

高性能磁気浮上型クリーンポンプの開発

A magnetically suspended clean pump

07NM415F 黒須 寛秋

指導教官：増澤 徹 教授

1. はじめに

近年、半導体、有機、液晶分野で、洗浄時に用いる超純水や研磨時に用いる CMP スラリーなどを送液する無塵ポンプとして、無摺動、無拍動でよりクリーンな送液性を有する磁気浮上遠心ポンプの需要が高まっている。本ポンプは、浮上ロータをケーシングで封入した canned motor 構造を採っている。ポンプの耐圧性や耐食性の信頼を高めるためにはより厚いケーシング壁が必要である。そこで、ワイドギャップに対応可能な 4 軸制御型磁気軸受・モータシステムの提案を行い、設計最適化手法を用いた、磁気浮上クリーンポンプの開発、評価を行ったので報告する。

2. 方法

2.1 ダブルバイアスハイブリッド磁気軸受・モータシステム

Fig. 1(a)に本システムの概略図を示す。本システムは回転制御を行うモータステータの両端に、浮上制御を行うラジアル磁気軸受を 2 つ有する。バイアス磁束発生用の永久磁石として、一次永久磁石をモータステータと磁気軸受コアの間に、二次永久磁石を磁気軸受 C 型コアの突極に対向するロータ表面にそれぞれ配置した。磁気軸受 C 型コアにはコイルを巻き、浮上制御用磁束を発生させる電磁

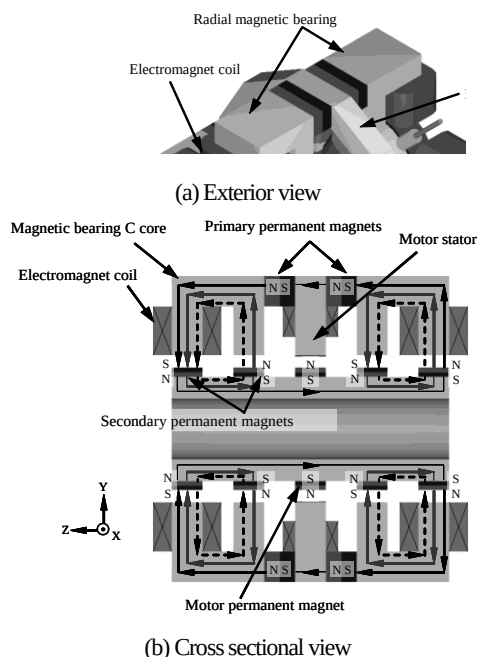


Fig. 1 Hybrid magnetic bearing and motor system

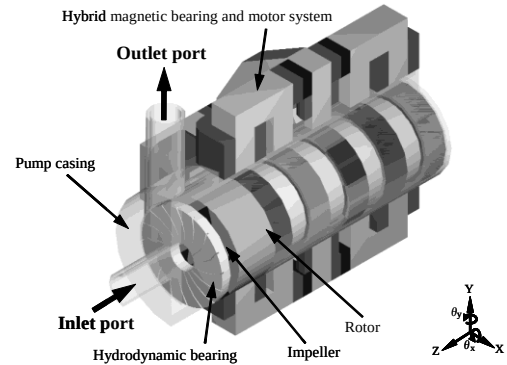


Fig. 2 Magnetically suspended clean pump

石とした。ロータの径方向位置は、4 つの渦電流変位センサにより検出する。ロータ中央には 8 枚のモータ用永久磁石を貼り付け、12 突極のモータステータで発生する 3 相 8 極の回転磁界により回転する。Fig. 1(b)に磁気軸受の断面図を示す。実線はバイアス磁束を、破線は制御磁束をそれぞれ示している。一次永久磁石で発生したバイアス磁束の流れを二次永久磁石によって発生したバイアス磁束で外側突極中のみに流れるように誘導することで、より強力なハイブリッド磁気軸受を実現した。図に示すように制御磁束を流すと、ロータ上側のエアギャップ中の磁束は増加し、下側エアギャップ中の磁束は減少し、ロータに図中上方向の吸引力が働くことになる。このように、制御磁束でギャップ中に磁束を制御することにより、ロータの径方向位置 (X, Y) の制御が可能となる。また、8 つの磁気軸受コアを独立に制御することにより径方向軸回りの傾き (θ_x , θ_y) も制御可能である。ロータの軸方向位置 (Z) は、磁気支持系の受動安定性によって静的に支持することとした。

2.2 磁気浮上型クリーンポンプ

Fig. 2 に磁気浮上型クリーンポンプの構造図を示す。ロータ先端に、軸方向タッチダウン防止用動圧軸受を有するインペラを設置した。ロータをポンプケーシングで覆い、その周りに磁気軸受・モータシステムを設置し、磁気浮上遠心ポンプを構成する。流体は流入口から入り、インペラで加速され、流出口から送出される。ポンプの目標性能はインペラ回転数 6000 rpm、最大揚程 58.8 kPa (6 mH₂O)、最大流量 $16.7 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ (10 L/min) と設定した。

2.3 磁気軸受の設計

高い磁気支持性能を有するダブルバイアスハイブリッド磁気軸受を開発するため、有限要素法を用いた三次元磁場解析により、二次永久磁石配置の検討を行った。最適な二次永久磁石の配置で、発生磁気吸引力の目標値を 20 N と設定し、本研究室で開発された、設計最適化プログラムを使用し、磁気軸受 C 型コアのサイズやコイル巻数等の設計最適化を行った。

2.4 性能評価実験

専用の磁気吸引力測定実験装置を製作し、本磁気軸受の径方向発生磁気吸引力を測定する実験を行った。また、本磁気軸受の安定性を評価するため、FFT アナライザを用いて周波数応答を測定した。開発した磁気軸受・モータシステムの磁気浮上回転性能を評価するため、空気中において磁気浮上回転実験を行った。さらに、水実験回路に開発した磁気浮上型クリーンポンプを接続し、ポンプ排出性能評価実験を行った。また、動圧軸受とインレットポート側のポンプケーシング間にスペーサを設置し、動圧軸受の性能評価も行った。

3. 結果および考察

3.1 磁気軸受の設計

三次元磁場解析により、二次永久磁石を2つともロータ表面に配置することで、最大磁気吸引力 16.2 N を得られることがわかった。Fig. 3 に設計最適化プログラムを実行した結果から得られた磁気軸受形状を示す。外径 100 mm、長さ 140 mm、1 次永久磁石厚さ 1.3 mm、二次永久磁石厚さ 1.6 mm、電磁石コイルの巻数 463 turn の磁気軸受・モータシステムの設計が行えた。三次元磁場解析により、設計した磁気軸受は、コイル励磁電流 1.0 A で 39.8 N の磁気吸引力を発生可能であると推定された。

3.2 磁気浮上型クリーンポンプ

Fig. 4 に製作した磁気浮上型クリーンポンプを示す。本ポンプは外径 $\phi 100$ mm、長さ 160 mm であり、ロータ・インペラとポンプケース間の流路幅は軸方向に 2.0 mm、径方向に 0.5 mm である。ロータ・インペラの質量は 780 g である。

3.3 性能評価実験

Fig. 5 に径方向磁気吸引力測定実験の結果を示す。開発した磁気軸受は、コイル励磁電流 1.0 A で 36.4 N の磁気吸引力を発生可能であることを確認した。これは、三次元磁場解析により推定された吸引力の 91.4 % であった。周波数応答測定の結果より、前側と後側の両磁気軸受における共振点での制振効果と、141.3 Hz までの良好な制御性能を確認した。空気中における磁気浮上回転実験の結果より、開発したシステムは、回転数 9000 rpm まで破綻することなく、非接触で回転可能であることを確認した。Fig. 6 に本ポンプの HQ 特性を示す。ポンプ駆動時では、回転数 6000 rpm まで回転し、最大揚程 9.32 mH₂O、最大流量 25.2 L/min のポンプ排出性能を有していることを確認した。回転数 6000 rpm のときのみ、流量 17.8 L/min 以上の高流量域では回転数が指令回転数に達しなかった。このため、高流量域で HQ カーブの落ち込みが、若干急になっている。これは、逆起電力の影響により、モータコイルに十分な電流を流せなかったことが原因である。全ポンプ域における径方向位置の最大値は、441 μ m、径方向振動振幅の最大値は、193 μ m であり、どちらも径方向クリアランス 500 μ m より小さかった。動圧軸受とスペーサ間距離の最小値は、38.5 μ m であり、本動圧軸受により、回転時のロータ・インペラの軸方向タッチダウンを防止できることが確認できた。以上より、十分な磁気支持性能およびポンプ性能を有した磁気浮上型クリーンポンプが開発できた。

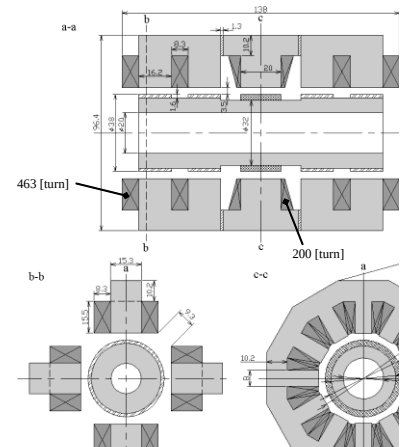


Fig. 3 Dimensions of the hybrid magnetic bearing and motor system

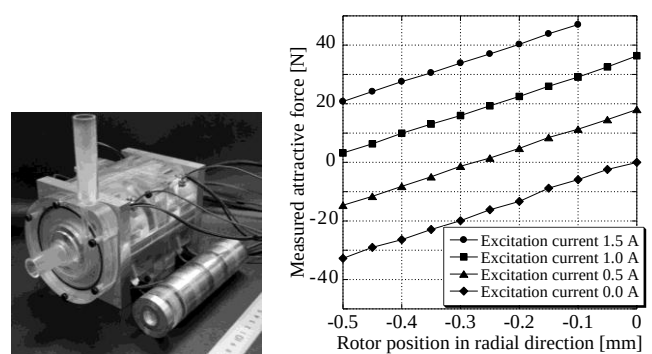


Fig. 4 Developed clean pump

Fig. 5 Measured attractive force

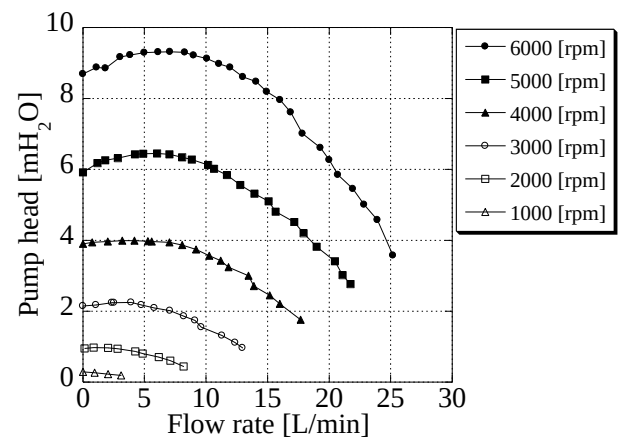


Fig. 6 HQ characteristic

4. まとめ

ワイドギャップに対応可能な 4 軸制御型磁気軸受・モータシステムの提案を行い、設計最適化プログラムを用い、外径 100 mm、長さ 140 mm、エアギャップ 3.5 mm のシステムを開発した。本システムにおいて、浮上用コイル励磁電流に対する発生磁気吸引力の割合を示す力係数は 36.4 N/A であった。また、開発したシステムを用いた外径 $\phi 100$ mm、長さ 160 mm の磁気浮上型クリーンポンプを開発した。本ポンプは最大揚程 9.32 mH₂O、最大流量 25.2 L/min のポンプ排出性能を有し、ロータ・インペラは 6000 rpm まで非接触で回転できることを確認した。