度近辺にすることが良い事、またこのターン運動に必要なエネルギーは直進時とほぼ変わらない事等が分かる。これらの成果については各種学会にて報告(学会発表 A, B, C, F)したほか、投稿論文原稿にまとめた。この論文原稿については、共同研究者との議論の中から「方向変化の精度についてもさらに研究を進め、方向の制御に至った段階まで含んだ論文にする方がより良い」という結論に至り現在再準備中である。



(推進方向変化のスイマー形状依存性)

- (2) スイマー間相互作用については、3 項(2)で説明した様なスイマー 2 体系についてのシミュレーションと解析から、下



図に示す様な相互作用の著しい変形運動位相差依存性を見出す事が出来た。この結果については学会発表等を通じて報告した(論文 ii, 学会発表 H, I, J)。

(図: 2 体スイマーの成す角の変化の時系列。変形運動の位相が揃っている場合

には相対方向の変化はほぼ無いのに対し、位相がずれている場合は互いに離れる向きに方向が変化していくことが分かる。論文 ii より再掲。)

- (3) その他、本研究を進めて行く過程で関連する諸課題にも展開を見た。特に、高密度の群衆運動のモデル研究について粉体系とのアナロジーに基づく解析により歩行者集団の運動方向整列の機構の理解を深める事が出来た(論文 i, 学会発表 D, E, G, K)

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 0 件)

[学会発表](計 11 件)

- A) 島田尚,
“How to swim in sand”,
2012 年物性若手夏の学校 分科会招待講演 (2012/8/8 岐阜)
- B) Takashi Shimada,
“Controlling of swimming in granular bed”,
The 3rd Workshop on Computational and Statistical Physics (2012/10/19 京都リサーチパーク)
- C) Takashi Shimada,
“Controlling of the swimming in a granular bed”,
satellite meeting of STATPHYS 25: Physics of glassy and granular materials (2013/7/16 京都大学基礎物理学研究所)
- D) Takayuki Hiraoka, Takashi Shimada, & Nobuyasu Ito,
“Effect of panic in high density crowd”,
satellite meeting of STATPHYS 25: Physics of glassy and granular materials (2013/7/16 京都大学基礎物理学研究所)
- E) 平岡喬之、島田尚、伊藤伸泰,
“高密度群衆におけるパニックの効果”
日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013/9/25 徳島大学)
- F) 島田尚,
“三次元粉体層中の泳ぎ運動の制御について”,
日本物理学会 2013 年秋季大会 (2013/9/25 徳島大学)
- G) 平岡喬之、島田尚、伊藤伸泰,
“目的地を持たない歩行者の集団運動”
第 19 回交通流のシミュレーションシポジウム (2013/12/16 名古屋大学)

- *i)シンポジウム紀要(オンライン公開、
査読有)
- H) 島田尚,
“粉体中におけるスイマーの2体間相
互作用について”
第19回交通流のシミュレーションシン
ポジウム(2013/12/17 名古屋大学)
- *ii)シンポジウム紀要(オンライン公開、
査読有)
- I) Takashi Shimada,
“Collective motion in sand-swimming
and a stock market”,
2014 Mini Workshop on Networks &
Society (招待講演)
(2014/2/17 Academia Sinica, Taipei)
- J) 島田尚
“粉体層中スイマー間の相互作用につ
いて”,
日本物理学会第69回年次大会
(2014/3/28 東海大学湘南キャンパス)
- K) 平岡喬之、島田尚、伊藤伸泰,
“目的地を持たない歩行者の高密度に
おける集団運動”,
日本物理学会第69回年次大会
(2014/3/28 東海大学湘南キャンパス)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

島田 尚 (SHIMADA Takashi)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号：90431791

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：