

氏名	村上 倫子
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博理工第555号
学位授与年月日	平成29年9月20日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	薄小型補助人工心臓用磁気浮上カスケードポンプの研究
審査会	委員長 増澤 徹 委員 田中伸厚 委員 近藤 良 委員 栗原 和美

論文内容の要旨

本研究では心不全の重症化予防のため、中程度の心不全患者への補助人工心臓適応が有効であると考え、胸部筋層下にペースメーカーのように埋め込むことができる薄小型補助人工心臓の開発を行っている。開発した第1試作機は、目標性能である揚程100mmHg、流量2L/minを回転数2000 rpmで達成し、補助人工心臓としての性能を十分に有していることを確認している。しかし、非制御軸の変動が不明であることと、径方向の磁気浮上制御域が狭く、血液ギャップが0.2 mmと小さいことがより安全安心な補助人工心臓を実現するための問題となっている。そこで本研究では磁気浮上カスケードポンプの非制御軸の変動評価とデバイスの改良を行った。

I 非制御軸の変動評価

磁気浮上を用いることは、摺動部品を撤廃し、広い血液流路を確保できるという利点がある。しかし、同時にセンサや制御コイル等の部品点数の増加、制御系等システムの複雑化、消費電力の増加による多種の問題が生じる。そこで、少ない制御軸数で完全浮上を実現するかが課題となる。本デバイスでは駆動部に径方向2軸のみを制御するセルフベアリングモータを採用し、軸方向と傾きは永久磁石による受動安定特性を利用することで制御軸数削減を図っている。しかし、非制御軸の存在は本デバイスの浮上インペラの安定性にどのような影響を与えているのか現在、十分な検討がなされていない。特に磁気浮上ポンプにおいて、磁気浮上の低支持剛性により浮上インペラが揺れ、血液ギャップが変動することによる溶血発生が問題となる。そこで本研究においては制御軸数を削減した本デバイスの浮上インペラの変動の把握と流体力による影響についての検討を行った。

本デバイスの第1試作機を用いて血液と同等の粘度である3mPa・sに調節したグリセリン水溶液を作動流体として浮上インペラの回転軸を除く5軸の変動測定を行った。非制御軸である軸方向の最大変動振幅は目標性能を達成する回転数2000 rpm、流量2 L/minにおいて0.041mmと可動可能域(0.4 mm)と比較し約1割と十分小さく、本デバイスはポンプ使用域において安定浮上していることを確認した。また、非制御軸の浮上インペラ変動がポンプ効率と負の相関が見られたことから、ポンプ内流れの乱れによる流体力変動が浮上インペラの変動原因の1つであると考えた。

そこで本研究では、カスケードポンプ内の圧力不均衡により浮上インペラに生じる流体力による影響を検討するために非定常流体解析を行った。目標性能を達成する回転数2000 rpm、流量2 L/minにおいて発生揚程は実機で100 mmHg、数値流体解析で103 mmHgと良い一致を見た。軸方向の平均推定流体力は0.01 Nと小さく、推定流体力の最大振動振幅も0.03 Nと小さいことを確認した。

以上の研究により、浮上インペラの軸方向の変動は可動域と比較し、十分小さく、変動原因の1つである流体力も非定常流体解析により十分に小さいことを確認した。これより、本デバイスにおいて非制御軸である軸方向の浮上が流体力が原因で破綻する可能性が低いことを明らかにした。

II 磁気浮上カスケードポンプの改良

径方向の磁気浮上制御域を広げることが目的とし、数値計算と3次元静磁場解析を用いてラジアル型セルフベアリングモータの改良を行った。エアギャップを0.8 mmから1.3 mmに拡大し、負ばねを第1試作機の-9.2 Nから-4.9 Nまで約半分に低減した。負ばねの低減により径方向の制御域を0.2 mmから0.4 mmに拡大した。空気中での浮上回転実験の結果、回転数4400 rpmまでの浮上回転を確認し、径方向の最大振動振幅を第1試作機の約半分となる0.097 mmまで低減した。

ステータ径の増加への対応、解剖学的見地においてより埋め込みやすいインレットとアウトレットの配置とすることを目的とし、カスケードポンプの改良を行った。定常流体解析

を用いてカスケードポンプを設計製作した結果、目標性能を回転数1800 rpmで達成し、その時の径方向の最大振動振幅は0.035mmと小さいことを確認した。

本研究の成果により、磁気浮上ポンプを補助人工心臓へ適用をするにあたり課題となる制御軸数を削減した本デバイスの浮上インペラの変動の把握と流体力による影響についての検討を行った。また、磁気浮上カスケードポンプを改良し、負ばねの削減により径方向の磁気浮上制御域を広げた。これらの結果より、今後、より安全安心な補助人工心臓の実現が行えると考えられる。

論文審査の結果の要旨

【論文の要旨】胸部筋層下にペースメーカーのように埋め込むことができる薄小型補助人工心臓の実現を目指して、径方向支持型セルフベアリングモータとカスケードポンプを組み合わせた第1試作機を製作し、目標性能である揚程100mmHg, 流量2L/minを回転数2000 rpmで達成可能であることを確認した。しかし、制御域が狭く、血液ギャップが0.2 mmと小さいこと、非制御軸の変動が不明であることが問題となっている。そこで本研究では径方向支持型磁気浮上カスケードポンプの非制御軸の変動評価とデバイスの改良を行った。

I. 浮上インペラの非制御軸の変動評価：第1試作機を用いて浮上インペラの回転軸を除く5軸分の変動測定を行った。非制御軸である軸方向の最大振動振幅は目標性能を達成する回転数2000 rpm, 流量2 L/minにおいて血液と同等の粘度である3mPa・sにおいて0.04mmであり、本デバイスは使用域において全軸で安定浮上していることを確認した。浮上インペラの非制御軸に変動を生じさせる主要因と考えられる、カスケードポンプ内の圧力不均衡により生じる浮上インペラにかかる流体力を非定常流体解析により推定した。その結果、軸方向の平均推定流体力は流量2 L/minにおいて0.01 Nと十分に小さい値であることを確認した。これより、浮上インペラの軸方向の変動は可動域と比較し、十分小さく、推定流体力も十分に小さいことから、本デバイスにおいて非制御軸である軸方向の浮上が流体力が原因で破綻する可能性は低いことを明らかにした。

II. 磁気浮上カスケードポンプの改良：数値計算と3次元静磁場解析による磁気浮上モータ設計手法を考案し、径方向支持型セルフベアリングモータの改良を行った。負ばねの減少により径方向の制御域を0.2 mmから0.4 mmに拡大した。空気中での浮上回転実験の結果、回転数4400 rpmまでの浮上回転を確認し、径方向の最大変動振幅を第1試作機の約半分となる0.10 mmに低減した。その結果、ポンプ目標性能を回転数1800 rpmで達成し、径方向最大振動振幅0.04mmの非常に安定した磁気浮上ポンプを開発できた。

【論文の特色と学術上の寄与】実験と数値流体解析により浮上インペラの非制御軸上変動と流体力の関係を明らかにした点に新規性がある。その上で人工心臓のサイズ等の制約下での磁気浮上ポンプ設計手法を考案し、セルフベアリングモータの負ばね減少、磁気吸引力増加に成功し、十分な性能を有する磁気浮上補助人工心臓を実現した。本内容は学術上に寄与するのみならず産業上にも寄与する。

【判定】審査会では、必要単位が全て修得されていること、予備審査で指摘された事項が全て解決・修正されていることを確認した。本論文の内容は学術誌論文3編、国際学会論文1編に発表されており生産科学専攻の博士号取得条件を満たしている。以上を総合して、本論文は博士（工学）の学位論文として十分であり合格と判定する。