

# 両心補助用磁気浮上人工心臓の研究開発

Bi-ventricular assist device with a magnetically levitated motor

09NM426A 寺山 昌幸

指導教員：増澤 徹 教授

## 1. 緒言

重度の心不全患者に対する治療法として心臓移植があるが、臓器提供者が不足している。そこで人工心臓の研究開発が進められている。研究されている人工心臓の多くは左心または右心を補助する片心補助人工心臓であり、両心補助人工心臓の開発が遅れている。両心補助を必要とする患者は片心補助人工心臓適用後の発症も含め全体の 10～20% いると言われ、今後人工心臓の適用症例増加に伴う増加が懸念される。そこで本研究では一つのアクチュエータで左右二つの遠心ポンプを同時に駆動し両心を補助する小型な両心補助用磁気浮上人工心臓の研究開発を行った。

## 2. 方法

**2.1 両心補助人工心臓** 図 1 に提案する両心補助用磁気浮上人工の概略図を示す。本人工心臓は中央に二枚のロータディスクを有した磁気浮上モータを設置し、上下のロータディスクにインペラを形成、ポンプケーシングに封入することで上下に二つの遠心ポンプを有した定常流型両心補助人工心臓を構成する。また、両心補助人工心臓として生体の状態に合わせた左右ポンプ拍出量の調整を行う。これはインペラの軸方向浮上位置を変位させることでインペラ、ケーシング間の間隙を調整し、ポンプ内部の二次流れを変化させることで行う。

**2.2 磁気浮上モータの概要** 図 2 に磁気浮上モータの構造を示す。本磁気浮上モータは上部にモータステータ、下部に磁気軸受を有した一つの電磁石コア、電磁石コアを挟み込む回転用、浮上用の二枚のロータディスク、ロータディスクを繋ぐ電磁石コアを貫通した連結シャフトにより構成される。ロータディスクには回転、浮上のため永久磁石が設置されており、電磁石コアに対し常に吸引力を発生している。この吸引力を磁気軸受により制御することで磁気浮上を行う。

図 3 に磁気軸受の構造を示す。本磁気軸受は 90 度間隔に配置した 4 つの電磁石、永久磁石を組み込んだ浮上用ロータディスクにより構成する。浮上用ロータディスクには径方向に着磁した一次永久磁石と軸方向に着磁した大小二つの二次永久磁石を組み込む。一次、二次の永久磁石によるバイアス磁束と電磁石による磁束を重畳し強力な磁気支持性能を有するダブルバイアス型磁気軸受を構成する。4 つの電磁石に同方向の電流を励磁し、吸引力を強弱し軸方向位置を制御する。対向する電磁石に逆方向の電流を励磁し、対向する電磁石の吸引力に不均衡を発生させ径方向軸まわりの傾きを制御する。

浮上制御は磁気軸受の電磁石間に設置した 4 つの渦電流変位センサによりロータの軸方向位置及び径方向軸まわりの傾きを検出し、デジタル PID 制御を行う。回転制御はホール IC により、回転用ロータディスクの永久磁石切り換わりを検出し回転数を求め、デジタル PID 制御を行う。

**2.3 磁気浮上モータの設計** 平成 20 年度に製作した試作機を基に直径 50 mm、高さ 40 mm の磁気浮上モータの設計・製作を行った。また、インペラの軸方向変位について検討を行うため二枚のロータディスク間の間隙が異なる三本の連結シャフトを用意した。

**2.4 磁気浮上モータの評価** 磁気浮上モータの性能を評価するため磁束密度、軸方向吸引力、回転トルク、磁気浮上性能を測定した。磁気軸受、モータの間隙、励磁電流に対する磁束密度、軸方向吸引力を測定した。磁気軸受の軸方向吸引力を基に力係数、加速度係数を算出した。モータの回転数を一定とし間隙、負荷トルクに対する消費電力を測定した。消費電力からモータ効率を算出した。

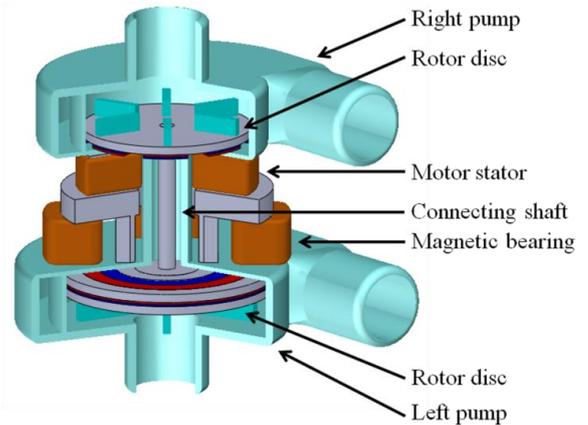


図 1 両心補助用磁気浮上人工心臓

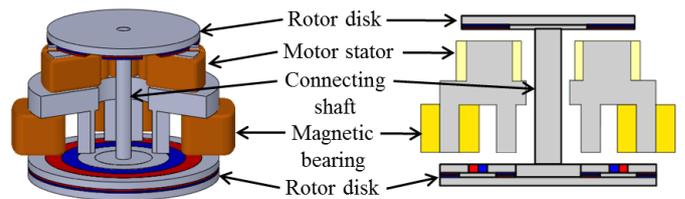


図 2 磁気浮上モータ

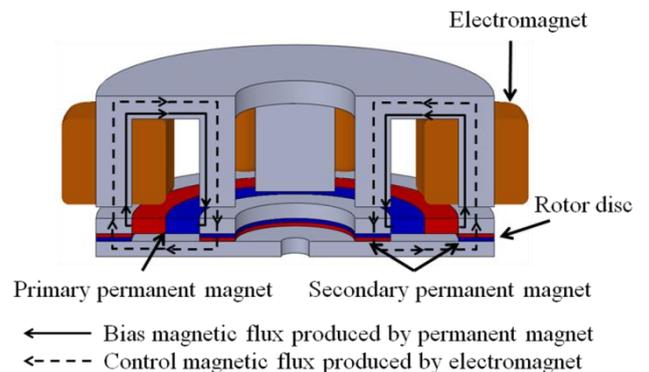


図 3 ダブルバイアス型磁気軸受

空気中における磁気浮上・回転を行い消費電力、軸方向振動振幅、最大傾きを測定した。磁気浮上・回転はロータを軸方向に変位した場合についても測定を行った。

**2.4 両心補助用ポンプ試験機的设计** 数値流体解析により左右遠心ポンプの設計を行い、両心補助用ポンプ試験機の設計・製作を行った。本磁気浮上モータは径方向変位を受動安定としているため径方向スラスト力の小さなダブルボリュート形状をポンプに採用した。

### 3. 結果及び考察

**3.1 軸方向吸引力測定試験** 図4に磁気軸受とモータの軸方向吸引力測定結果を示す。磁気軸受は間隙2.0mmにおいて力係数7.2 N/A, 加速度係数69.7 m/(s<sup>2</sup>・A)であった。また、間隙1.5mm, 励磁電流0Aにおけるモータの軸方向吸引力26.4 Nに対し間隙2.5mm, 励磁電流2.5Aにおける磁気軸受の軸方向吸引力28.2 Nと対抗可能である結果が得られた。このことからロータと電磁石コア間の間隙を磁気軸受, モータ共に2.0mmとした時にロータを±0.5mm変位可能であると考えられる。

**3.2 回転トルク測定試験** 図5に間隙1.5mm, 2.0mm, 2.5mmにおける回転トルクに対する消費電力とモータ効率を示す。どの間隙においても目標値30mNmを達成可能であった。消費電力は回転トルクとともに増加し、間隙が狭まるほど増加する傾向がみられた。モータ効率は最高で46%ほどであったがこれは人工心臓としてロータ, ステータ間の間隙を広くしているためである。

**3.3 磁気浮上・回転性能評価試験** ロータと電磁石コア間の間隙を磁気軸受, モータともに2.0mmとする連結シャフトと±0.5mmの長さとなる3本を用意し、磁気浮上・回転性能評価を行った。連結シャフトの長さにより短いほど強い軸方向吸引力を釣り合わせ浮上するため浮上の剛性は高いが、軸方向変位に対する吸引力の差も大きくなるため軸方向可動範囲が狭まる傾向がみられた。そこで間隙とともに2.0mmとする連結シャフトを採用する。図6に軸方向振動振幅, 径方向軸まわりの最大傾きの結果を示す。回転数は4000rpmまで確認でき、使用回転数の2000rpmでは軸方向可動範囲は0.6mmであった。また軸方向振動振幅はほぼ150μm以下を維持し、最大傾きも0.25deg程度で広範囲において安定した浮上回転を実現した。

**3.4 両心補助用ポンプ試験機的设计** 数値流体解析を利用し左右遠心ポンプを設計し、試験機を製作した。製作した磁気浮上モータ, ポンプ試験機により水中における2000rpmの浮上回転に成功した。左心側ポンプは1800rpmにおいて流量20L/min, 揚程46mmHgであった。右心側ポンプは2000rpm時に流量9L/min, 揚程8.2mmHgであった。

### 4. 結言

一つのアクチュエータで両心を補助でき、小型な両心補助用磁気浮上人工心臓の研究開発を行った。製作した磁気浮上モータは空気中において十分な磁気浮上・回転性能を有していることを確認した。また、ポンプ試験機を製作し水中における浮上・回転, ポンプ性能評価を行い、2000rpmの浮上回転に成功した。

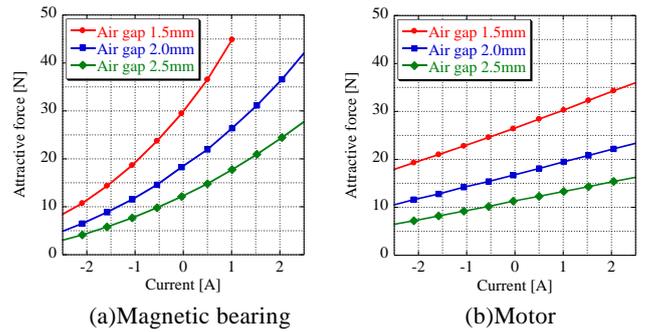


図4 軸方向吸引力測定結果

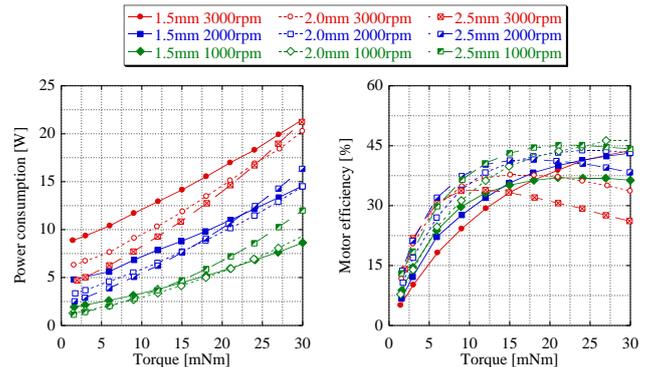


図5 回転トルク測定結果

Plot	MB side [mm]	Motorside [mm]	Plot	MB side [mm]	Motorside [mm]
.....	2.3	1.6	—	1.9	2.0
.....	2.2	1.7	—	1.8	2.1
.....	2.1	1.8	—	1.7	2.2
—	2.0	1.9	—	1.6	2.3

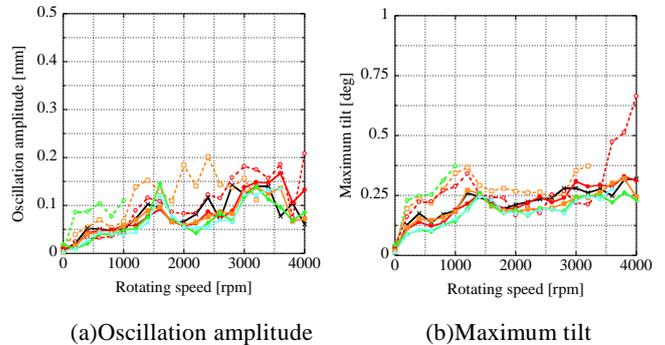


図6 磁気浮上・回転性能評価

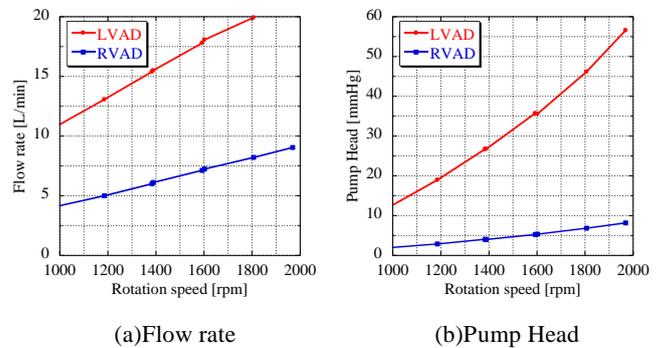


図7 両心補助用ポンプの拍出性能