

全置換型人工心臓用磁気浮上モータの改良

The improvement of maglev motor for total artificial heart

○ 國府田 芳彰(茨城大) 増澤 徹(茨城大) 長 真啓(茨城大) Daniel L Timms (BiVACOR.Inc)

Yoshiaki KODA, Toru MASUZAWA, Masahiro OSA, Ibaraki University

Daniel L Timms, BiVACOR.Inc

Abstract: A magnetically levitated total artificial heart has been developed with a single magnetically levitated motor. The device has double pumps which replace left and right ventricles. A stator which has both of a magnetic bearing (MB) core and a motor stator core is set at center of the device. A levitated part is formed with left and right pump impellers which are connected with a shaft through the center hall of the stator core. These impeller's axial position and tilting around radial axes are controlled by the magnetic bearing, and its radial position is passively supported with attractive force exerted on the impellers. In this study, two types of the MB and two types of the motor stator are developed. Four types of the combination of the MB and the motor stator are evaluated their levitation stability and the power efficiency to find suitable combination stator.

Key Words: Magnetic bearing, Magnetically levitated motor, Total artificial heart

1. 諸元

重症心不全患者を救う方法として，心臓移植が挙げられるが，心臓移植にはドナー不足という問題がある．そこで心臓移植までのブリッジ使用，あるいは心機能の半永久的補助を目的に補助人工心臓が用いられている．しかし両心が荒廃した患者に適用可能な全置換型人工心臓は未だに臨床に供せるものが存在しない．更に長期の左心補助人工心臓適用患者の 10~20 % に右心不全併発が報告されているため，両心補助装置や全置換型人工心臓の開発が望まれる⁽¹⁾．そこで我々は磁気浮上モータの技術を応用した全置換型磁気浮上人工心臓 IB-Heart (Innovative Bi-Ventricular Artificial Heart)の開発を行っている

本デバイスでは磁気軸受ステータとモータステータを一体化させたステータコアを中央に配置し，浮上インペラの浮上位置及び回転制御を行っている．本研究では 2 種類の磁気軸受ステータと 2 種類のモータステータを製作し，各ステータの性能評価試験を行った．またステータの最適な組み合わせを見つけるために，4 つの組み合わせの磁気浮上モータについて磁気浮上回転性能を評価した．

2. 方法

2.1 全置換型磁気浮上人工心臓の概要

Fig. 1 に IB-Heart の概要図を示す．IB-Heart はデバイス中央に設置した磁気浮上モータと左心用，右心用の二つの遠心ポンプケーシングから構成する．ステータコアは左心側が磁気軸受ステータ，右心側がモータステータであり，それぞれに対面するように浮上用と回転用の二枚のディスクを配置する．二枚のディスクはステータ中央を貫く連結ロッドによって接続し，同一回転数で駆動する．各ディスクに羽根を取り付け浮上インペラとする．

Fig. 2 に磁気浮上モータの浮上・回転制御システムの概要を示す．本システムは磁気浮上モータ，渦電流変位センサ，ホールセンサ，PID コントローラ，パワーアンプから成る．本デバイスでは浮上インペラの軸方向，傾き角度，回転速度は能動的に制御する．インペラ軸方向位置と径方向軸周り傾き角度を渦電流変位センサで検知し，回転速度をホールセンサで検知する．各センサ出力をもとに PID 制御則で制御電流を計算しパワーアンプで各コイルに制御電流を流す⁽²⁾．浮上インペラ径方向変位は浮上インペラにかかる磁気吸引力により受動的に支持する．

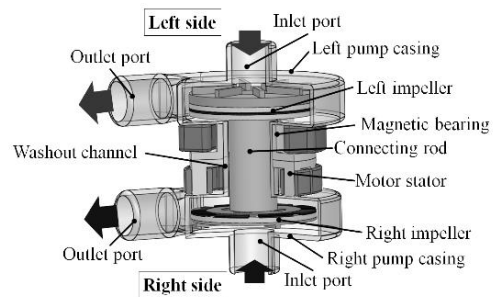


Fig. 1 Structure of IB-Heart

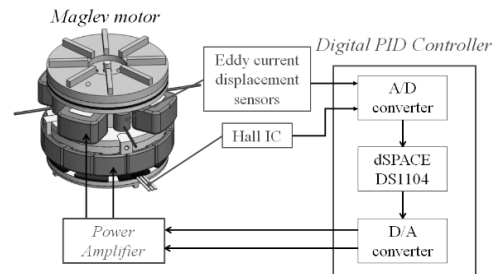


Fig. 2 The control system

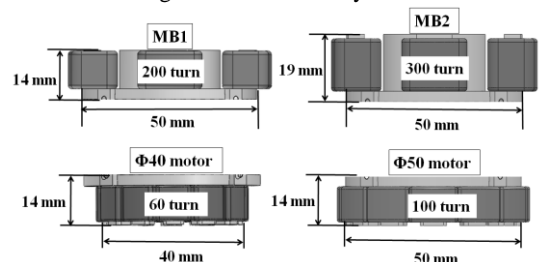


Fig. 3 Outline figures of the stators

2.2 磁気浮上モータ性能評価試験

本デバイスにおいて，2 種類の磁気軸受（小型，低制御力の MB1 と大型，高制御力の MB2）と 2 種類のモータステータ（小型，低トルク，外径 40 mm の Φ40 モータと大型，高トルク，外径 50 mm の Φ50 モータ）を製作した．Fig. 3 に各ステータの概要図を示す．

2.2.1 磁気吸引力測定

磁気軸受の制御性能を知るために軸方向磁気吸引力を測定した．ステータ - ロータ間隙を変化させ，各間隙でコイ

ルを励磁したときの磁気吸引力を測定する．間隙を 1.5, 2.0, 2.5 mm と変化させ，励磁電流は-2.0 A から+2.0 A まで 0.5 A 刻みで変化させた．

2.2.2 回転トルク測定

モータの回転性能を知るために回転トルクを測定した．モータをサーボ制御，電気角位相差 90 deg で駆動し⁽³⁾．回転時にロータに回転トルクを負荷したときの U 相電流を測定する．間隙は 1.5, 2.0, 2.5 mm とし，回転数は 1000 rpm から 2500 rpm まで 500 rpm 刻みで変化させた．負荷はロータ実指令回転数が指令回転数に満たなくなるまで 5 mNm 毎に変化させた．

2.2.3 磁気浮上回転性能評価

各ステータを組み合わせてステータコアとし，計 4 つの組み合わせにおいて浮上インペラの最大振動振幅，最大傾き角度，及びモータ消費電力を測定し，磁気浮上回転性能を評価した．振動振幅の許容値は 0.4 mm，傾き角度の許容値は 1.2 deg である．インペラ浮上位置は，磁氣的釣合い点付近である間隙 1.9 mm とし，各浮上位置において回転数を 0 rpm から 3000 rpm まで 500 rpm ずつ変化させた．

3. 結果

3.1 磁気吸引力測定

Fig. 4 に磁気軸受の各間隙における磁気吸引力をそれぞれ示す．この結果より，磁気吸引力は間隙増加に伴い減少し，励磁電流増加に伴い増加する傾向を得た．間隙 2.0 mm, 0 A における磁気吸引力は MB1 で 18.9 N，MB2 で 17.0 N であった．また MB1 より MB2 の方が励磁電流増加に対する吸引力増加率が高くなった．

2.3 回転トルク測定

Fig. 5 に回転数 2000 rpm のときの回転トルク測定結果を示す．想定使用条件（間隙 2.0 mm，回転トルク 30 mNm）において，励磁電流 1 A 当たりの回転トルクは Φ40 モータで 26.0 mNm/A，Φ50 モータで 47.8 mNm/A であった．

2.4 磁気浮上回転性能評価

Fig. 6 から Fig. 8 に各回転数における最大振動振幅，最大傾き角度，消費電力をそれぞれ示す．振動振幅は MB2 と Φ50 モータの組み合わせにおいて 500 rpm 時に最大値 0.27 mm，最大傾き角度は MB1 と Φ50 モータの組み合わせにおいて 500 rpm 時に最大値 0.79 deg，消費電力は MB1 と Φ50 モータの組み合わせにおいて 2500 rpm 時に最大値 24.7 W となった．また MB2 と Φ50 モータの組み合わせにおいて 1500 rpm 付近に共振点を確認した．

4. 考察

4.1 磁気吸引力測定

MB1 より MB2 の方がコイル巻数が多いため，MB2 の方が励磁電流増加に対する吸引力増加率が高くなった．これより磁気軸受は設計通りの性能を持つことを確認した．

4.2 回転トルク測定

コイル巻数とロータ半径の増加のため，励磁電流 1 A 当たりの回転トルクは Φ40 モータより Φ50 モータの方が大きくなった．これよりモータステータは設計通りにトルク向上を図ることが出来た．

4.3 磁気浮上回転性能評価

MB1 と Φ40 モータの組み合わせにおいて振動振幅，傾き角度が小さくなり，一番高い安定性を確認した．対して MB1 と Φ50 モータの組み合わせにおいて安定性が劣化した．これはモータ径が大きく，不均一な回転磁場で発生する傾きトルクの増加が原因であると考えられる．

また浮上インペラは共振点において不安定であったが，想定使用点付近の 2000 rpm においては十分な安定性を示した．特に Φ50 モータとの組み合わせでは MB1 と Φ40 モータとの組み合わせと同程度の安定性を示し，低消費電力な磁気浮上モータとなった．

以上より，MB1 と Φ40 モータの組み合わせが最も安定性が高くなった．この組み合わせはトルクは小さいが目標性能は満たしており，かつ小型である．よって IB-Heart に用いる磁気浮上モータとして適切なのは MB1 と Φ40 モータであると結論する．

5. 結言

開発中の全置換型磁気浮上人工心臓 IB-Heart に用いる磁気浮上モータにおいて，磁気軸受ステータとモータステータを 2 種類ずつ製作し，性能評価試験と 4 つの組み合わせにおける磁気浮上回転性能を評価した．その結果，MB1 と Φ50 モータの組み合わせ以外の 3 組で十分な磁気浮上回転性能を有することを確認した．特に MB1 と Φ40 モータの組み合わせが最も安定性が高く，最適な組み合わせである．

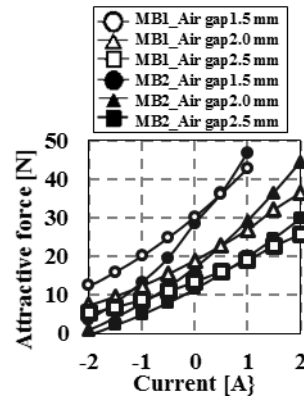


Fig. 4 Attractive force

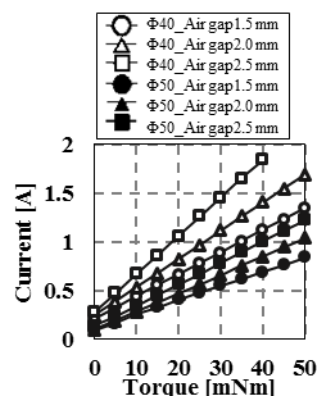


Fig. 5 Rotating torque

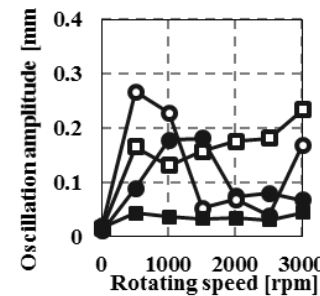


Fig. 6 Oscillation amplitude

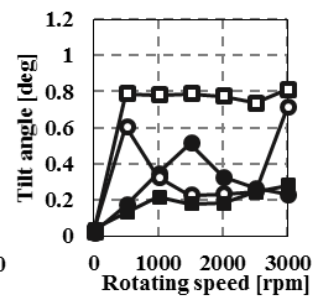


Fig. 7 Tilt angle

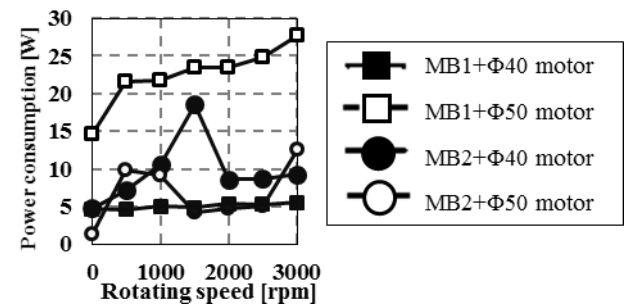


Fig. 8 Power consumption

参考文献

(1) 日本人工臓器学会，人工臓器は，いま，はる書房，2003