

## 審査の結果の要旨

氏名 山田 雄士

本論文は「Immersed-Boundary 法による微小流路中に分散するベシクルの流動解析」と題し、5章より構成されている。

人体の微小循環では、血液中に混在する赤血球や白血球などのベシクルの大きさが管径と同オーダーであり、個々のベシクルの変形やベシクル間の相互作用が流れ場全体の流動構造に大きな影響を及ぼしている。微小循環の流動構造を数値解析によって解明せんとする研究では、血液中に最も多く存在する赤血球を主な対象としてその変形や相互作用の解析が行われており、多くの研究者によって着実に進展してきた。しかし現状では、大規模シミュレーションによって数百個の赤血球の流動解析を行った報告例はあるものの、赤血球1個の流動ですら、よく知られる **tank-treading** 運動や **tumbling** 運動を十分安定かつ高精度に解析できる計算手法が構築されたとは言えない状況である。

そこで本論文では、界面追跡手法の一つである **Immersed-Boundary** 法を用いて、個々のベシクルの変形及び、複数のベシクルが相互作用する流路内の流動構造について解析を行うことを目的としている。**Immersed-Boundary** 法は、複数のベシクルの解析や複雑な血管形状の計算への適用が容易であることから、微小循環の計算に適した手法であると考えられている。対象とするベシクルとして赤血球だけでなく、近年医療応用の場で注目されているリポソームについて解析が行われている。

第1章は「緒論」であり、研究背景及びベシクルの流動に関する従来の研究、本論文の目的について述べられている。

第2章は「流体・構造連成解析の基礎式」であり、流体及びベシクルの基礎方程式について記述されている。ベシクルの基礎方程式として、本論文で対象とするリポソームと赤血球について、流体膜としての特性を持つリポソームと弾性膜としての特性を持つ赤血球の違いに着目して、それぞれ異なる基礎方程式で記述されている。

第3章は「数値計算手法」であり、本論文で行う計算手法について詳細に述べられている。まず、本論文で用いる **Immersed-Boundary** 法について記述されている。次に円管内の流れ場を矩形格子を用いて解析するため、壁面の境界条件を与える手法について述べられている。最後にベシクル膜を非構造格子で分割する手法及び、非構造格子上の離散的な位置情報から膜に生じる応力を計算する手法について述べられている。

第4章は、「せん断流中におけるベシクルの流動解析」であり、本論文で行われた計算の結果及びその考察が述べられている。以下に得られた成果について重要なものをまとめる。

まずは単純せん断流中の1個のベシクルの流動解析を行い、内部流体と外部流体の粘性係数の比の違いによって、両ベシクルは **tank-treading** 運動や **tumbling** 運動をする結果が

得られている。また、従来の実験結果や数値計算結果との比較を通じて、本数値計算手法の妥当性が示されている。さらに **tank-treading** 運動におけるベシクルの変形量と長軸の傾きについて、リポソームでは内部体積と表面積一定の条件がこれらの物理量に支配的であるのに対し、赤血球では膜のせん断応力と流れのせん断の比がこれらの物理量に支配的であることが示されている。

次に微小矩形流路内の複数のリポソームの流動解析を行い、リポソームが流れのせん断によってパラシュート形状やスリッパ形状に大きく変形する結果が得られている。

最後に微小円管内の複数の赤血球の解析が行われている。微小円管内で軸対称な赤血球が、周囲の非軸対称な赤血球との相互作用によって、軸対称を崩した形状に変形する結果が得られている。また、赤血球の存在によって円管内の見かけの粘性が大きくなること、赤血球膜のせん断応力係数や赤血球のヘマトクリットが大きくなる程、見かけの粘性の増加量は大きくなることが示されている。また、赤血球のヘマトクリットが十分に大きくなると、周囲の赤血球の存在によって膜のせん断変形が抑えられるために、せん断応力係数を大きくしても見かけの粘性の増加量に変化が見られなくなることが示されている。

第5章は「結論」であり、本研究で得られた上記の結果についてまとめられている。

本論文で、二種類のベシクルの流動解析を行い、両ベシクルの構造の違いが流動に与える影響について明らかにしたこと、また、複数個のベシクルの解析が比較的容易な **Immersed-Boundary** 法を用いて、これまで十分な解析が行われていない複数個の赤血球の流動について、ヘマトクリットや膜のせん断応力係数が管内の見かけの粘性に与える影響について新たな知見を得たことは重要な成果である。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。