

磁気浮上血液ポンプの高機能化に関する研究

Improvement of magnetically levitated blood pump

03T1039G 佐々木 瑛祐

指導教員：増澤 徹 教授

1. 緒言

人工心肺を用いた体外循環治療(ECMO)の長期化によって、血液ポンプの長寿命化が求められている。そこで本研究では、遠心血液ポンプのインペラを軸方向に磁気支持することにより、機械的摺動部品を完全撤廃した高耐久な磁気浮上血液ポンプの開発を行っている。昨年度に開発された磁気浮上血液ポンプは、大きなバイアス磁石の割に十分な磁気浮上性能が得られず、浮上可能回転数に限られ、その消費電力も大きいといった欠点を有していた。そこで本年度は、磁気浮上血液ポンプの高機能化として、浮上性能と回転性能の向上を図り、低消費電力で安定した浮上回転が可能な磁気浮上モータの実現を目指した。

2. 方法

2.1 磁気浮上モータの概要

Fig.1 に磁気浮上モータの概略図を示す。本モータは磁気浮上用の上部ステータ、回転制御用の下部ステータで浮上ロータを上下にはさみ込む構造を採っている。Fig.1 の破線は磁気浮上系のバイアス磁束の流れを、実線は制御磁束の流れを示している。上部ステータは、90度間隔に配置されたコの字型電磁石をバイアス磁束用永久磁石によって繋げた形状とした。これにより、大きな永久磁石によるバイアス磁束が得られ、高い剛性が得られる。また電磁石による制御磁束がバイアス磁石中を通過しないため、制御磁束を大きくできる。しかし、このままの形状ではバイアス磁束が電磁石コア内に進入した際に内側と下方の磁路に分岐してしまい、電磁石による吸引力制御ができない。そこで、電磁石コア内に薄いバイアス磁束誘導用永久磁石を組み込んだ。この永久磁石によって、バイアス磁束を下方の磁路一方に流れるように制限している。この浮上用磁気回路によってロータに働く軸方向の磁気吸引力を増減させることで、ロータの軸方向位置及び傾き制御を行っている。径方向の振動抑制については、軸方向の吸引力より発生する受動安定性によって静的に抑制している。ロータの回転数を制御している下部ステータは12突極とし、3相8極の電磁石によって回転磁場を発生させている。下部ステータにより軸方向吸引力が生じるため、ロータにかかる上部ステータと下部ステータの軸方向吸引力が釣り合わせるように設計し、低消費電力化を図っている。

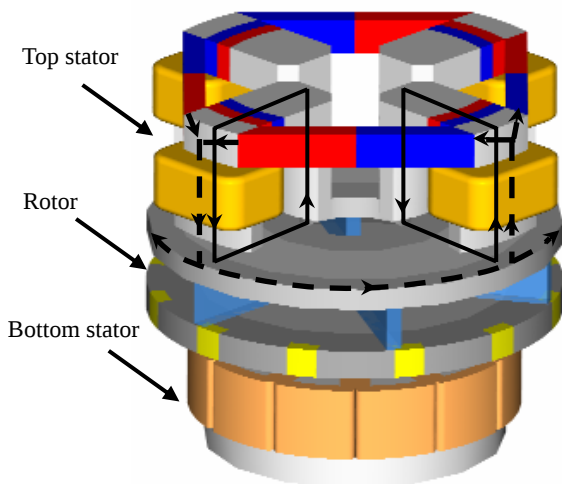


Fig.1 Axially levitated motor

2.2 回転性能の向上:回転制御系の再設計

下部ステータの設計は、電気等価回路に置き換えて行った。式(1)に発生トルクの式を示す。ステータ径を大きくし回転用永久磁石の面積を大きくすることで、同一発生トルク下で電磁石に必要な電流を減少させ、低消費電力化を図った。

$$T = \frac{MNI_c \pi}{2} (r_2^2 - r_1^2) B_m \sin M\psi \quad (1)$$

M : 極対数 r_2 : 外半径 ψ : 巻き数
 N : 巻数 r_1 : 内半径 B_m : 永久磁石の磁束密度
 I_c : 電流

2.3 浮上性能の向上:磁気浮上系の再設計

有限要素法による3次元磁場解析を行い、誘導用永久磁石の厚み、断面積について検討した。誘導用永久磁石は制御磁束の磁路中にあるため、厚みを大きくすることでバイアス磁束を大きくできるが、制御磁束の磁気抵抗は大きくなってしまふ。そこで、3次元磁場解析によって、最適な誘導用永久磁石寸法を導出した。

3. 結果及び考察

3.1 回転制御系の再設計

ステータ外径を $\phi 40$ [mm]から $\phi 58$ [mm]とすることで、消費電力が約40 [%]低減できることがわかった。測定の結果、消費電力が約2 [W]低減できた。また下部ステータによる軸方向吸引力の理論値は26.7 [N]となった。

3.2 誘導用永久磁石厚みの検討

3次元磁場解析を用いて誘導用永久磁石厚みを検討した。Fig.2 に誘導用永久磁石厚みを変えたときの軸方向吸引力を示す。誘導用永久磁石厚みを1 [mm]から3 [mm]に変更することで、軸方向吸引力が励磁電流なしで13.9 [N]から20.5 [N]に、励磁電流2.5 [A]で31.9 [N]から37.5 [N]に増加することが分かった。また、厚み3.0 [mm]では磁石厚みを厚くしたことによる性能低下は見られなかった。

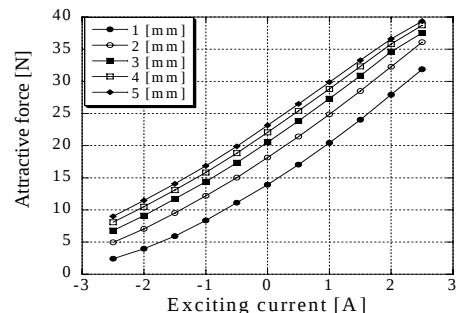


Fig.2 Attractive force in the axial direction

3.2 誘導用永久磁石断面積の検討

3次元磁場解析を用いて誘導用永久磁石断面積を検討した。誘導用永久磁石高さを6 [mm]から7 [mm]に変更し、断面積を 14.5×6 [mm²]から 14.5×7 [mm²]とすることで、軸方向吸引力が励磁電流なしで20.5 [N]から25.7 [N]に増加することが分かった。これにより、上下ステータによる吸引力を釣り合わせることができた。また磁気飽和の影響は確認されなかった。

4. 結言

磁気浮上血液ポンプの高機能化として、磁気浮上系と回転制御系の再設計を行った。回転制御系の再設計により、回転消費電力を約2 [W]低減できた。また、浮上・回転系の再設計により、ロータの軸方向支持力を14 [N]から26 [N]に倍増でき、高剛性で低消費電力な磁気浮上モータを設計できた。