

課題名(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. 本課題の研究の背景、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、複数赤血球の運動に基づく微小循環挙動を検討した。管径  $100\ \mu\text{m}$  以下の微小血管がネットワーク上に繋がっている微小循環では、血管径と赤血球の大きさが近い為、個々の赤血球の変形と運動が血流を決定づける。たとえば、微小管路網の血流は、管路網の幾何学的な構造と赤血球の分配様式に依存する[1]。このような赤血球に応じた血流挙動の詳細については、未知な点が多く残されている。本研究では、家兎大網に位置する微小血管網の幾何学的データ[2]を用いて、二次元微小血管網モデルを作成し、血流の二次元粒子法シミュレーションを行った。これにより、複数の赤血球の運動に応じた血管網内血流の様子を調べた。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

2. 1. 血液の粒子計算モデル 血液の構成成分として、両凹形の赤血球と血しょうを考慮した。赤血球は、表面の弾性細胞膜と内部の粘性流体に分けた。これらの血液の構成成分を、複数の粒子を用いて離散的に表現した。赤血球膜の弾性特性は、膜に配置した曲げばねを用いて表現した[3]。また、膜の周長と体積は、ペナルティ関数を用いて一定に保った。非圧縮粘性流れを仮定し、連続の式と NS 式に基づく MPS 法[4]を用いて流体計算を行った。この際、赤血球膜の弾性力を NS 式の外力項に代入することで、膜の変形と流体の流れとの連成計算を行った[3]。血液に占める赤血球の体積分率は約 30%とした。

2. 2. 微小血管網モデル 血流計測の *in vivo* 実験に使用された家兎大網微小血管網の幾何学的データ[2]を参照して、微小血管網モデルを作成した (Fig.1)。この際、流路壁面の形状を滑らかに表現するために、壁面上に配置した粒子の位置をスプライン関数を用いて決めた。流入口と流出口は、それぞれ1つとした。血

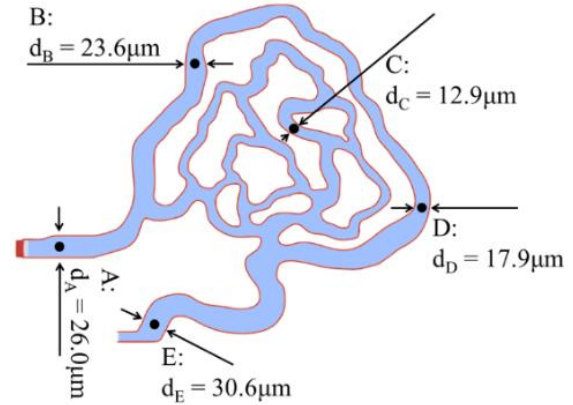


Fig. 1 Microvascular network model

液は流入口から一定の速度で流入させ、出口は自由流出で圧力ゼロとした。流入部のレイノルズ数を 0.3 とすることで、ストークス流れを想定した計算条件にした。

## 3. 結果

赤血球が有る場合と無い場合について、圧力・流速分布のシミュレーション結果を Fig. 2 に示す。いずれも場合も、管路網内の流量分布は、実験的に計測された値[1]と近かった。また、赤血球が有る場合の方が、無い場合と比較して、圧力降下とせん断速度の両者が時空間平均値で 10~20%ほど大きかった。

## 4. まとめ

微小血管網内における赤血球と血流挙動との関係を調べるため、粒子法を用いた二次元血流シミュレーションを行った。その結果、本シミュレーションを用いることで、赤血球の影響を首尾良く評価できる可能性が示された。

## 5. 今後の計画・展望

今後は、赤血球の体積分率が流れに与える影響を調べる。また、LSMPS 法を用いることで、壁面せん断速度の詳細な評価を行う。これにより、実験的に観察されている流体力学的な幾つかの現象について、そのメカニズムの一端を明らかにしていく。

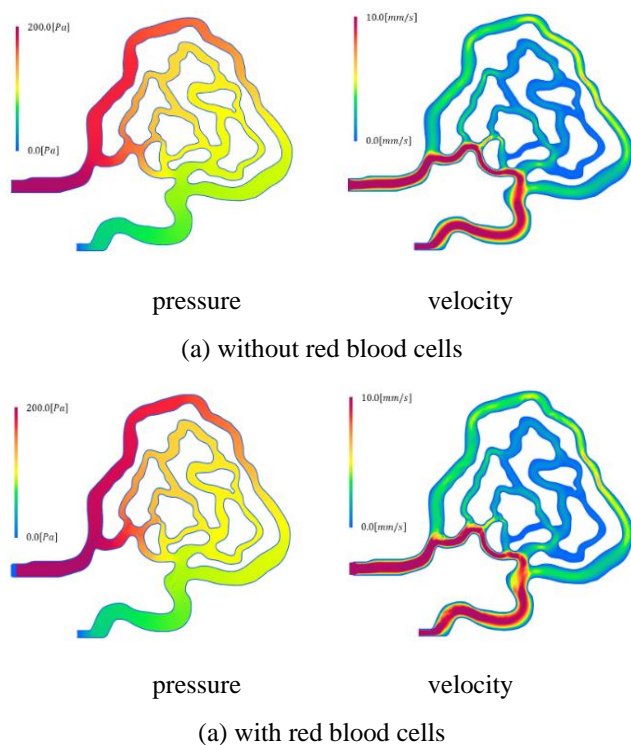


Fig. 2 Simulation results of blood flow in microvascular network

参考文献

- [1] Kodama, Y., Aoki, H., Yamagata, Y. and Tsubota, K. (2019). In vitro analysis of blood flow in a microvascular network with realistic geometry, *Journal of Biomechanics* 88, 88-94.
- [2] Zweifach, B. W. and Lipowsky, H. H (1977). Quantitative microvascular hemodynamics of cat mesentery and rabbit omentum, *Circulation Research* 41, 280-390
- [3] Tsubota, K. and Wada, S. (2010). Effect of the natural state of an elastic cellular membrane on tank-treading and tumbling motions of a single red blood cell, *Physical Review E* 81, 011910.
- [4] Koshiuzuka, S. and Oka, Y. (1996). Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid, *Nuclear Science and Engineering* 123, 421-434.

2020年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

Tsubota, K. (2021). Elongation deformation of a red blood cell under shear flow as stretch testing, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* (in press). doi: 10.1016/j.jmps.2021.104345