

低温環境における1軸制御型セルフベアリングモータに関する研究

著者	加藤 博久
その他のタイトル	Studies on 1-Axis Self-Bearing Motor at Low Temperature
学位授与年度	令和2年度
学位授与番号	17104甲工第523号
URL	http://hdl.handle.net/10228/00008346

博士学位論文

低温環境における

1 軸制御型セルフベアリングモータに関する研究

Studies on 1-Axis Self-Bearing Motor

at Low Temperature

2020 年度

九州工業大学大学院

加藤 博久

目次

第1章	序論.....	1
1.1	研究背景.....	1
1.2	本研究の目的・意義.....	1
1.3	本論文の概要.....	1
1.4	従来の研究と本研究の立ち位置.....	3
1.4.1	低温で利用される装置.....	3
1.4.2	セルフベアリングモータの応用例.....	7
1.4.3	渦電流式変位センサの温度ドリフトに関する研究.....	9
1.4.4	本研究の立ち位置.....	11
1.5	本論文の要旨.....	11
第2章	1軸制御型セルフベアリングモータの開発.....	13
2.1	はじめに.....	13
2.2	実験装置構成.....	14
2.2.1	ASBMの基礎的特性.....	17
2.2.2	PMBの基礎的特性.....	19
2.2.3	渦電流式変位センサとホールセンサの基礎的特性.....	22
2.3	装置の構成.....	25
2.4	磁気軸受とセルフベアリングモータの制御理論.....	26
2.5	実験内容.....	31
2.6	ASBMによる液体窒素中における実験結果.....	32
2.7	結言.....	37
第3章	セルフベアリングモータの低温用遠心ポンプへの応用.....	38
3.1	はじめに.....	38
3.2	実験装置構成.....	39
3.3	実験内容.....	40
3.4	液体窒素中における汲上げ実験結果.....	41
3.5	結言.....	43
第4章	ゼロパワー制御を用いた磁気軸受の温度補償.....	45
4.1	はじめに.....	45
4.2	ゼロパワー制御と伝達関数を用いたセンサ外乱に対する変位の応答.....	45
4.3	実験装置構成.....	48
4.4	実験内容.....	49
4.5	実験結果.....	51
4.6	結言.....	54

第5章	ゼロパワー制御を用いた温度補償のセルフベアリングモータへの応用.....	55
5.1	はじめに.....	55
5.2	実験装置構成.....	55
5.3	実験内容.....	57
5.4	実験結果.....	60
5.5	結言	60
第6章	結論.....	61
	参考文献.....	62
	謝辞.....	67

第1章 序論

本章では研究背景, 研究の目的・意義, 本論文の概要, 従来の研究と本論文の要旨について述べる. 本研究が対象にしている分野や目的・意義, 本論文に使用される中心的な用語の定義, 本論文の全体的な構成を明確にすることによって新規性・独自性やその位置づけを明確にする.

1.1 研究背景

近年, 日本において液化天然ガスや液体水素が石油の代替エネルギーとして注目されている[1]. これらの液体は極低温かつ高圧ガス保安法の対象であるためそれらを取り扱うポンプには極低温に対応した軸受と密閉された構造が要求される. 極低温下では潤滑油が使用できないため, 従来 of 機械軸受では軸受寿命が短くなってしまう問題がある[2].

この問題に対してロータを非接触で支持できる磁気軸受を利用した極低温遠心式ポンプが開発されている[3-6]が, 磁気軸受の導入コストが高いため広く採用されていない[6]. 磁気軸受コストの問題は遠心ポンプに限らず広く問題として扱われており, この問題に対しては磁気軸受とモータを一体として扱うセルフベアリングモータが提案されている[7-10]. また, 低温下で磁気軸受を用いる場合, 変位センサの出力が温度変化の影響を受けてしまう温度ドリフトの問題がある[11-15].

これらの問題に対して本研究では1軸制御型セルフベアリングモータを用いた低温用のポンプを製作し, 液体窒素中において評価実験を行う. また, 低温下における渦電流式変位センサの出力が温度に依存して変化してしまう温度ドリフトの問題に対してゼロパワー制御を応用した磁気軸受の温度補償を提案する.

1.2 本研究の目的・意義

本研究の目的は環境の温度に関わらず安定した軸支持が可能な軸受の開発である. これは低温や極低温に限らず, 高温で使用される軸受に対しても有効であり, 使用する環境の温度に合わせたセンサや装置の調整や温度変化を相殺するための装置が不要となる. この床により温度変化が激しく, メンテナンスが不可能な特殊な環境下での軸受の可能性を広げる意義がある.

1.3 本論文の概要

本論文では低温用遠心ポンプに対してセルフベアリングモータを応用することにより, セルフベアリングモータの応用例とするとともに液体窒素中におけるセルフベアリングモータの有効性を示す.

また, 渦電流式変位センサの温度ドリフトの問題に対してゼロパワー制御を適用した磁気

軸受の温度補償を提案し、その有効性を伝達関数を用いた外乱応答関数によって求め、基礎的な磁気軸受を製作し、温度補償の有効性を実際に渦電流式変位センサを液体窒素によって冷却することによって確認する。

最後にセルフベアリングモータを使用した低温用遠心ポンプに対してゼロパワー制御による温度補償を適用し、室温中から液体窒素中への連続した浮上を行い、液体窒素中でセルフベアリングモータの安定性とゼロパワー制御の有効性を示す。

以下に本論文で使用される重要な用語について定義を示す。

<磁気軸受>

磁気軸受は電磁石や永久磁石から得られる電磁力をコントロールすることによってロータを浮上させ支持する。ロータとステータ間にはエアギャップがありロータはステータに接触しない。ブラシレスモータ等で回転トルクを伝達すればロータに接触する部分が完全になくなり、ロータは非接触支持された状態で回転することが可能である。このため、磁気軸受は無摩擦無摩耗、オイルレス、メンテナンスフリーであり、これらの特性を生かして特殊環境(真空、高温、低温、生体内部、クリーンルームなど)で用いられる。

<セルフベアリングモータ>

セルフベアリングモータ(Self-Bearing motor, SBM)はベアリングレスモータ(Bearingless motor)とも呼ばれる。モータにおける電磁石とロータ鉄心間の力のベクトルをコントロールすることによって回転トルクと軸支持力を生成する。

<ゼロパワー制御>

永久磁石によるバイアス磁束から得られる電磁力を一定の外乱と釣り合わせることで制御電流が定常的に 0 A となる制御。半導体搬送装置など浮上体の位置が重要ではなく、低消費電力が求められる分野に応用させている。

<温度ドリフト>

センサ出力が環境の温度変化によって誤差が生じてしまう状態。特に渦電流式変位センサではセンシングコイルの電気抵抗が温度に依存し、その結果温度が変化した場合、センサの電気的特性が変化してしまうため誤差が生じる。もう一つはセンサフレームの熱変形が原因である。

1.4 従来の研究と本研究の立ち位置

本研究に関係する従来の研究を取り上げ、本研究の立ち位置を明確にする、取り上げる内容は低温用回転機として超電導バルク・線材を用いた蓄電用フライホイールと超音波モータと磁気軸受を使用した遠心ポンプを取り上げる。また、本研究で応用されるセルフベアリングモータの応用例として人工心臓と冷却用ファンを取り上げる。最後に渦電流式変位センサの温度ドリフト誤差についての論文と温度ドリフトの影響を受けにくいフレキシブル基盤を使用した渦電流式変位センサの開発について取り上げる。

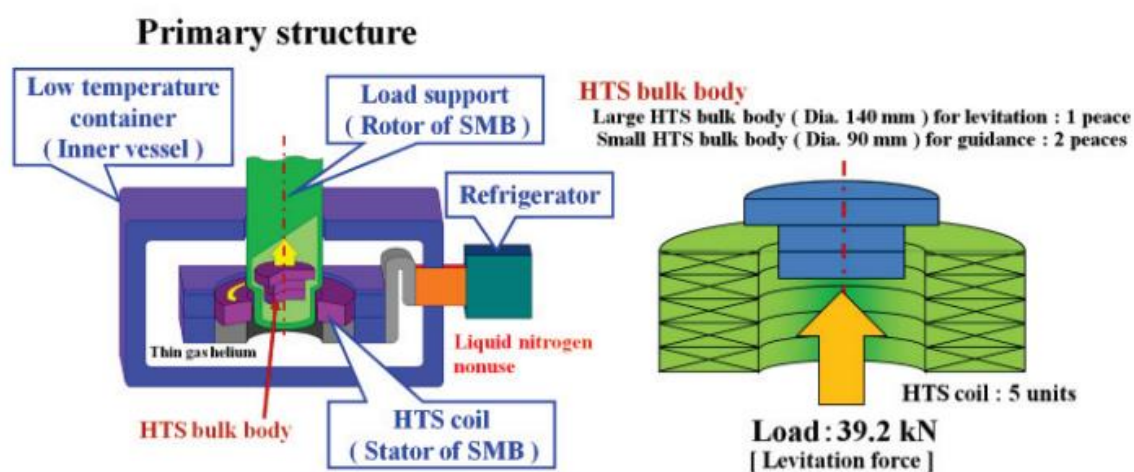


Fig 1.1 Superconducting flywheel energy storage device using superconducting magnetic bearings. The repulsive force between the high magnetic field generated by the high-temperature superconducting coil and the high-temperature superconducting bulk attached to the rotor side supports the weight of the flywheel, which is approximately 4 tons.

1.4.1 低温で利用される装置

山下らが開発した超電導磁気軸受を用いた超電導フライホイール蓄電装置を図 1.1 に示す[16]. フライホイール蓄電システム(FESS)は、太陽光発電システムの出力変動を安定化させることを目的として開発されている。FESS では高温超電導磁気軸受(SMB)を軸受に使用している。これは、ステータに高温超電導コイル、ロータに高温超電導バルクを用いたものである。高温超電導コイルを用いることによって希土類永久磁石では得られない高磁場を生成している。この磁場とロータ側に取り付けられた高温超電導バルクとの間に発生する反発力によって約 4t のフライホイールを浮上させ支持している。

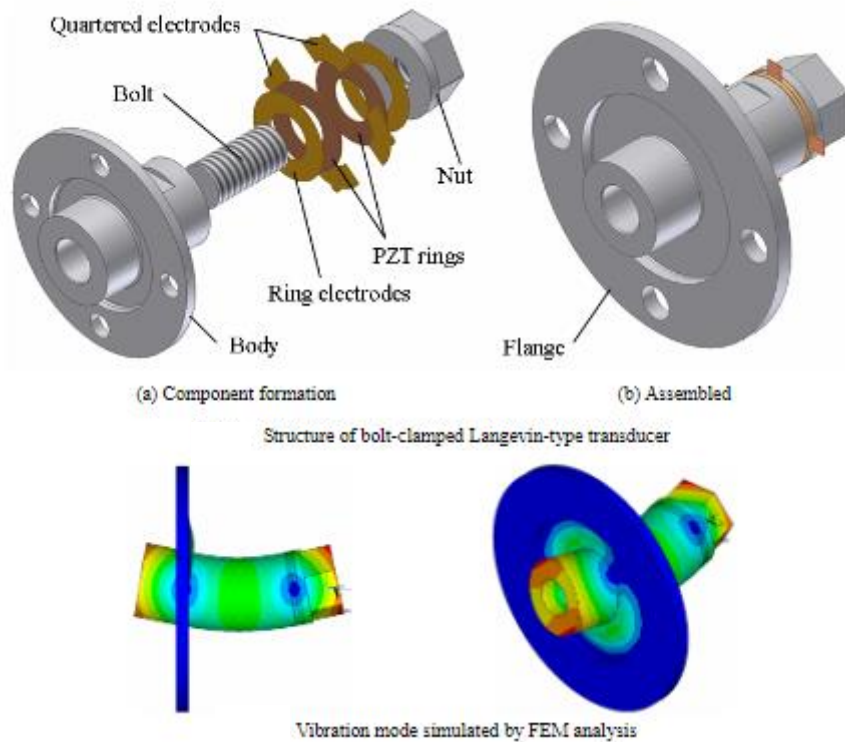


Fig 1.2 Schematic diagram of an ultrasonic motor using a bolted Langevin-type transducer for cryogenic applications.

山口らにより開発された極低温用ボルト締めランジュバン型振動子を利用した超音波モータを図 1.2 に示す[17]. 極低温環境に設置することを目的に小型で高速回転可能な超音波モータを実現するため、進行波型超音波モータを利用している.

進行波型超音波モータは時間的および空間的に 90° 位相差の異なる 2 つの定在波を重ね合わせる事により、進行波を励振する. 弾性体中を進行波が伝搬する際に、弾性体表面の粒子は楕円軌跡を描く運動を行う. この運動により、摩擦力を介して超音波振動を振動子に対する一方向への運動に変換する. 摩擦駆動の接触面は時間と共に移動することから、定在波型モータのように激しい接触が生じず、摩耗特性が優れている.

この研究では、極低温用超音波モータに使用されるボルト締めランジュバン型振動子を使用して回転力を発生させ、液体ヘリウム温度での回転を確認している.

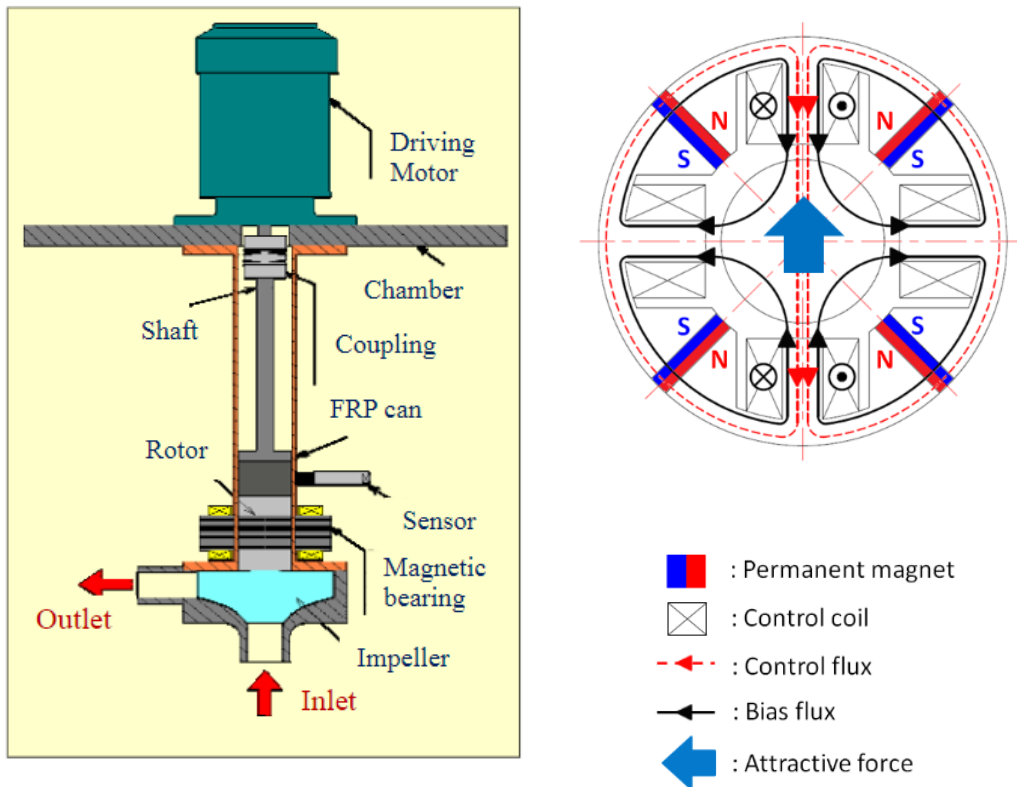


Fig 1.3 Schematic diagram of the high-efficiency hybrid-type magnetic bearing. Magnetic bearings are used for the radial bearings on the near side of the low-temperature liquid, while the other radial bearings and the motor are used at room temperature.

岡田らが提案した高効率ハイブリッド型磁気軸受を図 1.3 に示す[3]. 永久磁石を併用した磁気軸受を超低温流体ポンプに適用することを目的としている. 従来の低温用遠心ポンプはセラミック材料を利用したボールベアリングで支持されていたが, 低温液体の影響から軸受の寿命が短くなる問題がある. そのため, ロータを非接触で支持することが強く求められていた. 磁気軸受を利用すればロータを非接触で支持可能だが, 標準的な電磁石式磁気軸受では電力消費が高く, 液体が熱せられてしまうという問題がある.

この問題に対して, 超低消費電力で運転できる高効率ハイブリッド型ラジアル磁気軸受を提案している. 磁気軸受で使用するバイアス磁束は永久磁石により生成することで, 電磁石における定常的な電流を 0 としている. 軸受は低温の液体に近いもののみを磁気軸受とし, もう一つの軸受とモータは室温中で利用するため, モータから発生する熱の影響は極めて小さい. また, ポンプはステータと液体を分離するために肉厚の FRP パイプでキャニングされている. 設計した磁気軸受は 3mm 幅のエアギャップを有している.

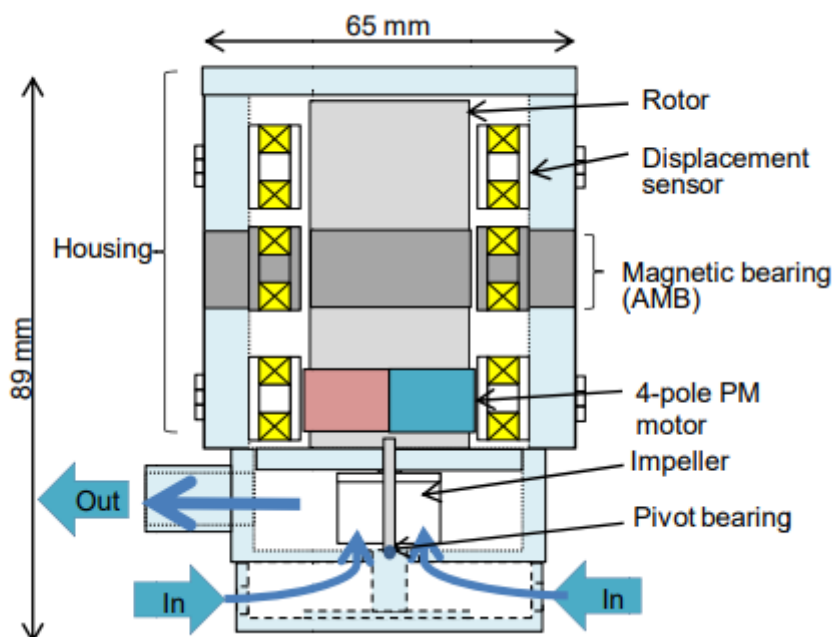


Fig 1.4 Submerged centrifugal pump using magnetic bearings. This centrifugal pump has two axis in radial direction supported by active magnetic bearings, and the other two axis in radial direction and one axis in axial direction supported by a pivot bearing installed under the impeller.

小森らが提案した磁気軸受を用いたサブマージド遠心ポンプを図 1.4 に示す[4]。クライオクーラーや燃料電池などには液体窒素、液体ヘリウム、液体水素などの極低温の液体が必要となる。これらの液体は、通常、大きな貯蔵タンクから液体を輸送している。高压の気体(液体)を使用するため、極低温メカニカルポンプが必要となる。

しかし、従来の液体ポンプのような極低温メカニカルポンプは機械的なベアリングが極低温ではうまく機能せず、特殊で高価であるため、それほど多くない。このため、安価で簡便な極低温ポンプが求められている。

この問題に対して磁気軸受を用いた遠心ポンプを提案している。この遠心ポンプはラジアル方向の 2 軸をアクティブ磁気軸受(AMB)、残りのラジアル方向の 2 軸とアキシャル方向の 1 軸をインペラ下部に設置されたピポット軸受によって支持している。ピポット軸受は接触面積が極めて小さく、軸径が小さく設定されているため摩擦が小さい。一方で AMB によってロータは非接触で支持され、PD コントローラによってロータの振動はコントロールされる。一般的に AMB は高価なためラジアル方向の 4 軸すべてを AMB を利用する遠心ポンプよりもより安価である。

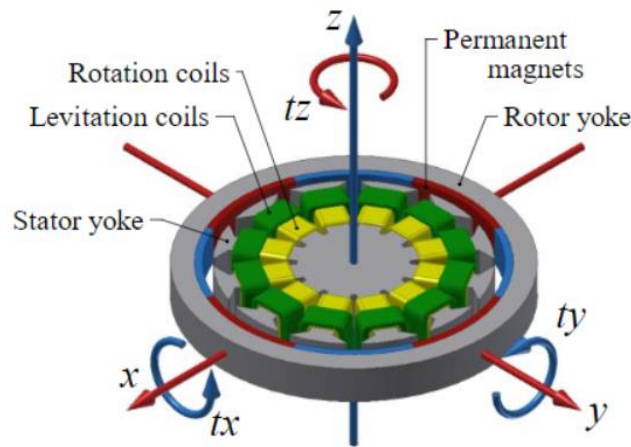
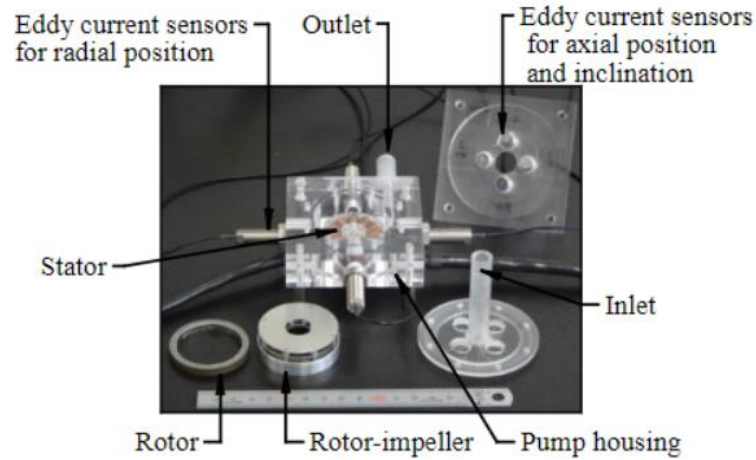


Fig 1.5 Compact magnetic levitation centrifugal blood pump using radial self-bearing motor.
The self-bearing motor is an outer rotor type self-bearing motor. The stator is installed inside the rotor, which makes the device compact.

1.4.2 セルフベアリングモータの応用例

小沼らが開発した植込み型人工心臓として使用するためのラジアル型セルフベアリングモータを用いた小型磁気浮上式遠心血液ポンプを図 1.5 に示す[18,19].

成人の小柄な患者さんに移植可能な血液ポンプを実現するためには、装置の小型化と高効率化が求められる。このため、小径・薄型のラジアル型セルフベアリングモータを開発し、回転磁界によるロータ・インペラの軸方向位置の制御を提案している。ロータのアキシャル方向の変位とラジアル方向の変位を比較し、磁気浮上の特性とモータの性能を評価している。その結果、ラジアル方向の磁気浮上性能は、ロータの軸方向位置を制御するのに十分な性能を有していることが確認された。アキシャル方向の受動的安定性能はアキシャル方向の位

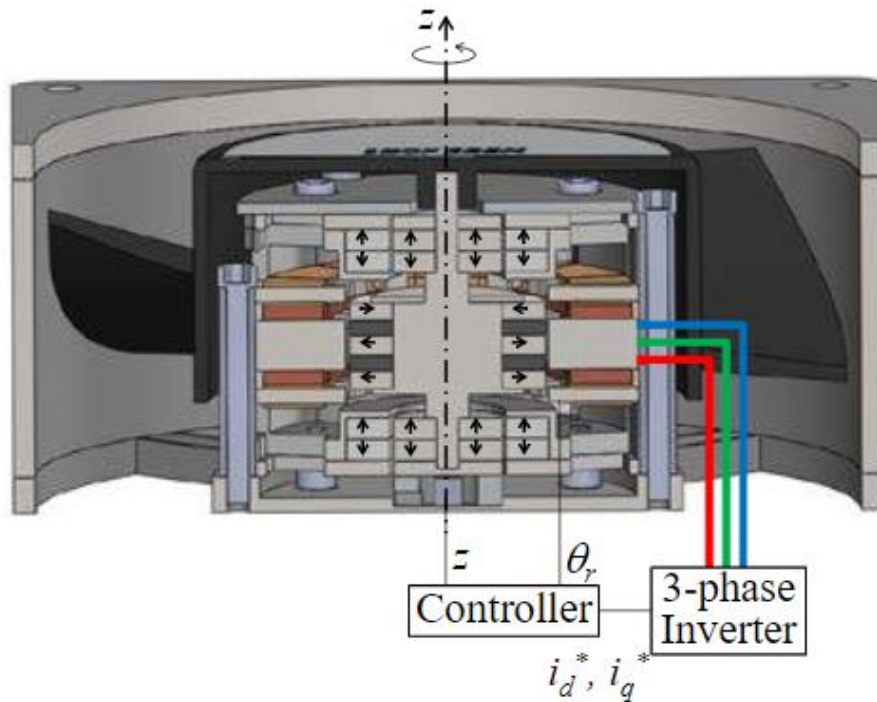


Fig 1.6 A small cooling fan with one-axis controlled bearingless motor. The bearingless motor installed in the radial direction generates axial force and rotational torque for the rotor.

置を制御するのに十分な能力を有していることが確認された。開発した磁気浮上式遠心血液ポンプは浮上性能と低消費電力を実証している。

杉元らが開発したベアリングレスモータが組み込まれた小型冷却用ファンを図 1.6 に示す [20,21]。ベアリングレスモータにおける重要な問題は磁気軸受の導入にかかる高いコストである。従来の 5 軸能動的に位置決めされたベアリングレスモータの場合、ラジアル方向、傾き方向、アキシャル方向が能動的に制御されている。このため、多くのセンサやインバータが必要となり、コストが高くなる。コスト削減のためには、能動的に制御される軸数を減らすことが有効である。1 軸制御型では、軸方向のみを能動的に制御するため、変位センサは 1 台、インバータは 2 台以下であり、コストが極めて低くすることが可能となる。

提案されている 1 軸制御型ベアリングレスモータは 3 相インバータ 1 台で回転トルクと軸支持力を生成している。ラジアル方向に配置された電磁石とロータに配置された永久磁石によってによってアキシャル方向の軸支持力と回転トルクを生成している。そのほかの自由度は永久磁石反発型磁気軸受によって受動的に支持している。

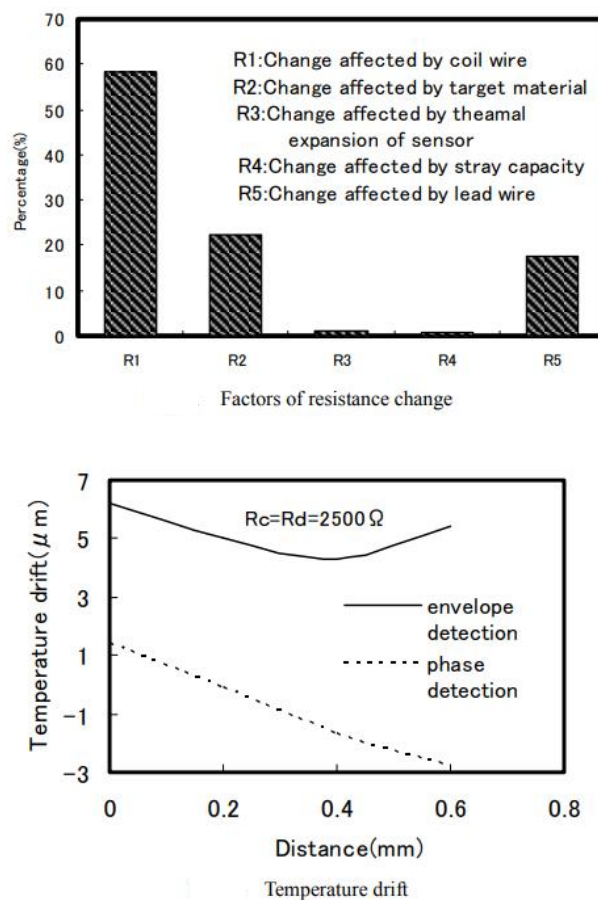
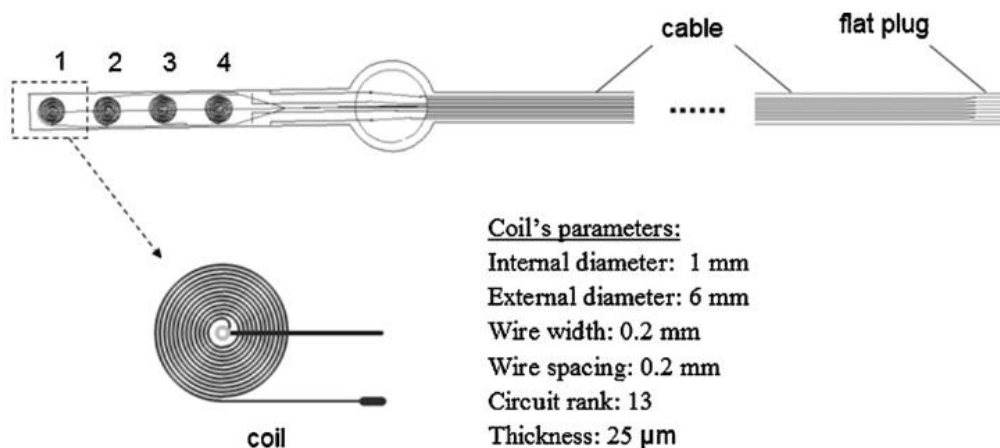


Fig 1.7 Factors of resistance change and measurement results of temperature drift in an eddy-current displacement sensor.

1.4.3 渦電流式変位センサの温度ドリフトに関する研究

松村らが導出した渦電流式変位センサの温度ドリフトを引き起こす要因と温度ドリフトの計測結果を図 1.7 に示す[11]. この論文において渦電流式変位センサの温度ドリフトの要因は渦電流式変位センサのヘッドのコイル巻線の電気抵抗の変化によるものが大きいとされている. また, センサプローブやセンシングターゲットの電気抵抗の変化もセンサの出力に影響を与える要因であるとされる

この温度ドリフトの問題に対して周波数の差分を計測する位相検波方式が有効である点, 検出コイルに加えて, 抵抗調整用のダミーコイルの有効であると述べられている.



Schematic drawing of flat eddy current sensor probe.

Fig 1.8 A frameless eddy current sensor for cryogenic displacement measurement. The sensing coil is installed on a flexible printed circuit board to suppress the error caused by the deformation of the frame at cryogenic temperatures.

Wangらによって開発された極低温用の渦電流式変位センサを図 1.8 に示す[12]. 極低温下における変位の測定や液体推進剤エンジンのアキシャル方向変位の監視のためにフレームレス渦電流式変位センサを開発している. このセンサは平らなコイルおよび長く平らなケーブルから校正されている. センシングコイルをフレキシブルプリント基板 (FPCB) に設置することにより極低温化におけるフレームの変形による誤差を抑制している. また, センシングコイルの電気抵抗の変化に対して, 一般的な銅線の代わりにマンガンが添加されて銅線を用いることで低温における電気抵抗の熱安定性を高めている. 変位の検出方法には位相検波方式がとられており, 感度と安定性を向上させるために独自に開発された周波数変調発振器を使用している.

このセンサを用いた実験結果から, FPCB のフレームレス構造に設置されたマンガン銅コイルが温度の影響を抑えることが確認されている. このセンサは, 20-273K の温度範囲内で良好な熱安定性, 感度, 時間的安定性, 再現性を持っていることが確認された.

1.4.4 本研究の立ち位置

低温環境にかかわるアクチュエータの中でも回転機においては超電導材料を用いたフライホイールや超音波モータ、磁気軸受を用いた遠心ポンプなどが開発されている。共通する点として低温下において潤滑油が利用困難であるため、非接触の磁気軸受または摩耗の少ない超音波モータが利用されている。特に回転機においてはロータが回転し、軸受の摩耗が激しいため研究が進められている。

セルフベアリングモータの応用例は磁気軸受のコストの問題や軸受を組み込むための小型化が注目されている。特に自由度を減らすことで大きなコストの削減になる。

渦電流式変位センサの温度ドリフトに関する研究ではセンシングコイルやセンサのプロブ、ターゲットとなる材料の電気抵抗の変化が大きな原因であることが確認されている。この問題に対して位相検波式の渦電流センサやフレームの変形を受けないフレキシブル基盤を用いたセンサが提案されている。

本研究では、1軸制御型セルフベアリングモータを開発し、低温用の遠心ポンプに適用する。これにより低温用の遠心ポンプが抱える磁気軸受のコストの問題を解決する。さらに、現在応用例の少ないセルフベアリングモータの応用の一例として、低温用の遠心ポンプへの応用の提案を行う。一方で、低温下における渦電流式変位センサの温度ドリフトの問題では従来の研究においてセンサの温度補償が行われてきたが、本研究ではセンサの温度補償ではなく、磁気軸受の温度補償を行う。センサの温度ドリフトが発生している状態においても浮上可能な磁気軸受をゼロパワー制御を用いて実現する。

1.5 本論文の要旨

本論文における各章の要旨を示す。

第2章の「1軸制御型セルフベアリングモータの開発」では本研究で製作した1軸制御型セルフベアリングモータについて述べる。まず、基礎的な磁気軸受とセルフベアリングモータの制御原理についてまとめ、次に製作されたセルフベアリングモータの構造、制御原理、併用された軸受やセンサの基礎的特性、実験環境についてまとめる。最後に液体窒素中における浮上実験、回転実験の結果を示す。

第3章の「セルフベアリングモータの低温用遠心ポンプへの応用」では液体窒素中における軸受の安定性についての評価と遠心ポンプとして液体窒素汲上げ実験時の吐出量やその時の軸受の安定性について測定結果を示す。

第4章の「ゼロパワー制御を用いた磁気軸受の温度補償」では磁気軸受やセルフベアリングモータを低温または高温で利用する場合に問題となってくる変位センサ出力の温度ドリフトの問題に対してゼロパワー制御を用いた温度補償を提案し、その基礎理論、基礎的な実験装置、得られた実験結果について述べる。製作された1軸のみ浮上可能な簡易的な磁気軸受であり、温度補償の有効性が確認された。

第5章「ゼロパワー制御を用いた温度補償のセルフベアリングモータへの応用」では第4

章で述べた 1 軸制御型の遠心ポンプにこの制御理論を適用した。遠心ポンプは室温中でセットアップさせ浮上した状態で液体窒素によって冷却された。冷却後、液体窒素中において回転実験を行いその時のロータ変位と各電流を計測した。ロータは室温中でセットアップされ液体窒素中において調整されていないが、ゼロパワー制御による磁気軸受の温度補償によって安定して浮上、回転していることを確認した。また、ゼロパワー制御によって制御電流が抑えられていることを確認した。

第 6 章の「結論」においてセルフベアリングモータとその応用である低温用遠心ポンプ、ゼロパワー制御の温度補償とセルフベアリングモータへの応用についてまとめ、得られた結果について整理する。

第2章 1軸制御型セルフベアリングモータの開発

本章では製作されたセルフベアリングモータ[22]について取り扱う。製作されたセルフベアリングモータはアキシャル方向のみ支持可能な1軸制御型のセルフベアリングモータ(Axial type self-bearing motor, ASBM)である。その他の軸は永久磁石の反発力を利用した受動型磁気軸受(Permanent magnet bearing, PMB)によって支持される。ロータの回転に必要な回転トルクはASBMから生成される。アキシャル変位の制御にPIDコントローラ、回転速度の制御にPIコントローラを用いている。本章ではこのASBMの構造と制御原理、基礎的な特性、実施した実験内容と結果についてまとめる。

2.1 はじめに

低温用の遠心ポンプでは潤滑油が利用困難であるため、ロータを非接触で支持可能な磁気軸受の利用が進められてきた。しかし、磁気軸受には巻線、コントローラ、電源、パワーアンプなど機械軸受に対して必要な装置が多く、高コストである。このため、低温用遠心ポンプの分野においても磁気軸受の利用が進んでいない[6]。

この問題に対して制御する軸数を減らしたセルフベアリングモータが注目されている。この軸受はモータと軸受を一体としているため、必要な装置の共通化や軸受とモータが一体となることによって装置の小型化、軸長を短できるなどの特徴がある。この特性を生かして、セルフベアリングモータを用いたコンパクトな5軸制御型軸受[23,24]が開発されている。また、磁気軸受コスト削減に着目し、制御軸数を減らす軸受が開発されている。アキシャル方向と傾き方向のみ能動的に支持する3軸制御型軸受[25]、ラジアル方向に配置されたセルフベアリングモータとロータ永久磁石間の吸引力によってスラスト方向と傾き方向を受動的に支持する2軸制御型軸受[26]、永久磁石軸受を併用した1軸制御型軸受[27,28]、隈取磁極型モータを応用した1軸制御型軸受[29]、超電導バルク体を併用した1軸制御型軸受[30]など磁気軸受の導入コスト削減に制御軸数を削減したセルフベアリングモータが開発されている。その他、ロータ永久磁石から発生する交番磁界によるヒステリシスを低減させるためホモポーラ型軸受[31,32]などが開発されている。

本研究ではこのセルフベアリングモータを低温用遠心ポンプに応用する。本章ではまず、永久磁石軸受を併用した1軸制御型のセルフベアリングモータ(ASBM)を製作し、液体窒素中においてセンサや電磁石、永久磁石の基礎的な特性を測定する。次にASBMの制御理論と実験内容について触れ、最後に液体窒素中で行われた浮上・回転実験の結果を示す。これらの結果より、製作されたASBMが液体窒素中において動作可能であることを示す。

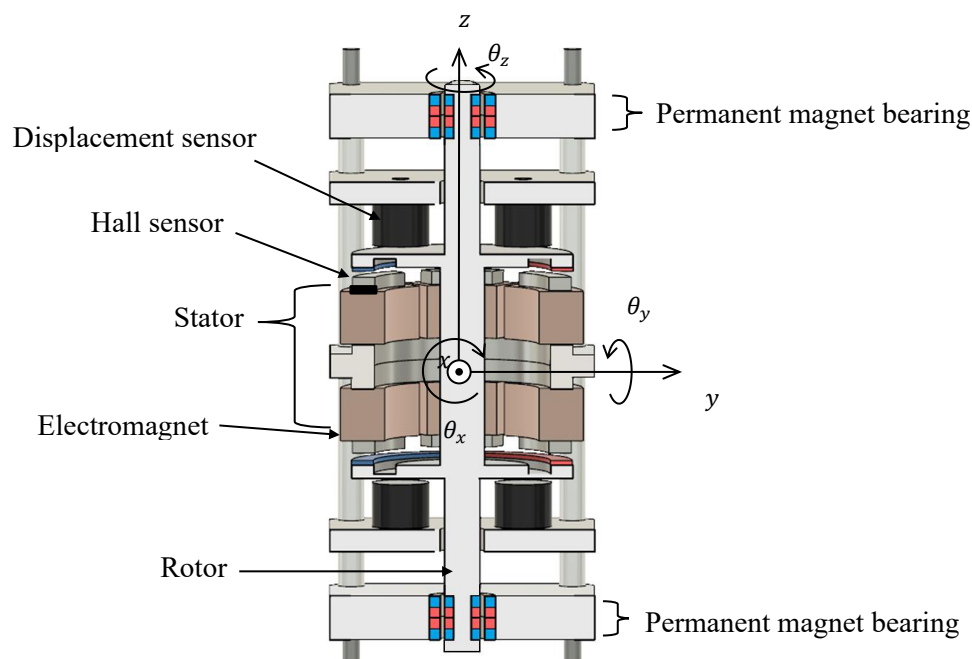


Fig. 2.1 Structure of axial type bearingless motor which consists of a stator, a rotor, displacement sensors, and Hall sensors. The PMBs passively control displacements and rotations in the $x, y, \theta_x,$ and θ_y directions. The coordinate point is the center position of the stator.

2.2 実験装置構成

ASBM の構造を図 2.1 に示す。ASBM は、ステータ、ロータ、3 つの変位センサ、3 つのホールセンサから構成されている。ロータは ASBM と 2 つの PMB を用いて浮上させ、ASBM を用いて z 軸を中心に回転させる。ASBM はロータに z 方向の力と θ_z 方向の回転トルクを発生させる。ロータの軸方向の変位と回転角を測定するために、3 つの変位センサと 3 つのホールセンサが設置されている。 z 方向の変位は PID コントローラを用いて能動的に制御する。 θ_z 方向の回転速度は PI コントローラを用いて能動的に制御される。 x, y 方向の変位と θ_x, θ_y 回転角は、PMB 内の半径方向の反発力によって受動的に支持されている。ロータが中心位置にあるとき、PMB の永久磁石から得られる反発力は釣り合っているが、釣り合い位置から離れるに比例して非復元力が大きくなる。この非復元力はそのまま ASBM の負荷となる。

以下でロータ・ステータ、PMB、変位センサ、ホールセンサの各種構造について詳しく述べる。

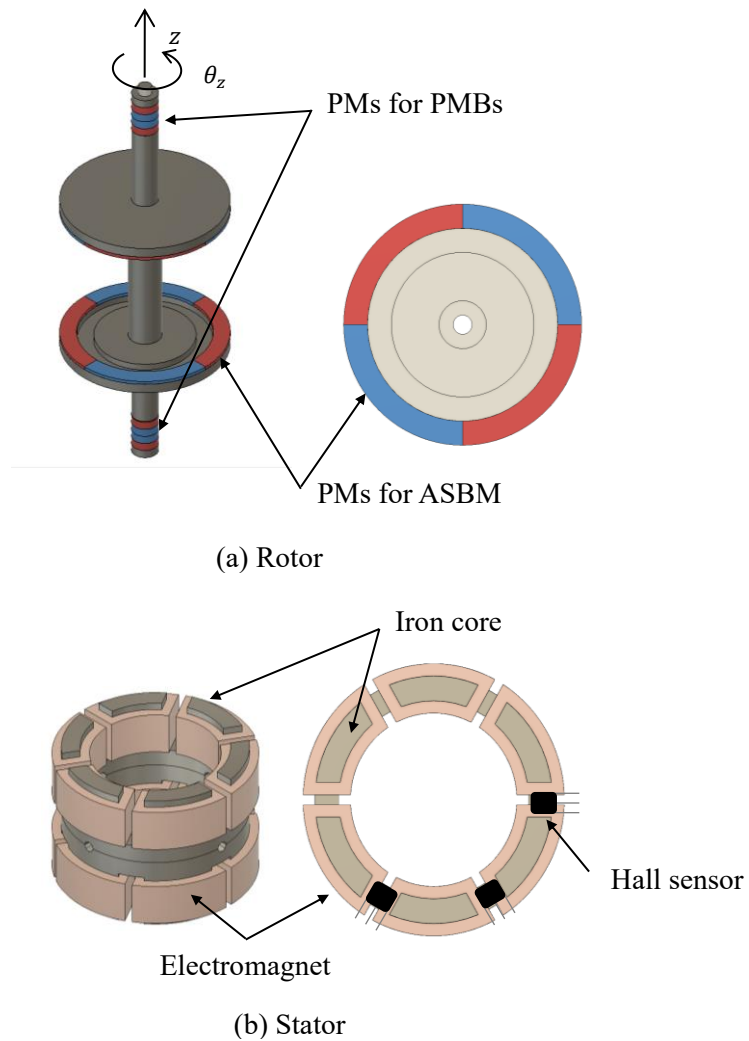


Fig. 2.2 Schematic drawing and cross-section of (a) the rotor and (b) the stator. The rotor consists of permanent magnet (PM) for PMBs and ASBM, rotor core and shaft. The stator consists of Electromagnets and a stator core.

図 2.2 は、ロータとステータの模式図と断面図である。図 2.2(a) に示すように、ASBM には 8 個の永久磁石が 4 極になるように設置されている。ロータの両端には 4 個の永久磁石が PMB のロータ側永久磁石として設置されている。ロータの回転軸は z 方向である。ステータは図 2.2(b) に示すように、鉄心と集中巻線の電磁石 12 個で構成されている。電磁石間の 60 度間隔で θ_z 方向の回転角度を検出するホールセンサが 3 つ 60 度間隔で設置されている。ステータは片側に 6 つの凸極を持ち、ロータは 4 つの永久磁石と 4 つの極を持つ。

Table 2.1 Parameters of the ASBM

Rotor and Stator core		PM of ASBM and electromagnet	
Material	Pure iron	PM	NdFeB (N40)
Stator core	$\phi 50 \times \phi 40 \times 40$ mm	Size	R 25 mm \times r 20 mm \times
Rotor core	$\phi 50 \times 3.0$ mm		1.0 mm \times 90°

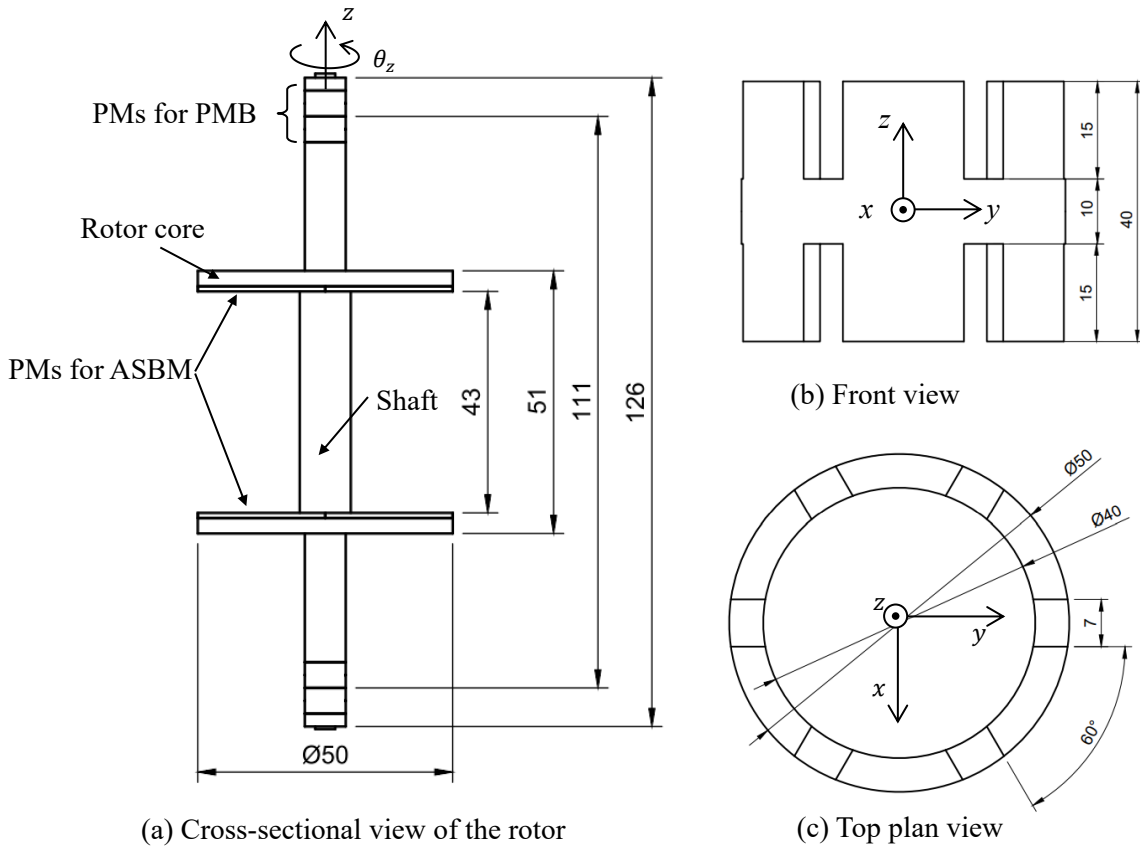


Fig. 2.3 Front plan view of the rotor. The rotor is 50 mm in outer diameter and 126 mm in height. Drawings of the stator. (a) and (b) are Top plane view and Front plan view of the stator. The stator is 50 mm in outer diameter, 40 mm in inner diameter and 40 mm in height.

ASBM のパラメータを表 2.1 に示す。ロータとステータのコアの材質は純鉄である。ステータは外径 50 mm, 内径 40 mm, 高さ 40 mm である。ステータの slots 間の隙間は、幅 7 mm, 深さ 15 mm である。ロータの外径は 50 mm, 高さは 126 mm である。ASBM の永久磁石と電磁石の上面との間のエアギャップは 1.5 mm である。ASBM の永久磁石は NdFeB(N40), 外径 25 mm, 内径 20 mm, 高さ 1 mm である。電磁石は線径 0.3 mm, 250 巻きである。これらの

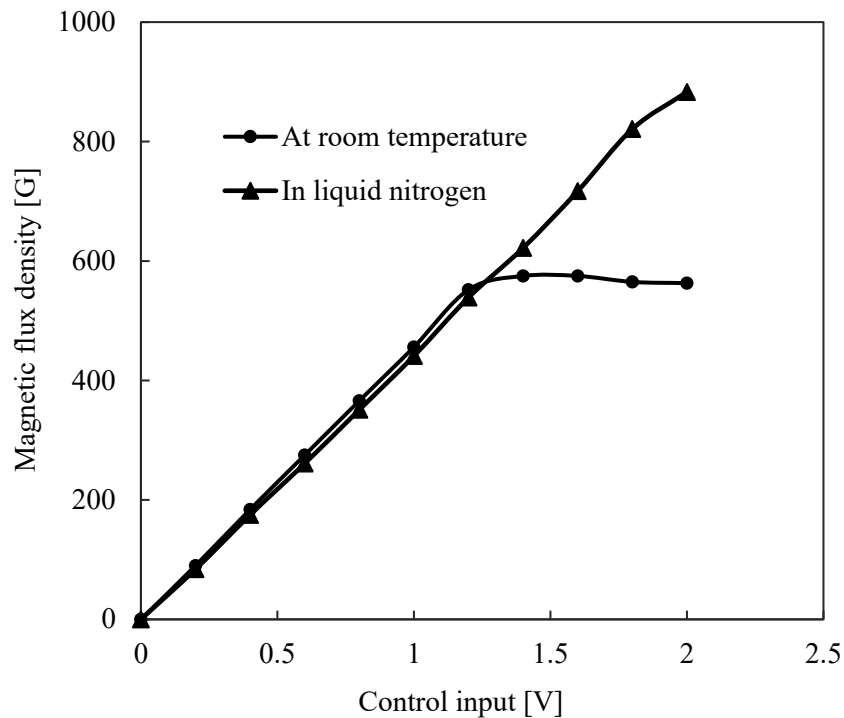


Fig. 2.4 Relationship between surface flux density and control input of electromagnets at room temperature and in liquid nitrogen. There is no difference in the surface flux density of the electromagnets at room temperature and in liquid nitrogen.

ロータとステータの詳細な寸法を図 2.3 に示す。

2.2.1 ASBM の基礎的特性

図 2.4 に室温中と液体窒素中における電磁石の表面磁束密度と電流制御量の関係の図を示す。電流制御量を 0 V から 2 V まで変化させたときのステータ電磁石の表面磁束密度をガウスメータにより測定した。入力信号 1 V 当たり流れる電流量は 1 A である。

0 A から 1.2 A までは室温中、液体窒素中ともに 1 A あたり 500 G の表面磁束密度が得られていることが確認できる。室温中と液体窒素中において大きな差は確認できない。一方で 1.2 A から 2 A までの間では液体窒素中の表面磁束密度が継続して増加しているが、室温中の表面磁束密度は上昇がみられない。これは室温中では電磁石巻線の抵抗が大きいため電磁石用電源の最大電圧 15 V に達しているためである。液体窒素中では抵抗が減少するためこのような状況は 2 A 以下では確認できない。ロータが中心位置付近で浮上している場合は永久磁石から受ける外乱は釣り合っているため制御電流には大きな電流は必要ない。このためつり合い位置付近では問題にならないと考えられる。

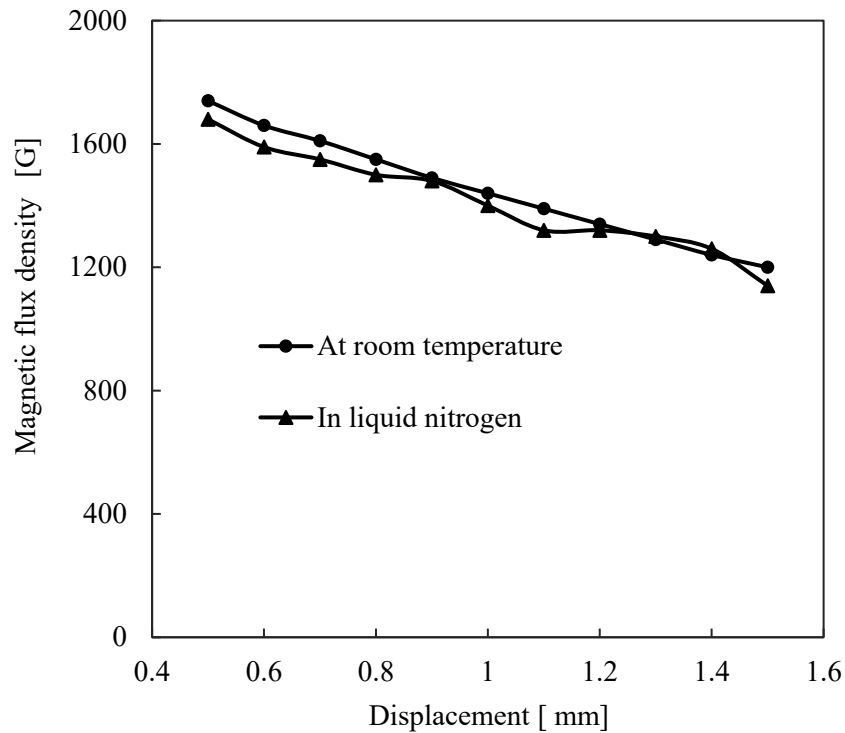


Fig. 2.5 Relationship between the magnetic flux density and the distance from the surface of the permanent magnets used in the ASBM rotor at room temperature and in liquid nitrogen. There is no significant difference in magnetic flux density between room temperature and liquid nitrogen.

図 2.5 に室温中と液体窒素中における ASBM のロータに使用した永久磁石の磁束密度とその表面からの距離の関係を示す。永久磁石の中心の磁束密度を Gaussmeter を使用して磁束密度を測定した。永久磁石は液体窒素に浸され、永久磁石表面から 0.5 mm の地点から 1.5 mm まで距離を取りながら測定した。実験結果より室温中と液体窒素中において磁束密度に大きな差は見られなかった。

すべてのネオジム磁石の残留磁束密度の温度係数はマイナスの値であるため、温度が上昇した場合、残留磁束密度が低下することによる減磁が起こる場合がある。一方で温度が低下した場合は残留磁束密度が上昇するため減磁は起こらない。このためネオジム永久磁石は低温において温度変化の影響を受けない。

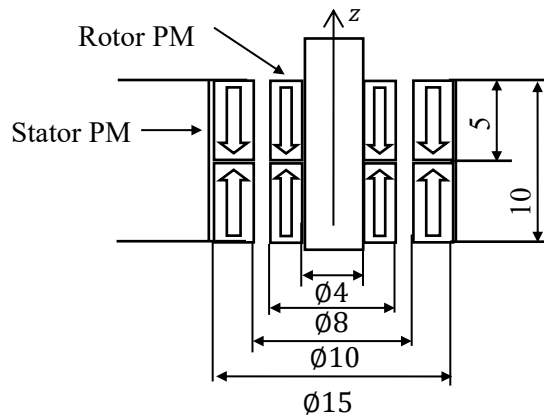


Fig. 2.6 Schematic of PMs for PMB. It consists of 4 ring-shaped PMs: 2 PMs attached to the stator and 2 PMs attached to the rotor. Arrows indicate the directions in which the PMs are magnetized.

Table 2.2 Parameters of the PMB

Item	Value, material
Material	NdFeB (N40)
Rotor PM	$\varnothing 8.0 \times \varnothing 4.0 \times 5.0$ mm
Stator PM	$\varnothing 15 \times \varnothing 10 \times 5.0$ mm
Air gap	1.0 mm

2.2.2 PMB の基礎的特性

PMB はステータに取り付けられた 2 個の永久磁石とロータに取り付けられた 2 個の永久磁石の計 4 個のリング状の永久磁石から構成される。これらの永久磁石は図 2.6 の矢印方向に磁化されているため、永久磁石のラジアル方向とアキシャル方向にそれぞれ反発力が発生する。

表 2.2 に PMB のパラメータを示す。材料は NdFeB であり、ロータ側永久磁石は外径 8.0 mm、内径 4.0 mm、高さ 5.0 mm である。ステータ側永久磁石は、外径 15 mm、内径 10 mm、高さ 5.0 mm である。ステータ側永久磁石とロータ側永久磁石との外径と内径の差であるエアギャップは 1 mm である。

PMB から得られるラジアル方向復元力とアキシャル方向非復元力の計算結果と実験結果を図 2.7 と図 2.8 に示す。

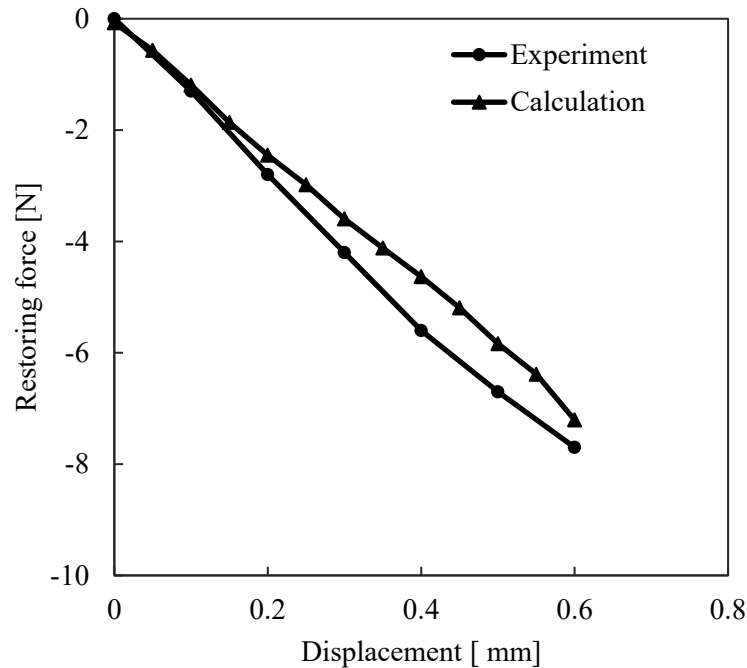


Fig. 2.7 Relationship between the displacement of the rotor in the radial direction and the restoring force of the PMB in the radial direction. The calculated result is -5.84 N at 0.5 mm and the obtained stiffness is -11.7 N/mm. The experimental result is -6.7 N at 0.5 mm and the obtained stiffness is -13.1 N/mm.

製作した PMB に対して有限要素法 (FEM) を用いた解析を行った。FEM 解析には J MAG Designer version 1.0 を使用した。FEM 解析では表 2.2 で示したサイズとパラメータにしたがって 3D モデルを製作した。2 つのステータ永久磁石間には 0.1 mm の空隙を設定し、同様に 2 つのロータ永久磁石間にも 0.1 mm の空隙を設定した。直径 15 mm の永久磁石に対して 0.5 mm のメッシュを基本的なサイズとして、メッシュを生成し、空隙に隣接する永久磁石の面は 0.1mm のメッシュを設定した。行った解析は静解析であり、永久磁石固定用に用いたアルミや真鍮に発生する渦電流の影響は考慮されていない。一方で、実験ではスタンドに固定されたフォースゲージにロータ側を取り付け、ステータ側を固定し、ロータ側を移動させることで測定した。フォースゲージは精度 0.1 N のものを使用した。

PMB におけるステータ永久磁石とロータ永久磁石間に働くラジアル方向の力とラジアル方向のロータ変位の関係を図 2.7 に示す。計算結果は 0.5 mm において -5.84 N、得られた剛性は -11.7 N/mm、実験結果は 0.5 mm において -6.7 N、得られた剛性は -13.1 N/mm である。

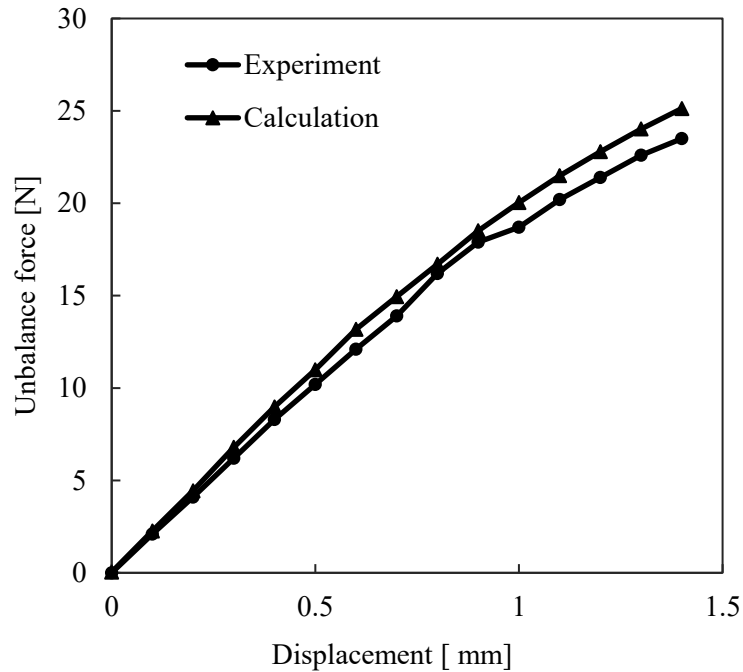


Fig. 2.8 Relationship between the displacement of the rotor in the axial direction and the unbalanced force of the PMB in the axial direction. The calculated result is 21.5 N at 1 mm, and the obtained non-restoring force is 19.5 N/mm. The experimental result is 18.7 N at 1 mm, and the obtained non-restoring force is 18.7 N/mm.

PMB におけるステータ永久磁石とロータ永久磁石間に働くアキシヤル方向の力とアキシヤル方向のロータ変位の関係を図 2.8 に示す. 計算結果は 1 mm において 21.5 N , 得られた非復元力は 19.5 N/mm, 実験結果は 1 mm において 18.7 N, 得られた非復元力は 18.7 N/mm である. このアキシヤル方向の非復元力は ASBM に対する負荷となる.

図 2.5 で得られた結果から永久磁石の表面磁束密度は低温において温度変化の影響をほとんど受けないため, 室温中で測定した図 2.7 と図 2.8 の結果は液体窒素においても同様の結果が得られると考えられる. これらの結果から, 本装置では 2 つの PMB を使用するため PMB から得られるラジアル方向の軸剛性は 26.2 N/mm, 傾き方向の復元トルクは 40.4 N·m/rad, アキシヤル方向に対する非復元力は 37.4 N/mm である.

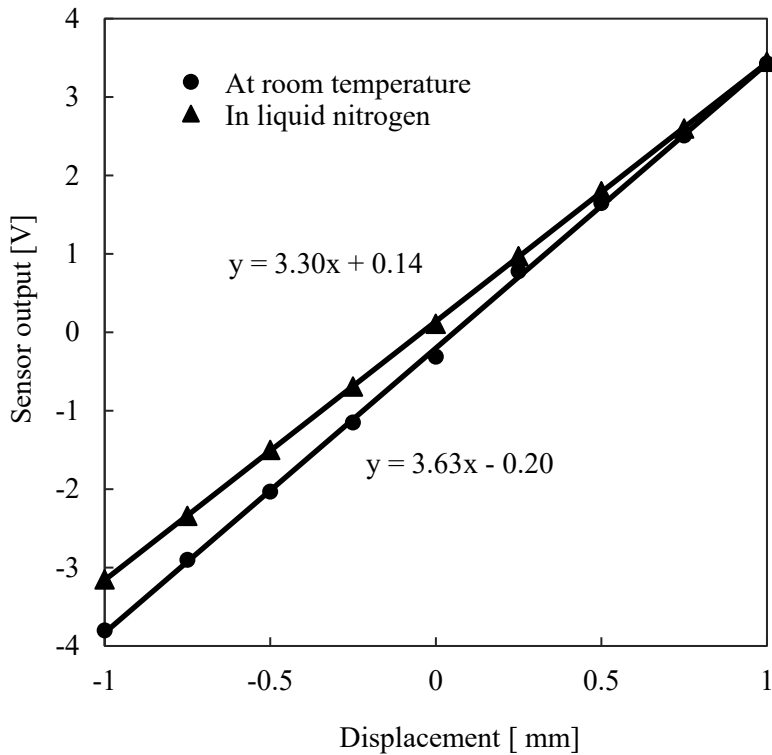


Fig. 2.9 Relationship between sensor output and measuring distance of an eddy current displacement sensor at room temperature and in liquid nitrogen. A temperature drift can be observed in the sensor output. The results are used to correct for errors due to their temperature drift in liquid nitrogen.

2.2.3 渦電流式変位センサとホールセンサの基礎的特性

図 2.9 に室温中と液体窒素中における渦電流式変位センサの測定距離とセンサ出力の関係を示す。使用された渦電流式変位センサは 2 つのセンシングコイルを持ち、その 2 つのコイル間の電圧を出力するため、一般的な渦電流式変位センサと異なり、測定対象が中心位置にあるときの出力は 0V となる。室温中において 3.3V の感度と 0.14V のバイアス電圧、液体窒素中においては 3.63V の感度と -0.2V のバイアス電圧があることが確認できる。これは渦電流式変位センサにおける温度ドリフトである。渦電流式変位センサにおける温度ドリフトはセンシングコイルの電気抵抗の変化によるものであるとされている。本章と第 3 章では室温中と液体窒素中においてこの結果を用いてセンサから得られた値を補正することで ASBM を液体窒素中において浮上させる。

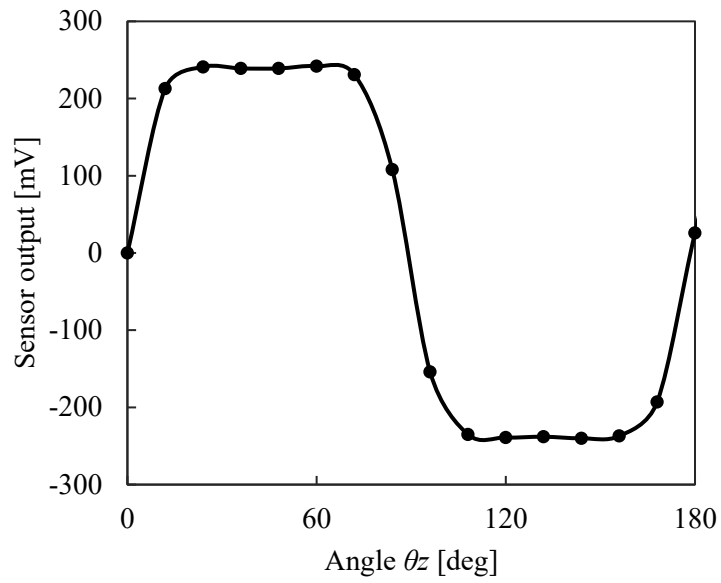


Fig. 2.10 Relationship between the rotational angle of the rotor and the output of the three Hall sensors placed in the stator electromagnets, which are 60 degrees apart.

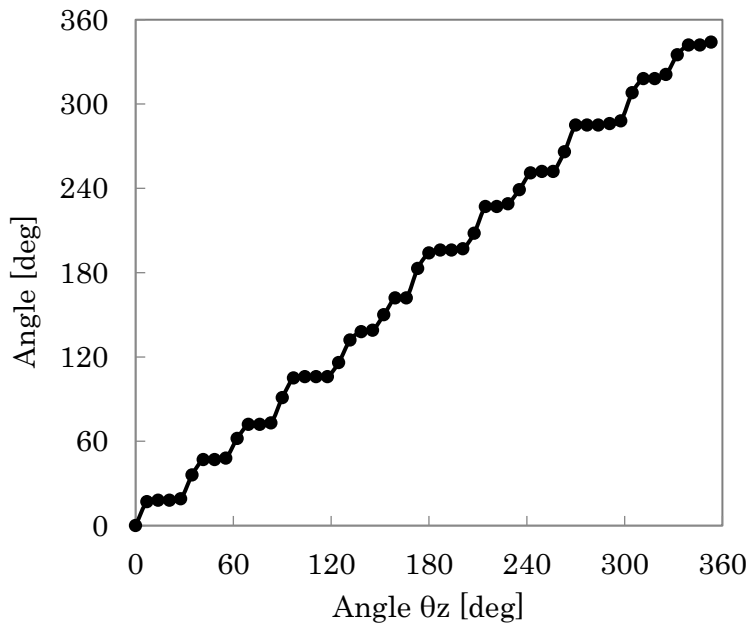


Fig. 2.11 Relationship between the angle detected by the Hall sensor and the rotational angle of the rotor. It can be confirmed that the rotational angle of the rotor is detected every 30 degrees.

図 2.10 にステータ電磁石に配置された 3 つのホールセンサの出力とロータの回転角の関係を示す。3 つのホールセンサは 60 度間隔で配置されそれぞれの出力は 60 度ずれたものとなる。3 つのホールセンサとロータに配置された 4 極の永久磁石によりロータの回転角 30 度ごとの検出を行う。また、ロータの回転速度はホールセンサ出力から 30 度ごとのパルスを作りパルスの間隔から求める。渦電流センサと同様にホールセンサにおいても低温下で利用する場合は温度変化により室温中と比較してセンサ出力が変化するが、ホールセンサの出力は矩形波に処理されるため回転角・回転速度の検出においてホールセンサの温度ドリフトの影響はない。

図 2.11 にホールセンサによって検出された角度とロータの回転角の関係を示す。ロータの回転角が 30 度ごとに検出されていることが確認できる。この角度は各電磁石の電流の配分の決定に用いられる。ホールセンサの出力からも確認できるように永久磁石から得られる磁束密度はほぼ一定になる区間がある。このような状況では電磁石側から見た場合、ロータの回転角は関係ないので階段状の角度検出でも問題ない。ただし、モータによって回転角を制御する場合にはこの方法は利用できない。より正確な方法で回転角を検出する必要がある。本実験では回転角の制御ではなく回転速度の制御を行うため、この角度の検出で大きな問題はない。

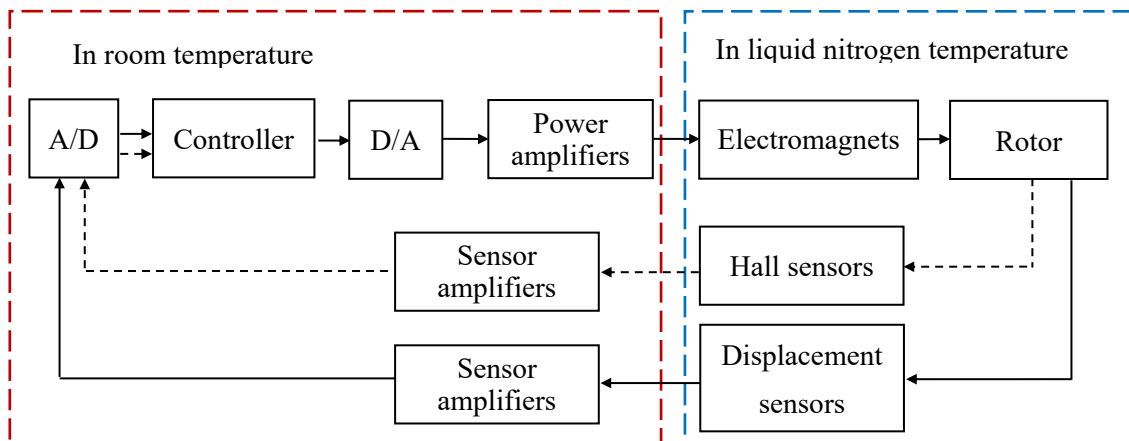


Fig. 2.12 Block diagram of the control system which consists of electromagnets, a rotor, hall sensors, displacement sensors, power amplifiers, sensor amplifiers, an analog-to-digital converter, a digital-to-analog converter, and a controller. Hall sensors are used to detect the rotation angle and rotation speed of the rotor. Displacement sensors are used to detect the displacement of the rotor in the z direction.

2.3 装置の構成

図 2.12 に制御系の概要図を示す。概要図は ASBM 用の電磁石、ロータ、ホールセンサ、変位センサ、パワーアンプ、センサアンプ、アナログ-デジタル変換器とデジタル-アナログ変換器、コントローラから構成される。ホールセンサは、回転角度と回転速度を検出するために使用される。変位センサは、ロータの z 方向の変位を検出するために使用される。電磁石、ロータ、ホールセンサ、変位センサは液体窒素温度中で使用される。パワーアンプ、センサアンプ、アナログ-デジタル変換器、デジタル-アナログ変換器、コントローラは室温中で使用される。コントローラはデジタル信号処理装置(DSP, DS1104)と Matlab の Simulink を用いて実装される。DSP のサンプリング周期は $100 \mu\text{s}$ に設定されている。デジタル-アナログ変換器とアナログ-デジタル変換器は電圧範囲 -10 V から 10 V 、変位センサ用の量子化ビット数 16bit とホールセンサ用の 12bit のチャンネルとパワーアンプへの出力用の 16bit のチャンネルから構成される。

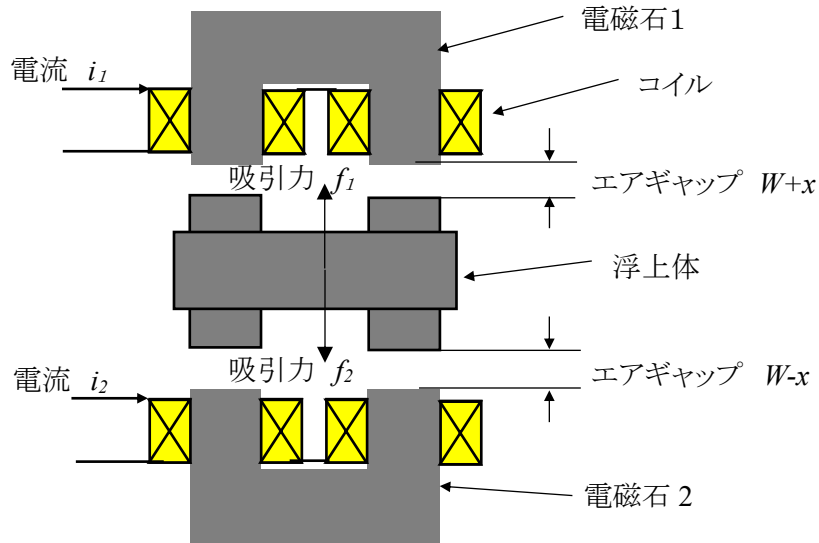


Fig. 2.13 Schematic diagram of a basic magnetic bearing.

2.4 磁気軸受とセルフベアリングモータの制御理論

図 2.13 に基本的な磁気軸受の概要図を示す。磁気軸受は上下に配置された電磁石 1・電磁石 2 と浮上体から構成される。電磁石に電流 i が印加されることによって電磁石が励磁され浮上体を吸引する。電磁石 1,2 に対して印加される電流をそれぞれ i_1, i_2 , そこから浮上体に対して発生する吸引力をそれぞれ f_1, f_2 とする。ここで力のつり合いは

$$m\ddot{x} = f_1 - f_2 \quad (2.1)$$

漏れ磁束がなく鉄心の透磁率が真空の透磁率と比べて極めて大きいとすると f_1, f_2 はそれぞれ以下のように定義できる。

$$f_1 = k \left(\frac{i_1}{W+x} \right)^2 \quad (2.2)$$

$$f_2 = k \left(\frac{i_2}{W-x} \right)^2 \quad (2.3)$$

$$k = \frac{\mu_0 S N^2}{2} \quad (2.4)$$

N は巻き数, S は電磁石と浮上体の対抗断面積, μ_0 は真空の透磁率である。電流 i_1, i_2 , は制御電流 i_c とバイアス電流 I_b を用いて以下のように定義する。

$$i_1 = I_b - i_c \quad (2.5)$$

$$i_2 = I_b + i_c \quad (2.6)$$

ここで中心位置近傍の浮上体の微小変位 Δx と微小制御電流 Δi_c を考え、2次以上の項を無視すればテーラー展開は

$$f(x, i) \approx f(0,0) + \frac{\partial f}{\partial x}(0,0) \cdot x + \frac{\partial f}{\partial i}(0,0) \cdot i \quad (2.7)$$

これにより f_1, f_2 はそれぞれ

$$f_1 = 2 \frac{kI_b^2}{W^3} \Delta x - 2 \frac{kI_b}{W^2} \Delta i_c \quad (2.7)$$

$$f_2 = -2 \frac{kI_b^2}{W^3} \Delta x + 2 \frac{kI_b}{W^2} \Delta i_c \quad (2.8)$$

これらと式 2.1 より、中心位置近傍での浮上体の力のつり合いは

$$m\ddot{x} = -k_i i_c + k_x x \quad (2.9)$$

このように線形化される。電流力係数 k_i と電流変位係数 k_x は

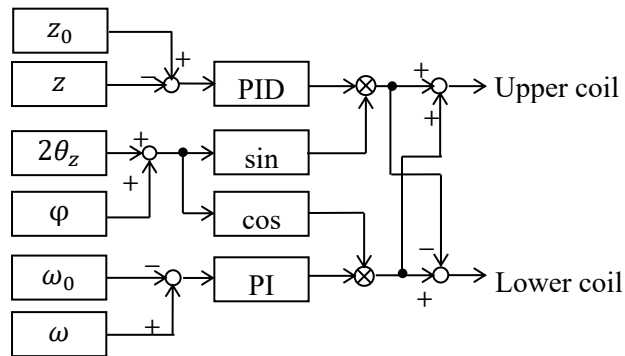
$$k_i = 4 \frac{kI_b}{W^2} \quad (2.10)$$

$$k_x = 4 \frac{kI_b^2}{W^3} \quad (2.11)$$

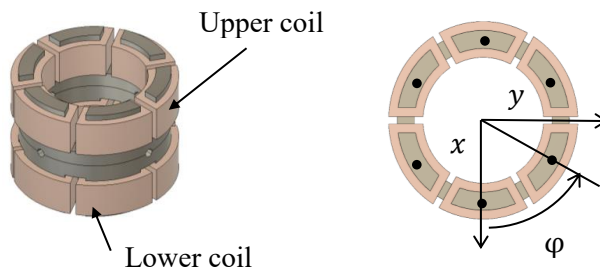
のように定義される。以上により、磁気軸受の運動方程式は線形化され、PID 制御による系の安定化や最適制御レギュレータによるパラメータ決定によって電流 i_c を決定し、系を安定にする。

このように磁気軸受の制御には PID コントローラが用いられる、一方、セルフベアリングモータはロータ側に永久磁石があるため、ロータの回転角によって電磁石の電流の配分を変える必要がある。このようなセルフベアリングモータの制御理論はアキシャル方向、ラジアル方向、傾き方向について理論的な設計と実験による確認が多くの研究[33-39]でなされている。

本論文で示す ASBM の基本的な動作は 4 極 3 相 6 スロットのブラシレスモータの回転用の駆動電流に対して、磁気軸受における PID コントローラ出力の電流を回転角により調整し、加算している。その概要図を図 2.14(a)に、回転角に依存していないアキシャル支持力の出力の結果を図 2.15 に示す。



(a) Block diagram of the controller



(b) Upper coil, Lower coil and φ

Fig. 2.14 Block diagram of the controller. The z_0 is target value of displacement of the rotor, the z is the displacement in the z direction, the θ_z is the rotation angle of the rotor, the φ is the center angle of the electromagnet, the ω_0 is target value of rotation speed, the ω is the rotation speed of the rotor.

図 2.14(a)にコントローラのブロック図を示す. z はロータの z 方向の変位, θ_z はロータの回転角, φ は角電磁石に設定された角度, ω_0 は回転速度の基準速度, ω はロータの回転速度である. 変位はPIDコントローラで制御され, 回転速度はPIコントローラで制御される. これらの出力は θ_z , φ に応じて各電磁石に分配され, ここで得られた制御信号はパワーアンプで増幅されて電磁石に流れる. 図 2.14(b)に上コイル, 下コイル, φ を示す. φ は 0 度から 300 度まで 60 度間隔の角度である.

極低温では, センシングコイルの抵抗値が低下するため, 変位センサの出力が室温に比べて大きく変化する温度ドリフトが発生する. このため, 液体窒素中ではセンサ出力の変化を補正して室温と同じ特性になるように調整される.

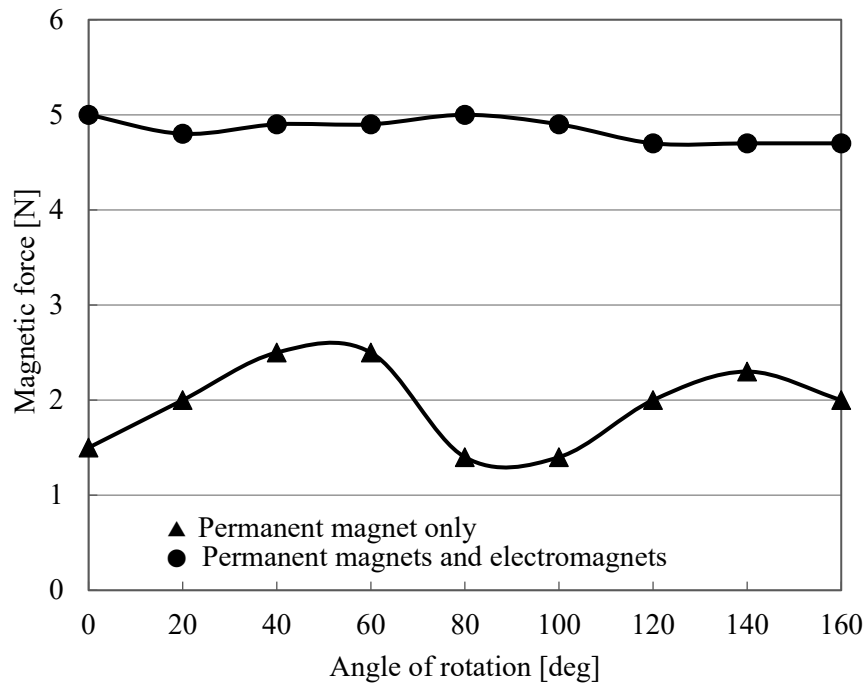


Fig. 2.15 Relationship between axial direction force acting between permanent magnet of rotor and electromagnet of stator and rotation angle. The force between the rotor and stator, which depends on the rotation angle, is no longer dependent on the rotation angle by controlling the self-bearing motor. This allows the self-bearing motor to be handled in the same way as a conventional magnetic bearing.

図 2.15 にロータの永久磁石とステータの電磁石間に働くアキシャル方向の力と回転角の関係を示す. 図 2.2 に示したロータをフォースゲージに取り付け 0 度から 160 度まで回転させ, 固定された電磁石ステータとの間に働く力を計測した. ロータ永久磁石とステータ電磁石スロットの配置はロータの回転角によって変化するため, アキシャル方向に発生する力は回転角に依存する. これに対して, 図 2.14(a)に示す制御方法と電磁石に一定の電流を印加した場合のアキシャル方向の力を示す. 永久磁石と電磁石スロットに働く力が電磁石によって一定に制御され, 電磁石によって回転角に依存していない力が発生していることが確認できる. これによってアキシャル方向の制御力は回転角に依存せず従来の磁気軸受の制御理論が適用可能となる.



Fig. 2.16 Photograph of the experimental setup. The ASBM is set in liquid nitrogen. Levitation and rotation experiments are carried out using this setting.

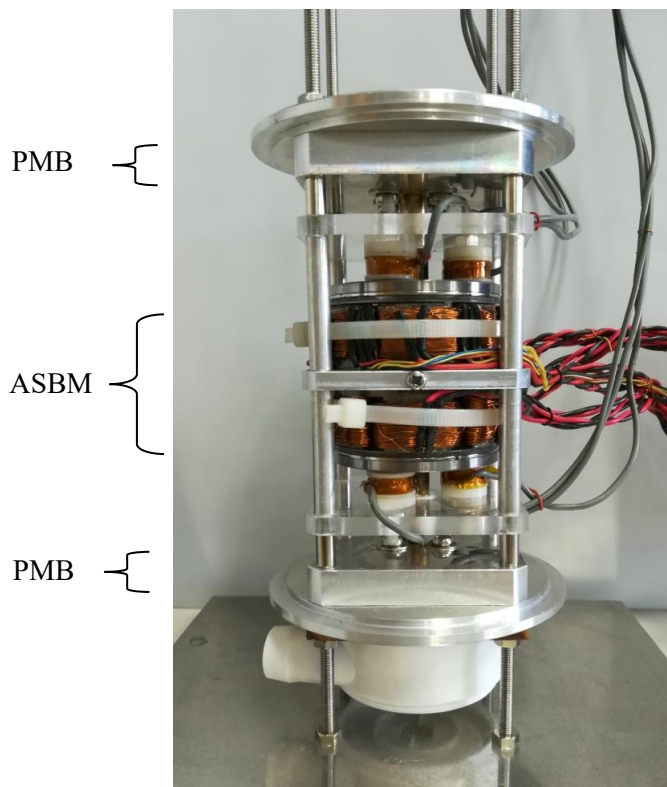


Fig. 2.17 Photograph of the ASBM and PMBs.

Table 2.3 PID gain of levitation control.

Item	Value
k_p	$5.3 \times 10^3 \text{ A/m}$
k_d	$0.020 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{s/m}$
k_i	$3.0 \times 10^3 \text{ A}/(\text{m} \cdot \text{s})$

Table 2.4 PI gain of rotation speed.

Item	Value
k_p	$1.0 \times 10^{-3} \text{ A/ rpm}$
k_i	$1.0 \times 10^{-3} \text{ A}/(\text{rpm} \cdot \text{s})$

Table 2.5 Physical parameters of the rotor.

Item	Value
m	0.159 kg
I_z	$2.98 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
I_x, I_y	$1.35 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

2.5 実験内容

極低温下での ASBM の安定性を確認するため、液体窒素中で実験を行った。ステータ、ロータ、変位センサ、ホールセンサ、PMB を液体窒素中にセットした。実験の写真と ASBM と PMB の写真を図 2.16, 図 2.17 に示す。この設定で浮上実験と回転実験を行う。ASBM, 変位センサ, ホールセンサは液体窒素中に設置される。温度ドリフトによる変位センサの出力の変化は事前に測定されてセンサの室温と液体窒素中の特性によって補正される。

浮上実験では、0 rpm でのロータの安定性を確認するためにインパルス応答を測定する。回転実験では、100 rpm から 1900 rpm の間でロータの振動と駆動電流を測定する。また、500 rpm から 1000 rpm までの回転速度におけるステップ応答とその時のロータ変位を測定する。

ロータのアキシャル方向を制御する PID コントローラのゲイン表 2.3 に示す。比例ゲイン k_p は $5.3 \times 10^3 \text{ A/m}$, 微分ゲイン k_d は $0.020 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{s/m}$, 積分ゲイン k_i は $3.0 \times 10^3 \text{ A}/(\text{m} \cdot \text{s})$ と設定される。回転速度制御の PI ゲインを表 2.4 に示す。比例ゲイン k_p は $1.0 \times 10^{-3} \text{ A}/(\text{rpm} \cdot \text{s})$, 積分ゲイン k_i は $1.0 \times 10^{-3} \text{ A/ rpm}$ である。ロータの物理パラメータを表 2.5 に示す。質量 m は 0.159 kg , ロータの中心点での z 軸周りの慣性モーメント I_z は $2.98 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot$

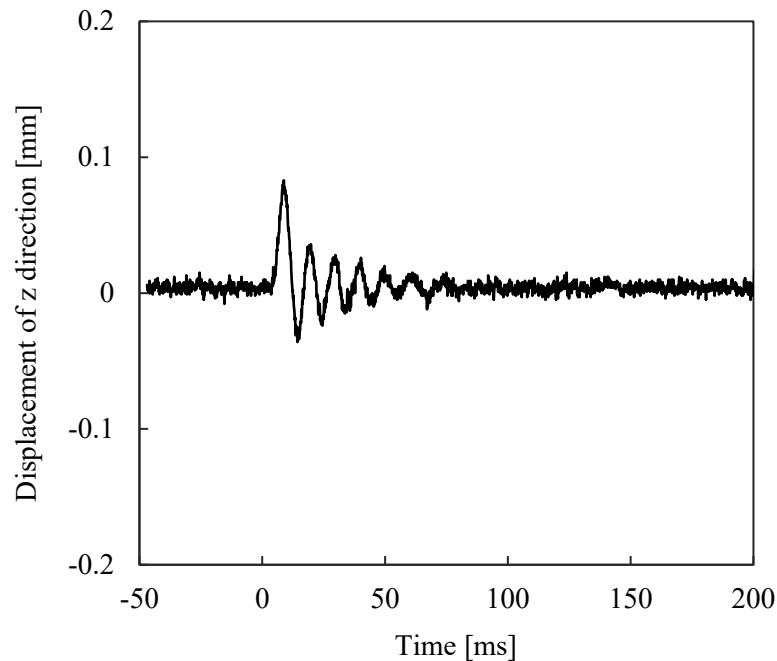
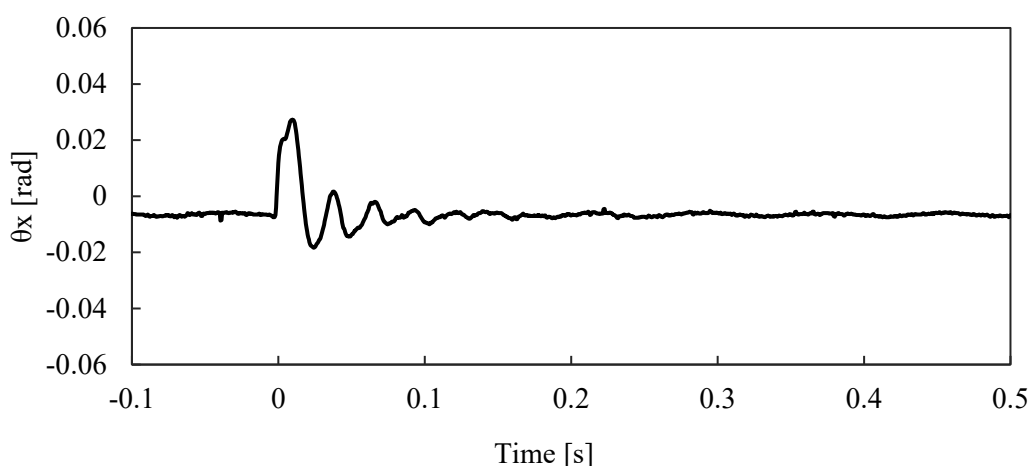


Fig. 2.18 Relationship between the displacement of the rotor in the z direction and time. The maximum displacement is 0.08 mm at 8.8 ms. The vibration has converged to the target position within 80 ms. The natural period is about 93 Hz.

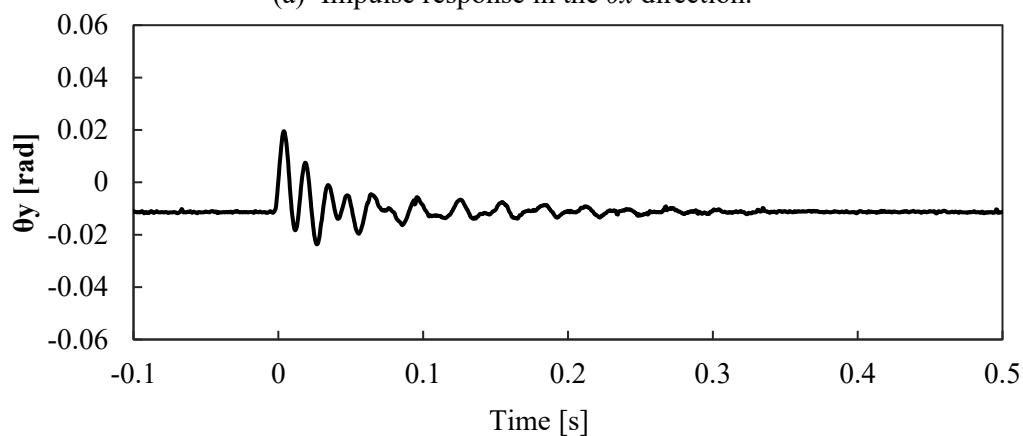
m^2 , ロータの中心点での x 軸と y 軸周りの慣性モーメント I_x, I_y はそれぞれ $1.35 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ である.

2.6 ASBM による液体窒素中における実験結果

液体窒素中に ASBM を設置した状態で 0 rpm においてインパルス応答を測定する. z 方向の変位と時間の関係を図 2.18 に示す. 0 秒の時点でアキシャル方向の PID コントローラの目標値に対して 5V, 5 ms のインパルスが入力される. 8.8 ms で最大変位は 0.08 mm である. 振動は約 80 ms で目標位置に収束している. 振動の周波数は約 93 Hz であった. これはアキシャル方向の固有振動数であると考えられる. 液体窒素中においてロータは安定して浮上していることが確認できる.



(a) Impulse response in the θ_x direction.



(b) Impulse response in the θ_y direction.

Fig. 2.19 Relationship between the displacement of the rotor in the z direction and time. The maximum displacement is 0.08 mm at 8.8 ms. The vibration has converged to the target position within 80 ms. The natural period is about 93 Hz.

液体窒素中におけるロータ浮上時のインパルス応答測定結果を図 2.19 に示す。ロータの傾きの角度は設置された 3 つの変位センサの出力から計算された値を用いた。横軸はインパルス印加開始時間を 0 秒とした時間、縦軸はロータ釣合い位置からの傾きである。 θ_x は 0.2 秒以内に振動が収束している。また θ_y は 0.3 秒以内に振動が収束していることが確認できる。 θ_x , θ_y とともに PMB によって液体窒素中においてロータを受動支持していることが確認された。

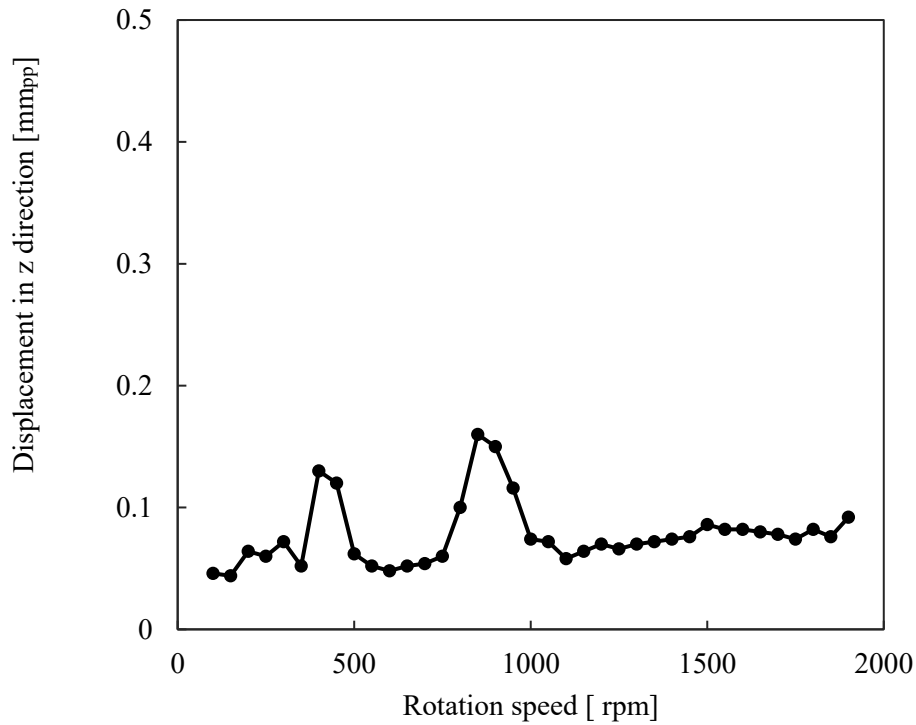


Fig. 2.20 Relationship between the displacement of the rotor in the z direction and the rotation speed. The displacement is 0.13 mm_{pp} at 400 rpm, 0.17 mm_{pp} at 850 rpm.

次に、液体窒素中での ASBM の安定性を確認するために回転試験を行う。ロータの z 方向の変位と回転速度の関係を図 2.20 に示す。ロータを浮上させ、100 rpm から 1900 rpm まで回転させた。最大変位量は 850 rpm をピークに 0.17 mm_{pp} である。また、2 番目に大きい変位は、400 rpm をピークに 0.13 mm_{pp} である。これらの変位は、ASBM のエアギャップが 1.5 mm であることよりも低い。100 rpm から 1900 rpm までロータは安定して回転していることが確認された。400 rpm と 850 rpm にピークがある原因は、回転数が固有振動数の 12 分の 1、6 分の 1 にそれぞれ近いこと、ステータコアの 6 凸極と 4 極のロータ永久磁石間に発生するコギングトルクによる外乱が共振したものであると考えられる。

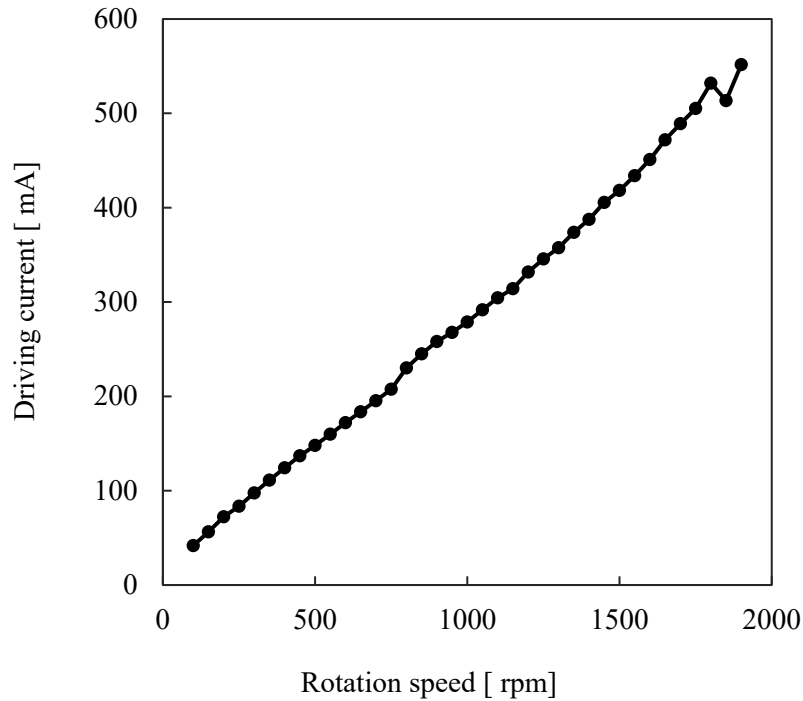
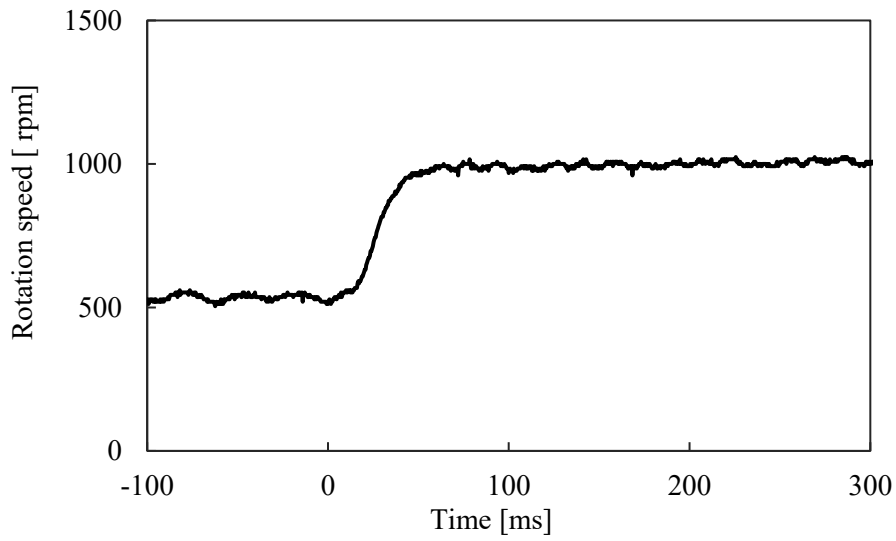


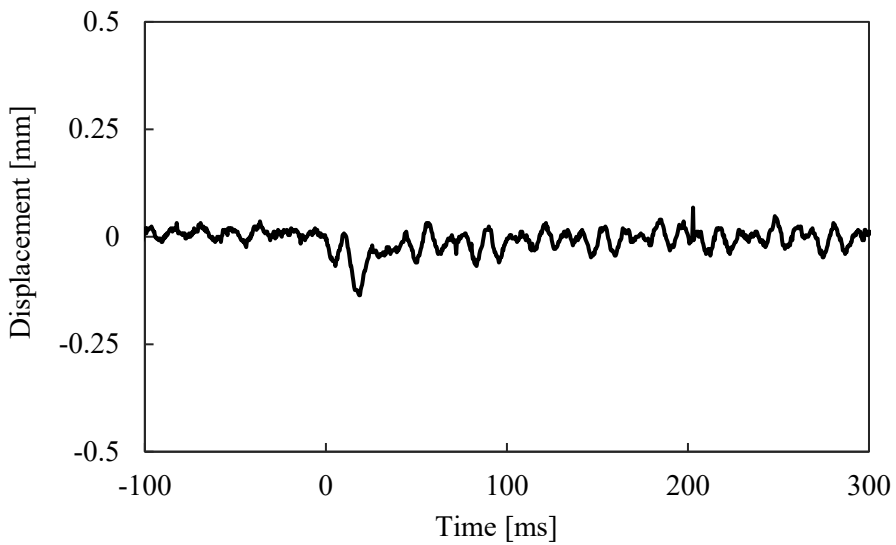
Fig. 2.21 Relationship between the current of electromagnets and the rotation speed. The driving current is 42 mA at 100 rpm and 552 mA at 1,900 rpm.

図 2.21 に電磁石の駆動電流と回転速度の関係を示す。回転速度に比例した駆動電流が確認できる。最小駆動電流は 100 rpm で 42 mA, 最大駆動電流は 1900 rpm で 552 mA である。回転数と駆動電流の関係は 0.277 mA/rpm である。850 rpm 付近で駆動電流が増加する原因は、モータに駆動に利用するエネルギーがロータの振動に対して消費されたと考えられる。また、1850 rpm において電流が急激に落ち込んでいることが確認できるが、図 2.20 よりロータが安定して回転している点から、液体窒素が気化したことによる回転に伴う粘性抵抗の減少などの環境の変化による測定誤差であると考えられる。

図 2.22 に回転速度のステップ応答の結果を示す。回転速度における PI コントローラの目標値を 500 rpm から 1000 rpm に 0 秒の時点で変化させた時の回転速度とロータの変位の時間変化を測定している。回転速度は 64 ms で目標値である 1000 rpm に到達している。最大変位は 19 ms で 0.14 mm である。ロータが加速している間、ステータが接触することはなロータは支持されていたが、回転速度が上昇しており、ロータの変位のに影響していることが確認された。



(a) Rotation speed



(b) Displacement

Fig. 2.22 Result of a step response test of the motor. The relationship between the rotation speed and time is shown in (a), and the relationship between the displacement and time is shown in (b). The reference speed of rotation speed is changed from 500 rpm to 1,000 rpm at 0 seconds. The rotation speed has reached the reference speed at 64 ms.

2.7 結言

本章では制作された ASBM の基本的な構造と液体窒素中における実験結果について述べた。

ASBM はアキシャル方向支持力と θ_z 周りの回転トルクを生成する。その他の軸は PMB によって非接触で受動的に支持される。この PMB のラジアル方向の剛性は 13.1 N/mm であった。一方で、PMB はアキシャル方向に対して 18.7 N/mm の非復元力が働くが、この非復元力は ASBM によって打ち消される。制御においてはロータの回転角によって各電磁石に電流を分配する。電流はアキシャル方向位置制御用の制御電流と回転トルク生成用の駆動電流を加算したものである。

液体窒素中における実験では室温中と液体窒素中の変位センサの特性の変化を事前に測定し、液体窒素中の実験においては室温中で PID ゲインを調整したのち、センサの特性を液体窒素中のものに補正して実験を行った。実験ではまず液体窒素中における ASBM の安定性を評価するために、インパルス応答測定、ロータ傾きにおける加振実験が行われた。

各軸の静的安定性を確認した後、回転実験を行った。液体窒素中において 100 rpm から 1900 rpm までロータを回転させ、その時のロータの振動の全幅と駆動電流を計測した。回転中のロータの最大の変位は 850 rpm において 0.17 mmpp を確認した。これはエアギャップ 1.5 mm と比較して十分小さくロータが液体窒素中において安定して回転することを確認した。また、回転速度のステップ応答の結果では 500 rpm から 1000 rpm への回転速度の追従を確認した。回転速度は 64ms で目標の 1000 rpm に到達し、その間の最大の変位は 0.14 mm であり、回転速度ステップ応答時もロータを安定して支持可能であることを確認した。

第3章 セルフベアリングモータの低温用遠心ポンプへの応用

ASBM の応答として低温用の遠心ポンプを提案する[40]. 製作された ASBM にインペラとポンプケーシングを取り付け、液体窒素の汲上げ実験を行ない液体窒素汲上げ時におけるロータの安定性や液体窒素の吐出量を確認した.

3.1 はじめに

セルフベアリングモータの応用例には人工心臓や冷却用のファン、キャンドポンプなどが報告されている. 人工心臓においては身体に組み込まれるため装置の小型化と高効率化の要求が強く、また定期的なメンテナンスが困難である点、潤滑油が利用できない点からセルフベアリングモータが採用されている[18,19,41]. 冷却用ファンにおいてはファンにモータを組み込むため従来の磁気軸受では装置が大型となり、小型のファンの製作が困難であった. そこで制御軸を1軸のみとし、その他の軸を永久磁石によって受動支持することにより小型かつ低コストでファンの内側に軸受を組み込む構造を実現している[20,21]. キャンドポンプにおいては粉塵のないクリーンな送液、メンテナンスフリー、高寿命、優れた化学耐性などの特性に着目し腐食性の強いケミカル溶剤などの液体を送液するためのポンプの開発を行っている[42].

このようにセルフベアリングモータには磁気軸受と同様に非接触で軸を支持可能なため無粉塵、オイルレス、メンテナンスフリーなどの利点があり、それに加え、モータと軸受が一体であるため、小型、巻線やパワーアンプ、鉄心を共通化できるため低コスト、軸長を短くできるため高速回転に適しているなど磁気軸受にはない利点がある.

本研究ではセルフベアリングモータの低温用の遠心ポンプへの応用を提案する. セルフベアリングモータを用いることで低温用の遠心ポンプに磁気軸受が採用されない問題点である導入コストの問題の解決する. また、冷媒循環用の遠心ポンプでは冷凍機の負荷を抑える必要があるため熱流入に対する要求が高く、小型でコンパクトであるため熱流入が小さく抑えられ、低温ポンプとしての損失の低減が可能である. さらに、低温の液体は粘性が低く、高い圧力を維持するには数万 rpm の高速な回転が求められる. セルフベアリングモータではモータを省略できるため、ロータの軸長を短くでき、固有振動数を高く設定することが可能である. これらの利点からセルフベアリングモータを低温用の遠心ポンプに応用する.

本章では第2章で示した ASBM に対してインペラとポンプケーシングを取り付け、液体窒素を1 cm 汲上げる実験を行う. その時のアキシャル方向の変位、傾き方向の変位、モータ駆動電流、液体窒素の汲上げ時の流量を計測した.

Table 3.1 Parameters of rotor and stator.

Rotor	$\varnothing 50 \times 126 \text{ mm}$
Stator	$\varnothing 50 \times \varnothing 40 \times 40 \text{ mm}$
Impeller	$\varnothing 18 \times 8.0 \text{ mm}$

Table 3.2 Air gap and coil.

Air gap of ASBM	2.0 mm
Air gap of PMB	1.0 mm
Number of turns	250 turn

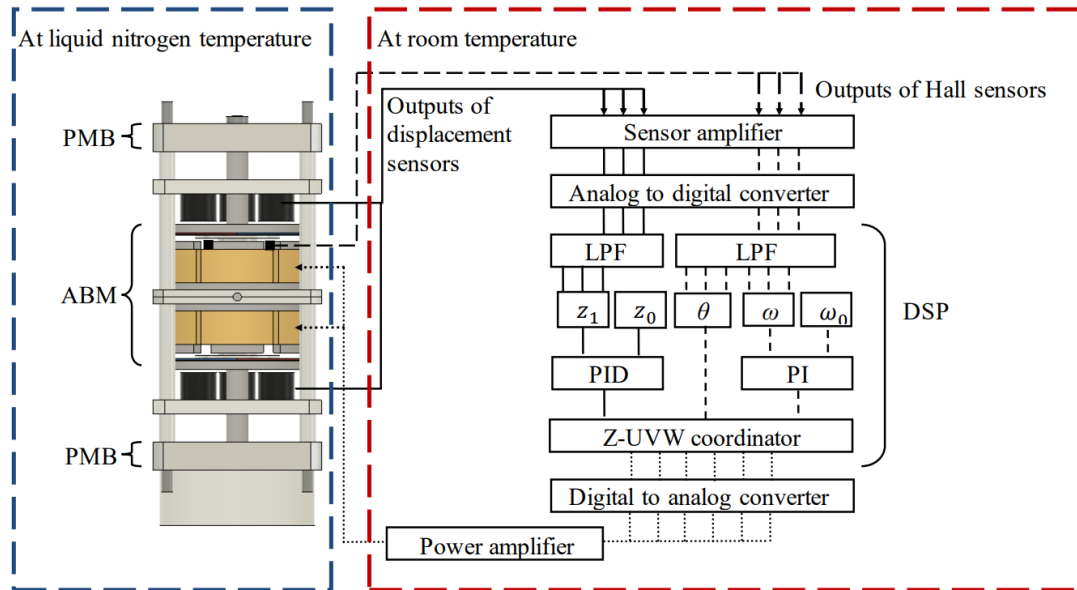


Fig. 3.1 Schematic diagram of the control system.

3.2 実験装置構成

実験装置は第 2 章で示した ASBM を使用した。回転体の z 方向の変位と回転速度は、PID コントローラと PI コントローラによって能動的に制御される。制御装置の概略図を図 3.1 に示す。制御装置は第 2 章で示したものと同様のセンサンプ、アナログ-デジタル変換器、デジタル信号処理装置 (DPS)、デジタル-アナログ変換器、パワーアンプから構成されている。ここで、 z_1 はステータの中心位置からの z 方向のロータ変位、 z_0 は PID 制御で用いる変位の目標値、 θ は θ_z 方向の回転角度、 ω は θ_z 方向の回転速度、 ω_0 は回転速度の PI 制御に用いる目標値である。また、変位センサとホールセンサ出力に対してカットオフ周波数 700 Hz と 200 Hz に設定されているローパスフィルタ (LPF) を用いる。Z-UVW コーディネータは、PID と PI コントローラの出力を三相の出力に変換して電磁石に入力する。ASBM、PMB、変位センサ、ホールセンサは液体窒素温度で使用される。その他は室温で使用される。センサの出力は温度に依存するため、液体窒素で測定したセンサの特性を用いてセンサゲインと PID、PI 制御用のパラメータは調整される。取り付けられたインペラは直径 18 mm、高さ 8.0 mm である。装置の詳細は表 3.1 と 3.2 に示す。

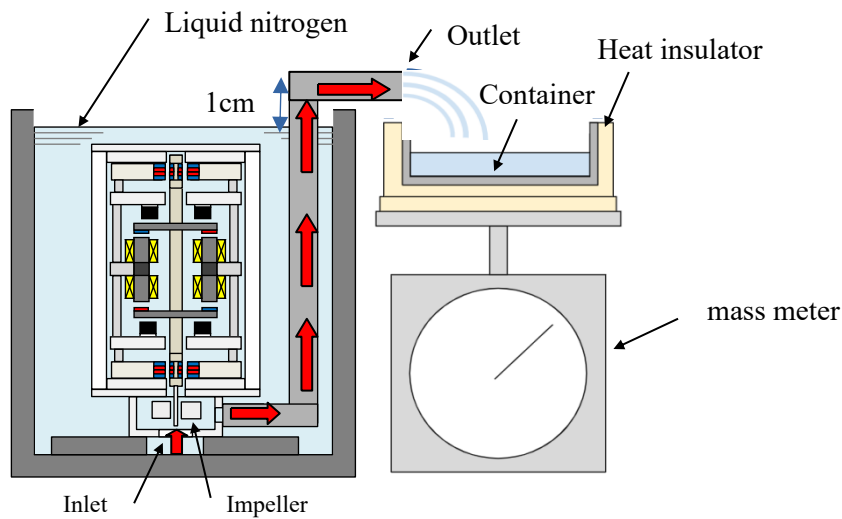


Fig. 3.2 Schematic diagram of the pump experiment.

Table 3.3 PID gains.

k_p	$5.5 \times 10^3 \text{ A/m}$
k_d	$0.019 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{s/m}$
k_i	$9.0 \times 10^3 \text{ A}/(\text{m} \cdot \text{s})$

Table 3.4 PI gains.

k_p	$1.0 \times 10^{-3} \text{ A/rpm}$
k_i	$1.0 \times 10^{-3} \text{ A}/(\text{rpm} \cdot \text{s})$

3.3 実験内容

実験では 2 種類の実験を行う。1 つは、液体窒素中でポンプ出口を閉じ、流量を 0 L/min に固定した実験。もう 1 つは、液体窒素を 1 cm の揚水高さで揚水する実験である。図 3.2 はポンプ実験の模式図である。ポンプは液体窒素中に設置されている。矢印で示すように液体窒素を汲上げ、その流量を質量計で測定する。液体窒素の蒸発を抑えるため断熱材で液体窒素容器は囲まれている。また、汲上げられた液体窒素の容器からの蒸発量は 0.01L/min 以下であり、実験での流量と比較して十分小さいため、実験において液体窒素の蒸発は考慮しない。実験における PID 制御と PI 制御のパラメータを表 3.3 と表 3.4 に示す。これらのパラメータは液体窒素中で試行錯誤して決めたものである。z 方向の変位を制御する PID ゲインは比例ゲイン $5.5 \times 10^3 \text{ A/m}$ 、微分ゲイン $0.019 \times 10^3 \text{ A} \cdot \text{s/m}$ 、積分ゲイン $9.0 \times 10^3 \text{ A/}$

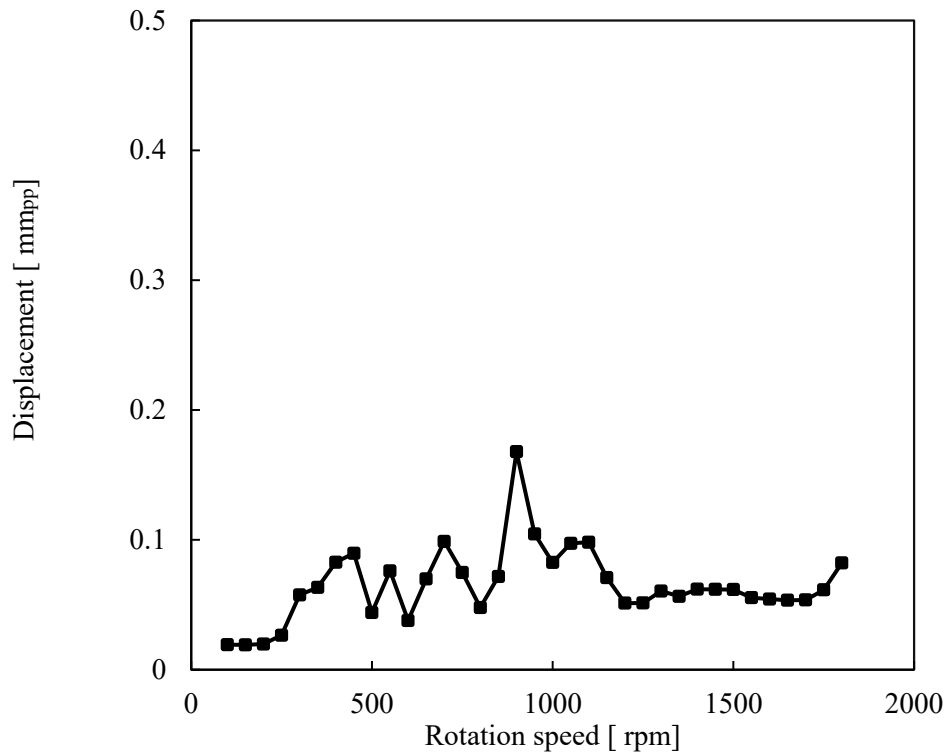
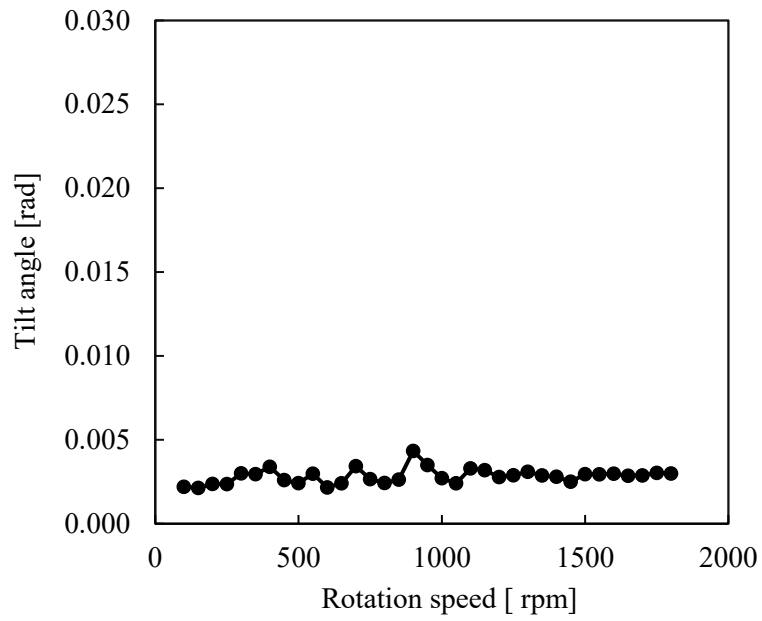


Fig. 3.3 Relationship between displacement of the rotor in the z direction and rotation speed of the rotor at 0 L/min in flow rate. The maximum displacement in the z direction is 0.17 mmpp at 900 rpm.

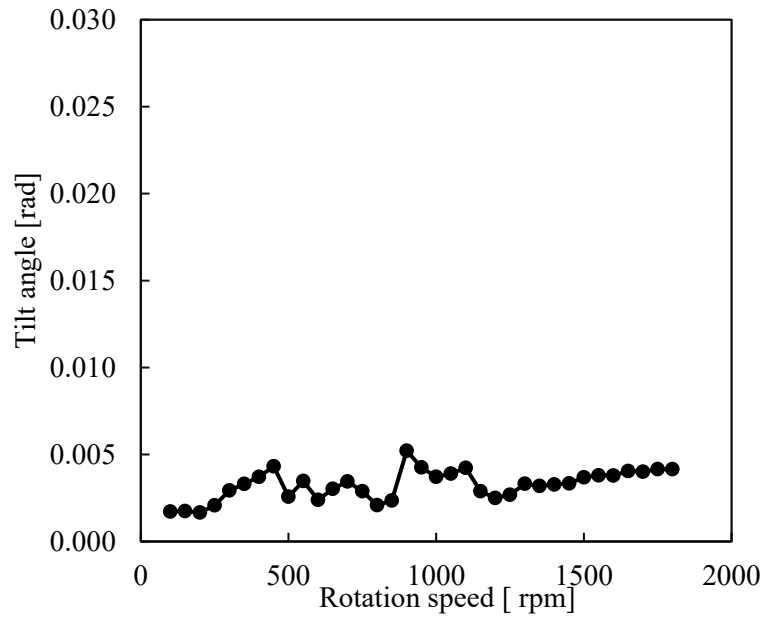
(m · s)である。回転速度を制御するための PI 制御用のゲインは比例ゲイン 1.0×10^{-3} A/rpm, 積分ゲインで 1.0×10^{-3} A/(rpm · s)である。

3.4 液体窒素中における汲上げ実験結果

図 3.3 は、液体窒素中の汲上げ流量 0 L/min におけるロータの z 方向の変位と回転速度の関係を示す。流量を 0 L/min とするためポンプケーシングの吐出口はふさがれている。その状態でロータの回転速度を 100 rpm から 1800 rpm まで 50 rpm 毎に増加させた時の z 方向におけるロータの振動の全幅を計測した。最大の振動全幅は 900 rpm での z 方向の最大変位は 0.17 mmpp である。この変位は ASBM のエアギャップ 2 mm 以下であるためロータはステータに接触せず回転していることが確認できる。ピークの原因は、回転数 900 rpm (15Hz)が固有振動数 93 Hz の 6 分の 1 程度であることから、6 つのステータ凸極とロータの永久磁石との間に発生するコギングトルクから受ける外乱による共振によるものと考えられる。



(b) θ_x



(a) θ_y

Fig. 3.4 Relationship between tilt angle of the rotor in the θ_x and θ_y directions and rotation speed of the rotor at 0 L/min in flow rate. The maximum value of 0.030 rad on the vertical axis is a displacement of about 1 mm at the center of the PMB, at which the rotor and stator make contact.

図 3.4 に図 3.3 と同様の実験で測定したロータの傾き方向である θ_x, θ_y 方向の傾斜角と回転速度の関係を示す。ロータの傾斜角はアキシャル方向に設置された 3 つの変位センサにより測定された変位をもとに導出される。縦軸の最大値 0.030 rad は PMB の中心位置において 1 mm の変位となり、ロータとステータが接触する傾斜角である。100 rpm から 1800 rpm までにおいてロータの最大傾斜角は 900 rpm で 0.0052rad である。この傾き角は、ロータとステータが接触する傾き角 0.03 rad に比べて小さいことが確認できる。 θ_x, θ_y 方向においても z 軸方向と同様にロータは液体窒素中にて非接触で支持されている。

図 3.5 に図 3.3 と同様の実験で測定した ASBM の駆動電流と回転数の関係を示す。回転トルク生成用の駆動電流は DSP 内部で計算され、パワーアンプには制御電流と加算されて印加されるため、DSP 内部での計算値を駆動電流として測定した。駆動電流の最小値は 100 rpm で 0.06A, 最大値は 1800 rpm で 0.82A である。両者の間には比例関係が確認できる。

図 3.6 に汲上げ高さ 1 cm における液体窒素汲上げ流量と回転速度の関係を示す。駅他窒素の吐出口における流量は 1000 rpm より確認された。1000 rpm における流量は 0.13 L/min, 1,800 rpm における流量は 1.3 L/min である。1000 rpm から 1800 rpm まで回転速度に比例した流量の増加が確認できる。

3.5 結言

第 2 章で示した ASBM を用いた低温用遠心ポンプを提案した。ASBM は軸方向に力と回転トルクを発生させ、ロータの軸方向変位と回転速度を制御する。軸方向の変位は PID コントローラを用いて能動的に制御し、回転速度は PI コントローラを用いて能動的に制御する。その他の軸は永久磁石軸受の反発力によって受動的に支持されている。

実験ではこの ASBM に対してインペラとポンプケーシングを取り付け、液体窒素中における流量 0 L/min における ASBM の回転速度に対する変位と回転速度に対する駆動電流を測定した。最後に、液体窒素を 1cm 汲上げる実験を行い 1800 rpm で 1.3L/min の流量を確認した。これらの結果よりロータは液体窒素中において非接触で支持され、1800 rpm まで浮上・回転・液体窒素の汲上げが可能であることが確認された。

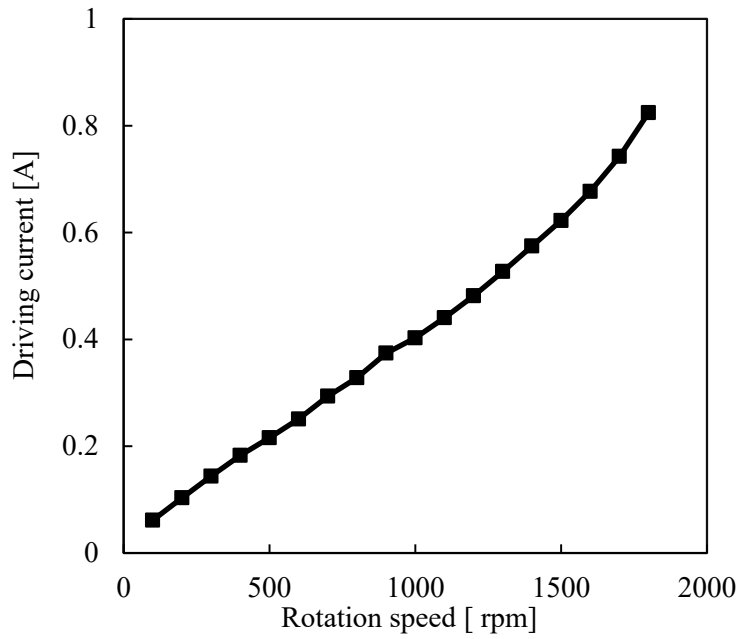


Fig. 3.5 Relationship between displacement of the rotor in the z direction and rotation speed of the rotor at 0 L/min in flow rate. The minimum driving current is 0.06 A at 100 rpm, and the maximum driving current is 0.82 A at 1,800 rpm.

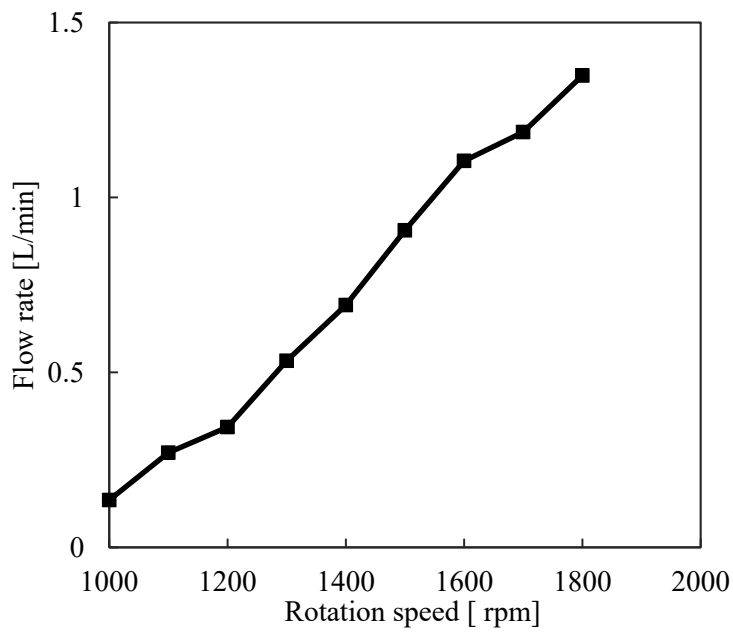


Fig. 3.6 Relationship between tilt angle of the rotor in the θ_x and θ_y directions and rotation speed of the rotor at 0 L/min in flow rate.

第4章 ゼロパワー制御を用いた磁気軸受の温度補償

本章ではゼロパワー制御を用いた磁気軸受の温度補償[43]を提案し、その理論的背景を従来のゼロパワー制御の伝達関数を用いて示す。さらに、基礎的な1軸制御型の磁気浮上装置を製作し、ゼロパワー制御を適用する。この装置に対して液体窒素を用いて渦電流センサを冷却し、温度ドリフト誤差を発生させ、その時のロータの変位を計測する。これによって、ゼロパワー磁気浮上を応用した磁気軸受の温度補償が有用であることを確認する。

4.1 はじめに

磁気軸受に一般的に使用される渦電流式変位センサは温度変化によってセンサの出力が変化する温度ドリフトの問題が確認されている[11]。この問題に対して低温専用の渦電流式変位センサの開発するなど研究が進んでいる[12]。これらの研究より温度ドリフトの発生する理由は変位センサに利用される銅線の抵抗値の温度依存性とセンサフレームの冷却時に発生する変形であることが明らかとなっている。本研究では低温における温度ドリフトによるセンサ出力の誤差に対してゼロパワー制御を応用した磁気軸受の温度補償を提案する。

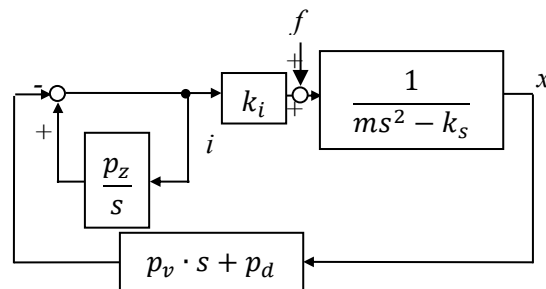


Fig. 4.1 Block diagram of the linearized magnetic bearing model. where m [kg] is the mass of the levitating body, k_s [N/m] and k_i [N/A] are the structural characteristic coefficients of the magnetic bearing, p_d [A/m] is the displacement feedback, p_v [As/m] is the velocity feedback, p_z [1/s] is the local current integrated feedback, s is the Laplace operator, x is the displacement of the levitating body, and i is the control current.

4.2 ゼロパワー制御と伝達関数を用いたセンサ外乱に対する変位の応答

本実験ではいくつかのゼロパワー制御方式のうち、局所電流フィードバック制御を使用している[44]。図 4.1 に局所電流フィードバック制御を用いたゼロパワー制御のブロック線図を示す。ここでは、 m [kg]は浮上体の質量、 k_s [N/m]と k_i [N/A]は磁気軸受の構造特性係数、 p_d [A/m]は変位フィードバックゲイン、 p_v [As/m]は速度フィードバックゲイン、 p_z [1/s]は局所電

流積分フィードバックゲイン, s はラプラス演算子, x は浮上体の変位, f は浮上体にかかる外乱力, i は制御電流である.

ここで浮上体について力の釣り合いを考えると

$$m\ddot{x} - k_s x = k_i i + f \quad (4.1)$$

ラプラス変換された浮上体の変位 $X(s)$ は

$$X(s) = \frac{1}{ms^2 - k_s} \{k_i I(s) + F(s)\} \quad (4.2)$$

同様に制御電流 $I(s)$ は

$$I(s) = -(p_d + sp_v)X(s) + \frac{p_z}{s} I(s) \quad (4.3)$$

以上から外乱力 $F(s)$ から浮上体の変位 $X(s)$ への伝達関数を求めると

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{s - p_z}{ms^3 + (k_i p_v - m p_z)s^2 + (k_i p_d - k_s)s + k_s p_z} \quad (4.4)$$

これにより, 一定の外乱力 f_0 に対する無限時間後の浮上体の変位 x は

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = -\frac{f_0}{k_s} \quad (4.5)$$

このように局所的な電流フィードバック制御では一定の外乱力に対して負の剛性を持つことが確認できる. 同様に外乱 $F(s)$ から制御電流 $I(s)$ への伝達関数を求めると

$$\frac{I(s)}{F(s)} = \frac{s(sp_v + p_d)}{ms^3 + (k_i p_v - m p_z)s^2 + (k_i p_d - k_s)s + k_s p_z} \quad (4.6)$$

これにより, 一定の外乱力 f_0 に対する無限時間後の制御電流 i は

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i(t) = 0 \quad (4.7)$$

このように一定の外乱が加えられたとき制御電流は 0 に収束することが確認できる. 以上が局所電流フィードバック型のゼロパワー制御における制御の原理である. 一定の外乱に対して負の剛性を示し, 無限時間後の制御電流が 0 となる制御法である[45-47]. このためゼロパワー制御は磁気軸受の省エネルギー化を目的として除振台[48]や半導体搬送装置[49, 50]などに応用されている.

本研究ではこのゼロパワー制御の機能に加え, これまでゼロパワー制御において想定されてこなかった温度ドリフトによるセンサ誤差を想定したセンサへの外乱について, 同様に伝達関数を用いて外乱に対する浮上体の変位の応答を求める.

図 4.2 に局所電流フィードバック制御を用いたゼロパワー制御のブロック線図における変位 x に対して外乱 w を加えたブロック線図を示す. 磁気軸受の装置において, 変位 x は変位センサを用いて測定するため, 外乱 w は変位センサへの外乱として考えられる. この外乱以外は用いているパラメータや磁気軸受の構成は図 4.1 と同様である.

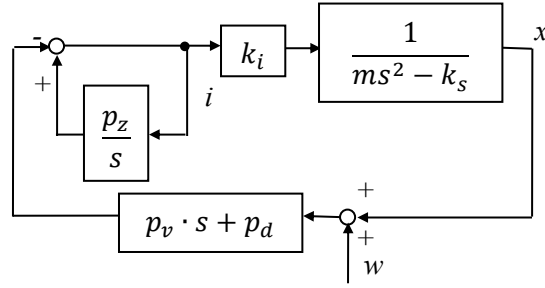


Fig. 4.2 Block diagram of the linearized magnetic bearing model. w is the disturbance caused by the temperature drift in the displacement sensor.

センサへの外乱を考慮した場合、磁気軸受の力の釣り合いと制御電流は次のように定義される。

$$(ms^2 - k_s) X(s) = k_i I(s) \quad (4.8)$$

$$I(s) = -(p_d + sp_v)(X(s) + W(s)) + \frac{p_z}{s} I(s) \quad (4.9)$$

これらより、浮上体変位 $X(s)$ に対する外乱 $W(s)$ の伝達関数は

$$\frac{X(s)}{W(s)} = \frac{-k_i(sp_d + s^2p_v)}{ms^3 + (k_ip_v - mp_z)s^2 + (k_ip_d - k_s)s + k_sp_z} \quad (4.10)$$

これにより、一定の外乱 w_0 に対する無限時間後の浮上体の変位 x は、

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0 \quad (4.11)$$

また、外乱 w の周波数が $\omega \ll 1$ である場合、 $\omega^2 \approx 0$ 、であるため $w(t) = w_0 \sin(\omega t)$ は $W(s) \approx \omega w_0 s^{-2}$ と近似できる。この時 $x_{(\infty)}$ は

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = -\frac{\omega w_0 k_i p_d}{k_s p_z} \quad (4.12)$$

外乱の周波数が小さい場合、 $x(t)$ は式 4.12 の値に収束し、局所電流積分フィードバックゲイン p_z を大きくとるか変位フィードバックゲイン p_d を小さくとることで $x(t)$ を小さくできることが確認できる。

渦電流センサの温度ドリフトによる外乱は、センシングコイルの抵抗値の温度依存性によるものであるため、外乱の周波数は磁気軸受の制御周波数に比べて十分に小さいと考えられる。したがって、変位センサ出力の温度ドリフトの影響を受けることなく、ゼロパワー制御で磁気軸受を浮上させることができると考えられる。

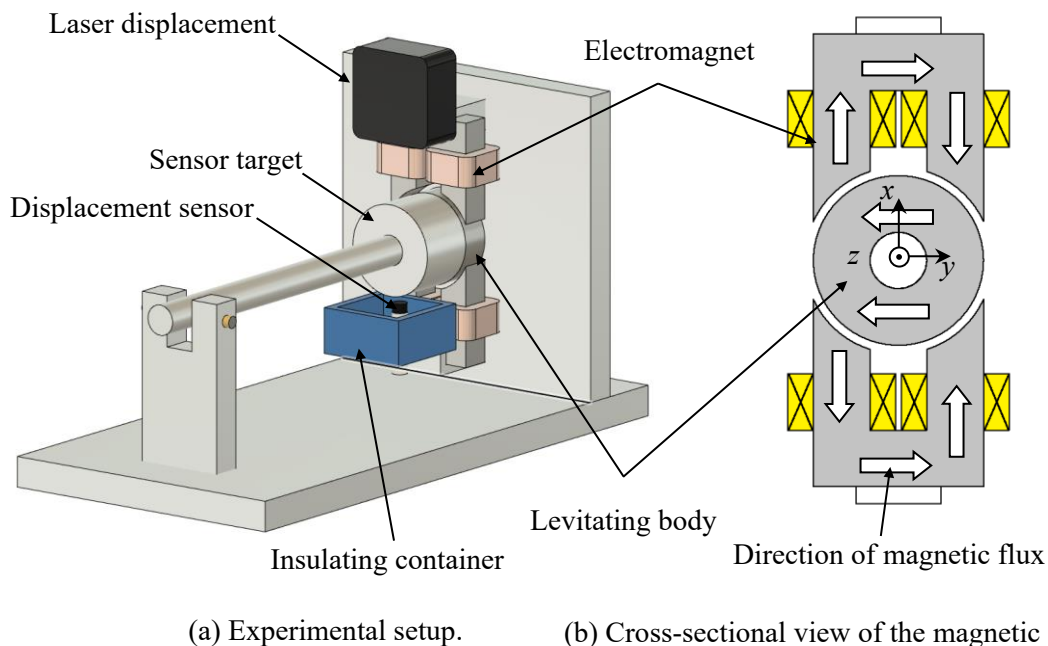


Fig. 4.3 The experimental setup is shown in (a). It consists of a magnetic bearing, an eddy-current displacement sensor, a shaft, a levitating body, a sensor target, a container for liquid nitrogen, and a laser displacement sensor. A cross-sectional view of the magnetic bearing is shown in (b). The gap between the electromagnet and the levitating body is 0.5 mm and the number of coil turns is 150 per coil. The levitating body is fixed except in the x -direction, while the x -direction is actively controlled and levitated using magnetic bearings and a controller.

4.3 実験装置構成

実験装置は、1 軸のみを支持する基本的な磁気軸受である。磁気浮上に使用する渦電流式変位センサは、室温から液体窒素温度まで冷却されている。

実験装置の構成を図 4.3(a)に示す。実験装置は磁気軸受、分解能 $0.3\mu\text{m}$ の渦電流式変位センサ(AEC-5505)、シャフト、浮上体、センサターゲット、断熱容器、繰返精度 $10\mu\text{m}$ のレーザー変位センサ(CD1-30N(J))から構成される。渦電流式変位センサは、浮上体の位置を検出しゼロパワー制御への入力として使用される。実験中は、センサを室温(293K)から液体窒素温度(77K)まで断熱容器に液体窒素を充填することで渦電流式変位センサのみ冷却する。渦電流センサの出力は実験中の温度ドリフトの影響を受けるため、室温中にレーザー変位センサを設置し、浮上体の変位を測定する。レーザー変位センサの出力は、磁気軸受の制御には使用されない。

図 4.3 (b)に磁気軸受の断面図を示す。浮上体は x 方向以外は固定されており、 x 方向は

Table 4.1 Magnetic bearing parameters.

Diameter of iron core	40	mm
Thickness of iron core.	16	mm
Diameter of sensor target	30	mm
Airgap	0.5	mm
Length of shaft	15	cm
Number of winding	300	turn

Table 4.2 Gains for zero-power control.

p_d	2.0	A/mm
p_v	0.001	A·s/mm
p_z	20	A·/(s·mm)

磁気軸受を用いて能動的に制御して浮上させる。白い矢印の方向は、各電磁石で発生する磁束の方向を示している。

製作した磁気軸受装置の仕様を表 4.1 に示す。磁気軸受に使用されている浮上体側の鉄心の直径は 40 mm, その鉄心の厚さは 16 mm, センサターゲットの直径は 30 mm, 浮上体の鉄心と電磁石との間のエアギャップは 0.5mm, シャフト長は 15 cm, 電磁石コイルの巻数は上下それぞれ 300 巻である。

表 4.2 にゼロパワー制御に使用したゲインを示す。変位フィードバックゲイン p_d は 2.0 A/mm, 速度フィードバックゲイン p_v は 0.001 A·s/mm, 局所電流積分フィードバックゲイン p_z は 20 A·/(s·mm) に設定される。これらの値は磁気軸受を実際に浮上させ、試行錯誤することによって決定された。

図 4.4 に装置の写真を示す。断熱容器に対して液体窒素を充填することで渦電流式変位センサを冷却する。この容器から浮上体の変位の測定に用いるレーザ変位センサは十分距離を離すことにより、レーザ変位センサは温度の影響を受けないように設置されている。また、センサターゲットの上下を利用していることから液体窒素によって発生する結露や霜の影響を受けにくい構造となっている。一方の渦電流式変位センサはセンサヘッドが液体窒素に完全に浸されるため、室温から液体窒素温度へと急激に冷却される。

4.4 実験内容

磁気軸受を用いた実験では大きく分けて 2 つの実験が行われる。1 つ目の実験は渦電流式変位センサ出力へセンサへの外乱 w として正弦波の電圧を加えた場合の浮上体の変位を測定する実験である。正弦波の周波数を変化させることにより伝達関数を用いて導出した

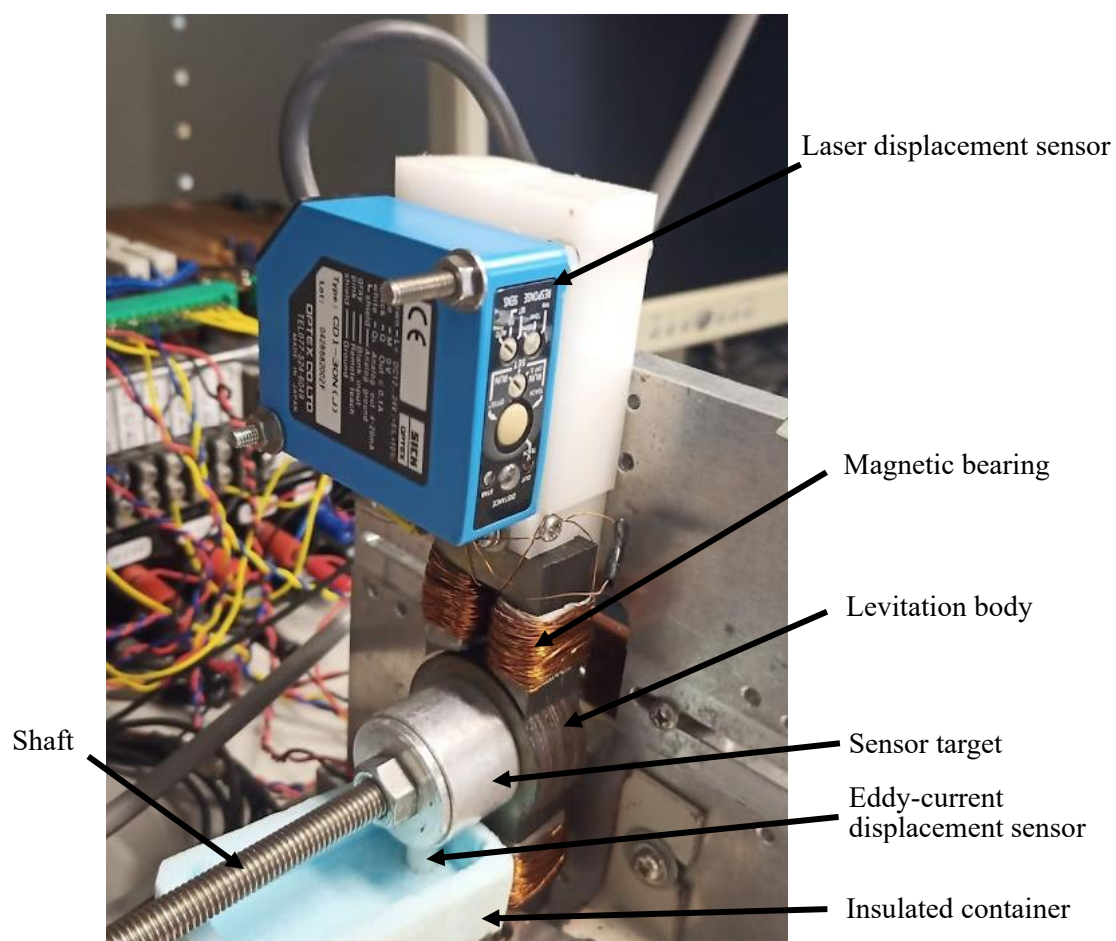


Fig. 4.4 Photo of the fabricated magnetic bearing. It consists of a magnetic bearing, eddy-current displacement sensor, shaft, levitation body, sensor target, insulated container and laser displacement sensor.

低周波数の外乱に対する変位の応答の結果、つまり、外乱の周波数に比例した浮上体の変位の応答を確認する。2 つ目の実験は断熱容器に液体窒素を充填することにより、渦電流式変位センサに対して温度ドリフトを発生させ、その時の温度ドリフトによるセンサ出力の変化、浮上体の変位、磁気軸受の制御電流を測定する。この実験により、渦電流式変位センサにおける温度ドリフト有効性を確認する。

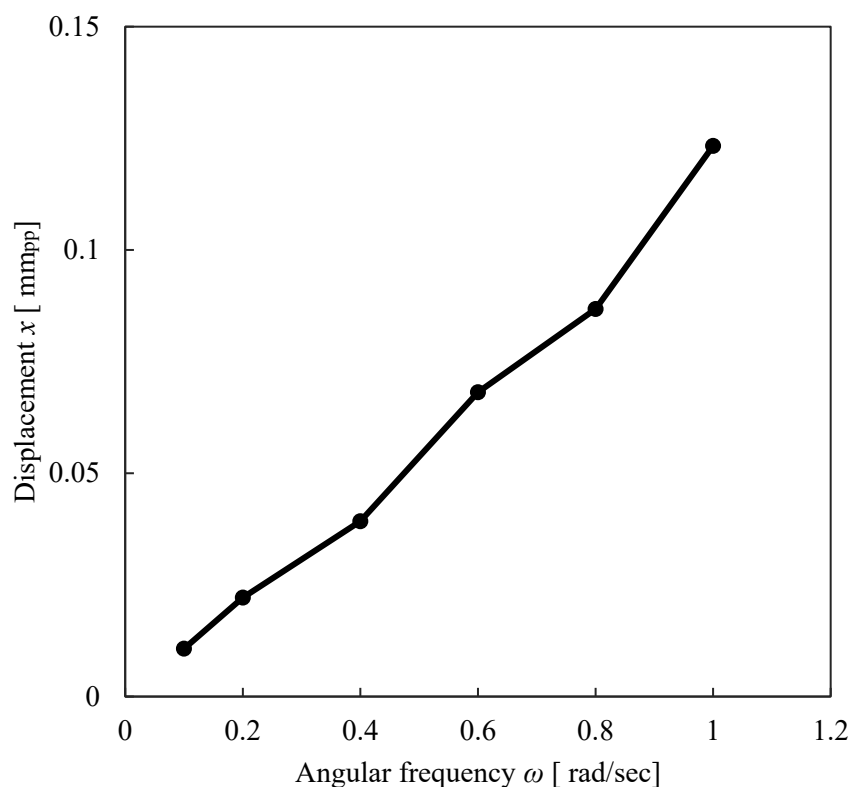


Fig. 4.5 Relationship between the frequency of the disturbance to the eddy-current displacement sensor and the displacement of the levitation body. The 0.5 V sinusoidal voltage is added as a disturbance to the sensor is added to the sensor output.

4.5 実験結果

図 4.5 に渦電流式変位センサへの外乱の周波数と浮上体の変位の関係を示す。センサへの外乱として加えた 0.5 V 正弦波の電圧がセンサ出力に加えられる。変位センサが室温中で 1.0 V/mm に校正させているため、位置制御の PID コントローラであればこの外乱は浮上体の変位にして 0.5 mm の変位に相当する。外乱の周波数を 0.1 Hz から 1.0 Hz まで変化させた結果、浮上体の変位は外乱の周波数に比例していることが確認できる。これは式 4.12 で求めた結果と一致する。この結果より、ゼロパワー制御におけるセンサへの外乱は外乱の周波数が低ければ変位に与える影響が小さいことが確認された。

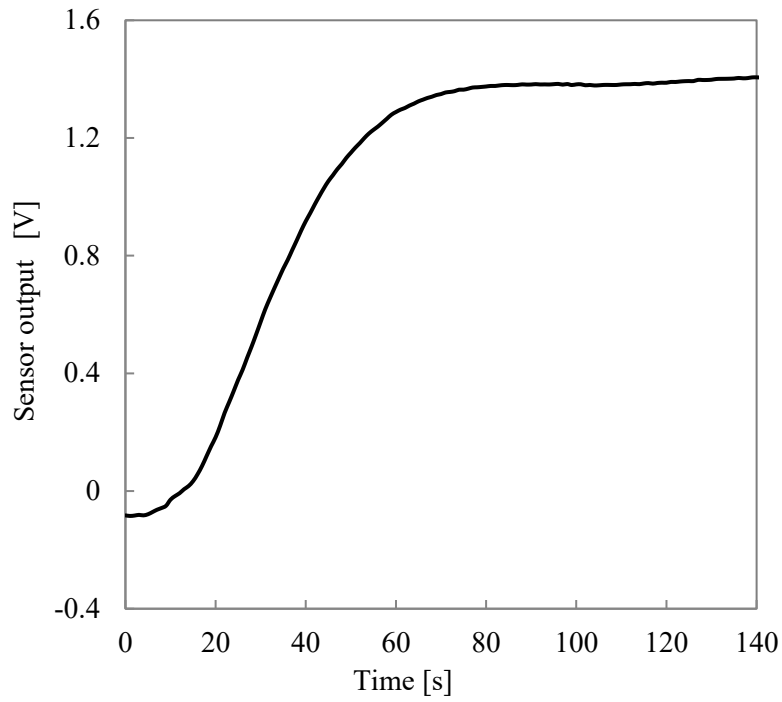


Fig. 4.6 Temperature drift in the eddy-current displacement sensor output. Filling the insulated container with liquid nitrogen at 5 seconds

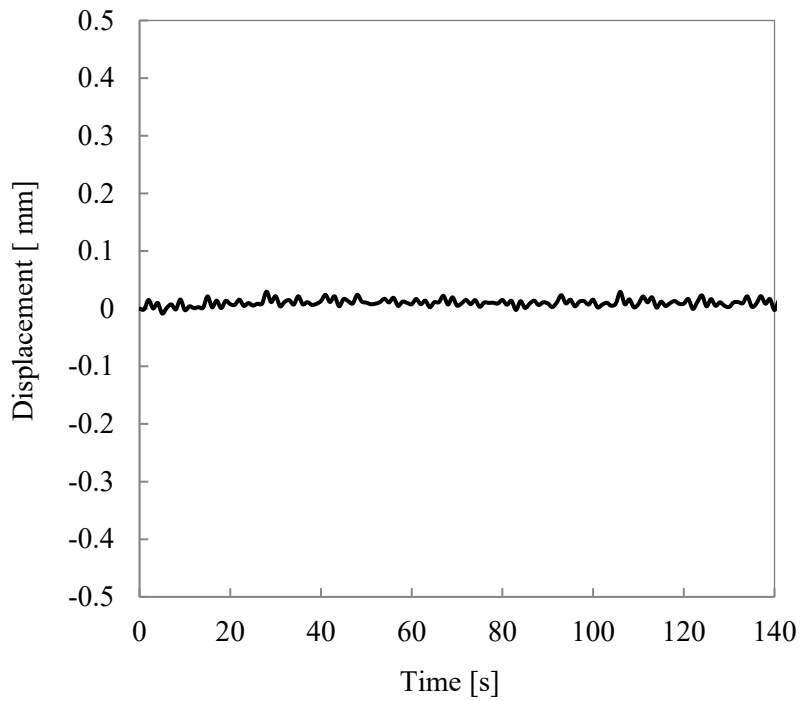


Fig. 4.7 Displacement of the levitating body measured by the laser displacement during temperature drift in the eddy-current sensor.

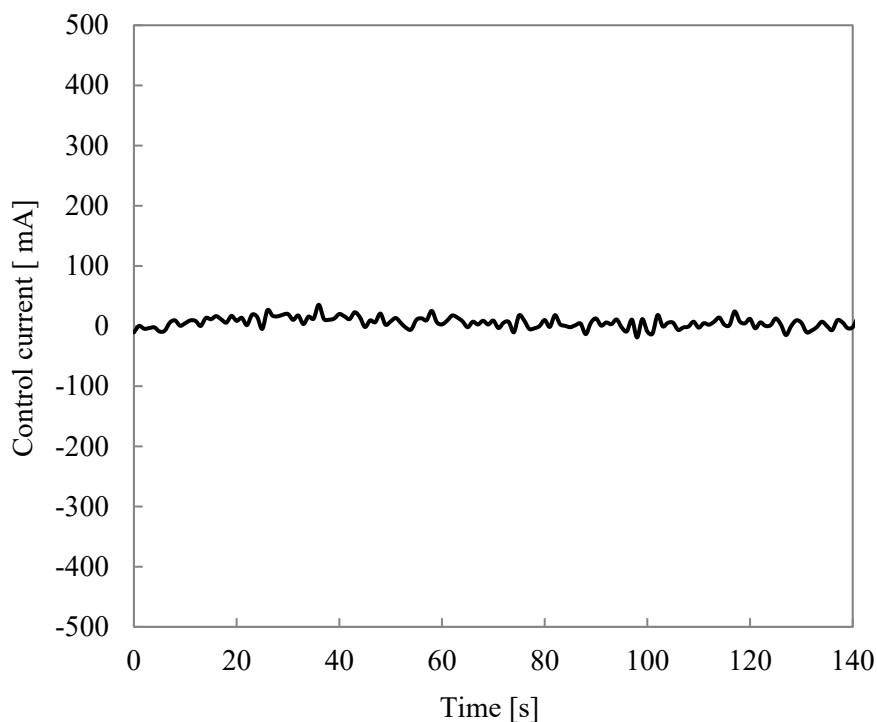


Fig. 4.8 Control current of magnetic bearing during temperature drift in the eddy-current sensor.

次に渦電流式変位センサを液体窒素によって冷却することにより温度ドリフトを発生させその時の浮上体の変位を測定する実験を行う。

図 4.6 は渦電流式変位センサの温度ドリフトの測定結果である。0 秒から 140 秒まで渦電流センサの出力が測定された。センサの出力は室温中において 1 V/mm に校正されている。5 秒から液体窒素を容器に充填し、約 80 秒までセンサの温度ドリフトが確認できる。センサが冷却されている間、センサ出力は-0.07 V から 1.38 V まで変化していることが確認できる。

図 4.6 と同様の実験においてレーザ変位センサによって測定された浮上体の変位を図 4.7 に示す。図 4.6 に示した 5 秒から 80 秒にかけて測定された温度ドリフトの影響を受けず、浮上体に影響がないことが確認できる。この結果より、液体窒素に浸すことによる室温から液体窒素温度への急激な冷却においてもゼロパワー制御を用いることによって磁気軸受はセンサの温度ドリフトの影響を受けずに浮上し続けることが可能であると確認された。

図 4.6 と同様の実験において測定された磁気軸受の制御電流を図 4.8 に示す。渦電流センサの温度ドリフトが最も大きいときに制御電流が 20 秒から 40 秒まで増加していることが確認できる。その間の電流の最大値は 35.4 mA である。このように実験で用いているゼロパワー制御は従来のゼロパワー制御と同様に、定常的な制御電流を 0 A とするように動作していることが確認できる。

4.6 結言

ゼロパワー制御を応用した磁気軸受の温度補償を提案した。伝達関数からセンサへの外乱に対する変位の応答を求め、1軸制御の磁気浮上装置を製作しその検証を行った。

実験は2種類行われた。1つ目はセンサの出力に対して0.5Vの正弦波を外乱として加えた場合の外乱の周波数とその時のロータの変位の最大値の関係を求めた。外乱の周波数を0.1 Hz から 1.0 Hz まで変化させた結果は伝達関数で求めた結果と同様に外乱の周波数に対して比例した変位の増加を確認した、もう一つの実験では実際に渦電流式変位センサを液体窒素を用いて室温から液体窒素温度まで冷却し、温度ドリフトを発生させた。その時の変位センサは室温中で 1.0 V/mm に調整された状態で温度ドリフトした結果センサ出力が-0.07V から 1.38 V まで変化する温度ドリフトを測定した。この状況で浮上していたロータの変位は影響を受けていないことが確認された。また、従来のゼロパワー制御と同様に制御電流が0 A になることを測定し、確認した。

これらの実験により渦電流式変位センサにの温度ドリフトによる外乱は周波数が非常に低い外乱であるため、ゼロパワー制御によってロータ変位への影響を抑えることが可能であると確認できた。

第5章 ゼロパワー制御を用いた温度補償のセルフベアリングモータへの応用

5.1 はじめに

本章では第2章で示した ASBM に対して第4章で示したゼロパワー制御を用いた磁気軸受の温度補償を応用し、ASBM においてゼロパワー制御を用いた温度補償を行う[51]。これにより第2章では液体窒素中と室温中で調整していたパラメータを調整することなく、室温中においても液体窒素中においても同様の設定で装置を浮上させる。

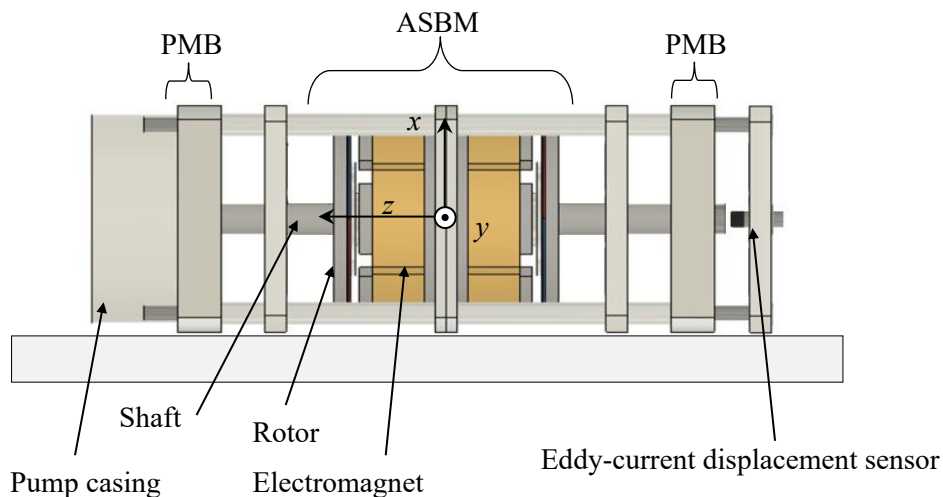


Fig 5.1 Experimental setup consisting of ASBM, PMB and an eddy-current displacement sensor.

5.2 実験装置構成

実験装置の構成を図5.1に示す。実験装置は第3章で示したものと同様に ASBM, PMB, 渦電流式変位センサ, インペラ, ポンプケーシングから構成されている。ASBM は、電磁石と永久磁石を使用しており、ロータの軸方向の支持力と回転トルクを生成する。また、両端に配置された2つの PMB がロータをラジアル方向と傾き方向の変位を受動的に支持する。渦電流式変位センサは、ロータのアキシャル方向の変位を測定する。回転角度と回転速度はホールセンサによって測定される。ロータの軸方向変位は、第4章に示すゼロパワー制御を用いて制御される。

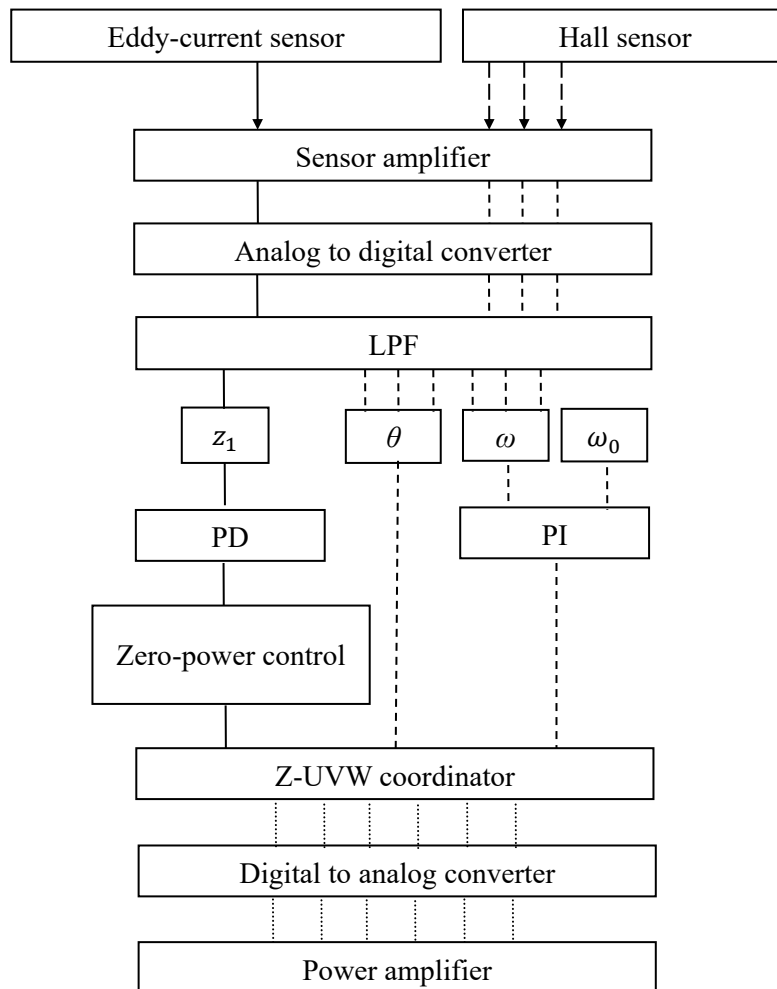


Fig 5.2 Flow diagram of the experimental setup.

実験装置のフロー図を図 5.2 に示す. 実験装置は渦電流変位センサ, ホールセンサ, センサアンプ, アナログ-デジタル変換器, ローパスフィルタ(LPF), ゼロパワーコントローラ, PI コントローラ, Z-UVW コーディネータ, デジタル-アナログ変換機, パワーアンプから構成される. アキシャル方向の変位には第 4 章で示したゼロパワー制御, 回転速度の制御には PI 制御を使用している. 図中の実線はロータのアキシャル方向の変位に関する信号である. 一方で, 点線はロータの回転角や回転速度に関わる信号である. Z-UVW コーディネータでは, それらの信号から得られた出力を加算し, ロータの回転角度に応じて各磁石に出力を配分する. センサアンプからパワーアンプまでの装置は室温で使用する. パワーアンプは図 5.1 に示す ASBM の電磁石に接続されている. 装置のサイズや回転トルクの生成については第 3 章で示した ASBM の設定と同様である.

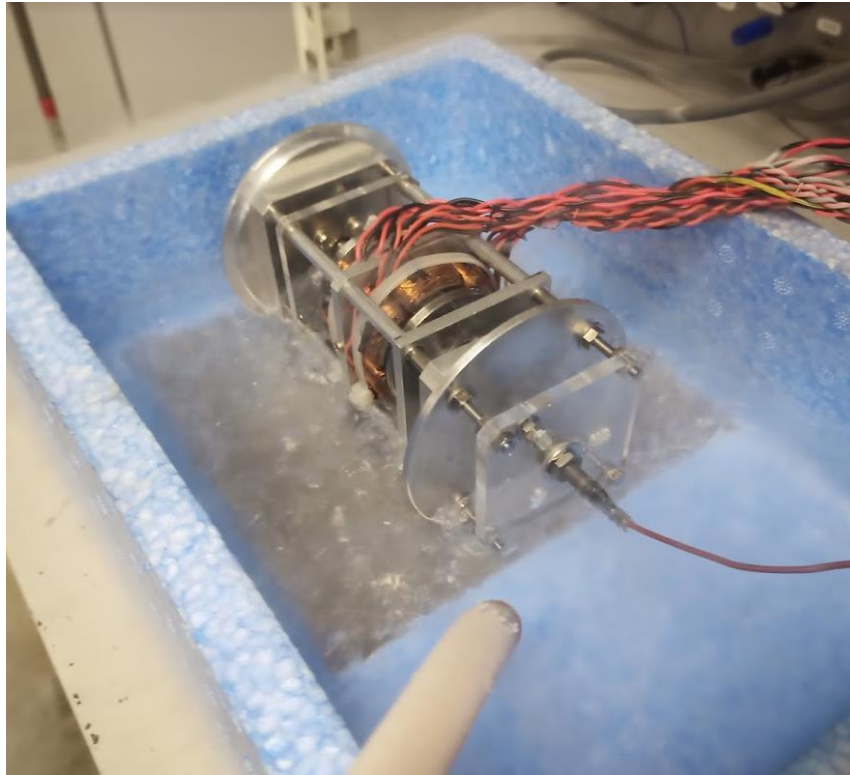


Fig 5.3 Photograph of an ASBM experiment with temperature compensation using zero power control. The PID and PI control parameters of the ASBM are set at room temperature, and the ASBM was floated at room temperature and cooled gradually using liquid nitrogen.

5.3 実験内容

図 5.3 にゼロパワー制御を用いた温度補償を適用した ASBM の実験の写真を示す。ASBM における PID や PI 制御のパラメータは室温中で設定され、室温中において浮上させた状態で液体窒素を用いて徐々に冷却される。この時、ロータはゼロパワー制御によって浮上した状態で冷却される。このため、第 4 章で述べたように渦電流式変位センサには温度ドリフトが発生するがゼロパワー制御によって、浮上した状態を維持する。この状態で液体窒素温度まで浮上し続けたまま冷却し、液体窒素中において ASBM におけるアキシャル方向のインパルス応答、回転速度とアキシャル方向の変位の関係、回転速度と駆動電流・制御電流の関係を測定した。

表 5.1 に本実験で使用した制御のパラメータを示す。ゼロパワー制御における変位フィードバックゲイン p_d は 5.6 A/mm, 速度フィードバックゲイン p_v は 0.0077 A・s/mm, 局所電流積分フィードバックゲイン p_z は 10 A・/(s・mm)と設定される。回転速度制御用 PI コントローラの

比例ゲイン k_p は 1.0×10^{-3} A/ rpm, 積分ゲインは 1.0×10^{-3} A/(rpm · s)に設定される.

Table 5.1 Gains for zero-power control.

p_d	5.6	A/mm
p_v	0.0077	A · s/mm
p_z	10	A ·/(s · mm)
k_p	1.0×10^{-3}	A/ rpm
k_i	1.0×10^{-3}	A/(rpm · s)

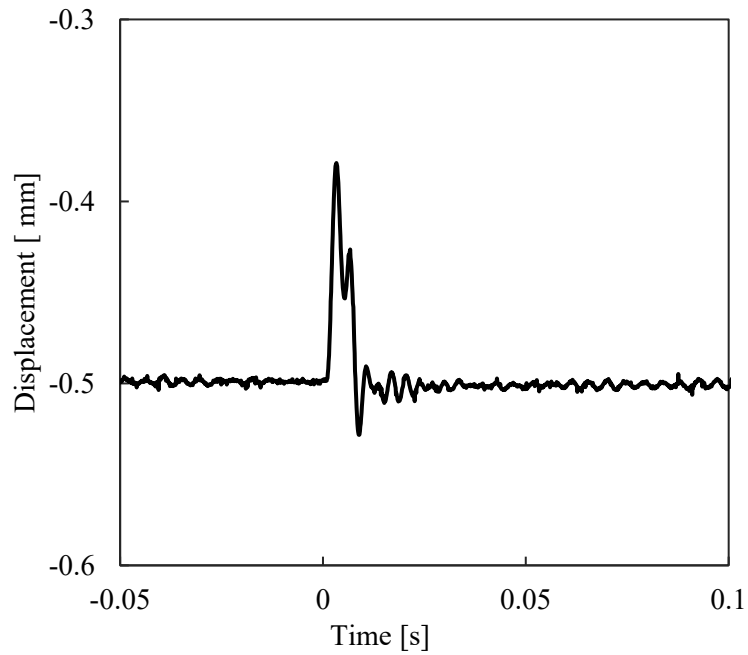


Fig 5.4 Impulse response in the axial direction for ASBM and zero power control. An impulse disturbance force was applied to the rotor at 0 second. The rotor displace 0.11 mm from the force balance position of -0.5 mm by the impulse disturbance.

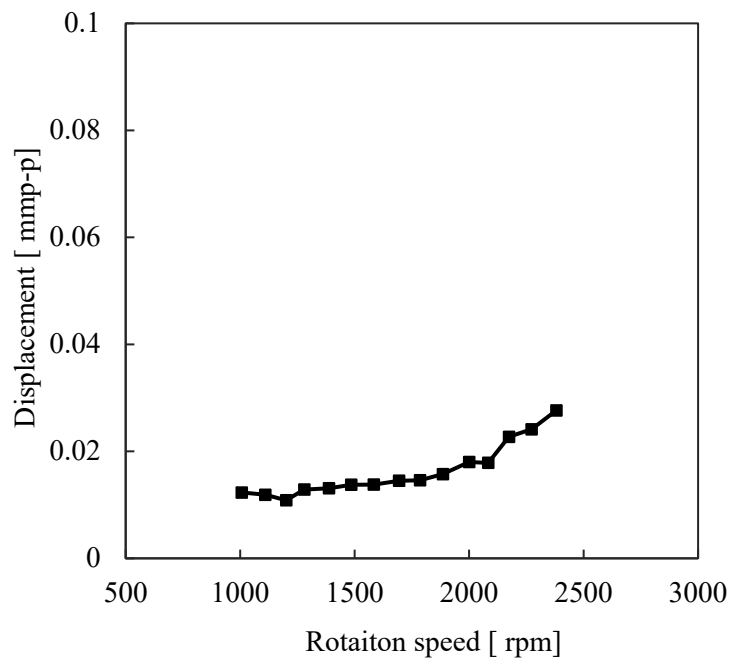


Fig 5.5 Relationship between the rotational speed and the full width of the rotor vibration. The maximum vibration is 0.03 mm_{pp} at 2400 rpm.

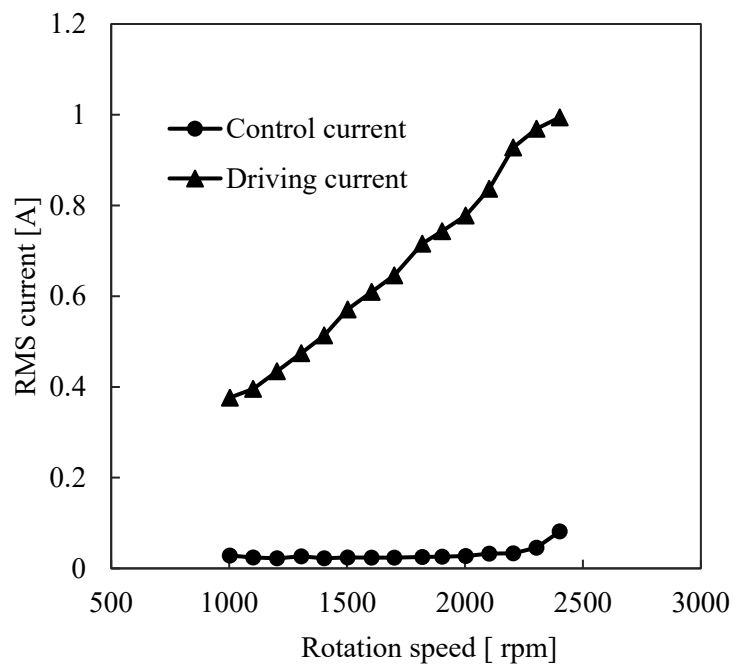


Fig 5.6 Relationship between rotation speed and control and drive currents of ASBM.

5.4 実験結果

液体窒素中におけるアキシャル方向のインパルス応答実験の結果を図 5.4 に示す。インパルスの外乱力は 0 秒時にロータに加えらる。ロータは力のつり合い位置である -0.5 mm から、インパルス外乱により 0.11mm 変位していることが確認できる。インパルスにより発生した振動は、28 ミリ秒で 0 秒時点の位置に収束していることが確認できる。ゼロパワー制御では局所電流積分フィードバックゲイン p_z によって式 4.5 に示した負の剛性があるため、インパルスによって発生した振動はつり合い位置を基準とした対称な波形となっていない。

回転数とロータの振動の全幅との関係を図 5.5 に示す。ASBM と PMB を非接触で支持し、液体窒素中で 1000 rpm から 2400 rpm までの間で回転させ、その時のロータの変位を測定した。ロータの振動の全幅は、1000 rpm で 0.01 mm、2400 rpm で 0.03 mm である。最大の振動は 2400 rpm で 0.03 mm である。回転数が上がるとロータの振動は大きくなるが、ASBM のエアギャップ 2 mm に対して十分小さい変位である。

回転速度と ASBM の制御電流・駆動電流との関係を図 5.6 に示す。この実験は図 5.5 の実験と同様にロータを 1000 rpm から 2400 rpm まで回転させている。その時の電磁石に入力される制御電流と駆動電流の実効値を回転速度毎に算出した。駆動電流は回転数に比例して増加することが確認できる。最小値は 1000 rpm で 0.37A、最大値は 2400 rpm で 0.99A である。一方、制御電流は非常に低く抑えられていることが確認できる。これは、ゼロパワー制御により制御電流の直流成分が相殺されているためである。制御電流の最小値は 1200 rpm で 0.022A、最大値は 2400 rpm で 0.081A である。

5.5 結言

磁気軸受の温度補償としてゼロパワー制御を ASBM 適用した。第 4 章で示したように、渦電流式変位センサの温度ドリフトによる外乱は温度変化が緩やかであることから、ゼロパワー制御によってその誤差を低減することが可能である。これを適用することで室温で設定された ASBM の室温から液体窒素温度への連続した浮上を行った。その後、液体窒素中において、インパルス応答と回転中の変位の測定し、ASBM は液体窒素中でも安定していることが確認された。このことから、ゼロパワー制御により、磁気軸受の渦電流式変位センサの温度ドリフトを低減できることが明らかとなった。

第6章 結論

アキシヤル方向のみを支持し、回転トルクを生成する ASBM を製作し遠心ポンプに応用した。製作されたポンプは液体窒素中において ASBM と PMB がロータを非接触支持し、揚程 1cm で液体窒素の汲み上げ実験を行い毎分 1.3 L の液体窒素の汲上げを確認した。

ゼロパワー制御を応用した磁気軸受の温度補償では伝達関数を用いてセンサ外乱に対するロータ変位の応答を求めた。基礎的な 1 軸制御の磁気軸受を製作し実験を行った。センサへの外乱に対する変位の応答では伝達関数で求めたものと同様に外乱の周波数に比例した変位の結果が得られた。

このゼロパワー制御を製作した ASBM を用いた遠心ポンプに対して適用し、室温中で設定・浮上させた状態の ASBM を液体窒素を用いて室温から液体窒素温度まで冷却した。冷却中も磁気軸受装置と同様に変位センサに対して温度ドリフトが発生したが、セルフベアリングモータは浮上した状態を維持した。この状態で液体窒素中においてインパルス応答実験と回転実験を行い、その時の変位と電流を測定した。結果は安定的に浮上と回転をしており、2400 rpm まで回転を確認した。

以上の結果より、ASBM の液体窒素中における駆動とポンプ応用、ゼロパワー制御におけるセンサへの外乱に対する変位の応答、磁気軸受と ASBM に対してゼロパワー制御を適用した場合の温度ドリフトへの有効性が明らかとなった。

参考文献

- [1] Agency for Natural Resources and Energy: Japan's energy 20 Questions to understand the current energy situation (online), available from <https://www.enecho.meti.go.jp/en/category/brochures/pdf/japan_energy_2016.pdf>, (accessed on 30 September, 2019).
- [2] 松村 正夫, LNG ポンプと LNG エキスパンダタービン, エバラ時報 No. 213 (2006), pp. 15-22.
- [3] Y. Okada, H. Suzuki, K.-I. Matsuda, R. Kondo and M. Enokizono, Development of Highly Efficient Magnetic Bearing and Application to Ultra-Low Temperature Fluid Pump, Mechanical Engineering Journal, Vol. 2, No. 4 (2015), DOI: 10.1299/mej.15-00086.
- [4] M. Komori, K. Watanabe, H. Kato, K. Asami and N. Sakai, Basic study on active magnetic bearing working in liquid nitrogen and its application to cryogenic pump, Mechanical Engineering Journal, Vol. 4, No. 5 (2017), pp. 1 - 9.
- [5] M. Komori, K. Watanabe, H. Kato, K. Asami and N. Sakai, Basic study on active magnetic bearing working in liquid nitrogen and its application to cryogenic pump, Mechanical Engineering Journal, Vol. 4, Issue 5 (2017), DOI: 10.1299/mej.16-00723.
- [6] Y. Okada, et al., Foundations and applications of magnetic bearings, Youkendo (1995), p. 176 (in Japanese).
- [7] S. Ueno and Y. Okada, Characteristics of Axial Force and Rotating Torque and Their Control of Permanent Magnet Type Axial Gap Self-Bearing Motor, Electrical Engineering in Japan, Vol. 132, No. 1 (2000), pp. 81-91.
- [8] X. Sun, L. Chen and Z. Yang, Overview of bearingless permanent magnet synchronous motors, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, Issue 12 (2013), pp. 5528–5538, DOI: 10.1109/TIE.2012.2232253.
- [9] Y. Sun, J. Tang and K. Shi, Design of a Bearingless Outer Rotor Induction Motor, Energies, Vol. 10, Issue 5 (2017), DOI:10.3390/en10050705.
- [10] T. Wellerdieck, T. Nussbaumer and J. W. Kolar, Experimental verification of an angle-sensorless control scheme for bearingless permanent magnet machines, Mechanical Engineering Journal, Vol. 4, No. 5 (2017), DOI: 10.1299/mej.17-00003.

- [11] 松村 憲明, 溝口 正信, 町田 博, 中原 崇文, 渦電流式変位センサの温度ドリフト低減法, 電気学会論文誌A(基礎・材料・共通部門誌), Vol. 126, No.3 (2006), pp. 169-177, DOI: 10.1541/ieejfms.126.169.
- [12] P. Wang, Z.B. Fu and T.H. Ding, A frameless eddy current sensor for cryogenic displacement measurement, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 159, Issue 1, 2010, pp. 7-11.
- [13] 品川 宏樹, 志村 祐介, 出口 見多, 榎木 茂実, 水野 勉, クロモモリブデン鋼を測定対象とする渦電流形変位センサの温度特性解析, 電気学会論文誌A, Vol. 130, No. 9 (2010), pp. 818-824.
- [14] T. Takahiko and Y. Kazuhiro, Improvement of the Angular-dependent Noise in a Magnetostriction Type Torque Sensor, *International Journal of Automotive Engineering*, Vol. 2, No. 3 (2011), pp. 75-80.
- [15] 夏川 亨介, 目野 豊, 蜂須賀 義文, 松井 繁之, 全方位測定傾斜計の開発, Vol. 2001, No. 693 (2001), pp. 219-230.
- [16] 山下 知久, 小方 正文, 長嶋 賢, 超電導磁気軸受を用いた超電導フライホイール蓄電, 日本 AEM 学会誌, Vol. 24, No. 4 (2016), pp. 293-298, DOI: 10.14243/jsaem.24.293.
- [17] D. Yamaguchi, T. Kanda and K. Suzumori, Bolt-Clamped Langevin-Type Transducer for Ultrasonic Motor used at Ultralow Temperature, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, Vol. 6, No. 1 (2012), pp. 104-112, DIO:10.1299/jamdsm.6.104.
- [18] 小沼 弘幸, セルフベアリングモータの人工心臓への応用, 日本 AEM 学会誌, Vol. 27, No. 3 (2019), pp. 286-291.
- [19] H. Onuma, T. Masuzawa and M. Murakami, Development of a small magnetic levitated centrifugal blood pump using a radial type self-bearing motor and axial position change of rotor-impeller by rotational magnetic field, *Mechanical Engineering Journal*, Vol.4, No.5 (2017), DOI: 10.1299/mej.17-00066.
- [20] 杉元 紘也, 田中 誠祐, 千葉 明, 小型 1 軸制御シングルドライブベアリングレスモータの構造と原理, 日本 AEM 学会誌, Vol. 23, No. 1 (2015), pp. 48-54, DIO:10.14243/jsaem.23.48

- [21] H. Sugimoto, I. Shimura and A. Chiba, Principle and Test Results of Energy-Saving Effect of a Single-Drive Bearingless Motor in Cooling Fan Applications, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 6, No. 6 (2017), pp. 456-462.
- [22] H. Kato, M. Komori, K. Asami and N. Sakai, Development of one-axis active controlled bearingless motor working at extremely low temperature, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 64, No. 1, pp. 1 - 8.
- [23] 栗田 伸幸, 石川 赴夫, 手塚 孝幸, 高田 敬夢, 5 自由度能動制御型磁気浮上モータに関する研究, 日本機械学会論文集, Vol. 76, No. 801 (2013), pp.249-236.
- [24] M. Osa, T. Masuzawa, T. Saito and E. Tatsumi, Magnetic levitation performance of miniaturized magnetically levitated motor with 5-DOF active control, Mechanical Engineering Journal, Vol. 4, No. 5 (2017), pp. 1-10.
- [25] N. Kurita, T. Ishikawa, H. Takada and G. Suzuki, Proposal of a Permanent Magnet Hybrid-type Axial Magnetically Levitated Motor, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol.4, No. 4 (2015), pp. 339-345.
- [26] J. Asama, Y. Fujii, T. Oiwa and A. Chiba, Novel control method for magnetic suspension and motor drive with one three-phase voltage source inverter using zero-phase current, Mechanical Engineering Journal, Vol. 2, No. 4 (2015), pp. 1-10.
- [27] 横山 正太郎, 杉元 紘也, 千葉 明, 薄型高トルク密度 1 軸制御シングルドライブベアリングレスモータの解析及び設計, 日本 AEM 学会誌, Vol. 26, No. 1 (2018), pp.205-211.
- [28] 上野 哲, 金箱 秀樹, 山根 隆志, 岡田 養二, 永久磁石反発型磁気軸受を用いたアキシナル磁気浮上モータの開発, 日本機械学会 Dynamic and Design Conference 2000 講演論文集.
- [29] N. Kurita, T. Ishikawa and G. Suzuki, Proposal of a magnetically levitated shaded pole induction motor, Mechanical Engineering Journal, Vol.2, No.6 (2015), pp. 1-9.
- [30] A. Matsuoka, M. Sumino, S. Ueno and T. Takeda, Development of a high-speed motor at extremely low temperatures with an axial self-bearing motor and a superconducting magnetic bearing, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 45, Issue 1 (2014), pp.859-865.
- [31] 夏目 龍一, 朝間 淳一, 大岩 孝彰, 千葉 明, ホモポーラ形ベアリングレスモータの磁気支持特性評価, 精密工学会学術講演会講演論文集,

- [32] M. Noh, W. Gruber and D. L. Trumper, Homopolar-biased Hysteresis Bearingless Slice Motors, Proceedings of the 15th International Symposium on Magnetic Bearings (ISMB15), pp. 454-458.
- [33] R. Schoeb, N. Barletta, Principle and Application of a Bearingless Slice Motor, JSME International Journal Series C Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing, Vol. 40, No. 4 (1997), pp. 593-598.
- [34] 大島 政英, 宮澤 悟, 泥堂 多積, 千葉 明, 中村 福三, 深尾 正, 永久磁石型ベアリングレスモータの解析と基礎特性, 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), Vol. 115, No. 9 (1995), pp. 1131-1139.
- [35] 大石 哲男, 出島 一直, 岡田 養二, 磁気浮上回転モータの研究, Vol. 58, No.556 (1992), pp. 241-246.
- [36] 渡邊 亮, 上野 哲, 姜 長安, コイル集中巻ステータを二つ用いたアキシヤルセルフベアリングモータのアキシヤル力と回転トルクの制御, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 865 (2018), pp. 1-13.
- [37] S. Ueno, R. Iseki and C. Jiang, Stability of a tilt-controlling axial gap self-bearing motor with single-stator, Mechanical Engineering Journal, Vol. 4, No. 4 (2017), pp. 1-12.
- [38] 住野 正幸, 上野 哲, アキシヤル型セルフベアリングモータの傾き角制御, 日本機械学会論文集, Vol. 80, No. 815 (2014), pp.1-14.
- [39] 上野 哲, 岡田 養二, 永久磁石アキシヤル型セルフベアリングモータのアキシヤル方向力とトルク特性およびその制御, 電気学会論文誌D(産業応用部門誌), Vol. 119, No. 3, pp. 282-290.
- [40] H. Kato, M. Komori, K. Asami and N. Sakai, Development of one-axis controlled bearingless motor and its application to a centrifugal pump for extremely low temperature, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 64, No. 1, pp. 1 - 8.
- [41] R. Jun, W. Hijikata and T. Shinhi, A bearingless motor utilizing a permanent magnet free structure for disposable centrifugal blood pumps, Vol. 9, No. 3 (2015), pp. 1-16, DOI:jamdsm.2015jamdsm0046.
- [42] 松崎 達也, 土方 規実雄, 宮本 和弥, 竹本 真紹, 小笠原 悟司, 平櫛 真, 5 軸能動制御形ベアリングレスキャンドモータポンプにおける高出力化のための新構造を備えた試作機による特性試験, 日本 AEM 学会誌, Vol. 21, No. 2 (2013), pp. 196-202, DOI: 10.14243/jsaem.21.196.

- [43] H. Kato, M. Komori, K. Asami and N. Sakai, Development of Magnetic Bearing Considering Temperature Drift on Displacement Sensor at Low Temperature, Proceedings of the 15th International Conference on Motion and Vibration Control (MoViC2020), pp. 1 - 4.
- [44] T. Mizuno and Y. Takemori, A Transfer-Function Approach to the Analysis and Design of Zero Power Controllers for Magnetic Suspension System, IEEJ Journal of Industry Applications, Vol. 121, No. 9 (2001) , pp. 933-940.
- [45] J. Liu and T. Koseki, 3 Degrees of Freedom Control of Semi-Zero-Power Magnetic Levitation Suitable for Two-Dimensional Linear Motor, Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS'2001), pp. 108-113."
- [46] M. Caple, E. Maslen, J. Nagel and J. Wild, Control of an AMB to zero static force, Mechanical Engineering Journal, Vol. 4, No. 5 (2015), pp. 1-10.
- [47] F. Sun and K. Oka, Zero Power Non-Contact Suspension System with Permanent Magnet Motion Feedback, Journal of System Design and Dynamics, Vol. 3, No. 4 (2009), pp. 627-638.
- [48] E. Hoque, T. Mizuno, M. Takasaki and Y. Ishino, A Nonlinear Compensator of Zero-Power Magnetic Suspension for Zero-Compliance to Direct Disturbance, 計測自動制御学会論文 文集, Vol. 42, No.9 (2006), pp. 1008-1016.
- [49] 森下 明平, 小豆沢 照男, 常電導吸引式磁気浮上系のゼロパワー制御, 1988 年 Vol. 108, No. 5 (1988), pp. 447-454, DOI:10.1541/ieejias.108.447.
- [50] 小豆澤 照男, 磁気浮上を利用した搬送技術, 精密工学会誌, Vol. 63, No. 7 (1997), pp. 938-942, DOI: 10.2493/jjspe.63.938.
- [51] H. Kato, M. Komori, K. Asami and N. Sakai, Development of Fluid Pump Using 1-DOF Control Self-Bearing Motor for High-Speed Rotation in Liquid Nitrogen, Proceedings of the 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS2020), pp. 1-4.

謝辞

本研究を遂行するにあたって九州工業大学 電気電子工学研究系(先端機能システム工学研究系) 小森 望充 教授には研究活動のみならず多大なるご指導を賜りました。心より感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、本学 電気電子工学研究系 和泉 亮 教授, 本学 基礎科学研究系 浅海 賢一 教授, 本学 機械知能工学研究系 坂井 伸朗 准教授, 本学 電気電子工学研究系 小迫 雅裕 准教授に細部に渡るご指導, ご叱正をいただきました。ここに紙面を借りて深く感謝申し上げます。

また、長期にわたる大学での生活を暖かく見守っていただき、金銭面でも支えてくださった家族に深く感謝申し上げます。

最後に、本学の諸先生、職員の皆様ならびに小森・坂井研究室の諸氏に感謝申し上げます。