

斜流ポンプ型人工心臓のための小型磁気軸受の開発

Development of a miniaturized magnetic bearing for an artificial heart with diagonal-flow pump

05NM418T 中山 直久

指導教官：増澤 徹 教授

1. 諸言

重症心不全患者の長期治療、心臓移植までの橋渡しとして人工心臓の開発が求められている。さらに近年、日本国内においても、小柄な体格に体内埋め込みが可能な、小型で高耐久な人工心臓の開発が進められている。

そこで我々は、小型化の可能性の高い連続流式人工心臓において問題とされる、機械的接触部分における血球破壊、血栓形成を防ぐ、磁気浮上技術を応用した人工心臓の開発を行っている。磁気軸受によりインペラを非接触に磁気支持することで、機械的摺動部品を撤廃した人工心臓が実現できる。今回、人工心臓への応用を目指した磁気浮上型斜流ポンプを考案し、本ポンプのための小型な磁気軸受の開発を行った。

2. 方法

2. 1 磁気浮上型斜流ポンプと磁気軸受

Fig.1 に磁気浮上型斜流ポンプと磁気軸受の構造を示す。本磁気軸受は 4 つの磁気軸受コアと 4 つの永久磁石により構成されるステータ、および浮上回転体であるロータから成る。各軸受コアにはコイルが巻かれ、制御用の磁束を発生させる電磁石となる。永久磁石はバイアス磁束発生用で、各軸受コア間に組み込まれる。また、ロータの位置検出のための渦電流センサを設置し、ロータの軸方向の位置 (Z) および X 軸、Y 軸周りの傾き (θ_x 、 θ_y) の制御を行う。

Outlet 側に設置したモータにより、インペラを回転させることで Inlet から入った血液を加速させ、Outlet へと送出する。

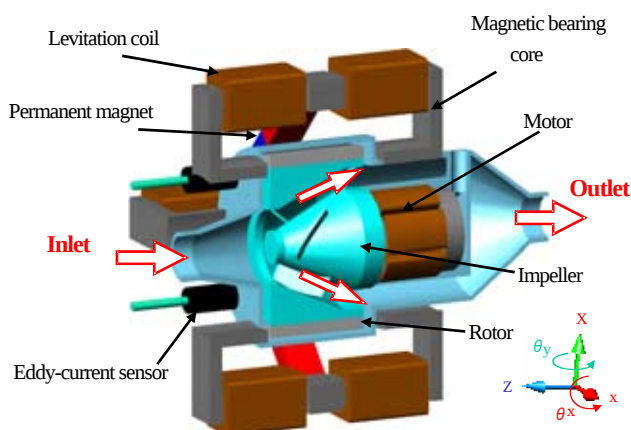


Fig.1 The magnetically suspended diagonal flow pump

2. 2 斜流ポンプ用磁気軸受の原理

Fig.2 に本ポンプに用いる磁気軸受による軸方向位置制御の原理を示す。本磁気軸受内には破線矢印で示されるような方向に永久磁石によるバイアス磁束が通常流れている。ここで浮上体であるロー

タが図中で左方向に外力を受けた場合を考える。この場合、各コイルに電流を流すことで、実線矢印で示される方向に制御磁束を発生させ、右側エアギャップ中の磁束を強め、逆に左側ギャップ中の磁束は弱める。その結果、ロータには図面右方向の磁気吸引力が働き、ロータを中心位置へ変位させることが可能となる。

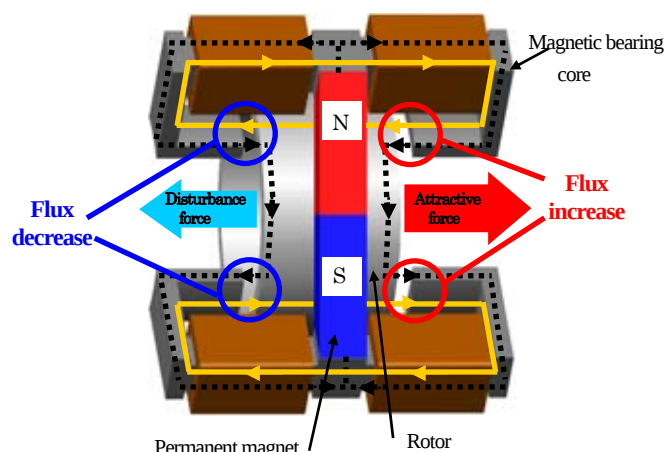


Fig.2 Magnetic flux pass way for axial position control

2. 3 斜流ポンプ用磁気軸受プロトタイプ的设计開発

24.8 [N]の軸方向磁気吸引力の発生を目標とした小型磁気軸受を設計し、製作した (Fig.3)。製作した磁気軸受は全長 53.4 [mm]、外径 51.2 [mm]である。また軸方向磁気吸引力を測定した結果、最大 4.6 [N]の吸引力が発生可能であったが、目標吸引力を得ることは出来なかった。

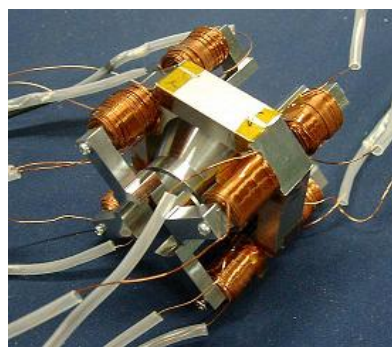


Fig.3 Developed magnetic bearing (Prototype)

2. 4 遺伝的アルゴリズムを用いた最適化設計手法

磁気軸受プロトタイプの開発結果から、磁気軸受の最適化設計手法の確立およびそれによる最適化が必要であると考えた。そこで、最適化問題を解くための手法として、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA) を用いることとした。GA は、広い設計空間から比較的良好な解もしくは近似解を短時間で探し出せる手法であり、本磁気軸受の設計に適していると考えた。GA を基に

作成した最適化設計プログラムのフローチャートを Fig.4 に示す。終了条件を、本磁気軸受をポンプとして使用したとき、ロータが 5000 [rpm] 時に受けるスラスト力 (20 [N]) とモータが発生する磁気吸引力 (13.6 [N]) の差である 6.5 [N] 以上の磁気吸引力を満足したときとした。また本プログラムにおける目的関数を浮上用の磁束密度および消費電力、磁気軸受の長さおよび直径とし、それぞれ 1.5 [T]、3 [W]、76 [mm]、76 [mm] とした。尚、磁気吸引力の計算式は磁気回路の電気等価回路式から求め、漏れ磁束を考慮するために補正係数 0.1 を掛けた。

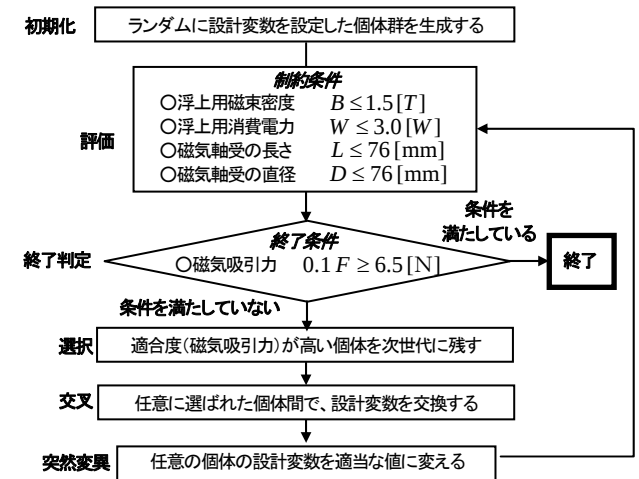


Fig.4 Flow of the optimization design for the magnetic bearing

2. 5 磁気軸受の磁場解析

最適化設計計算の結果を元に設計した磁気軸受において、漏れ磁束を低減するための永久磁石配置の検討を、有限要素法を用いた 3 次元磁場解析を行った。さらに磁気飽和を起さず、十分な軸方向磁気吸引力が発生可能であることを調べた。

3. 結果および考察

3. 1 最適化計算結果

本磁気軸受の磁気吸引力を Fig.4 に示す。結果から、条件が緩い方に個体が集中していることが分かる。また磁気吸引力が良い結果ならば、消費電力が悪い結果となるというように、一方が良ければもう一方は悪くなるというパレート解となっている。以上から、GA を用いた最適化設計計算が正常に行えたと考える。

さらに、得られた結果を元に磁気軸受の設計を行った。モータの吸引力を考慮した場合、6.5 [N] 以上の磁気吸引力が発生可能であれば十分であることから、最も浮上用消費電力が小さい個体を選び、設計を行った。個体を元に決定した磁気軸受の各寸法を Table.1 に示す。軸受全長 72 [mm]、軸受外径 76 [mm] の磁気軸受を設計することが出来た。

3. 2 磁気軸受の磁場解析

Fig.6 に磁石を中央に設置したときの磁束密度分布図を示す。励磁電流 0.429 [A] 時に 5.9 [N] の磁気吸引力が得られることが推定され、これにより 10% の誤差で最適化計算が行えていることが分かった。しかし、コイル設置部にて磁気飽和が確認された。Fig.7 に、永久磁石を両端に設置した場合の磁束密度分布図を示す。漏れ磁束が低減でき、中央設置時と同じ励磁電流で 9.6 [N] の吸引力が

得られることが分かった。なおかつ、軸受中央の磁石設置部が不要となり、軸受全長を 60 [mm] まで短縮できた。

4. 結言

磁気浮上型斜流ポンプのための小型磁気軸受の考案を行った。さらに遺伝的アルゴリズムを用いた磁気軸受設計のための最適化設計手法を考案し、それを用いて軸受全長 72 [mm]、外径 76 [mm] の磁気軸受を設計した。設計した軸受の磁石設置位置を、有限要素法を用いた 3 次元磁場解析により検討した。その結果、磁石位置を軸受両端に設置することで漏れ磁束を低減でき、さらに、軸受全長の短縮が行えた。

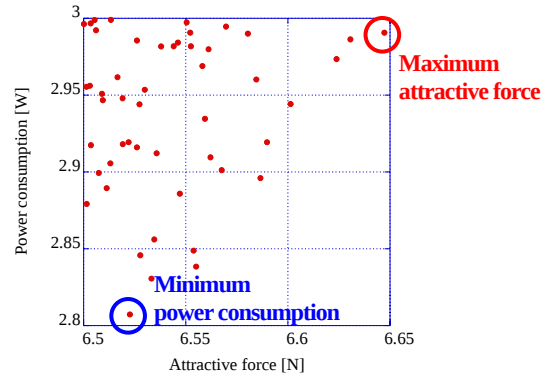


Fig.5 Result of the optimization design with genetic algorithm

Table.1 Size of each part of the magnetic bearing

Attractive force [N]	6.52
Power consumption [W]	2.81
Current [A]	0.429
Cross sectional area of the permanent magnet [mm ²]	63.9
Length of the permanent magnet [mm]	30.9
Winding [turn]	494
Length of the magnetic bearing [mm]	72
Diameter of the magnetic bearing [mm]	76

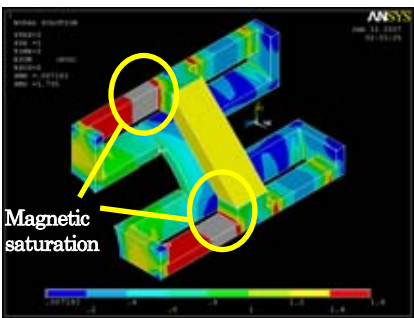


Fig.6 Flux density (one magnet type)

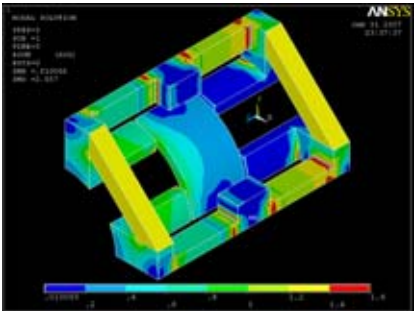


Fig.7 Flux density (separated magnet type)