

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

所属 : 光量子工学研究領域 光量子技術基盤開発グループ 先端光学素子開発チームフォント

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

微小循環では、直径約 100 μm 以下の多数の血管がネットワーク状につながった血管路を形成しており、その血流特性は、個々の血液細胞 (血球) の力学的な振る舞いに大きな影響を受ける。これまでに、in vivo および in vitro における赤血球運動の実験観察が数多く行われ、それらを力学的に説明する数理モデルおよびその計算機シミュレーションモデルの構築が行われてきた。利用者らも、単純な 2 分岐微小管や実形状に即した多分岐微小血管モデルを作成して、二次元粒子法シミュレーションを過去に行ってきた。その結果、微小循環における血球の力学的な振る舞いを定量的に捉えるためには、三次元計算が不可欠であることが示された。そこで、本課題では、従来開発した血球変形運動の二次元粒子法シミュレーション法を三次元問題へと拡張する。

2. 具体的な利用内容、計算方法

解析領域における赤血球内外の流体および流路内壁面を、計算粒子を用いて離散化した。赤血球の膜面は、三角形要素で分割し、各辺に伸びばねを、隣り合う三角形要素間に曲げばねを、それぞれ配置した。三角形の節点の位置に、膜面を表す粒子を配置した。非圧縮粘性流れを仮定し、MPS 法を用いて流体計算を行った。この際、膜面の粒子について、赤血球膜の弾性力をナビエストークス方程式の外力項に代入することで、膜変形と流体流れとの連成計算を行った。

狭窄角管モデルを図 1 に示すように作成した。流入部は一辺が 20.0 μm の正方形断面で、狭窄部の大きさは 5.5 μm とした。流入速度は 2.74×10^{-2} m/s、血しょうは密度 $\rho = 1.0 \times 10^3$ kg/m³、粘性係数 $\mu = 1.0 \times 10^{-3}$ Pa \cdot s、動粘性係数 $\nu = 1.0 \times 10^{-6}$ m²/s とした。

3. 結果

流路内における流れと赤血球の変形運動の連成計算

に成功した。その結果、図 2 に示す赤血球の変形運動が得られた。具体的には、同図から分かるように、赤血球は流路方向に伸張して、かつ垂直方向に曲げ変形を受ける形で狭窄部分を通じた。狭窄部分通過後は徐々に元の形に戻ろうとした。この変形結果は、微小流路内における赤血球の変形運動の実験観察と一致するものである。

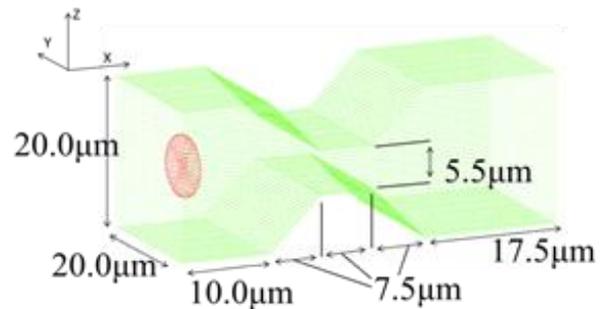


図 1 狭窄角管モデル

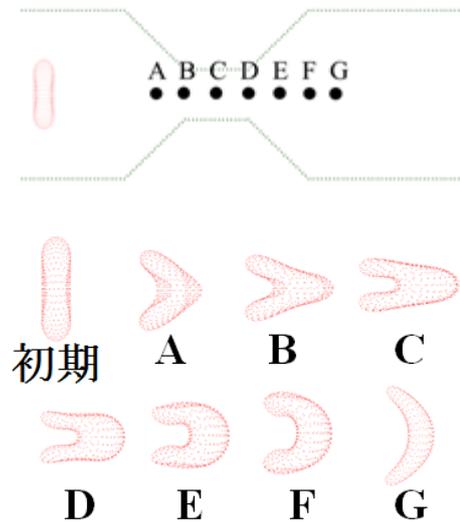


図 2 赤血球変形運動のシミュレーション結果

4. まとめ

三次元粒子法シミュレーション法を用いて、流路内における流れと赤血球の変形運動の連成計算コードを開発した。得られた変形計算結果は、実験観察と良く

対応していることを確認した。

5. 今後の計画・展望

計算結果と実験結果との詳細な比較を通じて、シミュレーションモデルの定量的な同定を進める。同時に、複数の赤血球の運動計算をイメージベースト実形状流路モデルで計算するための計算コード一式を開発して行く。