

## A03 低レイノルズ数における自己駆動素子の流体効果による集団運動

東北大学大学院理学系研究科 内田就也

本課題では繊毛や鞭毛の流体力学相互作用による集団運動の数理的解明を主テーマとし、アクティブコロイドの流体相互作用による集団運動を副テーマとして研究を進めている。2014年度の研究活動は以下の通りである。

### ・剛体回転子モデルによる繊毛メタクロナル波の発生条件の解析

繊毛のモデルとして研究代表者らが以前提案した、駆動力が位相の関数として周期的に変調する剛体回転子モデルを用いて、回転子の2次元正方格子でのメタクロナル波の発生条件を解析した。集団運動の相図を、円軌道上での駆動力のピーク位置を決める位相  $\delta_1$  と軌道半径と格子間隔の比  $b/d$ 、軌道面の傾き角などをパラメータとして描いた(図1)。2次元系では流体相互作用の異方性により1次元系とは定性的に異なる傾向が得られた。軌道面が平面基盤に対して平行および垂直な場合はメタクロナル波は発生せず、 $45^\circ$  傾いている場合に最も発生しやすいことが分かった。これはゾウリムシやマウス気管の繊毛の軌道が傾いている事実と照らし合わせると興味深い。また駆動力のピーク位置が円軌道の頂上より  $0^\circ \sim 45^\circ$  手前にある場合にメタクロナル波が発生しやすいことが分かった。

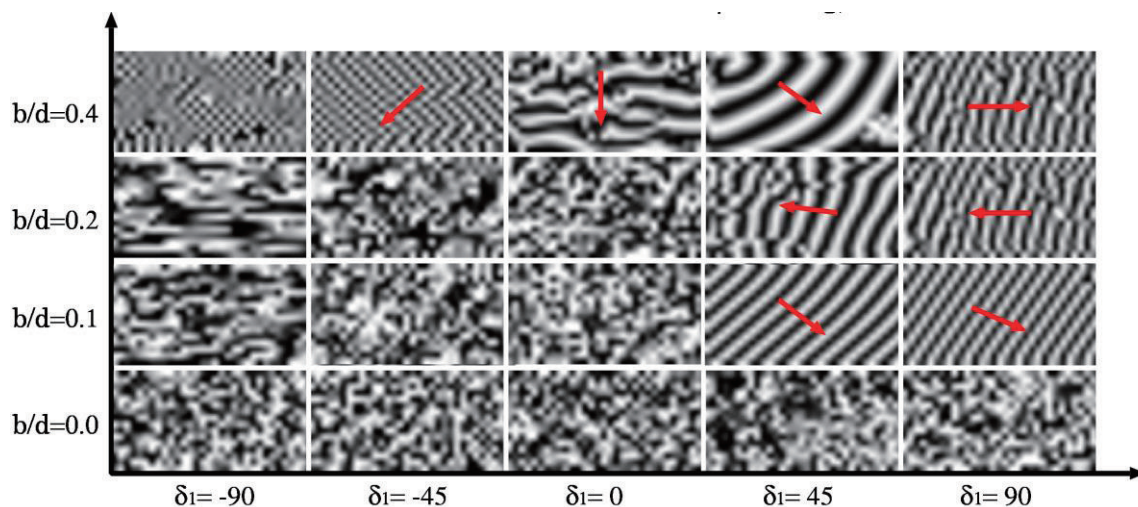


図1. 剛体回転子モデルにおける2次元集団運動の相図。グレースケールは回転子の位相、矢印はメタクロナル波の進行方向を示す。軌道面は平面基盤に対して  $45^\circ$  傾いている。

### ・光駆動コロイドの同期現象の解析

光ツイーザーによって駆動され円軌道上を回転するコロイド粒子の流体相互作用による同期現象の解析を、実験を行っている Pietro Cicuta 氏(ケンブリッジ大学)らのグループと協力して進めた。2つの回転子の駆動力をそれぞれの位相  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  の関数としてフィードバック制御することで、研究代表者らが提案した剛体回転子モデルと等価な実験系が構築されている。本年度は駆動力が倍調波の変調を持つ場合について、各粒子の駆動力がピークとなる位相  $\phi_{1m}$ ,  $\phi_{2m}$  をパラメータとして同期ダイナミクスの変化を調べた。その結果、 $\phi_{1m}$

=  $\phi_{2m}$  の場合は同位相で同期し、同期強度も最大となるという、理論の予測と整合する結果が得られた。一方、 $\phi_{1m} - \phi_{2m} = \pi$  の場合、理論で予測される逆位相同期は見られず、弱い同位相同期が観測された。この差異は、コロイド粒子の運動が円軌道に対して動径方向のゆらぎを持つこと、および回転子の固有駆動速度の差によると考えられるため、これらを取り入れて同期ダイナミクスの再解析を行なった。

#### ・バクテリアカーペットの集団同期転移のモデル作成と解析

2010年に研究代表者らが理論モデルにより予測していたバクテリアカーペットにおける鞭毛の集団同期現象が、Wei-Yen Woon氏（国立中央大学、台湾）らのグループによって観察された(1)。これを受けて研究代表者は2014年9月から同グループと共同研究を開始し、同期シナリオの推定および実験結果との定量的比較を進めている。実験に用いたバクテリアカーペットは *V. alginolyticus* の野生種 VIO5, 変異種 NMB136 およびそれらを混合した単層膜であり、溶液中の  $Na^+$  濃度によって鞭毛の回転速度を制御する。 $Na^+$  濃度が閾値を超えると鞭毛たちが作る流れの速度が急激な増加を見せる。その機構について複数の可能性を検討した結果、これは個々の鞭毛が菌体を支点とする歳差運動をしており、それが集団的に同期する2次相転移的な挙動であると推定した。次に既存の剛体回転子モデルを拡張し、各バクテリア種について鞭毛の回転速度、回転軸の基盤に対する傾き角、歳差運動の半径と速度を測定することでモデルの入力パラメータを定量的に評価した。特に重要なパラメータは鞭毛軸に対する駆動力の角度  $\delta$  であるが、NMB136 に対しては  $Na^+$  濃度によらず  $\delta = 1.1^\circ - 1.4^\circ$  と評価できた。これは集団同期転移が起きるための上限値  $\delta_c = 40^\circ$  に比べて十分小さく、上記シナリオと矛盾しない。

#### ・単一繊毛のビーティング運動のモデル作成と解析

学習院大学の西坂崇之氏らのグループにおいてマウス気管繊毛を用いた繊毛ビーティング運動の高精度3次元測定が可能となり、研究代表者は2014年10月よりこの系の理論解析に協力している。実験ではガラス基盤に接着した繊毛先端に標識用コロイド粒子を付けてビーティングさせ、光ツイスターによるトラップを併用して繊毛先端の変位と駆動力の時系列データを得る。理論モデルとして、ダイニンの滑り運動による駆動力、内部摩擦力、流体抗力、および弾性復元力のつり合いを仮定し、繊毛先端の変位およびダイニンの結合比率を動的変数としたモデルを作成した。流体抗力を slender body theory を用いて評価した結果、その大きさは駆動力の約10%に過ぎないことが判明した。弾性復元力は微小管の曲げおよび繊毛基部のヒンジに由来する。後者の剛性については基盤に対して垂直および平行に荷重を加えた時の変位を測定することで評価した。またダイニンと微小管の接触による内部摩擦力をアクチン・ミオシン系の Tawada-Sekimoto モデルにならって記述した。現時点で得られている実験データからは弾性復元力と内部摩擦力の大きさは同じオーダーであると推定できる。

#### 参考文献:

- (1) Yi-Teng Hsiao *et al.*, Appl. Phys. Lett. **105**, 203702 (2014).