

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 鳥井 亮

本論文は「数値シミュレーションによる脳動脈瘤の成長予測に関する研究」と題して、脳動脈瘤の成長に重要な役割を果たしていると言われている壁面せん断応力を正確に予測することを目的として、血流と血管壁との相互作用を考慮した流体構造連成問題を解析可能とする数値シミュレーションシステムを開発し、開発したシステムを脳動脈瘤を有する実形状の血管形状に適用することで壁面せん断応力分布に血管壁の変形が与える影響を検討したものである。近年、血管病変の解析ツールとして、Image-Based Simulation と呼ばれる医用画像から抽出した実際の3次元血管形状を用いた血流の数値シミュレーションが盛んに行われているが、本論文では数値シミュレーションを行った結果から、壁面せん断応力の予測を行うに際して壁面の変形が得られる結果に大きな影響を及ぼしているとの知見を得ており、このことは現状において血管の弾性を無視し、血管形状を剛体壁として取り扱っている Image-Based Simulation に対して新たな方向性を提案するものである。

第1章においては序論として研究の動機、背景および目的が述べられている。ここで論文提出者は、疫学統計の結果から脳動脈瘤の成長および破裂の予測に対する要求と意義を述べるとともに、多くの血流解析に関する研究活動をまとめることにより脳動脈瘤の成長・破裂予測ツールとして血流数値シミュレーションが期待されること、またその血流数値シミュレーションを用いて脳動脈瘤の成長・破裂を解析する際に血流と血管壁との相互作用を考慮することの重要性について述べている。

第2章において、論文提出者は脳動脈瘤の発生、成長および破裂を疫学統計および病理学の2つの側面から詳しく見ることにより、脳動脈瘤の発生、成長および破裂に関する特徴についてまとめている。また、これまでに行われた脳動脈瘤の発生・成長・破裂に関する研究、および血管と血流との病理学的な関係に関する研究の結果から、脳動脈瘤の成長予測のためには特に壁面せん断応力分布を予測することが重要であることが説明されている。

第3章では、血液流れの特徴が述べられ、数値シミュレーションによって体内の血流を解析する際に注意すべき条件がまとめられている。特に血流および血管壁を数値シミュレーションによって解析する際に検討すべき課題である(1)血液の非ニュートン性、(2)血管壁の変形特性、(3)血流の境界条件(脈動速度および圧力)、(4)血管壁の変位に対する境界条件、について本研究での取り扱い方法とその理由について説明している。さらに本研究において行われるCTのデータから血管形状を抽出してImage-Based Simulationを行う際の具体的な手順の構築について述べられている。

第4章では、流体構造連成の解析手法について述べられている。本論文では流体の挙動は移動境界問題として取扱い、その計算手法として **Deforming-Spatial-Domain/Stabilized Space-Time** 法を採用し、これを血管形状に適用する際に構造の挙動を線形弾性体の動的変形として取り扱っている。流体と構造の連成を考慮した系全体の解法の構築について述べるとともに支配方程式の離散化と離散化された方程式系の解法が詳しく示している。

第5章では数値シミュレーションの結果が述べられている。単純形状の直円管およびCTより形状を抽出した3通りの実形状の血管を対象として数値シミュレーションが行われ、その結果、血管壁面の変形が壁面せん断応力の分布に有意な影響を与え得ることが示されている。さらに血管壁と血流との相互作用について、(1) 内圧によって血管が半径方向に変形するような場合、管壁の半径方向の変形が管軸と直交する断面内に2次流れを発生させ、その影響によって管軸方向流速分布が剛体円管における流速分布と異なること、(2) 血流が血管壁に衝突するような場合、内圧により血管壁が半径方向に膨張し、血管径が増大することによって管軸方向の速度が減少するため、血管壁に衝突する流速の大きさが小さくなること、(3) 複雑な曲がりを持つ血管の場合には管軸方向の流速分布が偏り、壁面付近に血流が非常に速い領域が存在し、管軸が剛体変位をすることで管内における流れの速い領域と管壁との相対位置が変化すること、(4) 血流が血管壁に衝突するような場合、その衝突部分において内圧による血管壁面の変形があると衝突部周辺の壁面付近における血流の速度勾配は大きく変化することが示されている。以上の4通りのメカニズムは全て壁面付近の血流の速度勾配に影響を与え、結果として壁面せん断応力の分布に影響を与えるものであることが説明されている。

第6章において本論文全体の結論が述べられている。

以上を要約すると、本論文において開発された流体構造連成数値シミュレーションシステムを用い血流と血管との相互作用をシミュレーションした結果、血流の数値シミュレーションにおいて従来は無視されてきた壁面の変形を考慮することの重要性が示されている。それと同時に壁面の変形が脳動脈瘤の成長に寄与していると考えられる壁面せん断応力に対してどのようなメカニズムにより影響を与えているかが示されており、血管壁と血流との相互作用に関する新たな知見が与えられている。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格であると認められる。