

## 論文審査の結果の要旨

氏名 福成 洋

本論文は、「MRIに基づく大動脈弁のモデリングと時間空間有限要素法による血流解析、及びその検証」と題し、9章よりなる。

心臓には血液の逆流を防ぐために4つの弁があり、そのうち全身に血液を送る左心室の入り口と出口には、僧帽弁と大動脈弁が存在する。これらは心臓内外の血流に深く影響を及ぼす医学的に重要な器官であり、心臓血管系シミュレータにおいてもその適切なモデル化が望まれている。

本研究では大動脈弁に焦点をあて、弁開閉におけるすべての phase に渡って安定に解析できるシミュレータの開発を目的とし、時間空間有限要素法を適用する。時間空間有限要素法では時間方向に非構造格子を形成する有限要素メッシュを作成することで、要素の生成・消滅を含んだ解析を実現できる。これにより弁の開閉に伴って流体領域が分断されてしまう大動脈弁周りの血流解析を行うことが可能となる。

一方、大動脈弁の有限要素モデルの作成、流速境界条件の設定、及び解析結果の検証には MRI(核磁気共鳴画像法 :Magnetic Resonance Imaging) によって取得された実データを用いる。血管内血液の三次元流速情報は PCMRI(phase contrast MRI)を用いて取得することが出来る。解析モデルの作成、境界条件の設定、及び解析結果の検証にはすべて同じ被験者から得られた MRI データを用いており、解析と結果の検証に一貫性が保たれる。

第1章は、序論であり、本研究の背景、目的及び関連分野における従来の研究を説明している。

第2章では、心臓と心臓弁の概要、及びそれらの疾患、治療法について述べる。

第3章では、生体に関するコンピュータシミュレーションについて、既往の研究を整理している。また大動脈弁解析の先行研究について説明している。

第4章では、MRIによる大動脈弁のデータ取得に関して述べている。MRIの原理、データのアーチファクト、処理方法を説明している。MRIによる血流の計測法はMRA(MR血管撮影法,Magnetic Resonance Angiography)と呼ばれ、造影剤を用いない非侵襲MRAと、造影MRAが主に用いられている。前者ではTOF(Time of Flight)法とPC(Phase Contrast)法があり、本論文ではこのうち3次元の流速データが取得可能なPC法を利用している。

第5章では、本研究で採用する時間空間有限要素法について述べる。特に、今回開発したメッシュのトポロジー変化が可能なシミュレーション手法について説明する。本研究では時間空間有限要素法の中でも、DSD/SST(Deformable Spatial Domain/Stabilized Space-Time)法を用いる。4次元時空間の中で、シンプレックス要素を用いた非構造格子を

作成するのは困難であるため、過去の研究においては 4 次元のうち時間に関して、単純な線形補間を行うことが通常であった。本論文では、時間の代わりに空間の 1 次元 ( $z$ ) において線形補間を行いつつ、他 3 つの次元 ( $x_1, x_2, t$ ) で構成される時空間において四面体要素を生成することを提案している。このように時間方向にはシンプレックスな要素を用いることで、各時刻において異なるメッシュトポロジータを与えることができる。

第 6 章では、大動脈弁の 1/6 対称モデルの解析を行った。弁の運動を MRI 計測に基づき移動境界条件として与えた。流入口からの血流の加速・減速に伴い弁の下流では順流と逆流が混在し、バルサルバ洞には渦が発生することが観測された。メッシュトポロジータの変化により、弁開閉の全 phase における流体解析を行えることを確認した。

第 7 章では、大動脈のフルモデルの解析を行った。1/6 モデルを拡張した直管フルモデルに対し力学的変形解析に基づくメッシュ制御を行うことにより動脈弓を含む大動脈モデルを作成し、流体解析を行った。

第 8 章では、7 章で行われた大動脈弁、及び大動脈弓の血流シミュレーションの結果について、検証している。大動脈弓におけるらせん状の流れ、駆出血流の減速時に起こる逆流など、生理学的に妥当な結果が得られている。一方バルサルバ洞内の渦は再現できておらず、その原因として本メッシュ分割では高レイノルズ数流れを表現できるほどの空間分解能が無いこと、及び後流の境界条件の必要性について考察している。

第 9 章では、上記をまとめ、本研究の結論を導いている。

以上を要するに、本論文は心臓と大動脈を結ぶ大動脈弁の完全な開閉に伴う弁近傍の流れ場の解析を、新たに考案した 4 次元要素に基づく時間空間有限要素法によって可能にし、またそのモデル化と妥当性の検証を MRI を用いて行ったものであり、計算力学ならびに医学の両分野へ貢献するところが大きい。よって博士 (科学) の学位を授与できると認める。