

乳児用小型磁気浮上人工心臓の開発

Magnetically suspended artificial heart for infant

○長真啓 (茨城大学) 増澤徹 (茨城大学) 巽英介 (国立循環器病研究センター)

Masahiro OSA, Ibaraki University

Toru MASUZAWA, Ibaraki University

Eisuke TATSUMI, National Cardiovascular Center

Key Words: Magnetically suspended motor, Infant, Artificial heart

1. 緒言

本邦では、年間 3000 人にのぼる新生児、乳児の死亡者のうち 33% が先天性奇形を含む循環器・呼吸器系の疾患を死因としている。その救命方法として、人工循環デバイスの適用は有効であると考えられるが、小型、低充填量、高耐久かつ溶血、血栓形成を起こさない乳児用人工循環デバイスは未だ開発されていない。本研究では、乳児用磁気浮上人工心臓の実現を目指し、専用のダブルステータ型磁気浮上モータの考案、評価を行ったので報告する。

2. 方法

2-1 乳児用磁気浮上人工心臓の概要

乳児用血液ポンプの目標性能は、揚程 100 mmHg に対して回転数 4000 rpm で、流量 1 L/min を送出可能であることとした。Fig.1 に乳児用人工心臓の構成を示す。本人工心臓は、上部ステータ、下部ステータ、浮上インペラにより構成され、浮上インペラを上部ステータ、下部ステータにより軸方向に挟み込む構造の磁気浮上モータを考案した。ダブルステータ型の磁気浮上モータを採用することにより構造を単純化するとともに回転トルクの向上を図った。上部ステータ、下部ステータはそれぞれ 6 突極とし、各突極には軸方向位置・回転制御用コイルおよび傾き制御用コイルをそれぞれ独立して配置した。浮上インペラには、2 極の永久磁石が軸方向両表面にそれぞれ配置される。上部ステータと下部ステータで発生させる磁気吸引力を釣り合わせることで浮上インペラの浮上制御を行う。

2-2 ダブルステータ型磁気浮上モータの設計

乳児用人工心臓専用のダブルステータ型磁気浮上モータは、外径が 24 mm、全長が 41 mm である。上部ステータ、下部ステータに巻かれている 1 突極あたりの軸方向位置・回転制御用コイルを 70 巻、傾き制御用コイルを 70 巻とした。浮上インペラの質量は 38 g である。

2-3 ダブルステータ型磁気浮上モータの制御原理

本人工心臓は、浮上インペラの軸方向位置、回転および径方向軸回りの傾きを能動的に制御する。軸方向位置および回転の制御は、ベクトル制御を用いることによりそれぞれを独立に制御することが可能である。軸方向位置・回転制御用コイルにより発生する 3 相 2 極の回転磁界を B_s 、浮上インペラに配置した永久磁石から発生する磁束を B_m とすると、 B_s 、 B_m は以下の式で表すことができる。

$$B_s(\theta, t) = B_s \cos(\omega t - \theta) \quad (1)$$

$$B_m(\theta, t) = B_m \cos(\omega t - \theta - \psi) \quad (2)$$

ここで、 B_s 、 B_m はステータおよび永久磁石から発生する磁束密度の波高値、 ω は浮上インペラの回転速度、 ψ はステータが

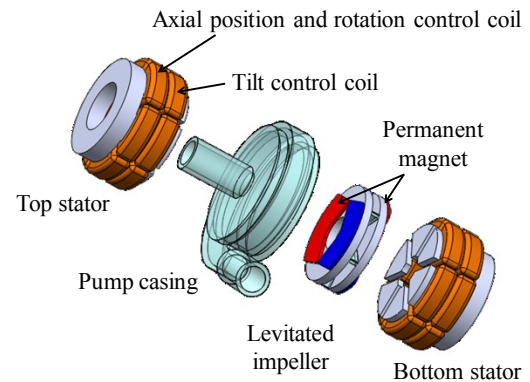


Fig.1 Pediatric artificial heart

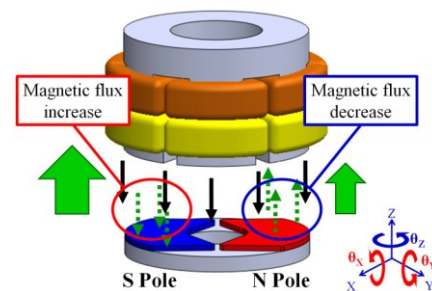


Fig.2 Tilt control principle

発生する回転磁場と永久磁石が発生する磁場との電気角位相差を示している。また、ステータと浮上インペラ間のエアギャップに蓄えられる磁気エネルギー W は以下の式で与えられる。

$$W = \int_V \frac{B^2}{2\mu_0} dV \quad (3)$$

式 (3) より、軸方向の吸引力および回転トルクは以下の式で表すことができる。

$$F = \frac{\partial W}{\partial z} = \frac{(r_2^2 - r_1^2)\pi}{4\mu_0} \{B_M^2 + B_M B_S \cos\psi + B_S^2\} \quad (4)$$

$$\tau = \frac{\partial W}{\partial \psi} = \frac{z(r_2^2 - r_1^2)\pi}{2\mu_0} B_M B_S \sin\psi \quad (5)$$

ここで、 r_1 、 r_2 は浮上インペラの内径および外径、 z は永久磁石の厚みを含むエアギャップを示している。式 (4)、(5) より、制御磁束の波高値と位相差を変化させることにより軸方向吸引力と回転トルクをそれぞれ制御する。

Fig.2 に傾き制御の原理図を示す。本モータの傾き制御用コ

イルはそれぞれが直列につながれており、直流電流を励磁することにより同一方向に様な制御磁束を発生させる。Fig.2の破線矢印が浮上インペラ表面に配置した永久磁石から発生する磁束、実線矢印が制御用コイルにより発生する制御磁束を示している。ステータと浮上インペラ間のエアギャップ中の磁束密度は、永久磁石のS極側では強めあい、N極側では弱めあうため、浮上インペラに働く磁気吸引力には不均衡が生じる。磁気吸引力の不均衡により発生する復元トルクにより浮上インペラの傾きを制御する。浮上インペラの上下で永久磁石を90 deg ずらして配置し、上部ステータ、下部ステータに傾き制御用コイルを配置することにより径方向2軸回りの傾きを制御することを可能とする。浮上インペラの径方向位置は、軸方向吸引力により発生する受動安定性により静的に支持するものとした。

2-4 磁気浮上・回転制御システム

Fig.3に磁気浮上モータの磁気浮上、回転制御システムを示す。本モータの磁気浮上、回転制御にはDSPを用いたデジタルPID制御を採用した。浮上インペラの軸方向位置および径方向軸回りの傾きの検出には、90 deg 間隔に4つ配置した渦電流変位センサを用いた。浮上インペラの回転角および回転数の検出には、浮上インペラ下面に30 deg 間隔に12枚配置した回転角検出用永久磁石とホールセンサを用いた。デジタルPID制御に用いたサンプリング周波数は10 kHzとした。

2-5 磁気浮上・回転性能評価

デジタル制御システムにダブルステータ型磁気浮上モータを接続し、磁気浮上、回転性能の評価を行った。浮上インペラの回転数は100 rpm 間隔で変化させた。各回転数における浮上インペラの軸方向位置の最大振動振幅および径方向軸回りの傾きを評価した。上部ステータ、下部ステータと浮上インペラ間のエアギャップはそれぞれ1.5 mm とした。ケーシングと浮上インペラのクリアランスは0.25 mm、傾きの余裕を0.72 deg である。

3. 結果・考察

Fig.4に浮上インペラの磁気浮上、回転時における軸方向位置の最大振動振幅を示す。空气中において300 rpm までの浮上回転が可能であった。最大振動振幅は96 μm と十分に小さいことが分かった。本モータが磁気浮上時に高速回転できなかった原因として、回転数300 rpm 付近に共振点が存在しており、共振点での振動を十分に抑えることができないためであると考えられる。共振点において十分な制御性能が得られなかった原因について、浮上インペラの傾きについて考察する。Fig.5に回転数350 rpm における浮上インペラの傾き θ_x 、 θ_y の変化を示す。Fig.5より、回転する浮上インペラの傾きは周期的に振動しており、その振動周期は浮上インペラの回転周期と同期していることが確認できる。共振点において、軸方向位置・回転制御用コイルは浮上インペラの軸方向の共振を抑制するように回転磁場を発生させる。傾き制御により浮上インペラの傾きを抑えきれないとき、傾いた浮上インペラに対して回転磁場はその傾きを助長するように作用する。そのため、回転周期と同期した最大傾きが0.36 deg の傾き変動が起きているものと考えられる。以上の結果より、傾き制御性能が十分得られていないことが分かった。本点は、磁気浮上系の簡単化のために、傾き制御用磁気回路が開磁路となる構造を採用しているためであると考えられる。今後、傾き制御用磁気回路に閉磁路を用いたシステムの検討を行い、傾き制御性能の向上を図る必要があると考える。

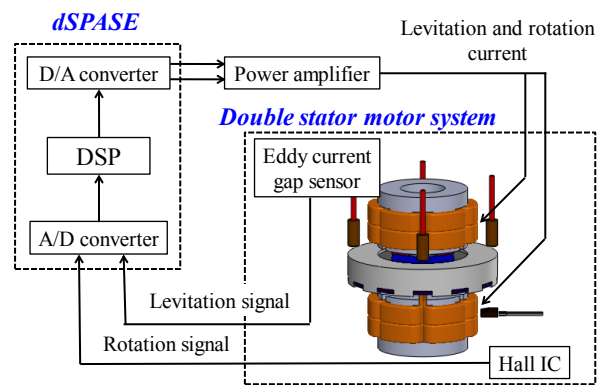


Fig.3 Digital control system

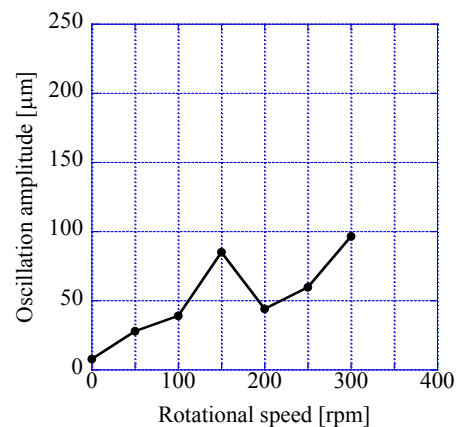


Fig.4 Maximum oscillation amplitude during levitated rotation in the air

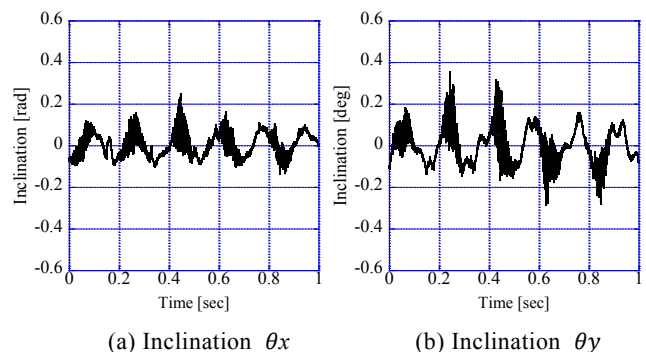


Fig.5 Inclination of the levitated impeller with rotational speed of 350 rpm

4. 結論

乳児用人工心臓のためのダブルステータ型小型磁気浮上モータを考案し、設計、製作、評価を行った。開発した磁気浮上モータは、300 rpm までの浮上回転に成功した。浮上回転時の共振点における浮上インペラの軸方向の振動振幅および傾きを検証したところ、開発したモータの傾き制御に開磁路となる磁気回路を用いているため、高い制御力が得られないことが示唆された。今後、閉磁路を形成した傾き制御システムに改良することにより傾き制御性能の向上を図り、磁気浮上モータを血液ポンプへ組み込み評価を行う。