

早稲田大学大学院 創造理工学研究科

博士論文審査報告書

論 文 題 目

Space–Time Computational Methods for
High-Fidelity Heart Valve
Flow Analysis with Leaflet Contact

申 請 者

Takuya TERAHARA

寺原 拓哉

総合機械工学専攻・流体構造連成系応用力学研究

2020年2月

(1) 審査経緯

当該博士論文審査は、以下の日程で実施された。

- 2019年11月14日 予備審査会を開催
- 2019年12月5日 総合機械工学専攻教室会議にて受理申請
- 2019年12月19日 創造理工学研究科運営委員会
- 2020年1月16日 第1回博士論文審査
- 2020年1月22日 公聴会を開催
- 2020年1月25日 第2回博士論文審査
- 2020年2月6日 審査分科会
- 2020年2月25日 創造理工学研究科運営委員会

(2) 審査内容および総評

心臓は個体差の大きい臓器のため、心疾患に対する治療には個別性が高く、個別治療のための予測手法が求められている。本論文はこのような背景のもと、心臓弁の開閉に伴う流れを高精度に捉えるための計算手法の構築を目的としている。心臓弁は開閉に伴い流体の存在する空間にトポロジー変化が生じ、これを高精度に計算する手法は数少ない。本論文では、高精度ということ、壁面せん断応力を十分解像することと定義し、それが可能な手段であること、そして実際に壁面せん断応力等の計算結果を示すことで提案手法の有効性を示している。

申請者から博士論文「Space-Time Computational Methods for High-Fidelity Heart Valve Flow Analysis with Leaflet Contact」の草案および研究業績の提出を受け、学科内の予備審査会を実施した。予備審査では高精度とはどういうことか、新規性がどこにあるか、将来展望など、草案には十分書かれていなかった項目についての質問がなされた。本予備審査を踏まえ、総合機械工学専攻教室会議にて受理申請に値することが承認された。この後、2回の審査に於いては、主に研究の動機となる医療における本研究の位置づけ、今回の研究により可能となったことの明快な説明、得られた数値計算からわかる実例に対する考察を強化するよう本文への修正が指摘された。公聴会は60号館206室に於いて行われ、博士10名（うち2名は医師）を含む総勢25名の聴講者の中、論文の内容が説明された。質問は離散化や数値計算手法に関する詳しいものから計算例に対する条件や得られた結果に対するものがあつた。医師からは本研究による弁形成術への発展の期待なども述べられ、すべての質問に対して聴講者が納得する形で終えた。以上を経て完成した本論文は英語で記述されており全7章および2つの付録から構成されている。日本語に要約すると以下の通りである。

第1章では、流体構造連成（FSI: Fluid-Structure Interaction）問題である心臓弁に関する疾患を含む説明や本研究のモチベーションが示されている。

そして心臓弁に働く壁面せん断応力・張力および応力について概算数値をもとに議論され、それを踏まえた上で数値計算の現状が示されている。また、本論文で発展させる **Space-Time** 法および本論文の研究手法および本論文の構成について説明されている。

第 2 章は前提となる支配方程式として非圧縮性流体の **Navier-Stokes** 方程式および構造力学の方程式と構成式 (**Fung** モデル) について説明されている。

第 3 章では本論文のベースとなる **Space-Time** 法およびアイソジオメトリック離散化と呼ばれる高次かつ滑らかな基底関数による離散化手法が説明されている。また本提案手法の核になる部分が本章に記されている。

第 4 章は心臓弁の弁動作が与えられている前提で流体計算を行う手法及び計算例が示されている。本計算例では、同一の格子を用いて、2 つの異なる弁動作に対する計算を実現している。その動作は 3 つの弁尖が同期して開閉する場合および非同期に開閉する場合である。

第 5 章では **Sequentially-Coupled FSI** という計算手法に基づき、構造計算によって得られた弁動作や **FSI** 計算に基づいて得られた弁動作に対して本提案手法を適用した例が示されている。

第 6 章では、流体計算において流入境界条件を表面力によって制御することが難しいという古くから知られている問題の解決法が示されている。その方法は、定式化を変えないことなく、アイソジオメトリック離散化の特徴を生かしたユニークな提案である。この手法を用い、左心室および大動脈を加えた広範囲の流体計算を実現している。弁にかかる壁面せん断応力は左心室での流れの影響を受けることもよく示された結果であった。この例からわかるように、提案手法は個別患者の複雑形状に適用可能である。

第 7 章では本論文を総括しており、特に壁面せん断応力を中心にそれぞれの章の結果がまとめられている。要約すると、弁の閉じ方は、弁形状により大きく変わるということが推測され、それによって壁面せん断応力の高い場所も異なるということが具体的に示されている。

以上を要するに、本論文では心臓弁の壁面せん断応力を高精度に評価できる計算手法を提案している。実際に、様々な弁形状や複雑な弁動作において手法の妥当性を示すとともに、それぞれの流れや壁面せん断応力について論理的に考察されている。また、本手法により、繊細な量を高精度に推定できることから、より高度な **FSI** 計算手法と組み合わせることで、個別医療の将来に期待が持てる有用性が示されている。よって、博士 (工学) としての価値のある論文であることをここに認める。

2020年2月

審査員

主査 早稲田大学教授 博士（理学）東京工業大学 滝沢 研二

早稲田大学教授 博士（工学）早稲田大学 草鹿 仁

早稲田大学教授 博士（工学）東京大学 石村 康生

早稲田大学准教授 博士（工学）名古屋大学 松田 佑