

# 流れによる赤血球、ベシクルの形状転移

東京大学物性研究所・准教授 野口博司

せん断流下での孤立した赤血球、脂質ベシクルの運動モードを研究した。定常せん断流下では、これまで知られている、tank-treading, tumbling, 中間の間欠的な運動、の3つだけでなく、tank-treading と tumbling が同期して起こる運動があることを明らかにした。また、周期的にせん断強度を変動させた場合、赤血球、脂質ベシクルともに、多様な運動が起こることを示した。高周波数では複数の運動モードがリミットサイクルとして共存する。

## 1. 定常せん断流下での赤血球の運動

赤血球、脂質ベシクルが定常せん断流下で tank-treading と tumbling という2種類の運動をすることが古くから、よく知られている。tank-treading でベシクル全体は一定の向き（傾斜角  $\theta$  一定）でいるが、膜と内部液体は回転している。Tumbling ではベシクル全体が回転する。脂質ベシクルについては最近、運動モードの詳細な相図が実験理論の両面から研究されており、傾斜角  $\theta$  と形状が振動する新しい運動モード (swinging) も見つかっている。それに対して、赤血球やマイクロカプセルでは、まだそれほど研究はすすんでいない。

赤血球では、膜にずれ弾性があるため、膜が細胞上を回転するときに、エネルギー障壁が存在する（ディスクの真ん中のくぼんだ部分にあった膜がディスクの端にくると、円周方向に引き伸ばされる）。ごく最近、Skotheim と Secomb がこのエネルギー障壁を考慮した傾斜角  $\theta$ 、膜の回転をあらわす位相角  $\phi$  の

2変数の微分方程式を提案した[1]。

この2変数のモデルと赤血球の形状変化も考慮した3変数のモデルを用いて、赤血球の運動の詳細を調べた[2]。その結果、参考文献[1]で報告されていた間欠的な運動だけではなく、傾斜角  $\theta$  と位相角  $\phi$  の回転が同期する運動モードが中間のせん断強度で見られることが明らかとなった（図1）。赤血球は弱いせん断流ではエネルギー障壁を越えられないので、膜は

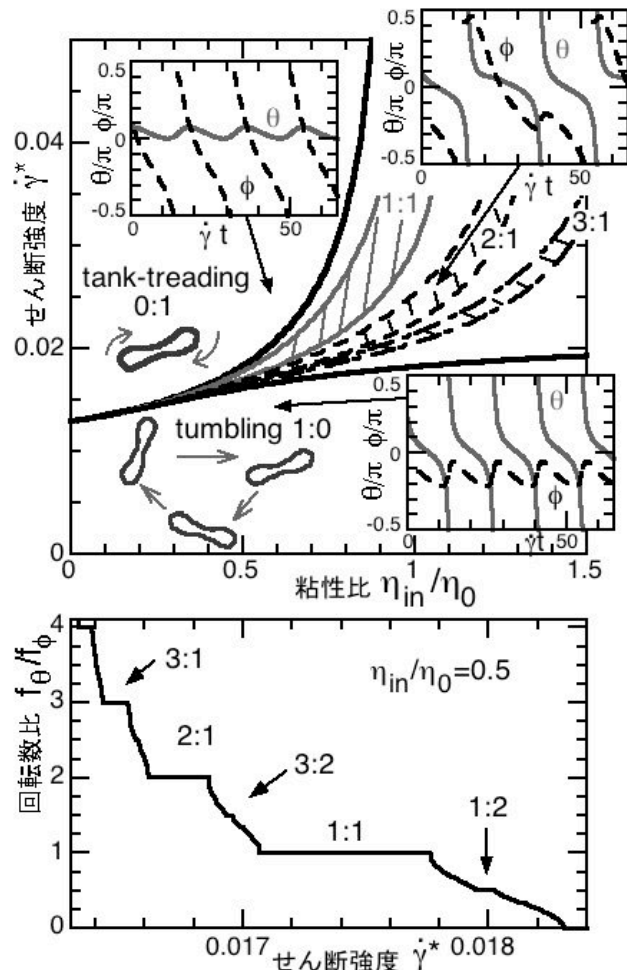


図1。上：赤血球の運動モードの相図。

下：傾斜角  $\theta$  と位相角  $\phi$  の回転数の比。

回転できず、tumbling 運動を行う。せん断強度が大きくなると、小さな粘性比  $\eta_{in}/\eta_0$  では tank-treading 運動に変わる。このとき膜の回転運動を合わせて、形状と傾斜角  $\theta$  は振動する。大きな  $\eta_{in}/\eta_0$  では膜の回転を伴った tumbling 運動になる。このようにせん断強度の増加に伴い、剛体的な運動から脂質ベシクル的な運動に変わる。この転移は連続的なものであるが、位相角  $\phi$  と傾斜角  $\theta$  の運動はカップルするので、周期が整数比の状態への引き込みが起こる。

## 2. 周期的なせん断流下での赤血球、脂質ベシクルの運動

周期的なせん断流中の脂質ベシクル、赤血球の運動を2変数もしくは3変数の現象論的方程式を用いて調べた。低周波の振動流では、定常流で得られるダイナミクス

(Tank-treading, Tumbling, swinging, 中間的な運動) を周期的に繰り返す。周波数が高くなるにつれ、ベシクルの運動の位相がせん断流に比べて遅れていく。追従できなくなる高周波数では複数のリミットサイクル運動が共存することが明らかとなった[3]。図2に脂質ベシクルの小さな粘性比  $\eta_{in}/\eta_0$  (定常流ではTank-treading相で  $\theta = 0.14\pi$ ) での運動を示す。低周波数  $f\gamma^* = 0.001$  では傾斜角  $\theta$  が  $\pm 0.14\pi$  を階段状に交互に入れ替わる。高周波数  $f\gamma^* = 0.25$  では初期状態に依存して2つのリミットサイクル軌道のどちらに引き込まれる。赤血球でも同様の運動が見られる。また、剛体では発展方程式の時間対称性から初期状態の傾斜角  $\theta$  に戻ってくるが、熱揺らぎを加えると特定の傾斜角の振動運動を誘発することが明らかとなった。

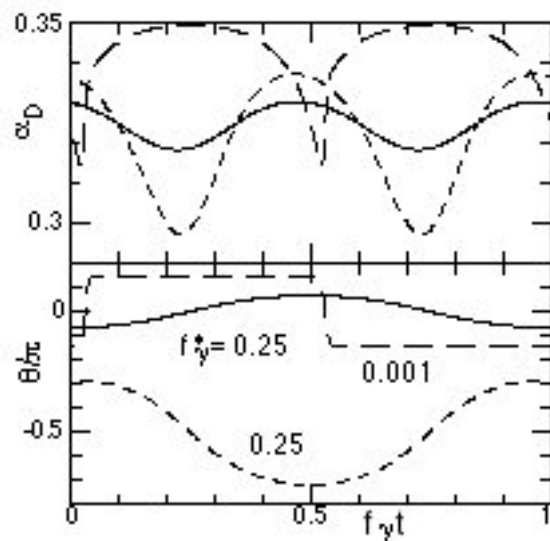


図2. 周期的な振動流下での脂質ベシクルの形状を表すTaylor変形パラメータ  $\alpha D$  と傾斜角  $\theta$  の時間変化。

来年度はこれらの理論研究をさらに発展させるとともに、数値シミュレーションを用いて、複数の赤血球、ベシクル間の流体力学的相互作用[4]、流路幅の変動や分岐のある流路の効果[5]の研究をすすめる予定である。

### <参考文献>

- [1] J. M. Skotheim and T. W. Secomb: Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 078301
- [2] H. Noguchi: Phys. Rev. E 80 (2009) 021902.
- [3] H. Noguchi: J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 024801.
- [4] J. L. McWhirter, H. Noguchi, and G. Gompper: Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. 106 (2009) 6039.
- [5] H. Noguchi, G. Gompper, L. Schmid, A. Wixforth, and T. Franke: EPL 89 (2010) 28002.