## 人工心臓用磁気浮上系の最適化設計に関する研究

Optimization design of magnetically suspended system for artificial heart

06NM430N 鈴木 健一

指導教員: 增澤 徹 教授

1. はじめに 従来の連続流式人工心臓では、インペラを回転・支持するための軸が必要である。この軸と回転インペ ラ部の血液漏れ防止のシール部の低寿命、摩擦によって発 生する熱による血液破壊・凝固などの多くの問題があり、 連続流式人工心臓の長期使用が困難である。この問題を解 決するために、インペラの支持に「磁気軸受技術」を用い る。磁気軸受の中でも、永久磁石と電磁石を併用するハイ ブリッド磁気軸受は、省エネ化・小型化が可能で現在注目 されている。本研究では、人工心臓に応用可能な扁平型ハ イブリッド磁気軸受を対象に、磁気軸受の最適化設計手法 の開発及び磁気軸受の最適化を行った。

## <u>2. 方法</u>

2.1 扁平型ハイブリッド磁気軸受の概要 Fig.1 に最適化 の対象とする磁気軸受の構造を示す。本磁気軸受は4つの 分割ステータコア、4 つの永久磁石および浮上ロータで構 成される径方向支持のハイブリッド磁気軸受である。各分 割ステータコアは中央に1つの主極とその両端に2つの補 極を持ち、主極にはコイルが巻かれ、制御磁束を発生させ るための電磁石となっている。補極は制御磁束を流れ易く するために取り付けている。永久磁石はバイアス磁束を発 生させるためのもので、各分割ステータコア間に磁極を対 向して組み込む。本磁気軸受は磁気回路を径方向の二次元 平面上に形成するので、漏れ磁束が少なく高効率が期待で きる。また、軸受形状が扁平型なので、軸方向サイズを縮 小できる利点を持つ。



Fig.1 Structure of magnetic bearing

Fig.2 に本磁気軸受の径方向吸引力発生原理を示す。永久 磁石によりバイアス磁束を破線矢印の方向に流す。制御磁 束の流れの方向が上下で同じとなるように、同じ大きさの 電流を上下の電磁石に流すことにより(プッシュプル方式)、 実線矢印方向に制御磁束を発生させ、バイアス磁束に制御 磁束を重ね合わせる。これにより上側主極エアギャップで は磁束が増加し、下側主極エアギャップでは磁束が減少す る。その結果、ロータには上方向の吸引力が発生する。



Fig.2 Force production mechanism

2.2 最適化設計手法 本研究では、漏れ磁束を考慮した磁 気等価回路、遺伝的アルゴリズム、有限要素法を用いた三 次元数値解析を用いた最適化設計手法を開発した。Fig.3 に 本磁気軸受の漏れ磁束を考慮した磁気等価回路を示す。仮 定磁路法により、主極エアギャップ、補極エアギャップ、 ステータコア間の漏れ磁束を考慮した。



(1) for permanent magnet



(2) for electric magnet Fig. 3 Electric equivalent circuit

Fig.4 に開発した最適化設計プログラムのフローチャートを示す。本プログラムでは、まず、①漏れ磁束を考慮した磁気等価回路より導出した理論式により、GA を用いて最良値を求める。次に、②求めた最良値で有限要素法を用いた三次元数値解析を実行し、性能を評価する。ここで、 ③数値解析の結果より磁気飽和の有無を判定し、磁気飽和があれば、GA の磁気飽和の制約条件を厳しくなるように補正し、再び GA を実行して最良値を求め、数値解析を行う。この一連の作業により、磁気軸受の最適化設計を行う。



Fig.4 Flowchart of optimization method

- 以下に設計条件を示す。
- 目的関数: 径方向吸引力
- 設計変数: 主極の幅、補極エアギャップ長、補極の 角度、永久磁石の角度、ステータの径方向長さ、 永久磁石の径方向長さ、電磁石のコイル巻き数

○ 制約条件: 磁束密度 1.5 T 以下、製作可能な形状 3. 結果 開発した最適化設計手法を用いて、扁平型ハイブ リッド磁気軸受の最適化設計を 10 回行った。Fig.5 に最適 化した軸受の吸引力を、Fig.6 に最適化した軸受で吸引力が 大きかった上位 4 個の解析モデル図を示す。吸引力が最も 大きかった計算結果 No.7 は主極の幅 8.7 mm、補極エアギ ャップ長 2.5 mm、ステータの径方向長さ 5.7 mm、補極の 角度 5.8 度、永久磁石の角度 6.3 度、永久磁石の径方向長 さ 12.5 mm、コイル巻き数 204 巻きで、数値解析より 24.1 N の吸引力が発生可能であった。Fig.7 に計算結果 No.7 の 励磁電流 2 A 時の吸引力とロータ変位の関係を示す。



Fig.5 Attractive force of optimized magnetic bearing



Fig.7 Relationship between attractive force and rotor displacement of calculation result No.7

4. 考察 Fig.6 より、最適化した軸受の形状には、①補極 が薄い、②永久磁石が薄い、③補極と永久磁石の径方向長 さがほぼ同じ、といった特徴がある。①の理由は、本磁気 軸受の構造上、補極では主極と逆向きの吸引力を発生する からである。この逆向きの吸引力を軽減するために補極は 薄くなる。②の理由は、①により補極の磁気抵抗が大きく なり、補極の制御磁束の通り易くするという本来の役割が 果たせなくなったからである。このため、補極の代わりに 永久磁石部を制御磁束が流れるように、永久磁石が薄くな った。③の理由は、できるだけ永久磁石の断面積を大きく し、バイアス磁束を増加させるためである。以上より、補 極の役割が本来の制御磁束の通り道を作り、制御磁束を増 加させるというものから、永久磁石の断面積を大きくし、 バイアス磁束を増加させるというものに変わったといえる。 このように、より発生吸引力が向上する構造に変化してお り、開発した最適化手法の有効性が確認できた。

試作機による実測値と解析値との比較から、実測値は解 析値の約 60%である。これより、最適化した磁気軸受は実 際に14N程度の吸引力発生が可能であり、人工心臓へ十分 応用が可能な磁気軸受の設計が行えた。

5. まとめ ゴリズム、有限要素法を用いた三次元数値解析を用いた最 適化設計手法を開発し、扁平型ハイブリッド磁気軸受の最 適化設計を行った。開発した手法の有効性を確認し、数値 解析で24.1 N の吸引力を発生可能な磁気軸受を設計した。