

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

Medical-Image-Based Aorta Modeling with
Zero-Stress-State Estimation
Correlated with Anatomical Observation

申 請 者

Takafumi SASAKI

佐々木 崇史

総合機械工学専攻・流体構造連成系応用力学研究

2019 年 2 月

治療において医用画像からの診断は重要な役割を果たす。測定技術が進歩した現在でも、体に負担をかけない非侵襲的な測定法には限界があり、すべての量を測定することができるわけではない。また、治療には予後の予測など、将来を推定することも重要な要素であることから、計算による状態の推定や、予後の予測に期待が寄せられている。計算を行うには、計算モデルの構築が不可欠である。この計算モデルとは、形状・材料定数等の物理パラメータなどが必要である。しかし、先に示した通り、多くの量は測定ができない。本研究は、大動脈を対象とし、測定できない量、すなわち“invisible data”を推定することにより、血管モデルを構築すること目的としている。血管モデルにおいて、解剖学的視点から初期応力状態（ZSS: Zero-Stress State）を推定すること、また、ある条件下で測定された医用画像に、内圧のかかった血管モデル形状が一致するという力学的条件から研究したものである。以下に審査状況を示す。

申請者から博士論文「Medical-Image-Based Aorta Modeling with Zero-Stress-State Estimation Correlated with Anatomical Observation」の草案、研究業績が提出され審査員より予備審査の開催に値することが確認された。これを受け2018年11月8日（木）60号館206室にて実施された総合機械工学専攻教室会議（以下教室会議）により予備審査会開催が承認された。草案は11月22日（木）より総合機械工学科事務室に於いて公開し、11月29日（木）11時から12時の間で、60号館206室に於いて予備審査を実施した。審査では論文の概要が説明され、特に血管壁の初期応力の実際がどういふ状況かについて議論がなされた。その上で、全審査員より研究業績および内容ともに受理申請に値することが承諾された。総合機械工学専攻としては、12月6日（木）に行われた教室会議に於いて、正式に受理申請を行うことが認められた。その後12月20日（木）16時の創造理工学研究科運営委員会において受理が認められた。審査の都合で、審査は主に個別に行われ、全体としては2019年1月11日（金）、15日（火）に行われた。並行して、公聴会の準備を進め、1月21日16時から17時の日程で、60号館206室に於いて開催された。東北大学水藤教授、芝浦工業大学山本教授、首都大学東京伊井准教授、医師らが参加した。質疑では、手法の細部まで及び、参加者の質問が尽きるまで行われた。以上を踏まえ、審査員に対して個別に、論文への修正説明がさらに行われた。論文は、1月30日（水）に総合機械工学科事務室に於いて公開し、最終的な修正は2月4日（月）に審査員に対して個別に報告され承認を得た。2月6日（水）教室会議にて実施された総合機械工学専攻審査分科会に於いて合格が承認された。以上を経て完成した本論文は英語で記載されており全7章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、対象とする大動脈について、その層構造等が示されている。また血管の構造を説明するにあたり、初期応力やゼロ応力状態がどうであるのか解剖学的視点で説明され、計測例などの先行研究について説明されている。また計算モデルの構築という視点での先行研究にも説明され、研究の着眼点や目

的について説明されている。そして、本研究の構成が示されている。

第2章では計算に用いる構造力学方程式，構成方程式について記述してある。特に以降の章で用いられる記号の説明や表記方法，また，本研究特有の定式化について記述されている。

第3章では，モデリング手法の核となるアイソジオメトリック離散化について，**B-spline** から **T-spline** までそれぞれ説明されている。またその計算手法や取り扱い方法が記述されている。

第4章では，第3章のアイソジオメトリック離散化を用いた独自の計算法である **Element-Based ZSS (EBZSS)** が説明されている。**EBZSS** では，解剖学的視点から行われる初期推定と，応力状態である医用画像への一致のための繰り返し計算で構成される。本章では，アイソジオメトリック離散化特有の良さを利用することおよびそれにより必要となった新たな繰り返し計算法が提案されている。ここでは，分岐血管の無いモデルによりその有効性が示されている。

第5章では **EBZSS** よりも更にフレキシブルな計算法である **Integration-Point-Based ZSS (IPBZSS)** が提案されている。この手法は，**EBZSS** と同様に初期推定と繰り返し計算で構成されるが，特に繰り返し計算に於いて **T-spline** の利用が難しかった点について，**IPBZSS** ではその難しさが自然と回避されており，計算が安定になっていることが分かる。ここでは，分岐血管を有するモデルでの計算例が示されており，手法の安定性や **IPBZSS** の有効性が示されている。

第6章では **IPBZSS** における初期推定に於いてシェル理論を用いることで推定精度が上がることを示されている。これにより，初期推定に於いて力学的視点および解剖学的視点の両者を組み込むことができ，繰り返し計算の前に十分尤もらしい **ZSS** の推定が可能となっている。例えば，円筒形状の血管では推定と収束結果がほぼ一致しておりその推定性能の高さが示されている。このことより，繰り返し計算により初期推定の解剖学的視点が失われることが少なくなり，より現実に近い推定が可能であることが分かる。また，これまで開き角という解剖学的視点で説明されていた初期応力について表面ストレッチという視点で説明している。これは，計測データの整理方法に関しても開き角よりも表面ストレッチの方が，不変性の高いパラメータである可能性を示唆しており新たな視点の提案をしていると理解できる。

第7章はこれらの章を総括し，本研究により測定できない **invisible data** を推定することで，血管に対する高精度なモデリングが可能であることが説明されている。

以上を要するに，本論文では，血管モデルの構築において不可欠である初期応力状態の推定を力学的視点および解剖学的視点で行ったものであり，その数学モデルの新しさに加え，医工学分野に対して新たな視点を提案しており，その有用さが認められる。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。

2019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 岩崎 清隆

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）早稲田大学 吉田 誠

早稲田大学教授 博士（工学）東京大学 石村 康生