231 毛細曲がり管における赤血球を含む血流の粒子法による数値解析

Particle simulations of blood flow with RBCs in narrow capillary bent tube

○正 永山勝也 (九工大) 学 本田啓介 (九工大)

Katsuya NAGAYAMA, Kyushu Institute of Technology, 680-4 Kawatsu, Iizuka City, Fukuoka
Keisuke HONDA, Kyushu Institute of Technology, 680-4 Kawatsu, Iizuka City, Fukuoka

Key Words: Red blood cell, Vein, Particle simulation

1. 結論

食生活の欧米化に伴う動脈硬化や血栓症などの増加に伴い、その原因を探るため血液の流動特性の研究が注目を集めている。赤血球(Red Blood Cell: RBC)自体の流動現象の解析は、実験とともに数値解析では粒子法を用いた解析も盛んになってきた。SPH 法や、MPS 法などの粒子法では、固体も液体も粒子として統一して扱え、複雑流動解析に適している。粒子法を赤血球の流動解析に適用する場合、赤血球をその弾性脂肪膜と内部液に分けて一個の赤血球の変形⁽¹⁾など詳細に解析されている。

しかし、実際流れている赤血球は血液の容積比率(ヘマトクリット値)で 40-60%を占め数も多い。我々の研究の目標は最終的に、多数の赤血球を含む血流の流動特性を明らかにすることである。赤血球モデルは多数提案されているが、我々はむしろ様々な実現象に応用し役立てることに重きを置いている。

これまでの研究で、2次元において、多数の赤血球を簡易ながら弾性粒子の塊として扱い定性的な流動を解析した⁽²⁾。また3次元で1個の赤血球を二重構造でモデル化して実現象に近づけた⁽³⁾。さらに三次元計算では、血流内に複数の赤血球を含む流れの解析に加え、血管内に弾性狭窄部を考慮した解析を行った⁽⁴⁾。

本報告では、毛細血管先端の流れに着目した。動脈から静脈に移行する部分であり、また栄養と酸素の供給と老廃物と2酸化炭素の排出などを行う役割がある。また指先の毛細血管は観察により健康状態診断にも使われるなど重要である。そこで毛細血管先端流れに着目して、2次元で多数の赤血球を含む曲がり管流れを、粒子法を用いて解析を行った。さらに3次元計算も行い、2次元流れと比較した。

2. 計算モデル

粒子法は、計算点を移動する粒子として、その粒子の動きを追跡することで解析を行う。本粒子法は、粒子間の相互作用に着目したものである。NS 方程式を粒子法表現に近似し、Eq.(1)のように、粒子間力項、粘性による速度拡散項、外力項から、運動方程式はなる。T は粒子間力であり、Eq.(2)のような形式を仮定し、右辺1項は膨張収縮により均一化しようとする力で重み関数 $w^{(5)}$ と近傍の粒子との重み関数の和 n を用いた。2項は赤血球の弾性膜に用いるバネ力で引っ張りとか曲げの効果を考慮している。a は定数である。

$$\frac{\partial \vec{u}_i}{\partial t} = \sum_{j \neq i}^N (\vec{T}_{ij}) + \frac{2d}{\text{Re} \cdot n^0 \lambda} \sum_{j \neq i} \left[(\vec{u}_j - \vec{u}_i) w \left(\frac{|\vec{r}_j - \vec{r}_i|}{\lambda} \right) \right] + \vec{F}_i \quad (1)$$

$$\vec{T}_{ij} = a w_{ij} \left(\frac{n_i}{n_0} + \frac{w}{w_0} - 2 \right) \frac{\vec{r}_{ij}}{|\vec{r}_{ij}|} - k \left(\frac{\vec{r}}{r_0} - 1 \right) \vec{r}_{ij} \quad (2)$$

2次元における赤血球モデルを Fig.1 に示す。隣り合った赤血球膜粒子同士を互いにバネで接続し円環状に配置したものの中に、赤血球内部粒子として血漿粒子を配置した二重構造となっている。赤血球膜粒子同士の接続には、バネ力と、円形状を維持する目的で曲げ抵抗を考慮しており、曲げ抵抗に関しては、Fig.2 に示すように、両隣の粒子の重心に向かう力を加えることで表現している。

次に3次元における赤血球モデルを Fig.3 に示す。球状に配置した赤血球膜粒子同士を三角形状に接続し、その集合で球状の膜を模擬している。内部に、赤血球内部粒子として、血漿粒子を配置し、内部の血漿については、初めの球形状の状態から、部分的に粒子を取り除いて円盤状の赤血球の形状を再現している。また、3次元赤血球モデルでは、赤血球膜粒子同士の接続に、曲げ抵抗を考慮せず、バネによる接続のみを考慮している。

Fig. 1 RBC 2D Model with spring

Fig. 2 Spring model

Fig. 3 RBC 3D model

3. 結果・考察

3-1 2次元曲がり管内の血流解析

毛細血管には体全体に、酸素や養分などをいきわたらせる作用があり、人体を構成する非常に重要な要素である。毛細血管の流動状態は、体の健康状態を知るひとつの指標であり、指先爪などで観察や、診断が行われている。毛細血管の先端はヘアピン状の曲がり管となっており、それを経過し、動脈から静脈へと変化する。その毛細血管先端における曲がり管での流動現象は、赤血球の影響を強く受ける。つまり、赤血球を含む毛細血管先端の曲がり管流動現象は血液循環において重要となる。そこで、今回、毛細血管程度の管径の曲がり管内に赤血球を配置し、その流動現象の解析をおこなった。

解析条件としては、管路内径 $9\mu\text{m}$ 、管路内の平均速度を 0.4mm/s とし、血漿密度 1030kg/m^3 、粘度 $1.2\text{mPa}\cdot\text{s}$ で、レイノルズ数は 0.034 となる。時間刻みは、 $0.05\mu\text{s}$ で、 100000 ステップで計 5ms である。粒子は $0.5\mu\text{m}$ ごとに配置した。赤血球体積比率はおおよそ 44% 、管路の流入出口には周期的境界条件を適用している。

解析結果を Fig.4 に示す。赤血球は曲がり管に入ると、外側の壁に寄りながら流動した、遠心力の作用も考えられる。詳しく見ると曲がり部の入り口では、部分的に内側に押し出される赤血球もある。これは流れが曲げられると赤血球はやや直進しようとして、内側の密度が減るが、そこを埋めるために部分的に内側に押し出されると考えている。大多数の赤血球は外側に寄りながら流動するが、詳しく見ると曲がり管の終わりでは内側にも移動する傾向があり、赤血球は二列となって横に倒れて流動する。しばらくするとまた赤血球は管路中央付近寄りに、ほぼ縦向きで一列となった。なお参考までに赤血球のない血漿流れも計算したが、速度分布は直管部分では放物線状のポワズイユ流れであった。赤血球のある場合は、赤血球が、ひきちぎれないように空間流速を一樣に保とうとする作用があり、速度分布は台形に近いものであった。

以上2次元流れでは、曲がり部入り口、曲がり部、出口で赤血球は柔軟に変形したその配置を変えていることがわかった。変形により流動抵抗を減らしているものと考えられる。

Fig. 4 2D blood flow in bend tube

3-2 3次元曲がり管内の血流解析

3次元解析条件では、2次元と同様、管路内径 $9\mu\text{m}$ 、血漿の物性も同じとした。粒子は $0.5\mu\text{m}$ ごとに配置し、管路の流入出口には周期的境界条件を適用している。なお初期配置として14個の赤血球を配置した。

Fig.5 に解析結果を、中央断面、ただし赤血球粒子は全部を表示した。赤血球が血管内部の流速分布に従って基本的にパラシュート型に変形しながら流動していく様子が確認できる。つまり流速の高い管中央で、赤血球前方は凸になり、逆に後方は凹になる。先端の凸部は前の赤血球の凹み部分に入り、逆に凹みには後方の赤血球の凸部が入り込む。そのため、Fig.5 のように外から見ると連なっているように見える

が、凹凸の隙間には血漿粒子層が存在している。

詳しく見ると、曲がり管の入り口付近では、外側の流速が高いために、やや曲がり外側に引き伸ばされ傾く。また傾くことは赤血球は向きを変えるのに役立っていると考えられる。曲がり部ではほぼ一定の傾きを保ちながら流れ、曲がり部の終わり付近で、傾きはほとんど無くなりほぼ管軸対象な形状に回復して出て行く。

2次元流れと実現象である3次元流れを比較すると、曲がり部への柔軟性としては3次元流れは劣る。原因として管壁の影響を2次元では両側からのみ受けるが、3次元流れでは管のあらゆる方向から制限が加わることが考えられる。更に赤血球構成粒子自体も、2次元はバネ影響は周囲2個だが、3次元では周囲4個の影響を受けるためと考えられる。

Fig. 5 3D blood flow in bend tube

4. 結論

今回、粒子法による、血漿、赤血球、血管を考慮した、2次元と3次元モデルを用いて、毛細血管先端を想定した内径 $9\mu\text{m}$ での曲がり管での赤血球流動の解析を行った。2次元曲がり管において、外側の壁に寄りながら流動し、直管に戻ると管路中央付近を流れた。実現象である3次元の曲がり管解析では、赤血球はパラシュート状に並んで流動することがわかった。赤血球は変形や位置を変化させながら流動抵抗を減らしながら、曲がり管を通過していると考えられるが、それは2次元の場合に顕著であった。

今後は、3次元で様々な状態の毛細血管流動解析を行い、健康の診断へ何からの形で役立てたいと考えている。

参考文献

- (1) 田中伸厚, 高野龍雄, 増澤徹, SPH 法による血流の3次元マイクロ・シミュレーション, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No.712(2004)
- (2) 永山勝也, 田中和博, 粒子法による複数の赤血球を含む2相流の解析, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No.G808(2004)
- (3) 永山勝也, 田中和博, 粒子法による赤血球を含む3次元血流解析, 日本流体学会年会 2005, AM05-17-007(2005)
- (4) 永山勝也, 本田啓介, 多数の赤血球を含む毛細血管内流れの粒子法による解析, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, No.1503(2006)
- (5) 越塚誠一, 数値流体力学, 培風館
- (6) 菅原基晃, 前田信治, 血液のレオロジーと血流, コロナ社