

# 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

## 1. 初期の研究目標と実際の研究推進

赤血球は変形することによって、自身の直径より狭い毛細血管中を通過することができる。病気などによって、赤血球の変形能力が下がると、流動抵抗が増加する。理論と数値シミュレーションを用いて、流れの下での赤血球、脂質ベシクルの変形、ダイナミクスを明らかにする目的で研究を行った。本研究では特に、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詳しく調べた。その結果、定常せん断流下で新しい運動モードの存在を明らかにし、膜の曲げ弾性とずれ弾性の比が変わると相図が、定性的に大きく変わることを示した。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明らかにした。

## 2. 研究成果

### 2-1. 定常せん断流下での赤血球、高分子カプセルの運動

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、赤血球や高分子カプセルでは、まだそれほど研究はすすんでいない。

赤血球と高分子カプセルでは、膜にずれ弾性があるため、膜が細胞上を回転するとき、エネルギー障壁が存在する。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 変数のモデルを拡張し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

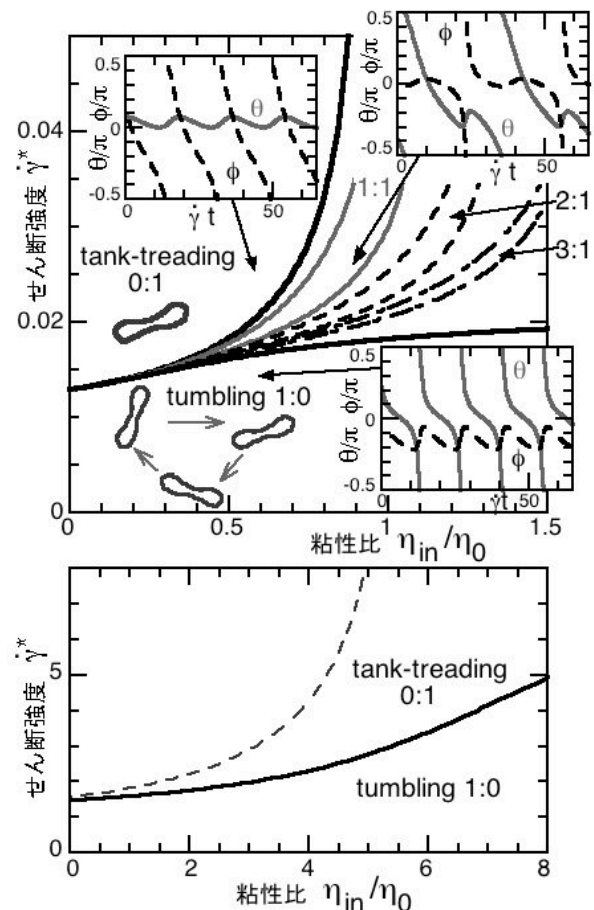


図 1、上：赤血球の運動モードの相図。下：ずれ弾性の大きな高分子カプセルの相図。

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。

その後、高分子カプセルにこのモデルを拡張し、膜の曲げ弾性に対して、ずれ弾性の大きい場合、相図が定性的に大きく変わり、tank-treadingとtumblingが同時に起こる領域がなくなることが明らかにした[3]。シミュレーションで観測されていなかったためにこの共存相は理論のアーチファクトでないかと疑う研究者もいたが、本研究で膜の物性の条件で決まることがわかった。

## 2-2. 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[4]。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かに引き込まれる。赤血球でも同様の運動が見られるが、tank-treadingとtumblingの同期などより複雑な挙動も起こる[5]。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。

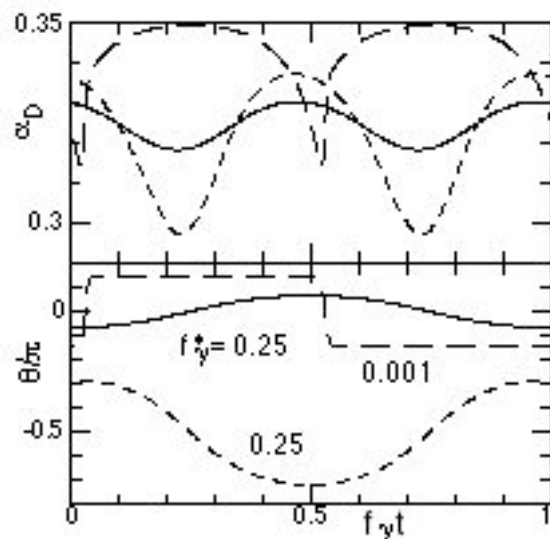


図2: 周期的な振動流下での脂質ベシクル形状を表すTaylor変形パラメータ $\alpha D$ と傾斜角 $\theta$ の時間変化。

### <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: Phys. Rev. E 81 (2010) 056319.
- [4] H. Noguchi: J. Phys. Soc. Jpn. 79 (2010) 024801.
- [5] H. Noguchi: Phys. Rev. E 81 (2010) 061920.