

# 定常および周期的なせん断流下での赤血球のダイナミクス

(東大物性研) 野口 博司

【はじめに】 赤血球は変形することで自身の直径より細い毛細血管をながれることができる。糖尿病などの病気等で赤血球の変形能が落ちると血流に支障が生じる。従って、細胞の変形と運動の仕組みを理解することは、医学的な見地からも重要である。単純せん断流下での赤血球の運動を、理論、シミュレーションを用いて、研究した。

最近、最近、赤血球がこれまで知られていたTank-treading (赤血球は静止していて、膜が回転する) とTumbling (赤血球全体が回転する) という2つの運動モードだけではなく、新しいモードがあることが報告された[1, 2]。せん断強度 $\dot{\gamma}$ の増加に伴い、TumblingからTank-treadingに転移するが、転移点のすぐ近くTank-treading相では赤血球の形と傾きの角度が振動する (Swinging)。理論的にはTank-treadingの膜の回転に膜の弾性によるエネルギー障壁があると考え、Keller-Skalak (KS) 模型を拡張すると理解できる[1]。また、転移点近傍では間欠的なTumblingに起こす領域があることも拡張KS理論によって示されている。

今回、拡張KS理論をさらに赤血球の形の変形を扱えるように拡張した。赤血球の運動は3変数、赤血球の形状を表す $\alpha_{13}$ 、流れの方向に対する傾斜角度 $\theta$ 、膜の回転の位相 $\phi$ の微分方程式で表される。

$$\frac{d\alpha_{13}}{\dot{\gamma}dt} = \left\{ 1 - \left( \frac{\alpha_{13}}{\alpha_{13}^{\max}} \right)^2 \right\} \left\{ - \frac{A_0}{\dot{\gamma}^*} \frac{\partial F^*}{\partial \alpha_{13}} + A_1 \sin(2\theta) \right\} \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{\dot{\gamma}dt} = \frac{1}{2} \left\{ -1 + f_0 f_1 \cos(2\theta) \right\} - \frac{f_0 d\phi}{\dot{\gamma}dt}, \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{\dot{\gamma}dt} = - \frac{(c_0 / \dot{\gamma}^* V^*) \partial F^* / \partial \phi + \cos(2\theta)}{2f_1 \{ 1 + f_2 (\eta_{in}^* - 1) + f_2 f_3 \eta_{mb}^* \}}, \quad (3)$$

【結果と考察】 この理論とシミュレーションを用いて、赤血球の運動の詳細な相図 (図1) を求めた[3]。その結果、Tank-treading 相と Tumbling 相の間にある中間領域には、間欠的な運動だけでなく、膜の回転と赤血球全体の回転が整数比で同期する相があることが明らかとなった (図2)。この無限個の整数比の同期は悪魔の階段として一般的に知られている。また、振幅を周期的に変動させたせん断流下での赤血球の運動も調べた。低周波数では定常流でみられた Tank-treading や Tumbling 運動が周期的に見られる (図3、4)。高周波数では初期状態によって、異なった軌道を描く。

## 【参考文献】

- (1) J. M. Skotheim & T. W. Secomb, *Phys. Rev. Lett.* 98, 078301 (2007).
- (2) M. Abkarian, M. Faivre, & A. Viallat, *Phys. Rev. Lett.* 98, 188302 (2007).
- (3) H. Noguchi, arXiv:0905.0180.

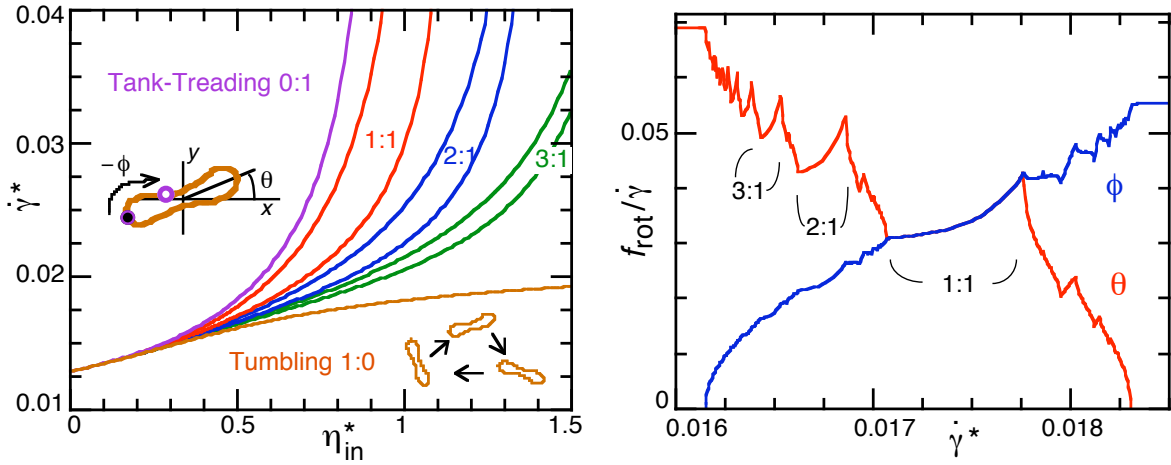


図1 (左) 定常せん断流中での赤血球の運動の相図。  $\eta_{in}^*$ : 赤血球内外の粘性比。  
 $\dot{\gamma}^*$ : 膜のずり弾性係数に対するせん断強度。

図2 (右) 赤血球の傾斜角度  $\theta$ 、膜の位相  $\phi$  の回転頻度  $f_{rot}$ 。 Tank-treading 相では  $f_{rot}^\theta : f_{rot}^\phi = 0 : 1$ 、Tumbling 相では  $f_{rot}^\theta : f_{rot}^\phi = 1 : 0$ 。 この2相の間領域では  $f_{rot}^\theta : f_{rot}^\phi$  が整数比では同期、もしくは間欠的に回転が行われる。

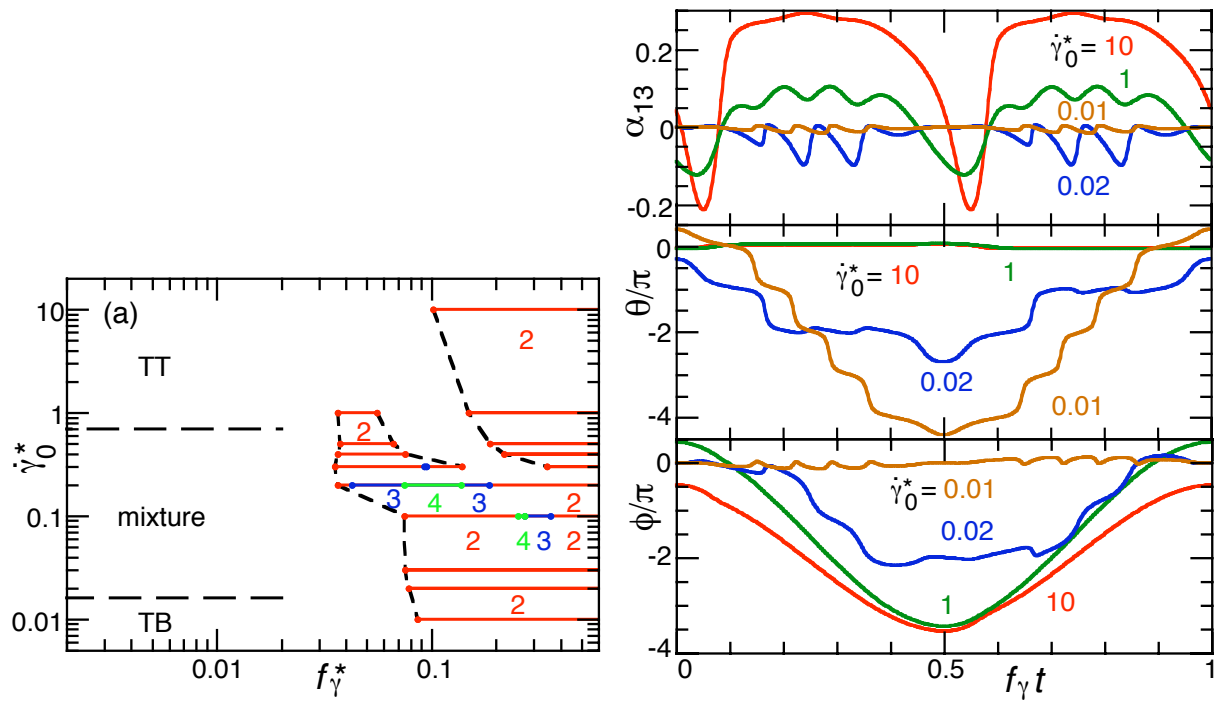


図3 (左) 周期的なせん断流中 ( $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \sin(2\pi f_\gamma t)$ ) での赤血球の運動の相図。  $f_\gamma^* = f_\gamma / \dot{\gamma}_0$ 。 高周波数では複数の limit cycle 振動が存在する。

図4 (右) 低周波数での赤血球の運動。 Tank-treading や Tumbling 運動を周期的に行う。