

審査の結果の要旨

氏名 光宗 倫彦

学位請求論文に対する審査は平成19年8月3日に東京大学にて東京大学 鎮西恒雄 准教授、伊福部達 教授、満洲邦彦 教授、磯山隆 講師、東北大学 井街宏 教授によって行われた。学位請求論文の提出者 光宗倫彦 が約1時間にわたって学位請求論文の内容を発表した後、審査委員が学位請求論文の内容及び関連事項について質問と討議を行い、学位請求論文の内容と提出者の学識とを審査した。学位請求論文は「数値流体力学解析による波動型人工心臓ポンプの最適設計」と題し、5章からなる。

第1章は序論であり、人工心臓開発の歴史と問題点、本研究で対象とした波動ポンプ、および人工心臓ポンプの数値流体力学(CFD)解析について述べている。波動ポンプはポンプ内部の移動体であるディスクが歳差揺動運動という独自の運動を行うことにより血液を駆出する。原理的には容積型ポンプであるため圧力補助性能に優れ、また回転型ポンプに近い構造であるため小型化が可能であり、それぞれのポンプの欠点を補完するポンプである。血液ポンプ設計段階では高効率化だけでなく、血液適合性の向上が重要な設計目標となる。ディスクとポンプハウジングとの間隔(クリアランス)を大きくすることにより血球破壊である溶血は減少するが、拍出性能は低下する。このように拍出性能と溶血性能にはトレードオフが存在するため、本研究では上下面・側面クリアランスを設計パラメーターとして拍出性能・溶血性能をCFD解析により評価し、波動ポンプの最適設計を行うことを目的とした。ポンプ内部の移動体が単純な回転運動を行う回転型ポンプでは、移動体と流体との境界条件として回転数を定義することにより、ポンプ作用のCFDシミュレーションを行うことが可能であるが、波動ポンプはディスクが歳差揺動運動という複雑な運動を行うため移動の式が複雑となり計算時間が膨大となるため、新たなCFD解析手法の開発が必要である。

第2章では波動ポンプの拍出性能評価について述べている。新しいCFD解析手法として、ディスクの位相を2度ごと移動させた180個の計算格子を予め作成し、CFDソフトウェアに順に読み込んで物理量を補間する方法を開発した。さらに計算格子に規則正しく並んだ構造格子を用いることにより、格子の移動や設計変更を容易にモデルに反映させることが可能となった。現状の設計値である上下面・側面クリアランスが0.5mmを基準として、一方のクリアランスを固定し、他方を0.1mmから1.0mmまで変更した9つの設計モデルについて、流出入口差圧100mmHg・モーター回転数1,500rpmで一定の条件下での流量を算出し、クリアランスが拍出性能に与える影響を評価した。また、解析の妥当性を検証するため、解析と同条件で計測実験を行った。実験は一方のクリアランスを0.5mmに固定し、他方を0.3mmから1.0mmまで変更した5つの設計について行った。結果より、クリアランスを大きくすると拍出性能は低下し、また側面クリアランスの方が拍出性能に与える影響が大きいことが分かった。この傾向

は計測結果と一致しており、解析の妥当性が示された。

第3章では波動ポンプの溶血性能評価について述べている。溶血評価に必要な流出入口差圧・流量が一定となる各ポンプのモーター回転数を導出し、その回転数条件で計算を行った後、血球破壊とせん断応力・曝露時間との関係を示したモデルを基に予測溶血量を算出した。また解析の妥当性を検証するため、ウシ血液を用いて溶血試験を行い、標準溶血指標を求めた。実験は、各クリアランスを0.3mmから0.7mmまで変更した5つの設計モデルで行った。結果より、上下面クリアランスを大きくすると溶血量が減少し、また側面クリアランスを大きくすると溶血量が増加することが分かった。この傾向は溶血試験結果とほぼ一致していた。

第4章では波動ポンプの最適設計と題し、上下面クリアランスを小さくするほど溶血が増加する要因、側面クリアランスを大きくするほど溶血が増加する要因についてそれぞれ仮説を立て、せん断速度分布・流速分布により検証し、波動ポンプ内における溶血の要因について詳細に考察を行った。

第5章は結論として、拍出性能を向上させかつ溶血を低減することができるため、側面クリアランスを小さくすることで最適設計ポンプとなることが分かったと述べている。

本論文において開発したCFD解析手法は、従来研究開発されてきた容積型ポンプ・回転型ポンプの解析に適用される手法では解析が困難であった波動ポンプのような動作原理の複雑なポンプに対して適用可能であることが示された。したがって、血液ポンプ設計の自由度を大幅に向上させることができ、医工学の分野に大きく貢献していると認められる。

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。