

A03 アクティブマターの集団運動としての細胞組織の記述

東北大学・原子分子材料科学高等研究機構 (WPI-AIMR) 義永 那津人

本年度は、自発運動する粒子・液滴間の相互作用に注目して研究を行った。特に、2014年6月中旬から7月中旬にかけて Bristol 大学の Tanniemola Liverpool 教授を訪問した際に本格的にスタートした、「Janus (ヤヌス) 粒子の相互作用」について主に研究を進めた。Janus 粒子とは、最近実験的にも作成できるようになった、一粒子内に表面物性の不均一性を持ったナノメートルからマイクロメートルスケールの粒子である。(図 2(A)) この不均一性により、Janus 粒子はある種の内部自由度を持ち、そのため多粒子の会合体は内部自由度を反映した、例えば、方向の長距離秩序を持つなどして、マクロスケールに新規な物性をもたらすことができる。この Janus 粒子にエネルギーを注入すると、非平衡状態においてさらに興味深い現象を示す。一例として、金で半面をコートした粒子 (図 1(A)) にレーザーを照射すると、金の部分が吸収し発熱することによって粒子の周りに温度勾配を作ることができる。温度勾配、あるいはもっと一般的に、場の量に勾配があるときには、粒子は一方向に運動し、この輸送現象は「泳動」として古くから知られている。外部から勾配を与えて粒子の運動を実現する古典的な泳動現象に対し、Janus 粒子は一様なエネルギー注入によって運動を生み出すことができる(1)。

Janus 粒子は粒子表面の不均一性から、球状であっても方向を持っている。特に、不均一性を球面調和関数で展開することによって特徴付け、0 次を除いた最低次のモードから、前後非対称な流れ場と前後対称な流れ場に対応 $l=1$ モードと $l=2$ モードの二つのモードのダイナミクスに帰着させることができる (図 1(B,C))。が重要な役割を果たす。このモデルは内

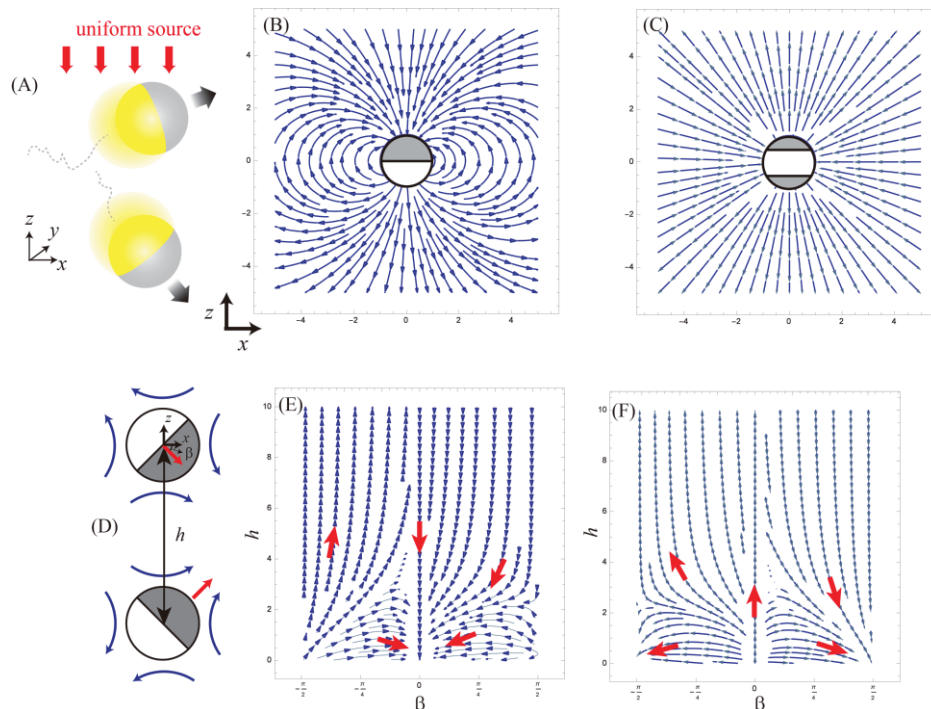


図 1: 自発的に運動する Janus 粒子と周りの流れ場。(A) Janus 粒子の模式図、(B) 1 モードに対応する、下向きに並進運動する時の流れ場、(C) 2 モードに相当する、puller と呼ばれる、進行方向に対して押し出すような流れ場を形成する運動。二粒子間の相互作用の模式図 (D-F)。運動方向を赤の矢印で示す。(E, F) pusher や puller に対応する方程式の力学系としての軌跡。この軌跡に従って粒子は運動する。

部自由度を持っているが、それらの変化は回転によって表現することができる。そのため変形がある場合に比べて比較的シンプルな理論を構築ができると考えこのモデルに注目している。我々は、二粒子間の相互作用を、遠方と近傍に分け、それぞれ計算し適当に内挿することによって一般的な配置における並進速度と回転速度を近似的に導出している。これは、Janus 粒子表面の不均一性に対応した球面調和関数の係数を用いて表現される。孤立した粒子の場合には、1 モードのみで並進運動が記述され、回転運動は存在しないが、相互作用によってモード間の結合が起きる。我々は、各モードの係数の時間発展を球面調和関数の l モードの係数に対応する $2l+1$ 次元のベクトルに対する回転行列を用いて、これらで閉じた時間発展の方程式を導出した。運動方程式は、粒子間の相対位置、相対速度に対する非線形方程式になっているが、現在、運動の力学フローを解析して運動の安定性について調べている。遠方の相互作用のみの場合を図 1(D-F)に示す。

また、変形する液滴の集団運動についても、主に数値計算を用いて解析を進めている (図 2)。我々がこれまで研究を進めてきた、化学反応で濃度場を生成・消費することによって自発運動する液滴のモデルを用いて(2-4)、多数の液滴を入れた時の集団挙動について解析を進めている。二体の場合には、正面衝突の際に広い範囲の衝突角で整列が起きることが分かってきた。また、多数の液滴の場合には、初期状態の乱雑な配置を反映し、決定論的かつエネルギー散逸が起きているモデルであるにもかかわらずランダムな運動をする定常状態に達することが分かった。また、速度分布から実効的な温度を見てみると、これは化学反応の反応速度に比例していることが分かってきている。

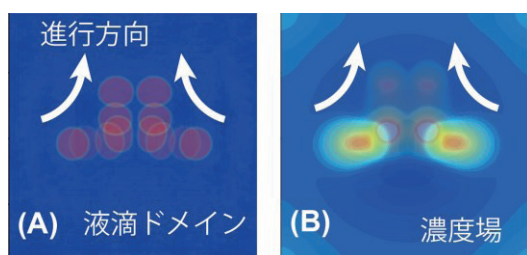


図 2: 自発的に運動する液滴が整列して運動する様子。(左) 個々の液滴の形と位置の変化。(右) 液滴が周りに形成する濃度場。

とめて現在 Physical Review E 誌に再投稿中である。

本年度は無生物系、つまり化学反応を用いた自発運動のモデルに注目して研究を進めてきたが、次年度はより生物系に近づいたモデルへと重心を移していきたい。細胞組織に関しては、早稲田大学の藤枝俊宣が行っている細胞シート内での各細胞の形や配置に関する解析について共同で進めている。細胞シートに外部から等方圧力を加えることによって、各細胞レベル、および細胞集団に対して与える影響について調べている。

参考文献:

- (1) H.-R. Jiang, N. Yoshinaga, and M Sano, *Phys. Rev. Lett.*, **105**, 268302 (2010).
- (2) N. Yoshinaga, *Phys. Rev. E*, **89**, 012913 (2014).
- (3) S. Yabunaka, T. Ohta, and N. Yoshinaga, *J. Chem. Phys.*, **136**, 074904 (2012).
- (4) N. Yoshinaga, K. H. Nagai, Y. Sumino, and H. Kitahata, *Phys. Rev. E*, **86**, 016108 (2012).
- (5) Y. Koyano, N. Yoshinaga, and H. Kitahata, *arXiv:1411.2409* (2014).