922 粒子法を用いた 3 次元流路を流れる赤血球の変形シミュレーション Three-Dimensional Simulation of RBC Deformation in a Flow Vessel using MPS Method

○学 田中正幸(東京大) 正 越塚誠一(東京大)

Masayuki Tanaka, Seiichi Koshizuka

Department of Quantum Engineering and Systems Science, The University of Tokyo,
Hongo 7-3-1, Bunkyo, Tokyo 113-8656

Key Words : Red Blood Cell, Deformability, MPS method, Spherocyte, Spleen

1. 序論

正常な赤血球は静止流体中において両凹円盤形をしているが、非常に大きな変形能を持ち、流れの中ではカップ形状となつて流れ、自身よりも細い毛細血管をも容易に通過することができる。その赤血球には様々な病気があることが知られている。

遺伝性球状赤血球症は赤血球膜に異常が起き赤血球が球状や楕円状になる病気であり、これらの赤血球は変形能が低く脾臓を通過できない場合がある。その結果貧血や脾臓が非常に大きくなってしまふ脾腫が引き起こされる。

和田らは赤血球膜のモデルとしてバネモデルを適用することにより両凹円盤形を再現することに成功した¹⁾。また、坪田ら²⁾や田中ら³⁾は赤血球の変形と流れの相互作用の研究を行っている。過去の研究において 2 種類のバネ定数の値を変えることにより両凹円盤形や球形、回転楕円体形など様々な形に変形することが確認されている。そこで、本研究ではこれらの症状の原因を力学的に解明するため、MPS 法を用いて赤血球のモデル化、および流路中の変形シミュレーションを行った。

2. シミュレーション手法

2.1 MPS 法

本研究では流体を粒子法の 1 つである MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法を用いて解析する。MPS 法では粒子数密度

$$w(r) = \begin{cases} \frac{r_e - r}{r} - 1 & r \leq r_e \\ 0 & r_e < r \end{cases} \quad (1)$$

を用いて連続体の運動を有限個の粒子の運動として離散化する。勾配モデル、ラプラスアンモデルはそれぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} = -\frac{d}{\rho n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{P_j - P_i}{|\bar{\mathbf{r}}_j - \bar{\mathbf{r}}_i|^2} (\bar{\mathbf{r}}_j - \bar{\mathbf{r}}_i) w(|\bar{\mathbf{r}}_j - \bar{\mathbf{r}}_i|) \right] \quad (2)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{n^0 \lambda} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(|\bar{\mathbf{r}}_j - \bar{\mathbf{r}}_i|)] \quad (3)$$

非圧縮条件は粒子数密度一定として表現される。赤血球粒子も流体として扱うものとする。

2.2 赤血球膜のバネモデル

赤血球膜変形²⁾に関して、膜を構成する粒子を三角格子状につなぎ、そこに伸び方向のバネ F_l を与え、隣り合う三角形間に曲げ方向のバネ F_b を与えた(図 1)。

$$F_l = k_l(l - l_0) \quad (4)$$

$$F_b = k_b \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (5)$$

ここで、 l_0 は初期状態における粒子間距離の平均値であり、 $l_0 = 1.0 \times 10^{-6}$ [m] とした。 θ は隣り合う膜面の法線ベクトルの成す角である。

図 1 バネによる赤血球膜モデル

球形を初期状態とした赤血球膜に上記のバネの力を適用しつつ体積を減少させると 2 種類のバネ定数の組み合わせにより、両凹円盤状、球状、回転楕円体状、カップ状などの形状となる。それぞれの形状となるバネ定数の値は図 2 の通りである。ここで、代表長さ l_0 を用いて以下のような無次元数 γ を定義する。図中の赤線は $\gamma = 1.0$ を表している。

$$\gamma = \frac{k_l}{k_b} l_0 \quad (6)$$

図 2 バネ定数と形状の関係

本研究では $k_l = 1.0 \times 10^{-6}$ [N/m]、 $k_b = 1.0 \times 10^{-12}$ [N] を正常な赤血球を表すバネ定数であるとする。

2.3 シミュレーション条件

両凹円盤形の赤血球を初期状態とし、一様な流路と一部が細くなっている流路の二種類の流路に流す。両凹円盤形の赤血球を流路に対して垂直に配置し、右向きに重力を与えることにより流速を生じさせた。それぞれの流路の断面図を図3、図4に示す。なお、青い粒子が流体、黄色い粒子が壁、赤い粒子が赤血球を表しており、流路全体の粒子数は約5500個、その内赤血球膜粒子が186個、赤血球内部粒子が121個となっている。

図3 一様な流路の断面図

図4 一部が細くなっている流路の断面図

3. 解析結果と考察

まず正常な赤血球が一様な流路を流れる様子を図5に示す。ただし、流体粒子および赤血球内部粒子は可視化していない。赤血球よりも大きな流路を流れる場合、赤血球は片側だけが凹んだカップ状となった。

(a) 0.0 秒後 (b) 0.050 秒後
図5 流路を流れる正常赤血球

図6は正常な赤血球が自身の大きさよりも細い流路を流れる様子である。上記同様最初はカップ状に変形し、その後大きく変形しながら細い部分を通過する。通過し終わると元のカップ状に戻る。

また、 $k_t = 1.0 \times 10^{-6} [N/m]$ 、 $k_b = 1.0 \times 10^{-11} [N]$ の場合についても同様の解析を行った。これは正常赤血球よりも曲げ方向のバネを強くしたものであり、球状赤血球となり、変形能が低く、流路の細い部分で詰まってしまう(図7)。

(a) 0.0 秒後 (b) 0.015 秒後

(c) 0.030 秒後 (d) 0.040 秒後

(e) 0.055 秒後 (f) 0.070 秒後
図6 自身よりも細い流路内を通過する正常赤血球

(a) 0.015 秒後 (b) 0.060 秒後
図7 球状赤血球が詰まる様子

4. 結論

赤血球膜にバネモデルを適用することにより、流路内を流れる様子と自身よりも狭い流路を変形しながら通過する様子、球状赤血球が細い流路で詰まってしまう様子を解析することができた。今回の研究では曲げ方向のバネを強くした場合のみ比較を行ったが、伸び方向のバネも含めバネの強さと変形能の関係を明らかにし、脾臓を通過する赤血球の挙動を解析することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 和田ら, 機論 A, 69 巻 677 号, 14-21 (2003).
- 2) 坪田ら, 機講論, No.04-48 (2005), 241-242.
- 3) 田中ら, 機講論, No.03-26 (2003), 295-296.