

プロジェクト名(タイトル):

細胞運動のバイオメカニクスシミュレーション

利用者氏名: ○坪田 健一

理研における所属研究室名: 光量子工学研究センター 先端光学素子開発チーム

1. 本プロジェクトの研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

細胞運動の関係するバイオメカニクスの現象を理解するための計算機シミュレーションを行っている。今年度は、管径 $500 \mu\text{m}$ 以下の血管における血球分布について、2次元計算機シミュレーションを用いて調べた。

血球の分布は、レオロジーや血栓形成現象などを決定づける点で、重要である。この分布は、血液の大半を構成する赤血球の運動に影響を受ける。ここでは、高せん断速度で生じやすい膜回転(tank-treading, TT)運動と、低せん断速度で生じやすい剛体回転(tumbling, TB)の2つの回転運動が、血球分布を決める様子を明らかにした。

2. 具体的な利用内容、計算方法

血液の構成成分として赤血球(RBC)、血小板(PLT)および血しょうを考慮し、これらの成分を粒子を用いて離散的に表現した。連続の式及びNS方程式に基づいて、粒子法の1種であるMPS法を用いて、二次元非圧縮性流れを仮定して血流を解いた。この際、赤血球の細胞膜および血小板の弾性特性をばねを用いて表し、このばね力をNS方程式の外力項に代入する事で、非圧縮流れと弾性変形との連成解析を行った。

血流シミュレーションのため、径が $H = 100 \mu\text{m}$ 、長さが $L = 192 \mu\text{m}$ の平行平板モデルを作製した(Fig.1)。赤血球の体積分率(ヘマトクリット) ϕ_0 RBC を 0.4 とし、血小板は赤血球と同じ数を配置した。赤血球が膜回転(TT)運動および剛体回転(TB)運動を行う場合について、それぞれ血流シミュレーションを行った。

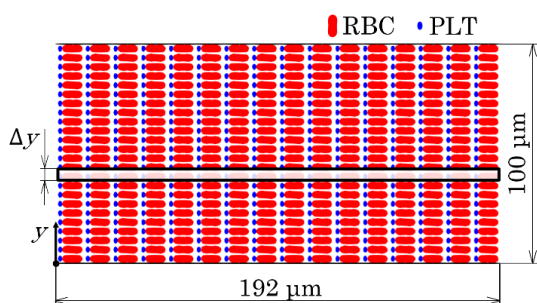


Fig. 1 2D Model of blood flow in tube

3. 結果

赤血球がTT運動を行う場合、壁面効果およびせん断速度勾配によって赤血球が流路の中心に向かって移動し、中央で密、壁面で疎になった(Fig.2a)。血小板は、赤血球に押し出されて、赤血球が無い場所へ移動し、壁付近で密になった。TB運動の場合、TT運動と比較して赤血球の拡散が大きくなり、壁付近にも赤血球が存在するため、壁に付近の血小板の密度はTT運動の場合より小さくなった(Fig.2b)。以上の結果から、赤血球の中心方向への移動と血小板の壁面への移動には、赤血球の回転運動が重要な役割を果たすことが分かった。

4. まとめ

赤血球と血小板の存在を直接考慮した二次元血流シミュレーションを行った。その結果、赤血球の回転運動の違いが、流路内部の赤血球の分布を決定し、その赤血球分布に応じて血小板の分布が決まる様子が分かった。

5. 今後の計画・展望

より詳細なシミュレーションによって粘弾性特性の影響を調べる。また、定量的な検討のため、三次元シミュレーションへ拡張する予定である。

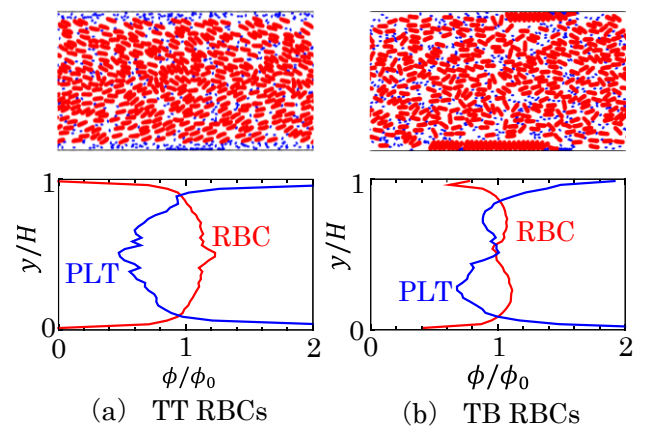


Fig. 2 Blood cell distribution for TT and TB RBCs

2021 年度 利用研究成果リスト

【口頭発表】

Tsubota, K., The mechanics of elongation deformation of a red blood cell under shear flow, The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics, December 2-5, 2021, Kyoto, Japan (Online).

Tsubota, K. and Namioka, K., Numerical simulation of blood cells distribution in small and large vessels, The 11th Asian-Pacific Conference on Biomechanics, December 2-5, 2021, Kyoto, Japan (Online).