

学術論文

4 軸制御型磁気軸受を用いた磁気浮上クリーンポンプの研究開発

Magnetically suspended clean pump with four degrees of freedom controlled magnetic bearing

黒須 寛秋^{*1}(学生員), 増澤 徹^{*1}(正員), 加藤 綾子^{*1}(正員), 小沼 弘幸^{*2}, 柿原 功一^{*2}Hiroaki KUROSU (Stu. Mem.), Toru MASUZAWA (Mem.), Ayako KATO (Mem.),
Hiroyuki ONUMA, Kouichi KAKIHARA

A new hybrid magnetic bearing and motor system with wide air gaps has been developed, and a magnetically suspended clean pump with the system has been developed. The optimization method to determine the optimal values of the design parameters has been developed based on magnetic equivalent circuit technique, genetic algorithm and three dimensional magnetic field analysis. The size of the hybrid magnetic bearing C core, the thickness of the permanent magnets, and the turn number of the electromagnets are optimized by the method. The developed system has an outer diameter of 100 mm, a length of 140 mm, and air gaps of 3.5 mm. And the developed pump has an outer diameter of 100 mm, a length of 160 mm. The measured ratio of force to excitation current is 36.4 N/A. The rotor-impeller could be driven up to a rotational speed of 6000 rpm without touching anywhere. The developed pump indicates sufficient pump performances which are maximum pump head of 9.37 mH₂O and maximum flow rate of 27.3 L/min.

Keywords: hybrid magnetic bearing, magnetic levitation, clean pump, optimization.

1 緒言

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 スリラーなどを送液する無塵ポンプとして, 無摺動, 無拍動に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。磁気軸受は非接触で摩擦・磨耗がなく, クリーン性が高いので[1], 高耐久かつ長寿命が求められるターボポンプ, 人工心臓などへの応用が研究されている[2-5]。また, 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り, 磁気浮上遠心ポンプを対象とした磁気軸受におけるステータと浮上物体間のエアギャップは, 一般的な磁気浮上システムより大きくなる。今回, 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, 設計変数最適化手法[6]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

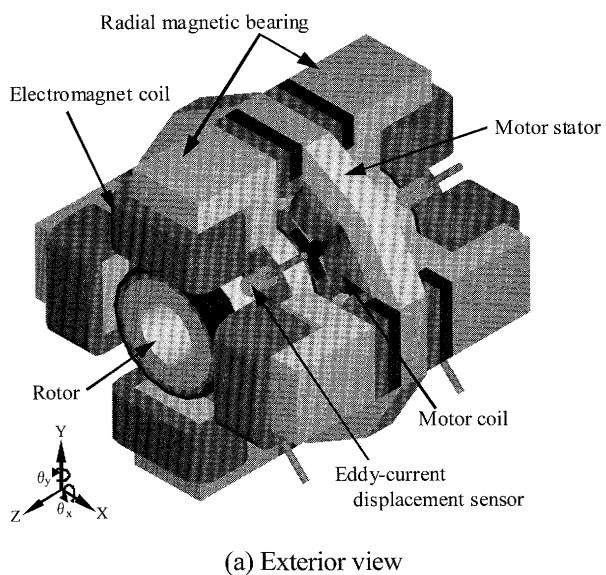
2.1 4 軸制御型ダブルバイアスハイブリッド磁気軸受・モータシステム

連絡先 : 増澤 徹, 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町
4-12-1, 茨城大学工学部機械工学科,

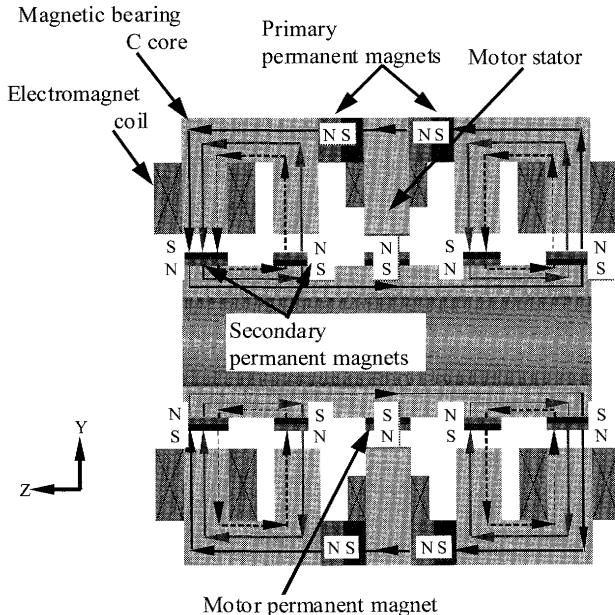
e-mail: masuzawa@mx.ibaraki.ac.jp

^{*1}茨城大学 ^{*2}株式会社 イワキ

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。本磁気軸受は一次永久磁石と二次永久磁石, 電磁石を併用するダブルバイアスハイブリッド磁気軸受である。バイアス磁束発生用の永久磁石として, 二次永久磁石を磁気軸受C型コアの内側(モータステータ側), 外側(内側突極の対)突極に対向するロータ表面に, 一次永久磁石をモータステータと磁気軸受コアの間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石とした。4つの渦電流変位センサにより, ロータの径方向位置を検出する。また, 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。ロータ・突極間のエアギャップ中の磁束は, バイアス磁束に制御磁束を重畠させたものになる。よって, 図ではロータ上側のエアギャップ中の磁束は制御磁束で増加し, 下側エアギャップ中の磁束は減少するピッシュプル状態になる。これにより, ロータに図中上方向の吸引力が働く



(a) Exterior view



(b) Cross sectional view

Fig. 1 The hybrid magnetic bearing and motor system

ことになり、ロータの径方向(X, Y)位置制御が可能となる。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傾き(θ_x , θ_y)も制御可能である。ロータの軸方向(Z)位置は、磁気軸受系の受動安定性によって静的に支持している。永久磁石はすべてネオジウム系磁石とした。

本磁気軸受の磁気等価回路を作成し、ロータに発生する吸引力 F の理論式を導出した[7]。なお、ロータとステータコアの磁気抵抗はゼロ、永久磁石の透磁率は真空の透磁率と等しいとし、漏れ磁束は無視して計算した。また、3次元磁場解析により、磁気軸受と回転

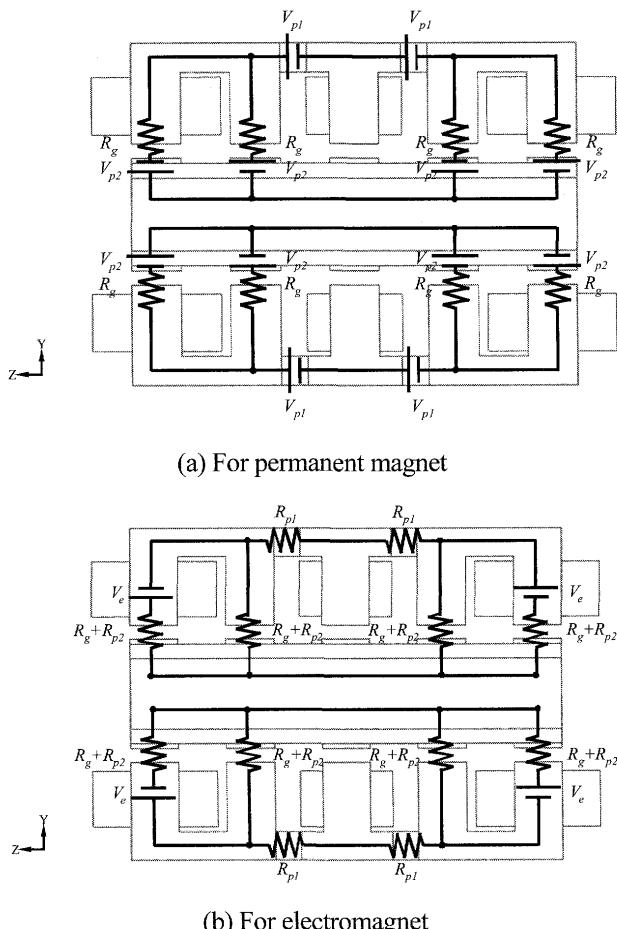


Fig. 2 Magnetic equivalent circuit of the hybrid magnetic bearing and motor system

系の各エアギャップにおける磁束の相互干渉はほとんどないと推定されたので、回転系の磁気回路は無視した。ロータが中心位置にあり磁気軸受C型コア突極とロータ間のエアギャップ長が一定であると仮定すると、磁気回路の対称性よりロータの上側と下側で分割した磁気等価回路は、ロータ部分がニュートラルとなり、上側と下側で分割して考えられる。Fig. 2に図中上方の吸引力を発生させる場合の本磁気軸受の磁気等価回路を示す。Fig. 2(a)に永久磁石用磁気等価回路を示す。本回路では電磁石を無視し、永久磁石のみを電圧源とおいた。Fig. 2(b)に電磁石用磁気等価回路を示す。永久磁石を磁気抵抗に置き換え、電磁石のみを電圧源とした。この二つの磁気等価回路より、永久磁石により発生するバイアス磁束と電磁石により発生する制御磁束をそれぞれ導き、発生吸引力を計算する。ここで、エアギャップの磁気抵抗を R_g 、一次永久磁石の磁気抵抗を R_{p1} 、二次永久磁石の磁気抵抗を R_{p2} とおいた。また、一次永久磁石の起磁力を V_{p1} 、二次永久磁石の起

磁力を V_{p2} , 電磁石の起磁力を V_e とした。ここで、永久磁石によってC型コアの外側突極に生成されるバイアス磁束密度を B_{po} , 内側突極に生成される制御磁束密度を B_{pi} , 電磁石によってC型コアの外側突極に生成される制御磁束密度を B_{eo} , 内側突極に生成される制御磁束密度を B_{ei} , C型コアの突極磁路断面積を A , 真空の透磁率を μ_0 とすると, B_{po} , B_{pi} , B_{eo} , B_{ei} は式(1)~(4)のようにそれぞれ表すことができる。

$$B_{po} = \frac{V_{p1} + V_{p2}}{R_g A} \quad (1)$$

$$B_{pi} = \frac{-V_{p1} + V_{p2}}{R_g A} \quad (2)$$

$$B_{eo} = \frac{(R_g + R_{p1} + R_{p2})V_e}{(R_g + 2R_{p1} + R_{p2})(R_g + R_{p2})A} \quad (3)$$

$$B_{ei} = \frac{R_{p1}V_e}{(R_g + 2R_{p1} + R_{p2})(R_g + R_{p2})A} \quad (4)$$

プッシュプル方式によってC型コアの外側突極での発生吸引力 F_o , 内側突極での発生吸引力 F_i は式(5), 式(6)で表すことができる。

$$F_o = \frac{2B_{po}B_{eo}A}{\mu_0} \quad (5)$$

$$F_i = \frac{2B_{pi}B_{ei}A}{\mu_0} \quad (6)$$

本磁気軸受はモータステータの両端に, ラジアル磁気軸受を2つ有する。したがって, 式(1)~(6)より本磁気軸受によってロータに発生する上方向の吸引力 F は, 式(7)で表すことができる。

$$F = 2(F_o + F_i) = \frac{4A(B_{po}B_{eo} + B_{pi}B_{ei})}{\mu_0} \\ = \frac{4\{(V_{p1} + V_{p2})(R_g + R_{p1} + R_{p2}) - (V_{p1} - V_{p2})R_{p1}\}}{\mu_0 R_g A_s (R_g + 2R_{p1} + R_{p2})(R_g + R_{p2})} NI \quad (7)$$

ここで, N は電磁石のコイル巻き数, I は励磁電流を示す($V_e = NI$)。本式より, ロータの位置制御のための吸引力 F を電流 I で制御できることが分かる。

2.2 磁気軸受の設計変数最適化

Fig. 3 に磁気軸受クリーンポンプの構造図を示す。ロータ先端にインペラを設置した。インペラは軸方向タッチダウン防止用動圧軸受を有する。インペラはポン

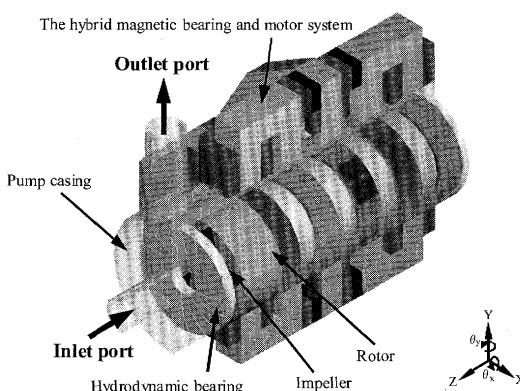


Fig. 3 The magnetically suspended clean pump

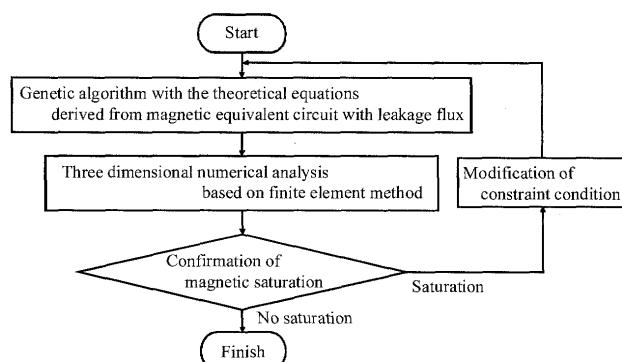


Fig. 4 The design parameter optimization method

ンプ運転時に, 軸方向の流体スラスト力を受けける。磁気軸受の受動安定性とタッチダウン防止用動圧軸受を用い静的にロータの軸方向を支持することで, 本ポンプの低消費電力化を図っている。ロータをポンプケーシングで覆い, ポンプケーシングを包み込むように磁気軸受モータシステムを設置し, 磁気軸受クリーンポンプを構成する。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。ポンプの諸元はインペラ回転数 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 磁気軸受の設計変数最適化

磁気軸受C型コアのサイズやコイル巻数等の設計変数を最適化する方法として, 漏れ磁束を考慮した磁気等価回路より導出した理論式と遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm : GA)を用いた設計変数最適化プログラム[6]に, 有限要素法による3次元磁場解析を付加したプログラムを開発した。Fig. 4 に開発した設計変数最適化プログラムのフローチャートを示す。設計変数の最適値はGAによって決定される。GAは, 広い設計空間から比較的良好な解もしくは近似解を短時間

で探し出す手法であり[8,9]、トレードオフ条件を有する磁気軸受の設計変数を決定する方法として適している。最適化の判断基準は磁気軸受の発生磁気吸引力とした。磁気吸引力は、前述の漏れ磁束を考慮した磁気等価回路により求められる[7,10,11]。GAにより決定された最適値を用い、有限要素法による3次元磁場解析を行うことで、より高精度な発生吸引力の推定と磁気飽和の有無が評価される。ここで、磁気飽和が確認された場合、最大磁束密度の制約条件を補正し、再びGAを実行する。補正係数は、磁気等価回路により導出したコア内磁束密度と3次元磁場解析により推定したコア内磁束密度の比から算出した。GAと3次元磁場解析は、磁気飽和が確認されなくなるまで繰り返し実行される。今回の設計では、ポンプの諸元より磁気軸受に要求される支持力を20 Nと設定した。径方向磁気吸引力20 N以上を目標値とし、磁気軸受C型コアの各寸法、一次・二次永久磁石の厚さ、電磁石コイルの巻数の決定を行った。また、制約条件としてコア内磁束密度を1.5 T以下、磁気軸受システムの長さを140 mm以下、外径を100 mm以下とした。電磁石励磁電流1.0 A、ロータ外径 ϕ 38 mm、モータステータ軸方向長さ20 mm、モータ用永久磁石厚さ3 mm、エアギャップ3.5 mm、渦電流センサ設置部幅9 mmは一定とした。GAには局所解を回避する手法が含まれているが、異なる局所解の回避のため、設計変数最適化プログラムを50回実行した。

2.4 磁気軸受浮上回転制御システム

Fig. 5に本磁気軸受の磁気軸受浮上回転制御システムの構成を示す。高速なデジタル信号処理を実現するため、デジタルPIDコントローラ(DS1104)を使用した。A/D変換器を介してロータの径方向位置を測定する渦電流変位センサの出力、およびロータの回転角を検出するため、モータステータ突極間に設置したホールICの出力をDS1104内に取り込み、浮上用コイルおよび回転用コイルに与える電流値を計算する。計算された値は、D/A変換器を介してリニアアンプに入力し、各コイルに制御電流を流す。制御プログラムはMATLAB/simulinkを用いて作成した。サンプリング周波数は10 kHzである。Table 1にPIDコントローラの各ゲインを示す。

2.5 径方向磁気吸引力測定実験

本磁気軸受の径方向発生磁気吸引力を測定する実験

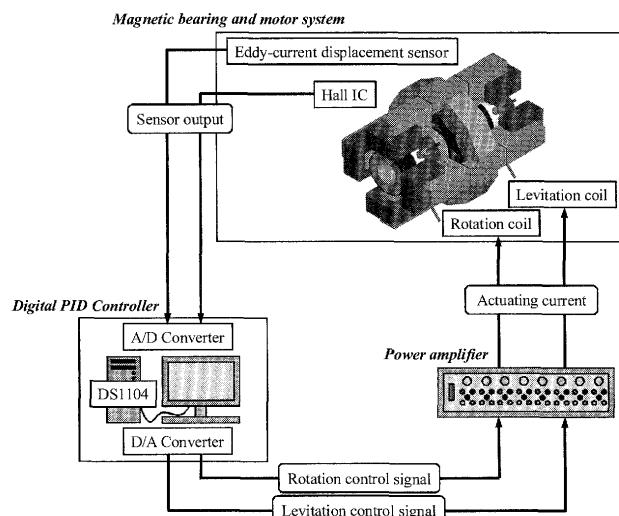


Fig. 5 The schematic diagram of control system

Table 1 The gain of PID controller

Levitation	Proportional gain : K_{LP} (A/mm)	5.0
	Integral gain : K_{LI} (A/mm sec)	0.0
	Derivative gain : K_{LD} (A sec/mm)	0.012
Rotation	Proportional gain : K_{RP} (A/rpm)	0.03
	Integral gain : K_{RI} (A/rpm sec)	0.0003
	Derivative gain : K_{RD} (A sec/rpm)	0.0

を行った。実験は、専用の磁気吸引力測定実験装置を製作して行った。本装置は、マイクロメータにより磁気軸受とロータ間のエアギャップを調整できる構造となっており、ひずみゲージ式荷重変換器により磁気吸引力を測定する。実験は、ロータと磁気軸受の中心0.0 mm(ロータと磁気軸受突極間のエアギャップがすべて3.5 mm)から、径方向に0.05 mm間隔で変化させて-0.5 mmまで測定した。浮上用コイルに流す励磁電流は、0.0 Aから1.5 Aまで0.5 A間隔で変化させた。

2.6 周波数応答測定実験

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。実験は、浮上制御システムの制御信号に外乱信号を加算し、与えた外乱信号とフィードバックされたセンサ出力を比較した。外乱信号はロータを±0.01 mm変位させる振幅の正弦波とし、周波数を $10^{1/50}$ 間隔でスイープさせた。測定は、ロータ前後(インペラ設置側がロータ前側)を磁気支持する各磁気軸受のX軸(水平)方向およびY軸(垂直)方向について、それぞれ行った。

2.7 ポンプ抽出性能評価実験

リザーバ、歪みゲージ式圧力計、絞り抵抗、超音波流量計から構成される水実験回路に、磁気浮上クリーンポンプを接続し、本ポンプの抽出性能を評価する実験を行った。実験はロータ・インペラ回転数を 500 rpm 間隔で変化させ、各回転数ごとに絞り抵抗を調整し、流量を約 1 L/min 間隔で変化させ、揚程およびロータ・インペラの径方向振動振幅を測定した。

3 結果および考察

3.1 磁気軸受の設計変数最適化

Fig. 6 に有限要素法を用いた 3 次元磁場解析により推定した 50 回分の発生磁気吸引力を示す。プログラム実行回数 8 回目の結果において、吸引力が 39.8 N となり最大であった。Fig. 7 にプログラム実行回数 8 回目の結果から得られた磁気軸受形状を示す。磁気軸受システム外径 100 mm、長さ 140 mm、1 次永久磁石厚さ 1.3 mm、2 次永久磁石厚さ 1.6 mm、電磁石コイルの巻数 463 turn の磁気軸受の設計が行えた。今回は、漏れ磁束の仮定に簡易的なモデルを用いたため、3 次元磁場解析により推定した吸引力を磁気軸受の最終的な性能評価に用いた。漏れ磁束の仮定方法については、更なる改良が必要であると考える。

3.2 磁気浮上クリーンポンプ

Fig. 8 に製作した磁気浮上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 径方向磁気吸引力測定実験

Fig. 9 に径方向磁気吸引力測定実験結果を示す。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 36.4N/A であった。本結果より、開発した磁気軸受はコイル励磁電流 0.55 A で、目標値である磁気吸引力 20 N を達成した。また、ロータがポンプケースに接触している状態である、ロータ径方向位置 -0.5 mm において、本磁気軸受はコイル励磁電流 1.5 A で 20.8 N の磁気吸引力を発生可能であり、タッチダウンからの浮上も可能である、十分に当初の目標をクリアする性能を有した磁気軸受の開発ができた。

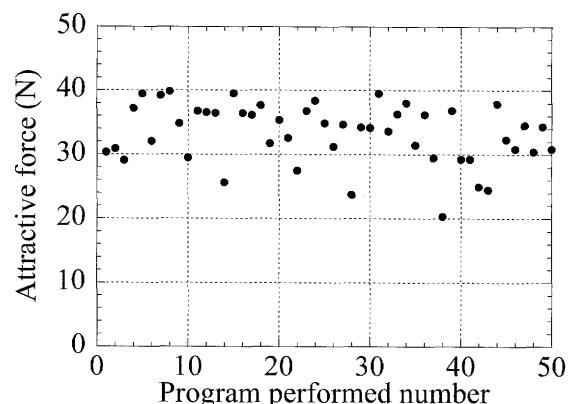


Fig. 6 The attractive force estimated with three dimensional magnetic field analysis

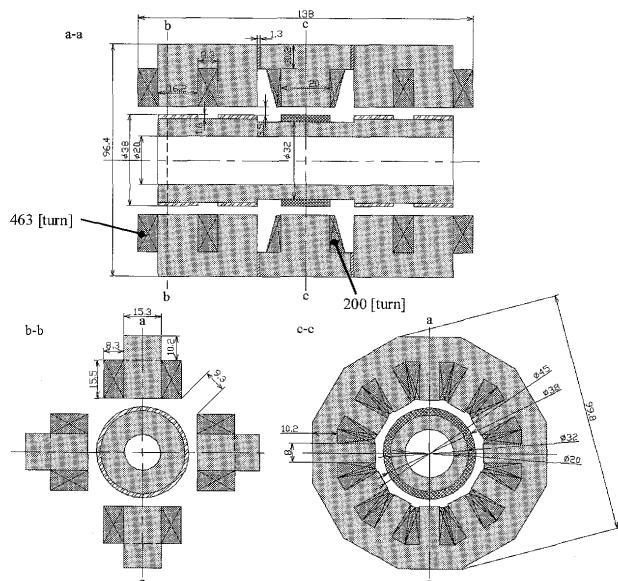


Fig. 7 The designed size of the hybrid magnetic bearing and motor system

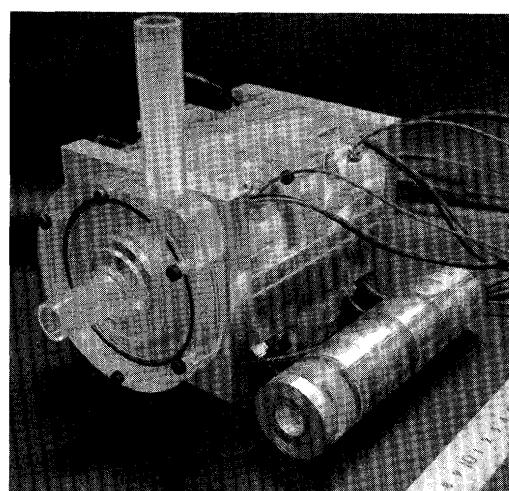


Fig. 8 The developed clean pump

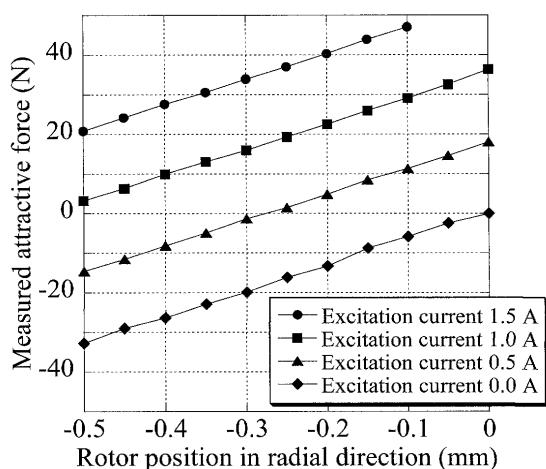


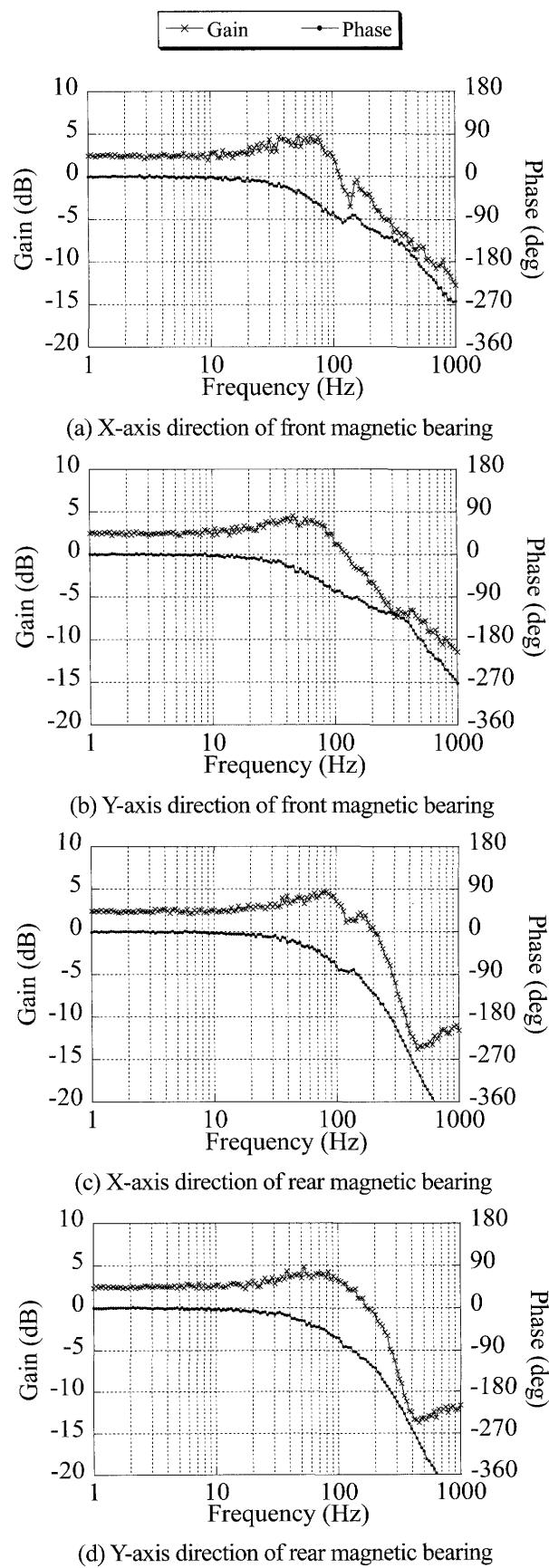
Fig. 9 The measured attractive force

3.4 周波数応答測定実験

Fig. 10(a)~(d)に前側と後側の磁気軸受におけるX軸およびY軸方向の周波数応答をそれぞれ示す。両磁気軸受における共振点でのゲインは小さく、良好な制御性能を確認した。

3.5 ポンプ抽出性能評価実験

Fig. 11に本ポンプのHQ特性を示す。回転数6000 rpmまで回転し、最大揚程9.37 mH₂O、最大流量27.3 L/minのポンプ抽出性能を有していることを確認した。最大揚程は目標値の1.56倍、最大流量は目標値の2.73倍である。回転数6000 rpmのときのみ、流量11 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急になった。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つたことが原因である。電源電圧を高電圧化することで、改善可能である。Fig. 12(a)~(d)に、ポンプ時の前側と後側の磁気軸受におけるX軸およびY軸方向の径方向最大振動振幅を示す。前側の磁気軸受では、回転数が増加するにつれ径方向最大振動振幅が大きくなつたが、後側では大きな変化は無かつた。同現象がわかり易いように、Fig. 13に締切時の回転数に対する径方向最大振動振幅を示す。これは、ポンプ運転時に径方向流体力が働くインペラ側を、前側の磁気軸受で磁気支持しているためである。また、X軸方向の振動振幅がY軸方向に比較して大きい。これは、遠心ポンプの流出口がX軸方向延長線上に位置していることに起因し、インペラに働く径方向流体力のX軸方向成分がY軸方向成分と比較して大きい。



(d) Y-axis direction of rear magnetic bearing

Fig. 10 The frequency response

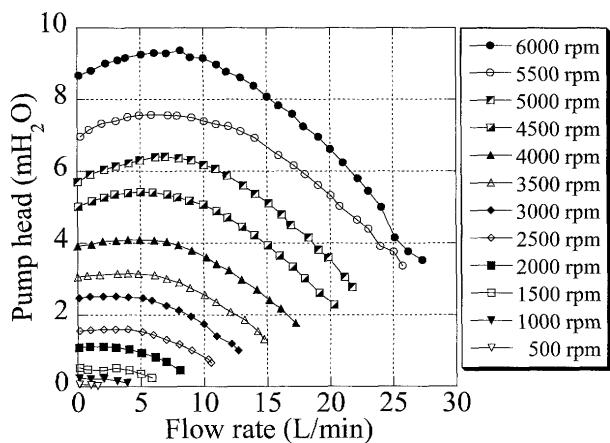
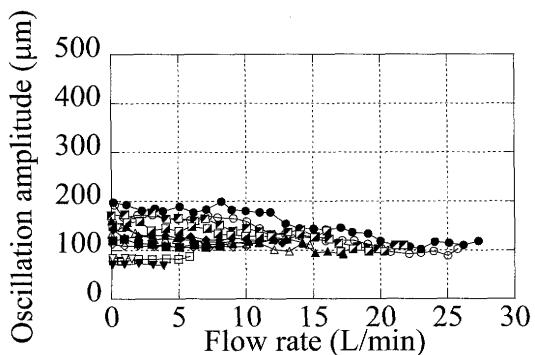
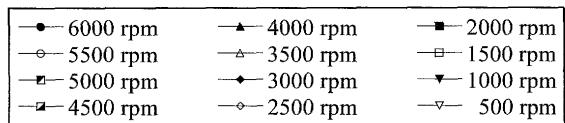
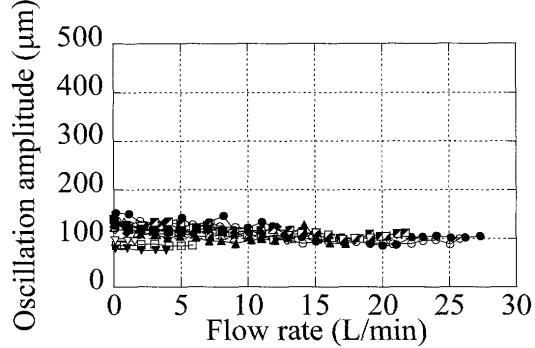


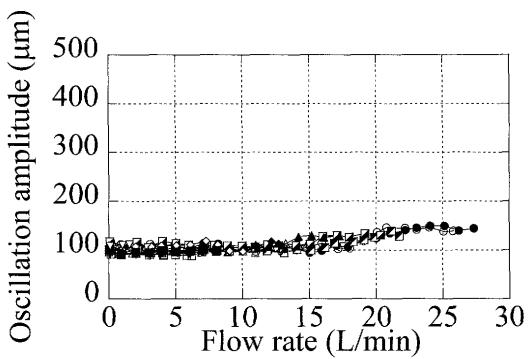
Fig. 11 The HQ characteristic



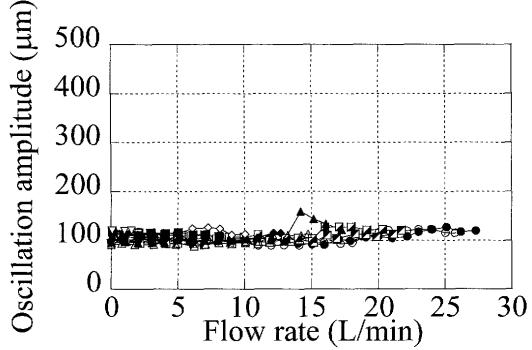
(a) X-axis direction of front magnetic bearing



(b) Y-axis direction of front magnetic bearing



(c) X-axis direction of rear magnetic bearing



(d) Y-axis direction of rear magnetic bearing

Fig. 12 The maximum oscillation amplitude

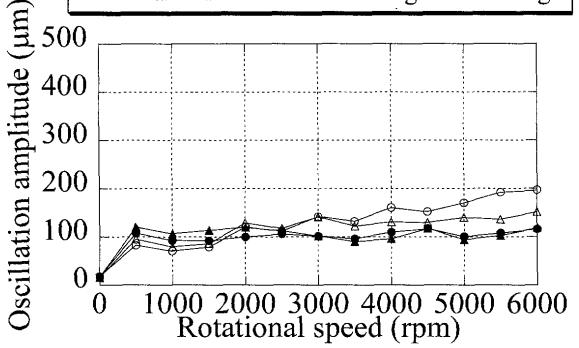
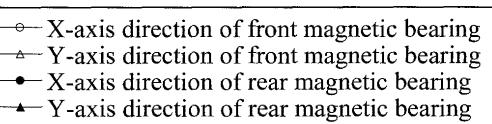


Fig. 13 The maximum oscillation amplitude under shut-off operation

いためである。しかし、全ポンプ域における径方向振動振幅の最大値は、199 μm であり、径方向クリアランス 500 μm より十分に小さい。Fig. 14 に一回転中のロータ・インペラの中心位置を 0.1 ms 間隔でプロット

したグラフを示す。Fig. 14(a), Fig. 14(b)は、回転数 6000 rpm における締切時と解放時を、それぞれ示している。ロータ・インペラの中心位置は、流量が増加するにつれ前側磁気軸受では X 軸負の方向へ、後側磁気軸受で

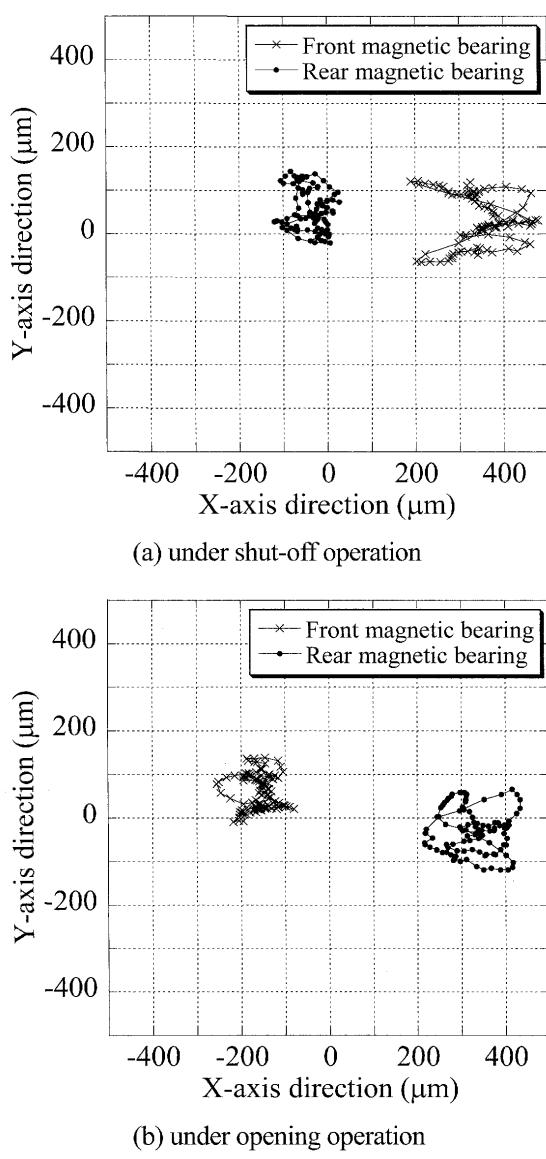


Fig. 14 The rotor-impeller center locus

はX軸正の方向へ変化した。これも、前述の通りインペラに働く径方向流体力によるものである。Iゲインを働かすことにより、ロータをより中心位置に制御することが可能となると考える。一方、ゼロパワー制御[12]を導入して、負ばね力と流体力を釣り合わせることにより、磁気軸受の低消費電力化も図れると思われる。以上より、十分な磁気支持性能を有している磁気浮上クリーンポンプが開発できた。

4 結言

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、設計変数最適化プログラムを用い、外径100mm、長さ140mm、エアギャップ3.5mm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36.4N/Aであった。また、開発したシステムを用いた外径 ϕ 100mm、長さ160mmの磁気浮上クリーンポンプを開発した。本ポンプは最大揚程9.37mH₂O、最大流量27.3L/minのポンプ抽出性能を有し、ロータ・インペラは6000rpmまで非接触で回転できることを確認した。

(2008年10月23日受付、2008年12月25日再受付、
2009年1月19日再々受付)

参考文献

- [1] Masuzawa T, Ezoe S, Kato T, Okada Y, Magnetically suspended centrifugal blood pump with an axially levitated motor, *Artificial Organs*, 27, 10, pp. 887-891, 2003.
- [2] Onuma H, Murakami M and Masuzawa T, Novel Maglev pump with a combined magnetic bearing, *ASAIO Journal*, 51(1), pp.50-55, 2005.
- [3] Masuzawa T, Kita Y, Matsuda K and Okada Y, Magnetically Suspended Rotary Blood Pump with Radial Type Combined Motor-Bearing, *Artificial Organs*, 24, 6, pp.468-474, 2000.
- [4] Masuzawa T, Onuma H, Kim SJ, Okada Y, "Magnetically suspended centrifugal blood pump with a self-bearing motor," *ASAIO Journal*, vol.48, 437-442, 2002.
- [5] Masuzawa T, Kita Y and Okada Y: An Ultradurable and Compact Rotary Blood Pump with a Magnetically Suspended Impeller in the Radial Direction, *Artificial Organs*, 25, 5, pp.395-399, 2001.
- [6] Katoh A, Masuzawa T, "Optimized Design for a Hybrid Magnetic Bearing for the Artificial Heart", *Proc. for the 10th Int. Symp. on Magnetic Bearings*: CD-ROM, 2006.
- [7] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, *Electric Machinery*, McGraw-Hill, 2002
- [8] Goldberg DE, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
- [9] Davis L, *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, A Division of Wadsworth, Inc., 1990.
- [10] 石黒敏郎, 坪島茂彦, 宮川澄夫, 交直マグネットの設計と応用, オーム社, pp.22-27, 1957.
- [11] 中田高義, 伊藤昭吉, 河瀬順洋, 有限要素法による交直電磁石の設計と応用, 森北出版株式会社, pp.20-22, 162, 164, 1991.
- [12] 増澤徹, 小沼弘幸, 岡田養二, 磁気浮上人工心臓におけるゼロパワー制御, 第47回自動制御連合講演会 04-256, CD-ROM 322, 2004