

論文の内容の要旨

論文題目 格子ボルツマン法による微小循環系内の血流の数値解析

氏名 張 東植

微小循環系は内径 $300\sim 10\mu\text{m}$ の細動脈、細静脈と $10\mu\text{m}$ 以下の毛細血管により構成されている循環系の末端の部分である。この領域では、赤血球のサイズが血管内径に対して相対的に有意になるため、赤血球の影響によるさまざまな現象が起こる。特に、血圧が $20\sim 25\text{mmHg}$ になり、心臓からの脈動も減衰し、定常流となる $300\mu\text{m}$ 以下の微小循環系では、太い血管に比べて血液中の赤血球の体積率であるヘマトクリット値が低下する Fahraeus 効果、血液の粘度が低下する Fahraeus-Lindqvist 効果が起こると報告されている。また、赤血球は血管壁面近傍と血管中心の血流の速度差によって生じる速度勾配により楕円形に変形し、赤血球膜が回転する Tank-Tread 運動をしながら軸中心に移動する。したがって、赤血球の軸集中化により壁面付近では血漿のみが流れる血漿層が形成され、血液の流れを円滑にしている。このように特異な現象が起こる細動脈内の血流を数値解析するためには、赤血球と血漿、および赤血球間の相互作用を考慮する必要がある。特に、赤血球1つ1つの変形挙動とともに、赤血球の集団としての挙動を考慮した解析が必要である。しかし、細動脈での赤血球のヘマトクリット値は約 $20\sim 30\%$ であり、血球間距離が非常に短いことが報告されているため、多数の赤血球を考慮しなければならない。

本研究では、従来の数値解析手法に比べて計算負荷が少ないと知られている格子ボルツマン法を用いて、高いヘマトクリット値を持つ細動脈内の血流を数値解析した。ここで、赤血球は剛体粒子、液滴粒子あるいは、膜を持つカプセル粒子と仮定し、細動脈内の単一粒子の挙動や集団挙動について詳細な数値解析を行うことを本研究の第1の目的とする。また、赤血球と仮定した剛体粒子、液滴粒子、カプセル粒子による赤血球の取り扱い手法や形状、ヘマトクリット値による影響を比較、検討することを第2の目的とする。また、本研究で開発された解析手法を用いて、ヘマトクリット値と流れのせん断によって変化する血液の見かけの粘性に対する検討を第3の目的とする。

はじめに、2次元チャンネルでの単一粒子の挙動について数値解析を行った。まず、剛体粒子はレイノルズ数により異なる安定位置を示すことを確認した。すなわち、 $\text{Re}>1$ の場合は Segre-Silberberg 効果によりチャンネルの中心軸と壁面の間のある位置で安定した。しかし、 $\text{Re}<1$ の場合は、壁面方向には移動せずに主流方向に移動した。それは、赤血球の実挙動、すなわち、軸方向への移動とは異なる挙動である。したがって、剛体粒子では細動脈内の赤血球の挙動を再現することは困難であると考えられる。

次に、赤血球を液滴粒子と仮定した場合、液滴粒子は剛体粒子と異なる挙動で軸中心への移動を示した。しかし、液滴粒子は膜を持っていないため赤血球の実形状や膜の

Tank-Tread 運動や Tumbling 運動などの挙動を再現することができない。

赤血球をカプセル粒子と仮定した場合、カプセル粒子は液滴粒子と同様に軸中心に移動した。カプセル粒子の軸中心への移動は面積の違いより形状による違いが大きく作用し、両面円盤型のカプセル粒子の方が他の円形カプセル粒子より軸中心に速く移動した。また、膜に発生する張力も両面円盤型カプセル粒子の方が他のカプセル粒子より小さいことが分かった。以上の結果より、膜の変形により発生する張力が小さいと初期形状に戻ろうとする反発力が小さくなるため、カプセルの移動速度が速くなる。また、張力や移動速度はカプセルの面積の違いよりも形状の違いに大きな影響を受ける。また、両面円盤型カプセル粒子は $0.485H$ (軸中心 : $0.5H$) に移動すると膜が回転する Tank-tread 運動からカプセル自体が回転する Tumbling 運動に移行した。これは、チャンネルの中心に移動すると流体の速度勾配によるせん断が小さくなるためである。この結果はせん断もカプセルの挙動を決める重要なパラメータであることを意味する。

次に、赤血球は剛体粒子、液滴粒子、あるいはカプセル粒子と仮定し、チャンネル内の多粒子の挙動について数値解析を行った。入口-出口間の圧力勾配を一定にして計算した場合、液滴粒子の方が剛体粒子、カプセル粒子より流速が速いことが分かる。また、粒子の軸方向への移動により発生する血漿層の分布も液滴粒子の方が厚くなった。一方、カプセル粒子を用いた形状の比較では、両面円盤型カプセル粒子の方が円形カプセルより瞬時速度が大きく、血漿層も厚くなった。しかし、流速には形状の違いより粒子の取り扱いの違いによる影響が大きく作用した。

2次元チャンネル流れの計算結果より、赤血球の実形状を考慮することができる Immersed boundary 格子ボルツマン法(カプセル粒子)が運動量交換法(剛体粒子)や非混和多成分格子ボルツマン法(液滴粒子)より赤血球の挙動をよく再現した。特に、軸中心への移動、膜の回転(Tank-tread 運動)と血球自体の回転(Tumbling 運動)が再現できた。

次に、3次元円管内の赤血球の挙動について数値解析を行った。薄い膜を持つ赤血球を3次元的に表現するため、本研究では Skalak モデルを用いて赤血球膜を3次元空間での2次元超弾性体として仮定した。まず、円管内での赤血球と球形カプセル粒子の挙動を比較した。赤血球は2次元解析と異なり壁面近傍においても Tumbling 運動しながら主流方向や軸中心に移動した。特に、軸中心への移動は赤血球の方が球形カプセル粒子より速く移動することを確認した。また、赤血球は Tumbling 運動により主流方向に対して垂直になった時、軸中心に大きく移動することも確認された。

円管内を流れる多粒子による赤血球の集団挙動について数値解析を行った。円管内流れでのレイノルズ数は 0.5 であり、流れは完全発達した Poiseuille 流れである。ヘマトクリット値は $5\sim 20\%$ ($18\sim 72$ 個の赤血球)として、ヘマトクリット値による影響を比較した。

赤血球は流れの速度勾配により変形や回転しながら主流方向に移動した。特に、赤血球のスリッパ形状が再現できた。また、ヘマトクリット値を 5% から 20% まで上げると流速が遅くなり、流動抵抗が増加することを確認した。

また、血液はヘマトクリット値とせん断により粘度が変化する非ニュートン性流体であるため、単純せん断流れにおいて、赤血球のヘマトクリット値とせん断率を変化させ赤血球の見かけの粘性を検討した。計算の領域は長さ $20\mu\text{m}$ 、高さ $20\mu\text{m}$ 、幅 $20\mu\text{m}$ の立方体である。計算で用いた赤血球のヘマトクリット値は 20%(16 個)、30%(24 個)と仮定し、単純せん断流れでのせん断とヘマトクリット値による見かけの粘性の変化について調べた。まず、せん断率が減少することにより血液の見かけの粘性は増加した。また、円管での計算結果のようにヘマトクリット値が増加すると血液の見かけの粘性も増加した。この結果より、血液はせん断率とヘマトクリット値により見かけの粘性が変化する非ニュートン性流体であることが確認された。

以上の結果より、**Immersed boundary** 格子ボルツマン法(カプセル粒子)が運動量交換法(剛体粒子)や非混和多成分格子ボルツマン法(液滴粒子)より赤血球の変形や挙動をよく再現することが分かった。特に、赤血球の軸方向への移動、赤血球の膜の回転(**Tank-tread** 運動)と赤血球自体の回転(**Tumbling** 運動)が再現できた。また、粒子の軸中心への移動速度は粒子の体積(面積)より形状に大きく依存する。すなわち、両面円盤型カプセルが球形(円形)カプセルより速く軸中心に移動した。