

審査の結果の要旨

氏名 坂東 佳憲

本論文は、「In Vitro 実験下での脳動脈瘤内血行動態の計測手法に関する研究」と題して、5章から構成されている。

本研究の計測対象である脳動脈瘤の破裂は致死率の高いくも膜下出血の主原因である。脳動脈瘤の発生・成長・破裂においては血行力学的な刺激が関与していると考えられており、実験、数値シミュレーションなどの様々な方法での研究がなされている。本研究が対象としている *in vitro* での実験においては「生体内の流れ場を再現」し、そのような条件下で「流動構造・壁の変形を計測」することが必要である。実験において「生体内の流れ場を再現」をするためには、血管の形状・変形や血流の拍動の再現が必要である。拍動と血管形状の再現については多数の研究が行われており、3次元的な流れ場が再現されている。一方、血管の変形については、変形可能な弾性材料を用いて単純形状における実験的研究が行われているが、血管の形状・弾性の両方の再現した3次元的なモデルについては、モデル製作自体が課題となっているため、実験が困難である。流動構造の計測については、空間解像度の不足や撮影領域の固定など、流れ場の計測技術が実血管形状に十分かつ柔軟に対応しておらず、得られる速度情報量に制限がある。また壁の変形については、拍動に伴って形状が変化するため、流れ場と共に3次元的な壁の変形を追跡できる手法の開発が重要である。

本論文では、血管の形状・弾性の両方を再現したモデルにおける「流動構造・壁の変形を計測」することに着目し、そのような研究において必要不可欠となる3次元的な流れ場および形状変化の計測手法の開発を目的としている。具体的には「複雑な内部形状に柔軟に対応できる3次元的な流れ場の計測手法の開発」と「流体と構造の連成によって変形する血管壁の追跡と流れ場の計測手法の開発」に取り組んでいる。その際に「生体内の状態を再現した *in vitro* 実験環境の構築」を行い、動脈瘤内全体の流動構造を把握することのできる計測手法を開発し、その手法の有用性について検証している。また、3次元的な流れ場が計測できる利点を生かし、血管の3次元的な形状を考慮した壁面せん断応力の分布の算出と検証を行っている。

第1章では、本研究で計測対象としている脳動脈瘤、および脳動脈瘤の破裂によって引き起こされるくも膜下出血の特徴と実態について述べている。その後、脳動脈瘤の発症等における血行力学的要因について説明し、それらの関連性を流体力学的観点から探る従来研究について述べている。さらに、流れ場の計測技術と *in vitro* における流動構造の計測の現状について述べ、流れ場計測における従来研究の課題点を明らかにしている。最後に本研究の目的について述べている。

第2章では、流れ場の計測手法としてステレオ PIV に着目し、複雑な内部形状に対応できるように開発したレーザ光を用いたキャリブレーション手法について説明している。さらに、移動量が既知の粒子画像を用いて従来のプレートを使ったキャリブレーション手法と算出精度の比較することで開発した手法の精度の評価を行っており、開発した手法が従

来の手法と同程度の精度を有していること確認している。

第 3 章では、剛体壁の実血管形状脳動脈瘤モデルを作製し、開発した計測手法を用いて動脈瘤全体の流動構造の計測を行った。また、計測結果を定性的・定量的に評価するために、不確かさ解析を行い、計測された速度分布と過去の一般的な動脈瘤内の流動構造の研究例、および数値シミュレーションの結果との比較を行った。その結果、流動構造は過去の研究や数値シミュレーションの結果と定性的に一致し、数値シミュレーションとの比較では血管部で定量的にも一致することを示している。これにより、複雑な内部形状に対応した流れ場の計測手法として本手法が有用であることが示されている。

またこの章では、3 次元流場が計測されていること、血管形状の 3 次元データを利用し、血管形状を考慮した壁面せん断応力の算出を行っている。流れ場において計測結果と数値シミュレーション結果がよい一致していることを踏まえて、壁面せん断応力について両者の比較を行い、算出精度について検証している。また、不確かさ解析を行い、壁面せん断応力の算出における誤差要因の検討を行った。数値シミュレーション結果と比較して、本研究で提案した方法では壁面せん断応力は低く算出される傾向にあり、その要因としては壁から離れた場所の速度を用いて壁面せん断応力を算出していることが考えられる。

第 4 章では、PIV 技術に着目し、壁部にもトレーサ粒子を分散させることにより、流体構造連成によって変形する血管壁の追跡と流れ場の計測手法の開発について説明している。本手法の実用性について検証するため、弾性直円筒管内の流れ場と壁の変形量の計測に適用し、理論解と比較した。速度場は、定常流では理論解と一致している。また、壁の変形量については、定常流では内圧支配の変形の特徴が得られている。また、拍動流では壁の変形の時間変化と内圧の時間変化では同様な波形が得られているが、定量的な評価については今後検討する必要がある。

第 5 章は結論であり、本研究において開発した手法と流れ場および壁の変形量の計測に適用した際の精度についてまとめ、今後の展望と課題点について述べている。

以上より、血管の形状・変形を再現した実血管形状の弾性壁モデルを使用した計測における課題点である、3 次元流れ場の計測、壁の変形と流れ場の計測に対する有効な手法が提案された。今後は、実血管形状をした弾性壁モデルに本手法を適用することにより、血管の形状の変化が流動構造に与える影響についての研究が期待される。また、動脈瘤に限らず血管内治療全般において、血管モデルに実際の治療の施し、治療後の流動構造の計測することによって、術後のシミュレーションや効率的な治療方針に関する研究への利用が期待される。

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。