

修士論文

人工心臓への適用を目的とした  
ダブルステータ型磁気浮上ポンプ  
の開発

群馬大学 工学部 電気電子工学科

計測制御エネルギー 第一研究室

指導教員 石川 赴夫 教授

栗田 伸幸 准教

15804035 齊藤 直希

## 目次

第一章 序論.....	3
1.1 研究背景.....	3
1.2 研究目的.....	8
第2章 左心室補助人工心臓用磁気浮上ポンプの開発.....	9
2.1 巻線一括型磁気浮上ポンプ.....	9
2.1.1 磁気浮上ポンプの構成.....	9
2.1.2 動作原理.....	14
2.1.3 実験装置.....	22
2.2 巻線分割型磁気浮上ポンプ.....	32
2.2.1 磁気浮上ポンプの構成.....	32
2.1.2 動作原理.....	36
2.2.3 実験装置.....	44
2.3 実験結果.....	48
2.3.1 浮上特性.....	48
2.3.2 振動振幅特性.....	56
2.3.3 ポンプ特性.....	61
2.3.4 考察.....	64
第3章 両心室補助人工心臓用磁気浮上ポンプの開発.....	65
3.1 磁気浮上ポンプの構成.....	65
3.2 実験装置.....	73
3.3 実験結果.....	77
3.3.1 浮上特性.....	77
3.3.2 振動振幅特性.....	80
3.3.3 ポンプ特性.....	85
3.3.4 考察.....	87
第4章 結論.....	88
4.1 まとめ.....	88
4.2 今後の展望.....	88
謝辞.....	89
参考文献.....	89

# 第一章 序論

## 1.1 研究背景

現在、心疾患は日本における三大死因の一つである。平成27年において死亡総数の15.2%を占め、約20万人もの人が心疾患で死亡している(図1.1参照)。そこで、重度の心疾患患者への最も有効な救命措置として心臓移植が挙げられる。

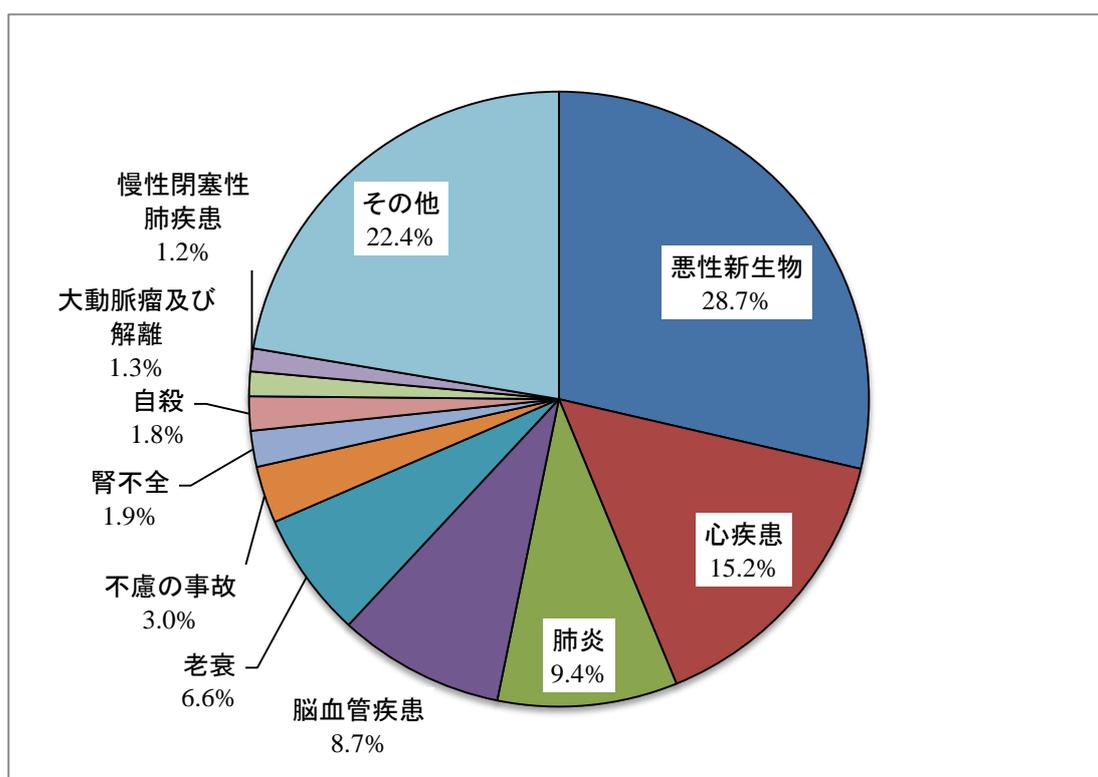


図1.1：死因別死亡数の割合[平成25年]  
(厚生労働省HPより)

1987年、南アフリカにて世界初の心臓移植が実施された。現在では、世界中で年間3500例近く実施されている。日本国内では、1997年に臓器移植法が改正され、延べ121例の移植が行われた(2012年1月)。しかしながら、圧倒的にドナー数が不足しており、深刻な問題となっている(2015臓器移植ファストブックより)。そこで、この問題に対応すべく人工心臓の開発が広く行われている。人工心臓には、心臓を切除して埋め込まれる「全置換型人工心臓(TAH: Total Artificial Heart)」と、心臓の機能の一部を補う「補助人工心臓(VAD: Ventricular Assist Device)」の2種類が存在する。この時左心室に障害が起こることが最も多いため、現在では左心室補助人工心臓の研究開発が主流であり、数多くの開発プロジ

ェクトが存在する。

人工心臓の研究は約 50 年の歴史を持っており、その間に数々の技術的な発展段階を経てきた。初期の補助人工心臓は主にダイアフラムと弁によって構成された脈動式ポンプであった。しかし、接触要素のためにデバイスの耐用年数は 3 年以下と低いものとなった。また、脈動流式ポンプは一定量の容積を必要とするため、装置全体の小型化に不向きであった。そこで、連続流式を採用した補助人工心臓が新たに登場し、現在の補助人工心臓の原型となった。連続流式ポンプは、脈動式ポンプに対し機械的な信頼性が高く、また小型化に適している。しかし、依然として接触型軸受を用いていたため、耐用年数は制限されるものとなった。そこで、現世代の補助人工心臓は磁気軸受や流体軸受を用いてロータを非接触支持し、接触軸受を排除した。これにより、装置の耐用年数は 10 年以上と飛躍的に向上することとなった。そのため、長期的な体内への埋込みが可能となり、体内埋込型の補助人工心臓の開発が広く行われるようになった。しかしながら、それらの補助人工心臓は 1 つのデバイスにおいて 1 組のインレット・アウトレットを有した、一方の心室補助のみを目的とした設計がなされている。しかし、一方の心室に疾患を抱えている患者の約 20%が、後に健全であったもう一方の心室にも障害を来すというデータがある。<sup>11)</sup>これらのデバイスで両心室補助を行う場合、2 つのデバイスを体内に埋め込む必要があり、消費電力の増加、デバイスの設置容積の増加、また手術回数の増加といった様々な問題が生じてしまうため十分とは言えない状況である。そのため、一つのデバイスで両心室を補助可能な人工心臓の開発が求められている。

一般的な電磁モータは、ロータ(回転子)とステータ(固定子)間に発生する磁気エネルギーを機械エネルギーへと変換するアクチュエータであり、工作機械、ロボット、ターボ分子ポンプ、フライホイール等、多くの産業分野で使用されている。従来型のモータの概略図を図 1.2 に示す。従来型のモータでは、ロータの軸受に転がり軸受やすべり軸受など、接触型の軸受が使用されている。これらの接触型の軸受では、物理的接触による摩擦によって、回転損失が生じることによる高速回転への妨げや、摩耗による粉塵の発生などが問題となっている。この問題解決のため、現在では静圧軸受や磁気軸受といった非接触型の軸受が開発された。この中でも、磁気軸受は磁気力によってロータを非接触で支持できるため、より高速な回転が可能となる。また、摩耗が発生しないことや、潤滑油を使用しないことにより、血液中・高温・低温・真空中・クリーンルーム内などの特殊な環境下での使用が可能であり、様々な分野への応用が試みられている。しかし、磁気軸受を用いることにより、図 1.3 のように回転軸以外の 5 自由度すべてを能動的に支持する場合、装置が大型化してしまうといった欠点がある。そこで、小型化を目的として、磁気軸受と電磁モータを一体化したベアリングレスモータが開発された。軸方向変位の制御と回転トルクの発生を同時に行うことのできるアキシアルベアリングレスモータ(概略図を図 1.4 に示す)、径方向変位の制御と回転トルクの発生を同時に行うことのできるラジアルベアリングレスモータ(概

略図を図 1.5 に示す)の 2 種類がある。今回は、1 自由度の能動制御と回転トルクの発生を行うことのできるアキシヤルベアリングレスモータに着目した。

ここで、アキシヤルベアリングレスモータとラジアルベアリングレスモータを用いた磁気浮上モータについて説明する。アキシヤルベアリングレスモータはロータの回転軸方向にステータを配置し、軸方向変位の制御と回転トルクの発生を能動制御するモータとなっている。径方向変位および径方向の傾きに関しては受動制御している。しかし、このモータは径方向の傾きを受動制御するために、ロータを細くする必要がある。ロータを細くした場合、装置の大きさに比べて永久磁石を貼りつけるスペースが小さいため、ロータ表面の磁束密度が小さくなってしまい、大きな回転トルクを発生させることができないため、小型化と高速回転を両立できないといった欠点が挙げられる。また、ラジアルベアリングレスモータはロータの径方向にステータを配置し、径方向変位の制御と回転トルクの発生を能動制御するモータとなっている。軸方向変位および軸方向の傾きを受動制御している。しかし、このモータは軸方向の傾きを受動制御するために、ロータを扁平な形にする必要がある。ロータを扁平にした場合、装置の大きさに比べて永久磁石を貼りつけるスペースが小さいため、ロータ表面の磁束密度が小さくなってしまい、大きな回転トルクを発生させることができないため、小型化と高速回転を両立できないといった欠点が挙げられる。

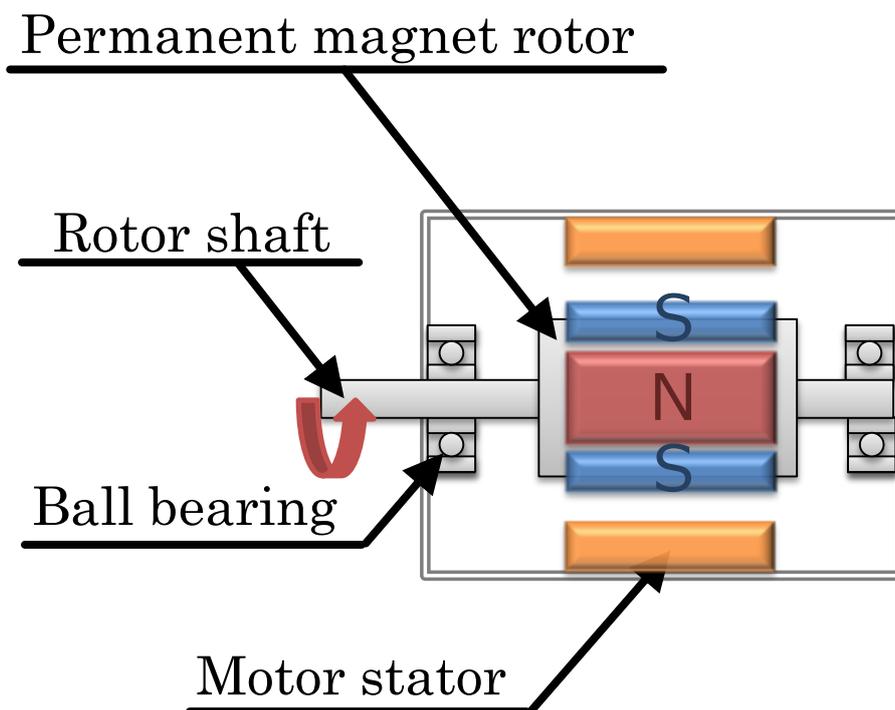


図 1.2：一般的なモータ

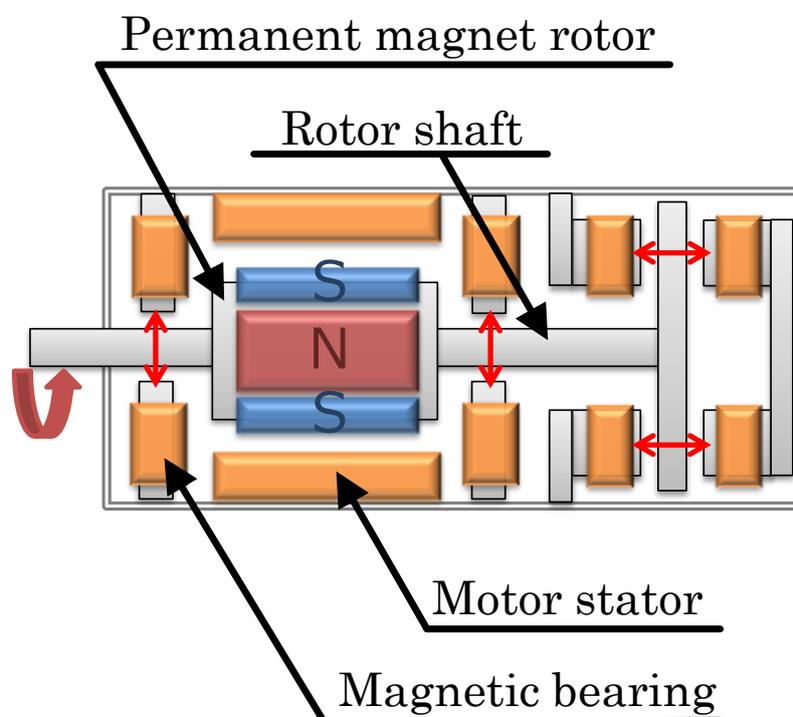


図 1.3：5軸能動制御型磁気浮上モータ

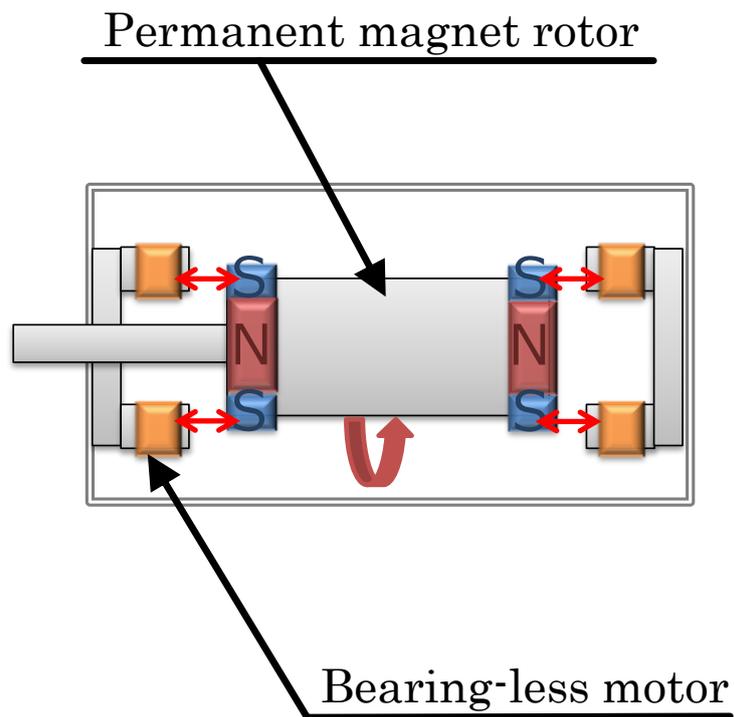


図 1.4: アキシアルベアリングレスモータ

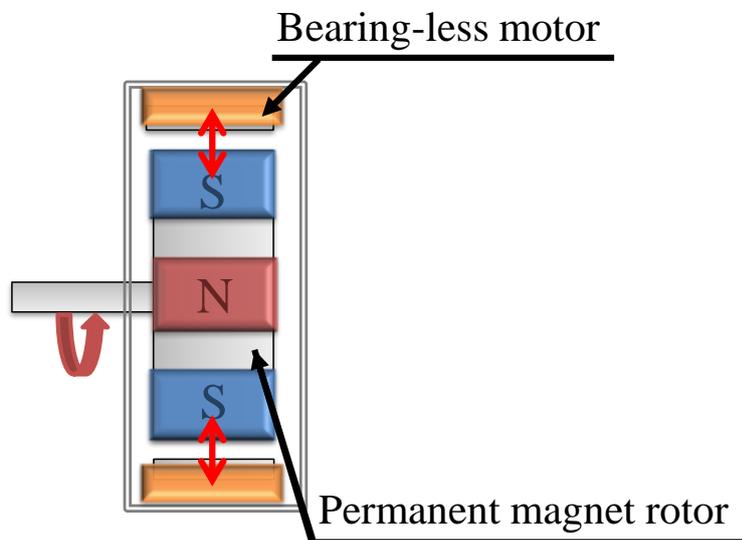


図 1.5: ラジアルベアリングレスモータ

## 1.2 研究目的

磁気浮上モータは磁気軸受によって回転体であるロータを非接触支持することによって機械式ベアリングを用いた血液ポンプの問題点であった軸受の摩耗・せん断力・滞留を防ぐことができる。そのため、磁気浮上モータを血液ポンプとして用いることにより高耐久性・低溶血・低血栓といった利点を有する。

本研究では、両心室補助を可能とする補助人工心臓に用いるデバイスとして、アキシヤルベアリングレスモータを用いた一つのデバイスで二組のインレットとアウトレットを有する磁気浮上ポンプの開発を目的とする。アキシヤルベアリングレスモータに扁平なロータを用いた場合、受動制御により安定していた径方向変位と径方向の傾きに関して、径方向変位は同様に受動制御できるが、径方向の傾きは受動制御のみでは不十分になってしまう。そこで、ロータの径方向の傾きを能動的に制御できる機能をアキシヤルセルフベアリングレスモータに適用したことで、扁平なロータを採用することが可能になった。そのため、小型化を実現するためにアキシヤルベアリングレスモータを採用し、インペラを内蔵したロータは永久磁石のスペースを広くすることで高いトルクを発生させることが可能な扁平なロータを用いる。また、ステータ 2 つでロータを挟むように配置することで、軸方向支持力とトルクを増加させることができる。また、ロータの上下にインペラを配置することによって一つのアクチュエータで二つの水流を発生させ、両心室を補助することが可能である。この時の磁気浮上モータの概念図を図 1.6 に示す。

本論文では、提案する磁気浮上モータを用いて磁気浮上ポンプを製作し、浮上特性及びポンプ特性を確認したので報告する。

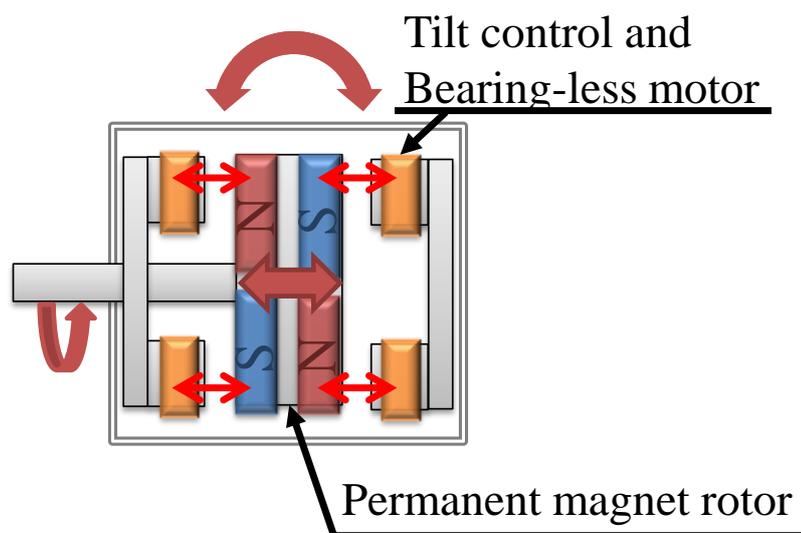


図 1.6：提案する磁気浮上モータ

## 第2章 左心室補助人工心臓用磁気浮上ポンプの開発

### 2.1 巻線一括型磁気浮上ポンプ

#### 2.1.1 磁気浮上ポンプの構成

- ・磁気浮上モータの構成

提案する巻き線一括型磁気浮上モータの全体の構成を図 2.1 に示す。全体の構造としては、ディスク状のロータが中心に位置しており、ロータを挟み込むように同構造のステータが2つ上下に配置される。ロータは、上部ステータおよび下部ステータにより発生するアキシヤル方向吸引力を釣り合わせることで支持される。ロータの軸方向位置、回転および径方向軸まわりの傾きを能動的に制御し、径方向位置は軸方向吸引力によって発生する受動安定性により受動的に支持する構造としている。ダブルステータ型の構造とすることで、小型ながらも高い制御性能と回転トルクを得ることができるモータとなっている。

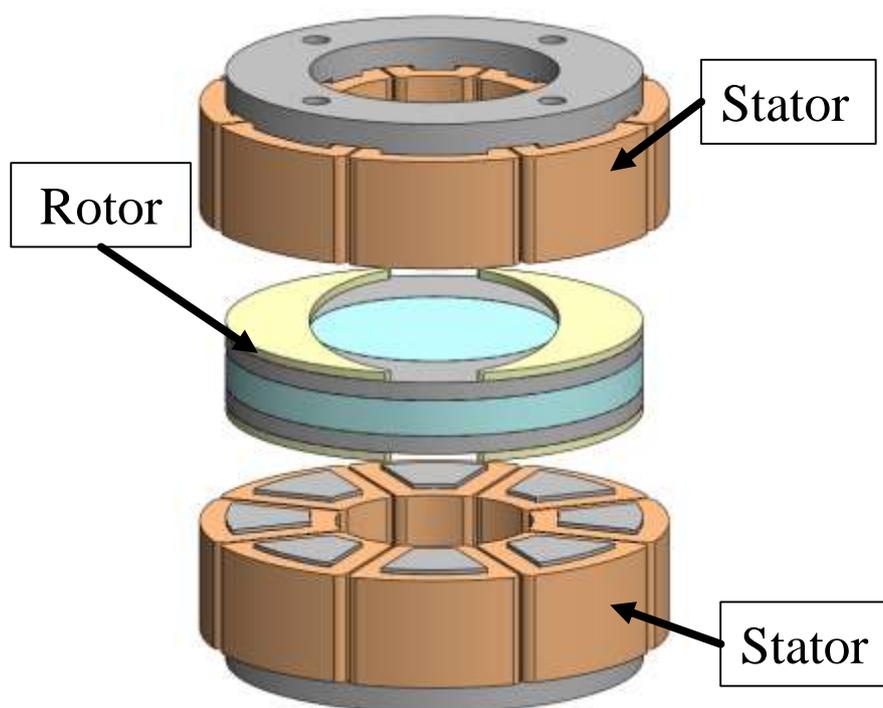


図 2.1 磁気浮上モータ構成

## ・ロータの構成

図 2.2 にアキシヤル磁気浮上モータ用に設計したロータのモデルを示す。図の左がロータ上部であり、右はロータ下部である。ロータの回転によって流体がインレットから入りアウトレットから出るように、ロータに内蔵されるインペラ形状の設計を行った。今回製作した遠心ポンプは側板を持つクローズドインペラを採用した。

上部の外側にはセンサターゲットが取り付けられる用に設計し、下部の外側にはエンコーダ用の永久磁石が計 50 個取り付けられるように設計を行った。また、上下ともに内側には極対数が 1 となるように永久磁石が 2 枚ずつ配置されている。これら永久磁石は、ロータの円周上に正弦波状の磁束を生じさせるために三日月型の形状とした。エンコーダ検出用の永久磁石の規格は直径 3.0mm 厚さ 1.0mm なので取り付けのために 3D で製作した際の誤差を考えて、直径 3.3mm 深さ 1.3mm の穴を開けている。インペラのブレードの高さは 3.0mm とした。

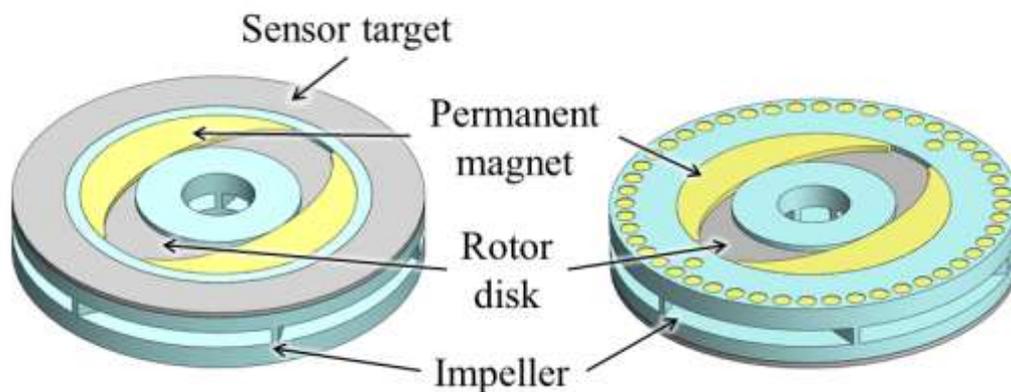


図 2.2 ロータ完成図(左：ロータ上部，右：ロータ下部)

## ・ステータの構成

図 2.3 に巻き線一括型アキシヤル磁気浮上モータ用に設計したステータのモデルを示し、図 2.4 にコイルの配線図を示す。ステータコアは 8 個の突極を有しており、それぞれに浮上回転制御及び傾き制御を行うために集中巻き線を施す。ステータコアの高さは 16 mm であり、径は  $\phi 45$  mm である。ステータ突極に施したコイルはそれぞれ異なるリニアアンプに接続する。そのため、上下ステータにおいて計 16 個のリニアアンプを必要とする。

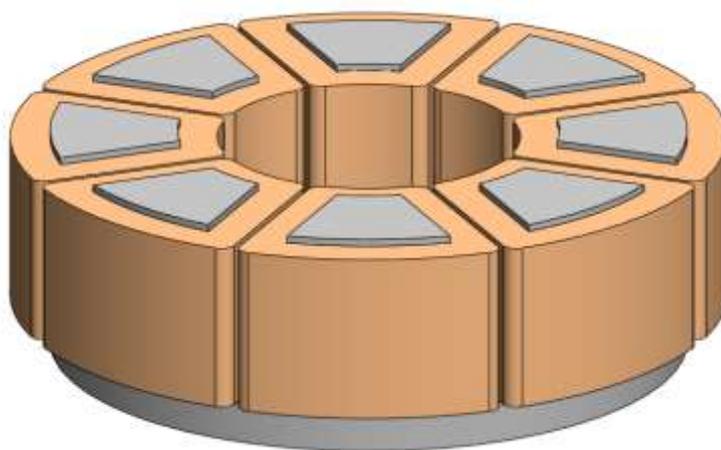


図 2.3 巻き線一括型磁気浮上モータ用ステータモデル

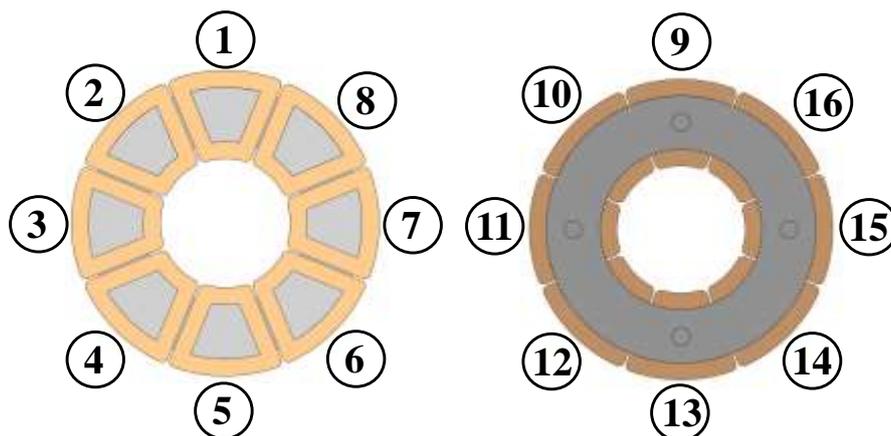


図 2.4 巻き線一括型磁気浮上モータ用ステータ配線図

## ・ポンプケーシングの構成

設計したポンプケーシングの説明をする。図 2.5, 図 2.6 は設計したポンプケーシングである。ケーシング内部でインペラを内蔵したロータが回転することでインレットからアウトレットへ水が流れる仕組みになっている。図 2.5 はケーシングの上部であり, 図 2.6 はケーシングの下部である。ポンプ上部にはインレットとアウトレットがあり, 変位センサが収まる空間も設けられている。さらにケーシング上部には下部と合わせた際に水漏れを防ぐための O-リング用の溝が設けてある。今回製作するポンプの規格としては直径 100 mm, 厚さ 16 mm とする。

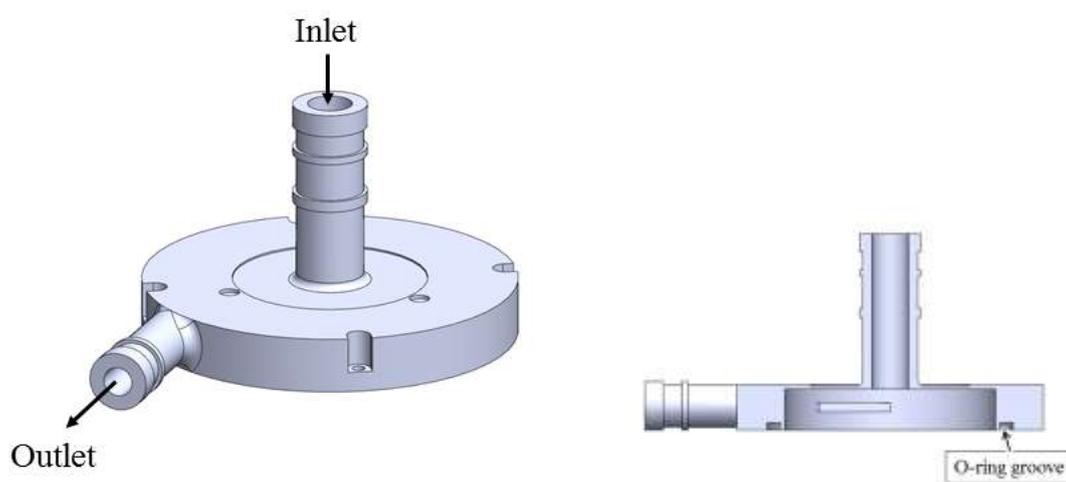


図 2.5 ポンプケーシング上部モデル(左:全体, 右:断面図)

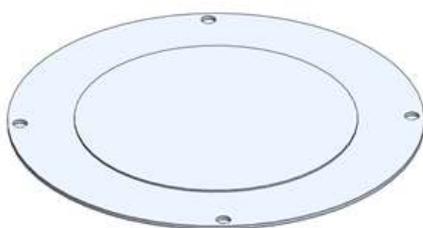


図 2.6 ポンプケーシング下部モデル

## ・磁気浮上ポンプの構成

本磁気浮上ポンプの3次元CADシステムを用いて設計した図を図2.7、断面図を図2.8に示す。図2.7のようにケーシングを上下二つのステータで挟み込むようにホルダーに固定している。それぞれがアキシヤルベアリングレスモータとして機能することで、アキシヤル方向変位とロータ傾きを支持しながらケーシング内のロータが回転する。

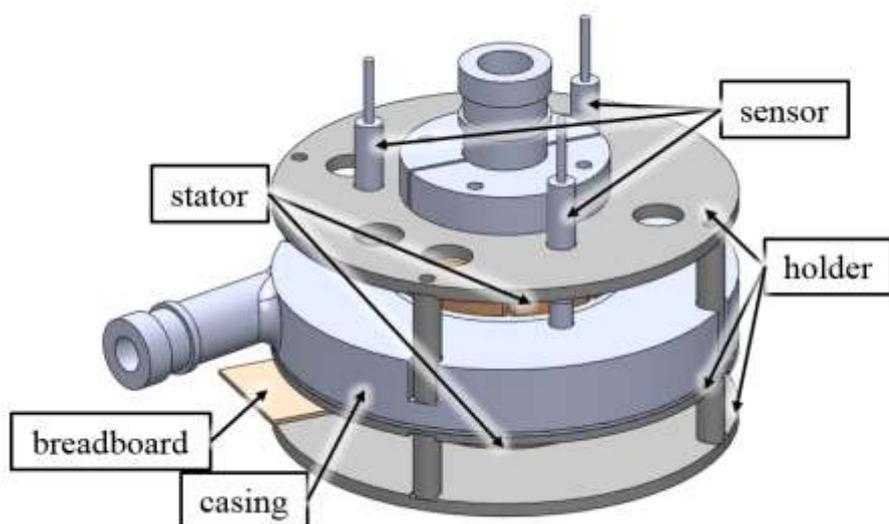


図2.7 磁気浮上ポンプモデル

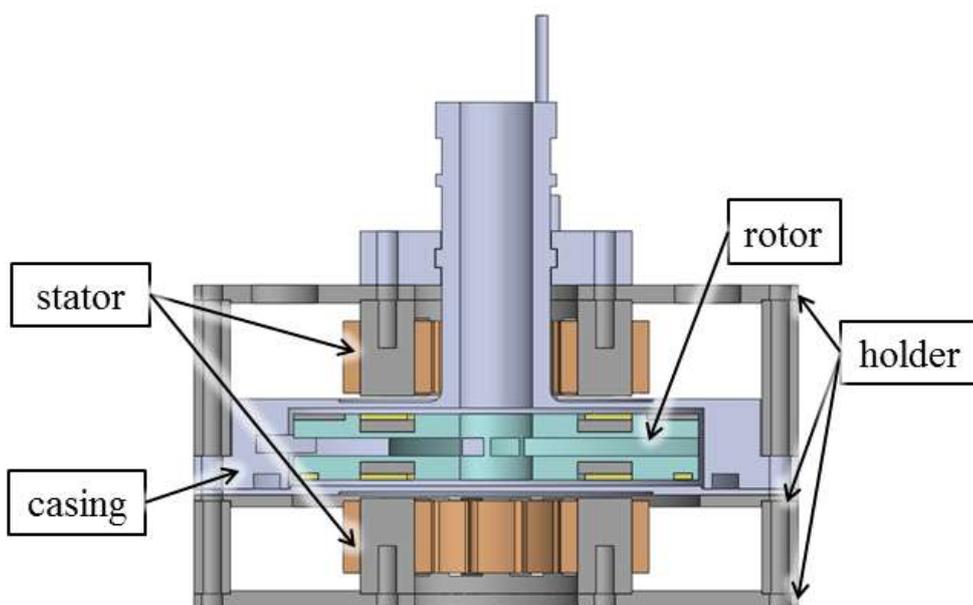


図2.8 磁気浮上ポンプ断面図

## 2.1.2 動作原理

図 2.9 ロータ永久磁石とステータの概略図と座標系を示す。動作原理の説明図は下部ステータと、ロータ下部永久磁石の位置関係を示しており、N は N 極, S は S 極に磁化されていることを示す。まず, ロータ永久磁石によりエアギャップに発生する磁束密度は次式となる。

$$b_{ru}(\theta, t) = B_R \cos(\omega t - M\theta)$$

$B_R$  : ロータ PM の磁束密度の波高値

$\omega t$  : ロータの回転変位

$M$  : ロータの極対数

$\theta$  : 角度座標

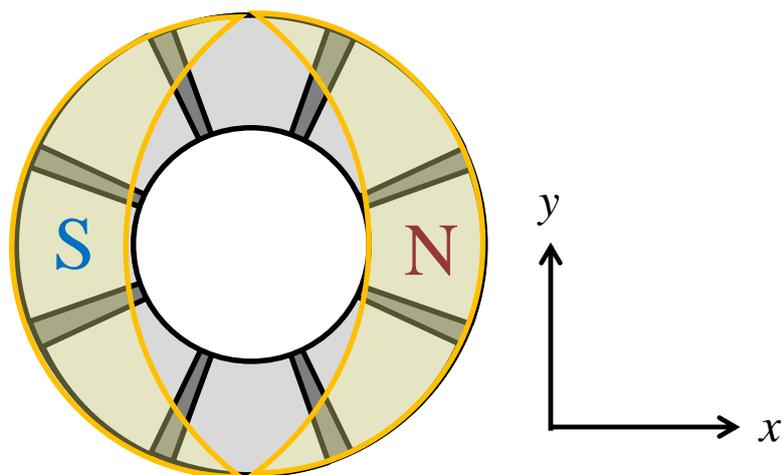


図 2.9 永久磁石の磁極及び座標系

・ 回転制御

回転制御を行う場合は上下のステータによりロータ永久磁石の磁極に対して位相を  $\varphi$  ずらした 2 極の回転磁界を発生させればよい。図 2.10 においては、最大の回転トルクが発生するときである  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  のときを示している。このように制御電流を発生させることによって、永久磁石同期モータと同様の動作原理によって回転トルクを与えることができる。上部ステータに発生させる磁束密度は次式によって表すことができる。

$$b_{st}(\theta, t) = -B_S \cos(\omega t - M\theta - \psi)$$

$B_R$  : 上部ステータコイルの電流により生じる磁束密度の最大値

$\psi$  : ロータ・ステータ間に生じる磁束密度の位相差

これらより、エアギャップの微小面積  $\Delta A$  の磁気抵抗  $R_g$  を、次のように仮定する。

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 \Delta A} = \frac{g}{\mu_0 r dr d\theta}$$

$\mu_0$  : 真空の透磁率

$g$  : ギャップ長

$r$  : ロータ半径

よって、エアギャップ中に蓄えられる磁気エネルギー  $W_g$  は、次式となる。

$$\begin{aligned} W_g &= \iint \frac{(b_{ru} + b_{st})^2}{2\mu_0^2 R_g} \\ &= \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{2\mu_0 R_g} \{B_{RU} \cos(\omega t - M\theta) + B_{ST} \cos(\omega t - M\theta - \psi)\}^2 r dr d\theta \\ &= \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{4\mu_0 g} (B_{RU}^2 + B_{ST}^2 + 2B_{RU}B_{ST} \cos \psi) \end{aligned}$$

$r_1$  : ロータディスクの有効内半径

$r_2$  : ロータディスクの有効外半径

トルクはステータとロータの磁極の位相差によって発生するので、磁気エネルギーを位相差で偏微分することによって求めることができる。ロータとステータの機械角のずれは、 $\psi/M$ となるので、トルクは次式で表される。

$$T = \frac{\partial w_g}{\partial \psi/M} = -\frac{\pi M(r_2^2 - r_1^2)}{2\mu_0 g} (B_{RU} B_{ST} \sin \psi)$$

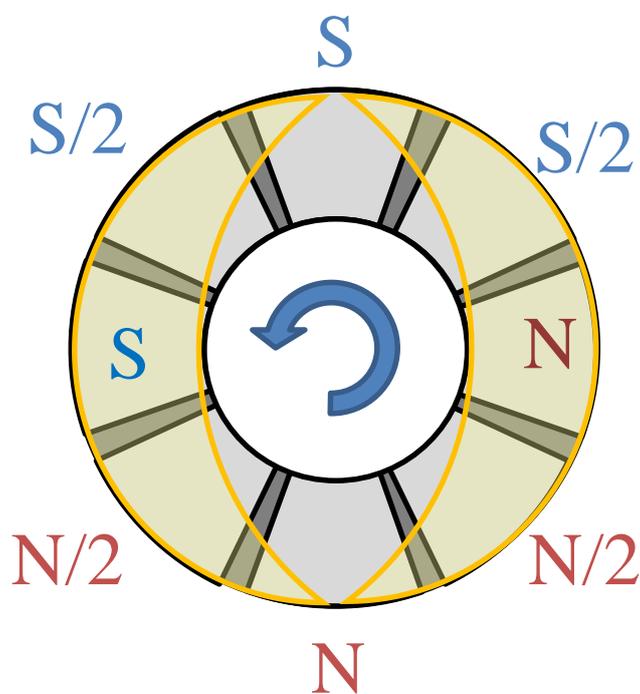


図 2.10 回転制御構成

・ 軸方向変位制御

軸方向変位を制御する場合は上下ステータによりロータ永久磁石の磁極と同相の 2 極の磁極を発生させればよい。図 2.11 のように制御電流を発生させることによって、上部エアギャップにおいては引力が生じ、下部エアギャップにおいては斥力が生じる。これらの力を合わせることによってロータには上向きの支持力を発生させることができる。

次のような磁束密度を生じさせた場合、上方向への吸引力が働く。

$$B_{sa}(\theta, t) = -B_{SA} \cos(\omega t - M\theta)$$

$B_{SU}$  : 上部ステータコイルによって発生する磁束密度の最大値

$$\begin{aligned} W_g &= \iint \frac{(b_{ru} + b_{sa})^2}{2\mu_0^2 R_g} \\ &= \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{2\mu_0 R_g} \{B_{RU} \cos(\omega t - M\theta) + B_{SA} \cos(\omega t - M\theta - \psi)\}^2 r \, dr \, d\theta \\ &= \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{4\mu_0 g} (B_{RU}^2 + B_{SA}^2 + 2B_{RU}B_{SA} \cos \psi) \end{aligned}$$

アキシヤル方向力は、磁気エネルギー  $W_g$  を  $g$  で偏微分することによって求めることができるので、

$$F = \frac{\partial W_g}{\partial g} = -\frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{4\mu_0 g^2} (B_R^2 + B_S^2 + 2B_R B_S \cos \psi)$$

となる。

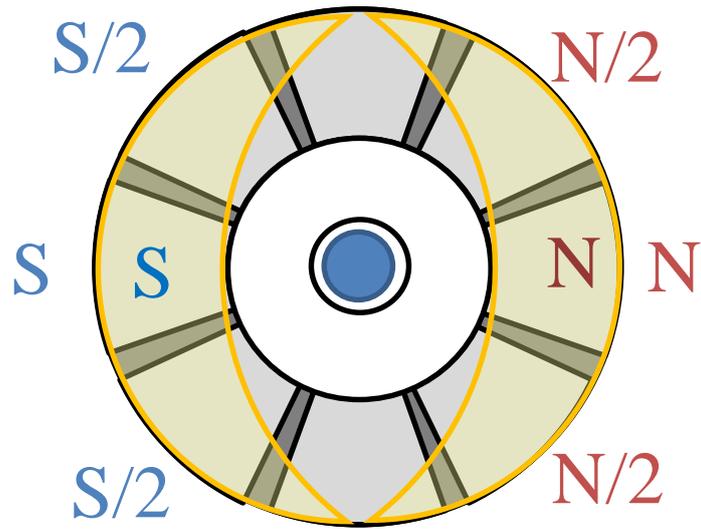


图 2.11 轴方向变位制御

## ・傾き変位制御

傾き制御を行う場合は上下ステータにより同位相の4極の磁極を発生させればよい。図2.12のように制御電流を発生させることによって、ロータ手前側においては上方向への力が生じ、ロータ奥側においては下方向への力が生じる。これらの力を合わせることでロータにはx軸まわりの傾きトルクを発生させることができる。y軸まわりにおいても図2.13のようにx軸回りの時より90°位相のずれた4極の磁極を発生させることによって傾きトルクを発生させることができる。上部ステータおよび下部ステータに発生させる磁束密度は次式によって表すことができる。

$$B_{sxu}(\theta, t) = -B_{SXU} \cos(\omega t - N\theta)$$

$$B_{sxl}(\theta, t) = -B_{SXL} \cos(\omega t - N\theta)$$

$$B_{syu}(\theta, t) = B_{SYU} \cos(\omega t - N\theta)$$

$$B_{syl}(\theta, t) = B_{SYL} \cos(\omega t - N\theta)$$

$B_{TXU}$  : 上部の、x軸傾き制御電流により発生する磁束密度の波高値

$B_{TXL}$  : 下部の、y軸傾き制御電流により発生する磁束密度の波高値

$B_{TYU}$  : 上部の、x軸傾き制御電流により発生する磁束密度の波高値

$B_{TYL}$  : 下部の、y軸傾き制御電流により発生する磁束密度の波高値

$N$  : ステータ電磁石の極対数

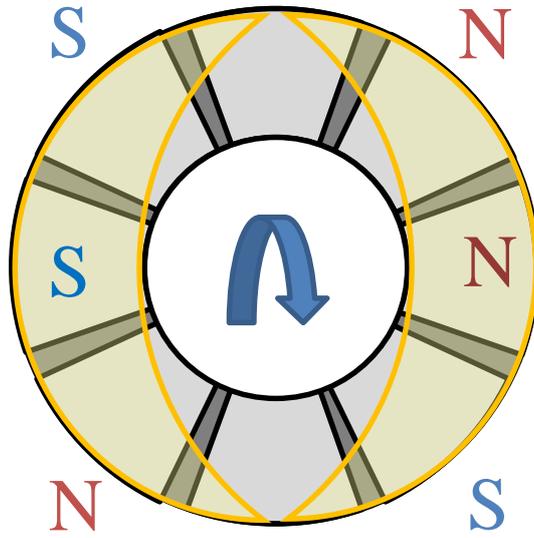


図 2.12 x 軸回り傾き制御

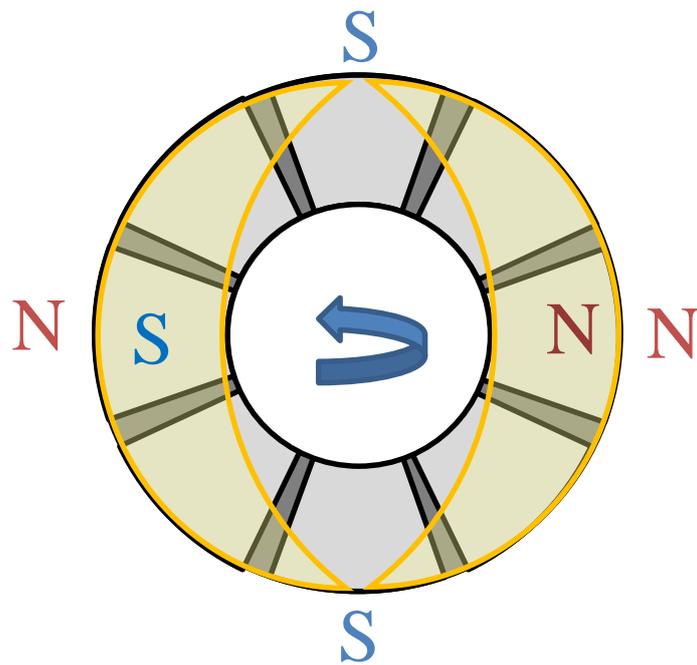


図 2.13 y 軸回り傾き制御

## ・ 径方向変位制御

径方向変位の制御に関しては、ステータからロータに常に働く吸引力を用いる。ロータがラジアル方向に変位した際、この吸引力によりロータが元の位置に戻ろうとする復元力が働く。こうして得られる受動安定性により、ロータの径方向変位を受動的に制御することができる。

## 2.1.3 実験装置

### ・制御系の構成

本磁気浮上モータの制御系構成を図 2.14 に示す。ロータにセンサターゲットを設け、ホルダーに固定した 3 つの渦電流式変位センサを用いてロータの  $z$  軸方向の並進位置と傾き  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  の 3 軸を検出する。また、ホール IC を用いたエンコーダによってロータの角度および回転速度を検出する。渦電流式変位センサ及びエンコーダにより検出された変位信号は A/D コンバータを通り高速演算器 (Digital Signal Processor : DSP) (dSPACE 製 DS1104) に入力される。そして DSP 内の MATLAB/Simulink を用いて作成された制御モデルによって各コイルに対応する制御電流の指令信号が計算され D/A コンバータを通り電流アンプ (リニアアンプ) に入力される。電流アンプは入力された指令信号に対応した制御電流を出力する。出力された電流がアキシシャルベリングレスモータのコイルにそれぞれ独立した電流が流れることによりロータに軸支持力が発生する。上下のステータコイルそれぞれに独立した電流を流すためにリニアアンプを計 16 個使用している。基本的にロータの位置、傾きを定常位置に安定させるよう制御を行う。

DSP 内で実現される MATLAB/Simulink のベアリングレスモータの制御モデルについて説明する。図 2.15 にベアリングレスモータの制御モデルを示す。この制御モデルを 2 つ用いることによって、上部ステータコイル 8 個、下部ステータコイル 8 個、計 16 個のコイルそれぞれに独立な制御電流を生じさせることができる。浮上制御においては変位センサより得られた 3 軸の値をフィードバックし、それぞれ目標値と比較して PID コントローラの入力とし、PID 制御を行うことで浮上制御用の 8 個の電流指令信号を作成する。その際、ロータの回転角度情報が必要となるので、エンコーダシステムを用いて得られたロータの回転角度情報をフィードバックする。回転制御においても同様に目標値と比較して PD コントローラの入力とし、PD 制御を行い回転制御用の 8 個の電流指令信号を作成する。この際にもロータの回転角度情報が必要となるため、エンコーダシステムを用いて得られたロータの回転角度情報をフィードバックする。そして、2 組の電流指令信号を足し合わせて 1 つの電流指令信号とし、実際にコイルに流す電流指令を決定するといった制御モデルとなっている。青色のブロックが PID コントローラブロック、緑色のブロックが制御電流生成ブロック、橙色のブロックがプラントブロックとなっている。

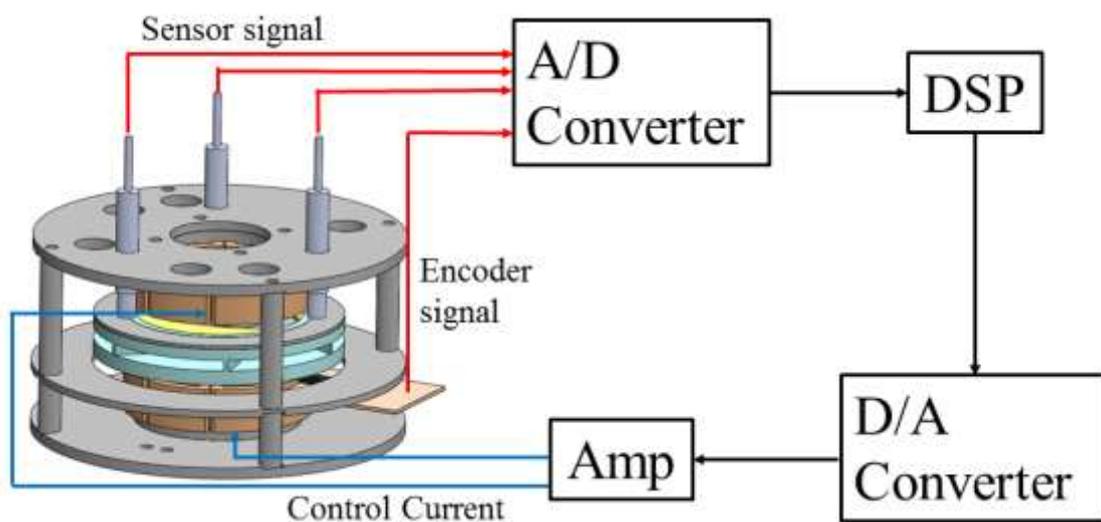


図 2.14 制御系の構造

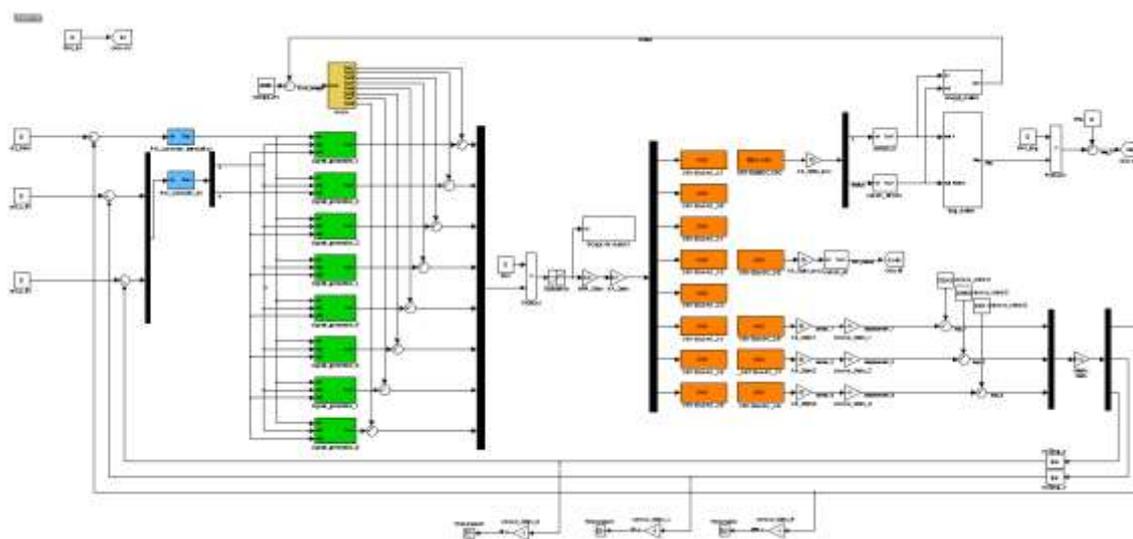


図 2.15 制御モデル全体図

## ・変位センサ

渦電流変位センサについて説明する。図 2.16 に使用したセンサヘッドと外観寸法図を示す。センサは渦電流式変位センサで、測定対象物は鉄でなくてはならない。そのため、本磁気浮上モータにはロータに SUY-1 を材料とするセンサターゲットを設けている。センサを 3 個用いてロータの軸方向変位・傾きの位置情報を取得し、これら位置情報をフィードバックしてロータの浮上制御を行う。センサの詳細を以下に示す。

- ・メーカー名：株式会社電子応用
- ・センサヘッド：PU-05
- ・変換器：AEC-5505
- ・測定範囲：0~2 [mm]
- ・測定物：鉄
- ・出力電圧：±5 [V]

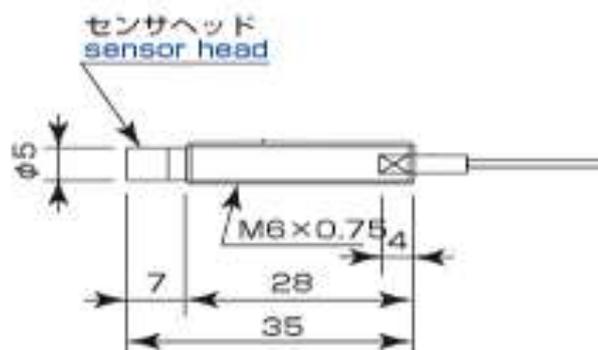


図 2.16 変位センサ

## ・エンコーダ

ロータの回転角度 $\theta_z$ および角速度 $\omega$ を検出するエンコーダシステムについて説明する。その方法として、ロータの下側に直径  $\phi 3.0 \text{ mm}$ 、厚さ  $1.0 \text{ mm}$  のネオジム永久磁石を外側に 48 個、内側に 2 個、計 50 個埋め込み、ホールセンサによってネオジム永久磁石の位置を検出することによって回転角度 $\theta_z$ と角速度 $\omega$ を算出する。図 2.17 に、ネオジム永久磁石を埋め込んだロータの概略図を示す。説明にあたり表面の磁極が N 極のネオジム永久磁石を赤色、S 極のネオジム永久磁石を青色としている。

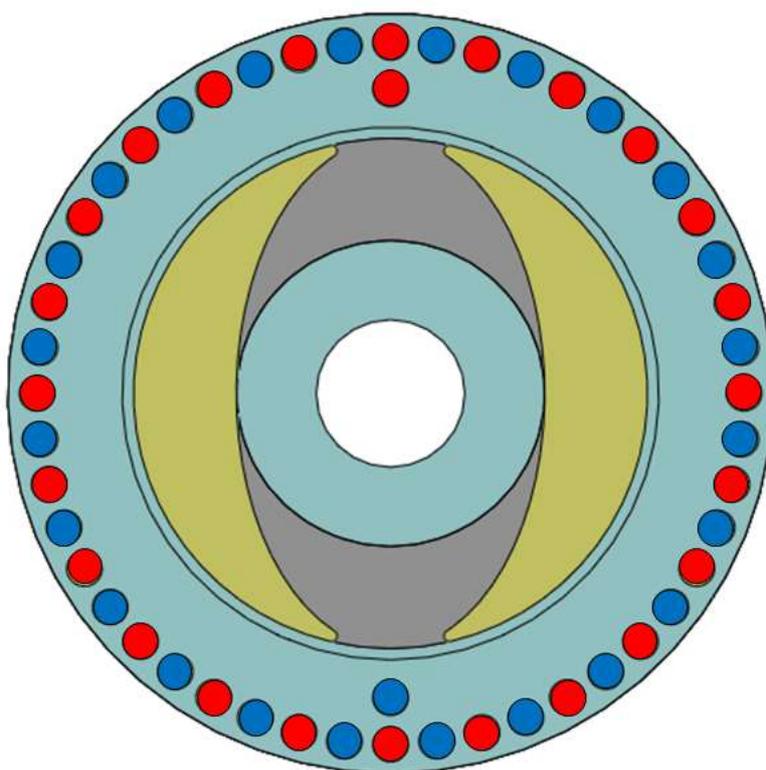


図 2.17 永久磁石の位置

図2.17において、外側の48個の永久磁石は角度検出用である。これらの永久磁石は $7.5^\circ$ の間隔で円周状に並べられ、その表面の磁極を検知するようにホールセンサを設置する。ロータが回転すると、ホールセンサの上を角度検出用永久磁石が次々と通過していく。角度検出ホールセンサはS極を検知した後のN極を検知する度に値を出力するため、ロータが1回転すると24回の出力が発生する。ホールセンサからの出力が確認される度に角度 $\theta_z$ の値が $15^\circ$ ずつ増加していくようにDSP内で計算することによって、ロータの回転角度を検出することができる。また、内側の2個の永久磁石はインデックス検出用である。角度検出用永久磁石のみでは角度 $\theta_z$ の値が無限に増加していつてしまう。そこで、角度 $\theta_z=0^\circ$ の位置を決定するためにインデックス用永久磁石を用いている。2個の永久磁石は、その表面の磁極を検知するように、角度検出ホールセンサとは別のホールセンサを設置する。インデックス検出ホールセンサも同様にS極を検知した後のN極を検知する度に値を出力する。インデックス検出ホールセンサがインデックス用永久磁石のN極を検知する度に角度 $\theta_z$ の値がゼロになるようにすることで、ロータが回転しても角度 $\theta_z$ の値は0, 15, 30, 45, ..., 360,  $0^\circ$ を繰り返すようになる。このようにしてロータの回転角度 $\theta_z$ の検出を行う。インデックス用永久磁石のN極以外にはS極が最低1つ必要であるため、今回は重心がずれないように180度の間隔を開けて永久磁石を配置した。

図2.18に使用したホールICと磁電変換特性を示す。図2.19にホールICの固定法を示す。実験装置ではホルダーを用いてケーシング下部を固定する。ホールICをブレッドボードに二つ設置し、ブレッドボードをホルダーに対して図のように固定する。二つのホールICがそれぞれ角度検出信号とインデックス信号を検出することでロータの位置を検出する。ホールICの詳細を以下に示す。

- メーカー名：旭化成エレクトロニクス株式会社
- ホールIC：EW512
- 検知型：交番検知型
- $B_{op}$ ：3 [mT]

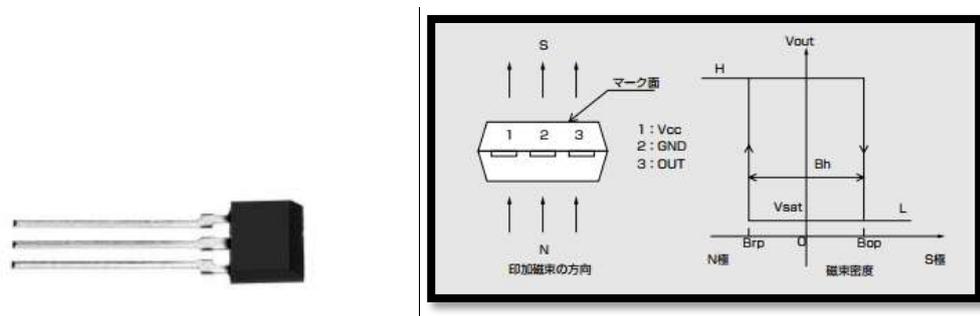


図 2.18 ホールセンサ



図 2.19 ホールセンサの固定法

## ・ロータの製作

実際に制作したロータを図 2.20 に示す。左の図がロータ上部になっており、右はロータ下部になっている。上部には渦電流式変位センサを用いるためのセンサターゲットを配置している。その内側に磁性体であるロータディスクを配置し、その上に永久磁石を配置している。永久磁石は三日月形のを上下に 2 枚ずつ、計 4 枚用いた。ロータ全体にはアクリル接着剤によって薄い膜が貼られている状態となっており、直接流体と接触することを防いでいる。またセンサターゲットにおいても、錆防止の塗料を表面に付与することにより、錆び付くことを防止している。ロータコアは 3D プリンターを用いて製作した。

完成したロータの詳細を以下に示す。

直径：67 [mm]

厚さ：11.6 [mm]

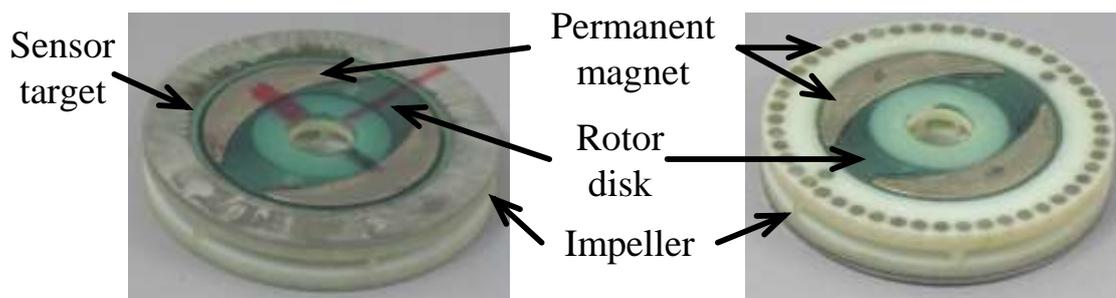


図 2.20 製作したロータ(左：ロータ上部, 右：ロータ下部)

## ・ステータの製作

図 2.21 に実際に製作したステータの写真を示す。ステータコアにそれぞれ 129 巻の集中巻き線を施した。コイルに用いた同線は  $\phi 0.315 \text{ mm}$  であり、コイルの巻き線抵抗の平均は約  $0.8 \Omega$  であった。

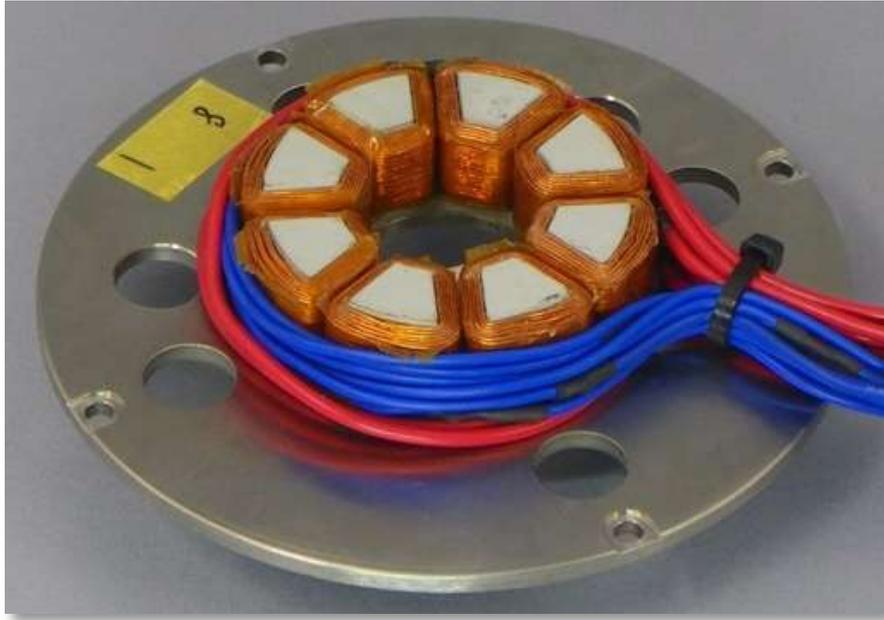


図 2.21 製作したステータ

## ・ポンプケーシングの製作

図 2.22 図 2.23 は実際に制作したポンプケーシングである。図 2.22 はケーシングの上部であり、図 2.23 はケーシングの下部である。原料としては Vero White Plus (白色硬化樹脂) を用いている。また、3D プリンターを用いてケーシングの製作を行っている。



図 2.22 ポンプケーシング上部写真



図 2.23 ポンプケーシング下部写真

## ・磁気浮上ポンプの製作

本磁気浮上ポンプを実際に製作した実験装置を図2.24に示す。ホルダー上部に3つの渦電流変位センサを固定して、ケーシング内のロータの変位を測定している。また、ホルダー上部にはケーシングのインレット部を固定具で固定している。これは実験する過程でケーシングに力がかかることで発生する破損を防ぐためである。リング状のホルダーがケーシング下部に取り付けられている。ロータ・ケーシング間に各1.0mmのギャップを設けたがロータの亚克力接着剤が上下で0.6mmの厚みを持ってしまっているため、軸方向の可動域は $\pm 0.7$  mm、径方向の可動域は $\pm 0.7$  mm、傾きの可動域は $\pm 1.12$ deg である。

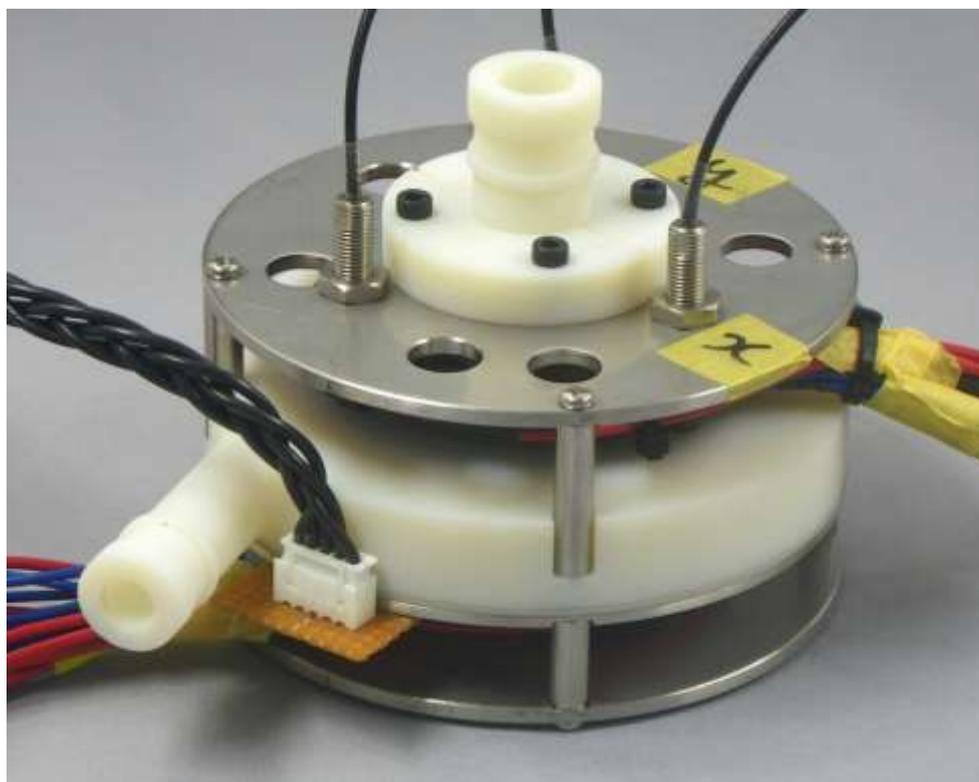


図 2.24 製作した磁気浮上ポンプ

## 2.2 巻線分割型磁気浮上ポンプ

### 2.2.1 磁気浮上ポンプの構成

#### ・磁気浮上モータの構成

提案する巻線分割型磁気浮上モータの全体の構成を図 2.25 に示す。全体の構成としては、ディスク状のロータが中心に位置しており、上下ともに極対数が 4 となるように永久磁石が 8 枚ずつ配置されている。ロータを挟み込むように同構造のステータが 2 つ上下に配置される。これらのステータは 12 個の突極を有し、浮上回転用コイルと傾き制御用コイルをそれぞれに施している。ロータは、上部ステータおよび下部ステータにより発生するアキシヤル方向吸引力を釣り合わせることで支持される。ロータの軸方向位置、回転および径方向軸まわりの傾きを能動的に制御し、径方向位置は軸方向吸引力によって発生する受動安定性により受動的に支持する構造としている。ダブルステータ型の構造とすることで、小型ながらも高い制御性能と回転トルクを得ることができるモータとなっている。

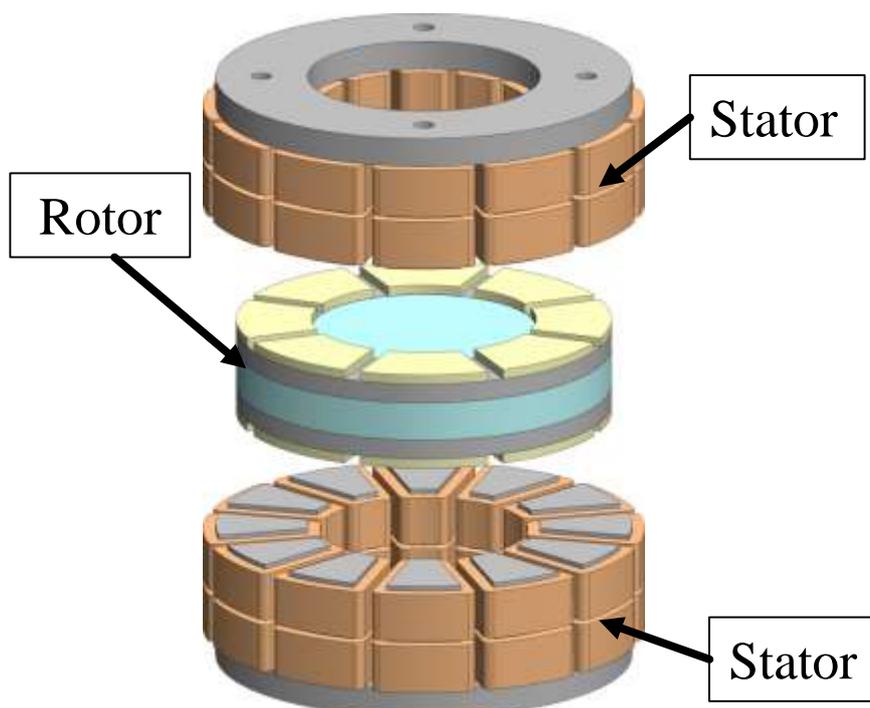


図 2.25 巻線分割型磁気浮上モータ構成

## ・ロータの構成

図 2.26 に巻線一括型アキシヤル磁気浮上モータ用に設計したロータのモデルを示す。図の左がロータ上部であり、右はロータ下部である。ロータの回転によって流体がインレットから入りアウトレットから出るように、ロータに内蔵されるインペラ形状の設計を行った。今回製作した遠心ポンプは側板を持つクローズドインペラを採用した。

上部の外側にはセンサターゲットが取り付けられる用に設計し、下部の外側にはエンコーダ用の永久磁石が計50個取り付けられるように設計を行った。また、エンコーダ検出用の永久磁石の規格は直径3.0mm 厚さ1.0mm なので取り付けるために3Dプリンターで製作した際の誤差を考慮して、直径3.3mm 深さ1.3mm の穴を開けている。インペラのブレードの高さは3.0mmとした。

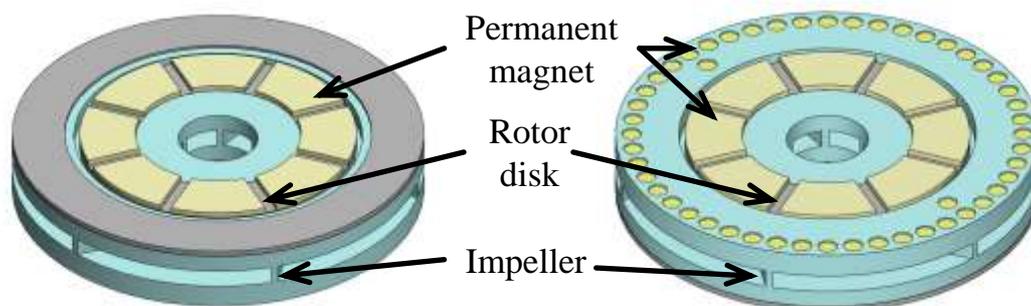


図 2.26 ロータ完成図(左：ロータ上部，右：ロータ下部)

・ステータの構成

図 2.27 に巻線分割型アキシヤル磁気浮上モータ用に設計したステータのモデルを示し、図 2.28 にコイルの配線図を示す。ステータコアは 12 個の突極を有しており、それぞれに浮上回転制御を行うための集中巻き線と傾き制御を行うための集中巻き線を施す。ステータコアの高さは 19 mm であり、径はφ45 mm である。ステータ突極に施したコイルは浮上回転制御用に上下で 3 個ずつ計 6 個、傾き制御用に 2 個のリニアアンプと接続される。そのため、上下ステータにおいて計 8 個のリニアアンプを必要とする。これにより巻線一括型磁気浮上モータより低消費電力化、装置全体の小規模化が期待できる。

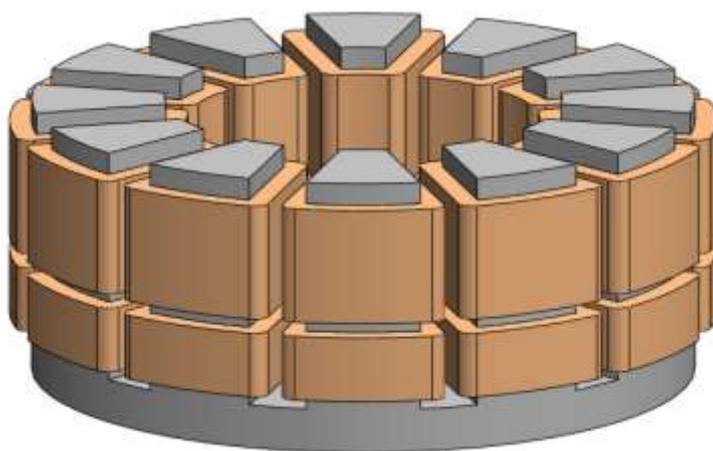


図 2.27 巻き線分割型磁気浮上モータ用ステータモデル

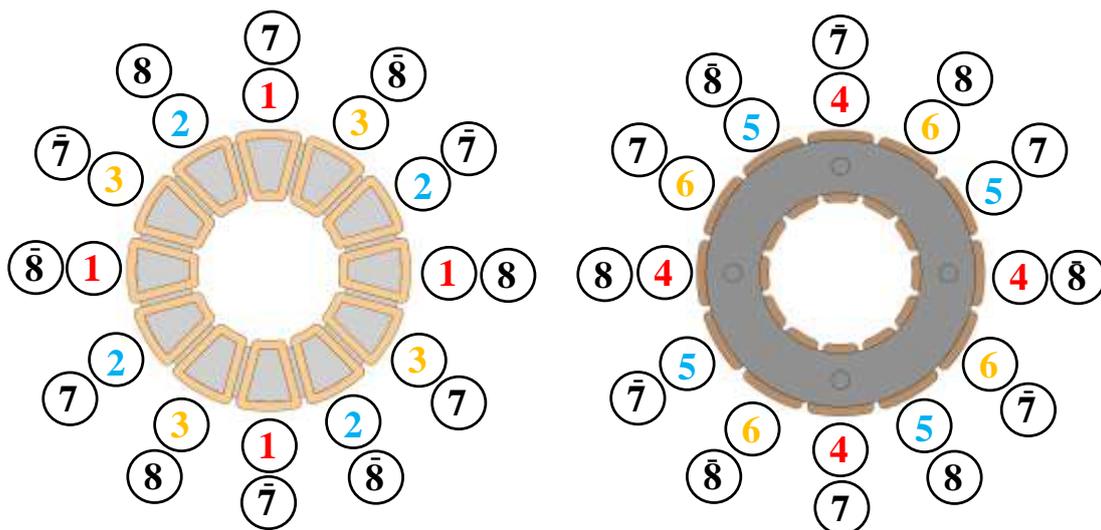


図 2.28 巻き線分割型磁気浮上モータ用ステータ配線図

- ・ポンプケーシングの構成

ポンプケーシングは巻き線一括型のものと同じものを使用したため、説明を省略する。

- ・磁気浮上ポンプの構成

ホルダー及びケーシングは巻き線一括型のものと同じものを使用したため、説明を省略する。

## 2.1.2 動作原理

図 2.29 にロータ永久磁石とステータの概略図と座標系を示す。動作原理の説明を簡単にするために下側エアギャップについて動作原理を説明する。動作原理の説明図は下部ステータと、ロータ下部永久磁石の位置関係を示しており、N は N 極、S は S 極に磁化されていることを示す。永久磁石によりエアギャップに発生する磁束密度は、永久磁石の磁束密度の最大値を  $B_{PM}$  とすると次式となる。

$$B_{pm}(\theta, t) = B_{PM} \cos(\omega t - M\theta)$$

$B_{PM}$  : ロータ PM の磁束密度の波高値

$\omega t$  : ロータの回転変位

$M$  : ロータの極対数

$\theta$  : 角度座標

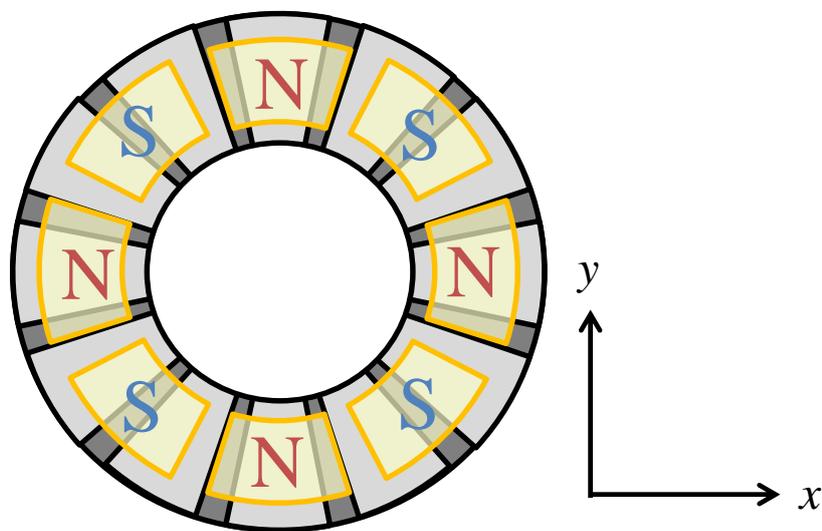


図 2.29 永久磁石の磁極及び座標系

・ 回転制御

回転トルクの制御原理について説明する。回転制御を行う場合は上下のステータによりロータ永久磁石の磁極に対して位相を  $\varphi$  ずらした 8 極の回転磁界を発生させればよい。図 2.30 のように制御電流を発生させることによって、永久磁石同期モータと同様の動作原理によって回転トルクを与えることができる。下部ステータに発生させる磁束密度は次式によって表すことができる。

$$B_r(\theta, t) = B_R \cos(\omega t - M\theta + \psi)$$

$B_R$  : 下部ステータコイルの電流により生じる磁束密度の最大値

$\psi$  : ロータ・ステータ間に生じる磁束密度の位相差

これらより、エアギャップの微小面積  $\Delta A$  の磁気抵抗  $R_g$  を、次のように仮定する。

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 \Delta A} = \frac{g}{\mu_0 r dr d\theta}$$

$\mu_0$  : 真空の透磁率

$g$  : ギャップ長

$r$  : ロータ半径

よって、エアギャップ中に蓄えられる磁気エネルギー  $W_g$  は、次式となる。

$$\begin{aligned} W_g &= \int \int \frac{(B_{pm} + B_r)^2}{2\mu_0^2 R_g} \\ &= \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{2\mu_0 R_g} \{B_{PM} \cos(\omega t - M\theta) + B_R \cos(\omega t - M\theta + \psi)\}^2 r dr d\theta \\ &= \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{4\mu_0 g} (B_{PM}^2 + B_R^2 + 2B_{PM}B_R \cos \psi) \end{aligned}$$

$r_1$  : ロータディスクの有効内半径

$r_2$  : ロータディスクの有効外半径

トルクはステータとロータの磁極の位相差によって発生するので、磁気エネルギーを位相差で偏微分することによって求めることができる。ロータとステータの機械角のずれは、 $\psi/M$ となるので、トルクは次式で表される。

$$T = \frac{\partial W_g}{\partial \psi/M} = -\frac{\pi M(r_2^2 - r_1^2)}{2\mu_0 g} (B_{PM} B_R \sin \psi)$$

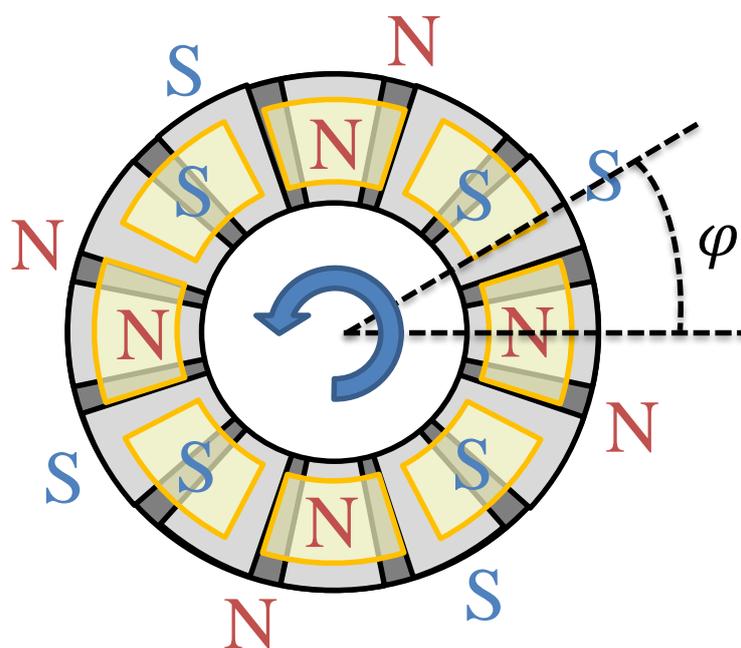


図 2.30 回転制御構成

・ 軸方向変位制御

軸方向変位を制御する場合は上下ステータによりロータ永久磁石の磁極と同相の 8 極の磁極を発生させればよい。図 2.31 のように制御電流を発生させることによって，上部エアギャップにおいては引力が生じ，下部エアギャップにおいては斥力が生じる。これらの力を合わせることによってロータには上向きの支持力を発生させることができる。

次のような磁束密度を生じさせた場合，上方向への吸引力が働く。

$$B_z(\theta, t) = -B_z \cos(\omega t - M\theta)$$

$B_z$  : 下部ステータコイルによって発生する磁束密度の最大値

$$\begin{aligned} W_g &= \iint \frac{(b_{PM} + b_z)^2}{2\mu_0^2 R_g} \\ &= \int_0^{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{2\mu_0 R_g} \{B_{PM} \cos(\omega t - M\theta) + B_z \cos(\omega t - M\theta - \psi)\}^2 r \, dr \, d\theta \\ &= \frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{4\mu_0 g} (B_{PM}^2 + B_z^2 + 2B_{PM}B_z \cos \psi) \end{aligned}$$

アキシャル方向力は，磁気エネルギー $W_g$ を $g$ で偏微分することによって求めることができるので，

$$F = \frac{\partial W_g}{\partial g} = -\frac{\pi(r_2^2 - r_1^2)}{4\mu_0 g^2} (B_{PM}^2 + B_z^2 + 2B_{PM}B_z \cos \psi)$$

となる。

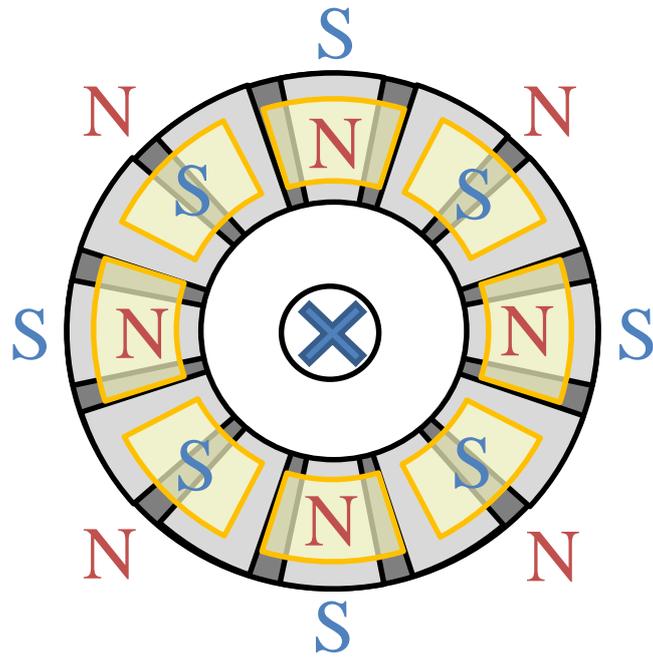


图 2.31 轴方向变位制御

## ・傾き変位制御

傾き制御を行う場合は上下ステータにより 6 極の磁極を発生させればよい。図 2.32 のように制御電流を発生させることによって、ロータ下側においては吸引力が生じ、ロータ上側においては反発力が生じる。これらの力を合わせることでロータには x 軸まわりの傾きトルクを発生させることができる。y 軸まわりにおいても図 2.33 のように x 軸回りの時より 90° 位相のずれた 6 極の磁極を発生させることによって傾きトルクを発生させることができる。上部ステータおよび下部ステータに発生させる磁束密度は次式によって表すことができる。

$$B_{\theta_x}(\theta, t) = B_{\theta_x} \cos(\omega t - N\theta)$$

$$B_{\theta_y}(\theta, t) = B_{\theta_y} \sin(\omega t - N\theta)$$

$B_{\theta_x}$  : x 軸傾き制御電流により発生する磁束密度の波高値

$B_{\theta_y}$  : y 軸傾き制御電流により発生する磁束密度の波高値

$N$  : 傾き制御用ステータ電磁石の極対数

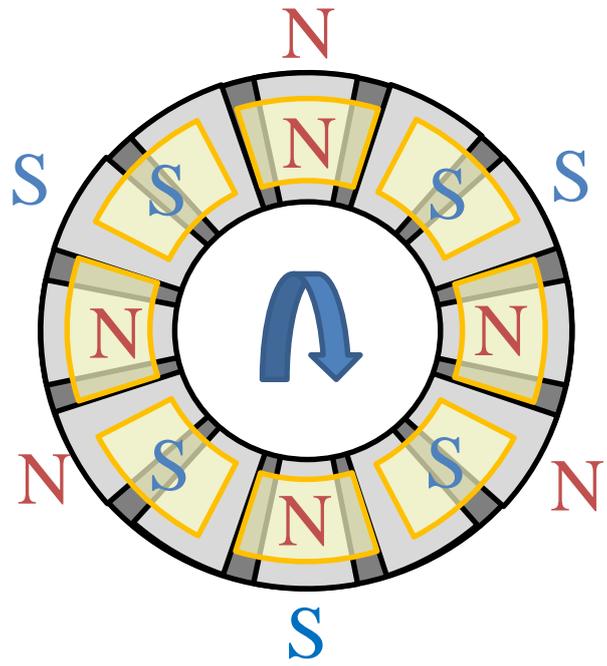


図 2.32 x 軸回り傾き制御

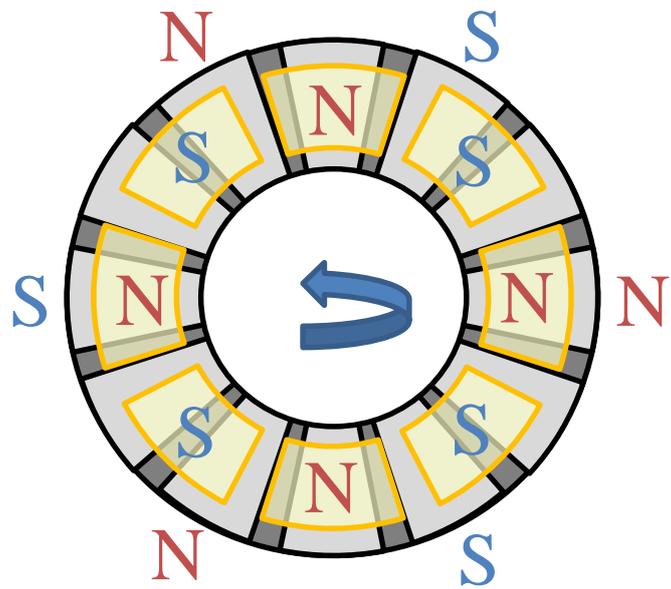


図 2.33 y 軸回り傾き制御

- ・ 径方向変位制御

径方向変位の制御に関しては、ステータからロータに常に働く吸引力を用いる。ロータがラジアル方向に変位した際、この吸引力によりロータが元の位置に戻ろうとする復元力が働く。こうして得られる受動安定性により、ロータの径方向変位を受動的に制御することができる。

## 2.2.3 実験装置

### ・制御系の構成

巻線一括型磁気浮上モータと同様に渦電流式変位センサ及びエンコーダにより検出された変位信号から DSP 内の MATLAB/Simulink を用いて浮上回転制御及び傾き制御用の指令地を計算し、D/A コンバータを通り電流アンプ (リニアアンプ) に入力され、電流アンプは入力された指令信号に対応した制御電流を出力する構成となっている。巻線分割型磁気浮上モータでは上下のステータコイルに浮上回転制御を行うために 6 個、傾き制御を行うために 2 個の計 8 個のリニアアンプを使用している。

DSP 内で実現される MATLAB/Simulink のベアリングレスモータの制御モデルについて説明する。図 2.34 にベアリングレスモータの制御モデルを示す。浮上制御においては変位センサより得られた軸方向変位の値をフィードバックし、目標値と比較して PID コントローラの入力とし、PID 制御を行うことで浮上制御用の 6 個の電流指令信号を作成する。その際、ロータの回転角度情報が必要となるので、エンコーダシステムを用いて得られたロータの回転角度情報をフィードバックする。回転制御においても同様に目標値と比較して PD コントローラの入力とし、PD 制御を行い回転制御用の 6 個の電流指令信号を作成する。この際にもロータの回転角度情報が必要となるため、エンコーダシステムを用いて得られたロータの回転角度情報をフィードバックする。そして、2 組の電流指令信号を足し合わせて 1 つの電流指令信号とし、実際にコイルに流す電流指令を決定するといった制御モデルとなっている。また、傾き制御においては変位センサから算出した傾きをフィードバックし、目標値と比較して PID コントローラの入力とし、PID 制御を行うことで傾き制御用の 2 個の電流指令信号を作成する。青色のブロックが PID コントローラブロック、緑色のブロックが制御電流生成ブロック、橙色のブロックがプラントブロックとなっている。

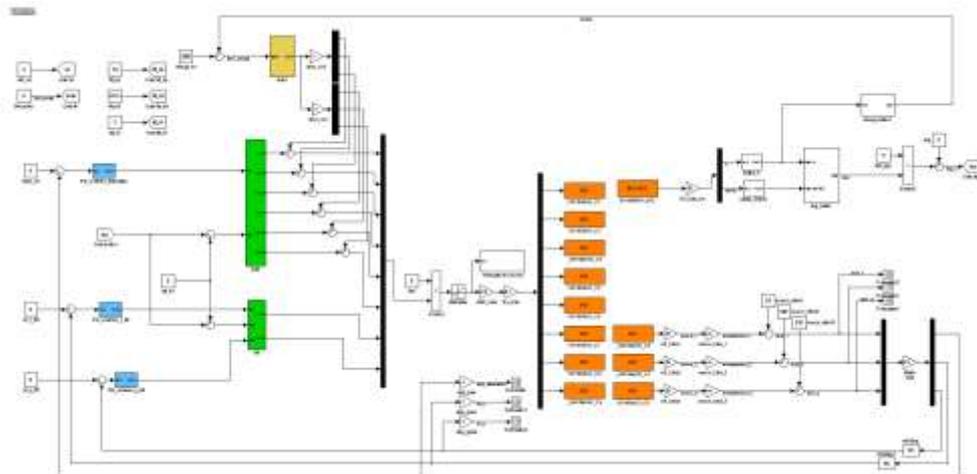


図 2.34 制御モデル全体図

・センシング部の構成

渦電流変位センサとホール IC は巻線一括型のものと同じものを使用したため、説明を省略する。

## ・ロータの製作

実際に制作したロータを図 2.35 に示す。左の図がロータ上部になっており、右はロータ下部になっている。上部には渦電流式変位センサを用いるためのセンサターゲットを配置している。その内側に磁性体であるロータディスクを配置し、その上に永久磁石を配置している。磁気浮上モータ用永久磁石は上下に 8 枚ずつ、計 16 枚用いた。ロータ全体にはアクリル接着剤によって薄い膜が貼られている状態となっており、直接流体と接触することを防いでいる。またセンサターゲットにおいても、錆防止の塗料を表面に付与することにより、錆び付くことを防止している。ロータコアは 3D プリンターを用いて製作した。

完成したロータの詳細を以下に示す。

直径：67 [mm]

厚さ：11.5 [mm]

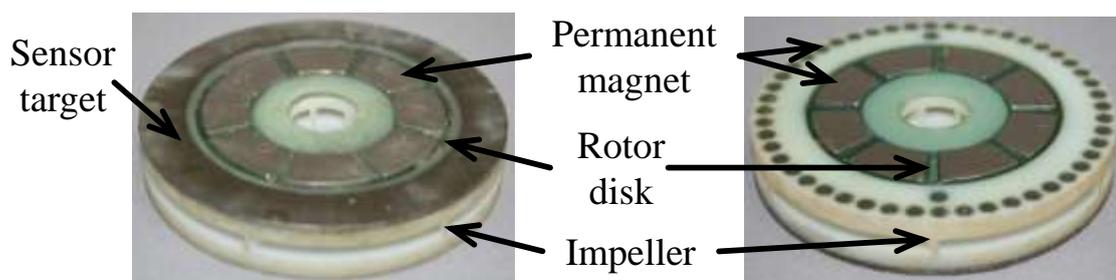


図 2.35 製作したロータ(左：ロータ上部, 右：ロータ下部)

## ・ステータの製作

図 2.36 に実際に製作したステータの写真を示す。ステータコアにそれぞれ 129 巻の集中巻き線を施した。コイルに用いた同線は  $\phi 0.315 \text{ mm}$  であり，浮上回転用コイルの巻き線抵抗の平均は約  $0.8 \Omega$  であり，傾き制御用のコイルの巻き線抵抗の平均約  $0.4 \Omega$  であった。

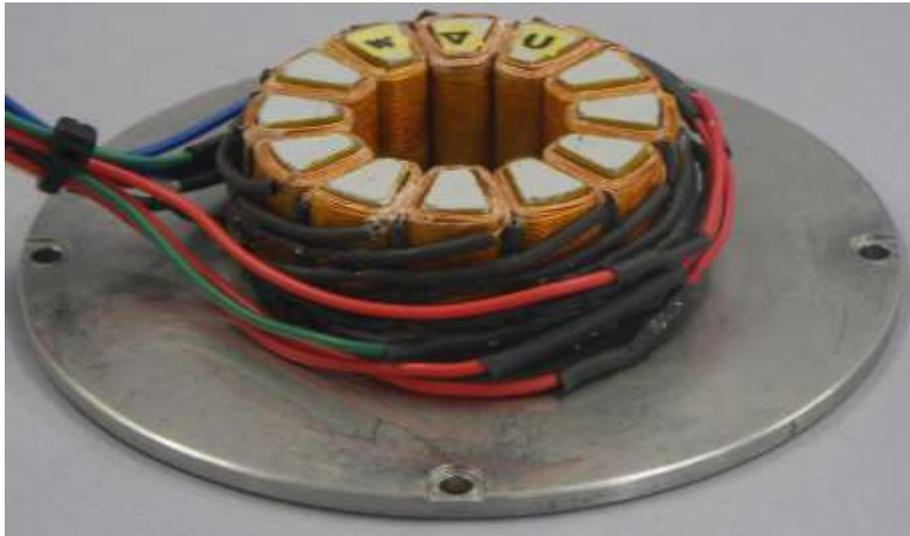


図 2.36 製作したステータ

## ・ポンプケーシングの製作

ポンプケーシングは巻き線一括型のものと同じものを使用したため，説明を省略する。

## ・磁気浮上ポンプの製作

ホルダー及びケーシングは巻き線一括型のものと同じものを使用したため，説明を省略する。

## 2.3 実験結果

### 2.3.1 浮上特性

製作した実験装置の磁気浮上制御性能を明らかにするために空気中でインパルス応答の確認を行った。ロータを上下ステータの中央位置で安定に磁気浮上制御した状態でロータにインパルス外乱を印加したとき、軸方向変位  $z$  と傾き  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  をそれぞれ測定しプロットした。インパルス外乱を印加後、ロータの中心位置に素早く戻ることができるかを確認する。軸方向のインパルス応答を測定する際にはロータの重心が約 0.1mm 変位するインパルス外乱を印加した。傾きのインパルス応答を測定する際には各傾き方向に約 0.1deg 変位するインパルス外乱を印加した。

#### ・巻線一括型磁気浮上ポンプ

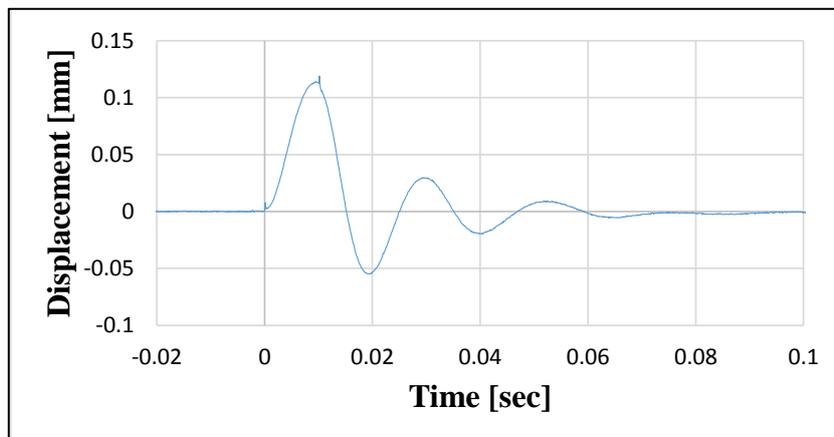
実験を行った際のベアリングレスモータのPIDコントローラの制御ゲインを表2.1に示す。

	<b>Kp</b>	<b>kd</b>	<b>Ki</b>
軸方向制御	3.8 [A/mm]	0.004 [A/(sec·mm)]	3.0 [A·sec/mm]
傾き制御	1.6 [A/deg]	0.003 [A/(sec·deg)]	2.5 [A·sec/deg]

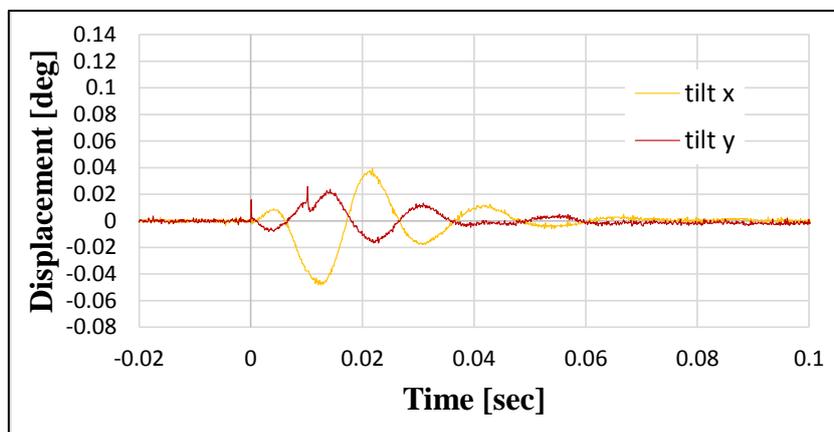
表 2.1 PID 制御ゲイン

図 2.37 に軸方向  $z$  が約 0.1mm 変位するインパルス外乱を与えたときの実験結果を示す。

実験結果より、ロータ変位振動が最大変位の $\pm 5\%$ 以下になるまでに要した時間は 0.056 sec と、短い時間で外乱印可前の浮上位置に戻ることが確認された。これにより速応性がよいことが明らかになった。また、傾きにもほとんど影響を及ぼしていないことが確認でき、外乱印可後も安定した浮上が続いていることが確認できた。



Axial

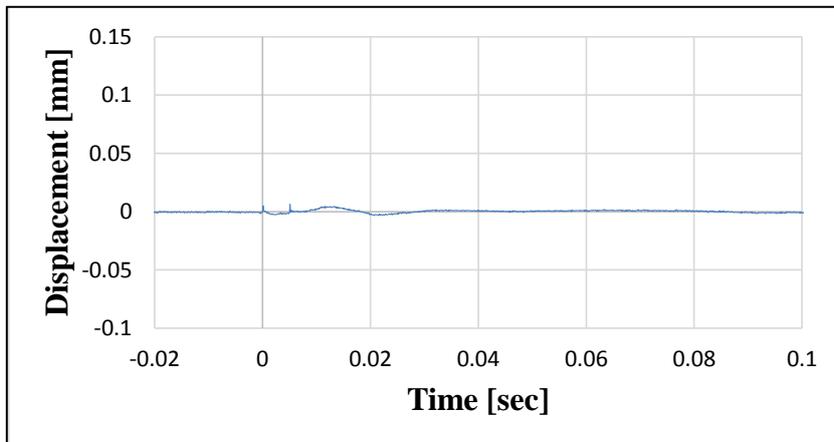


Tilt

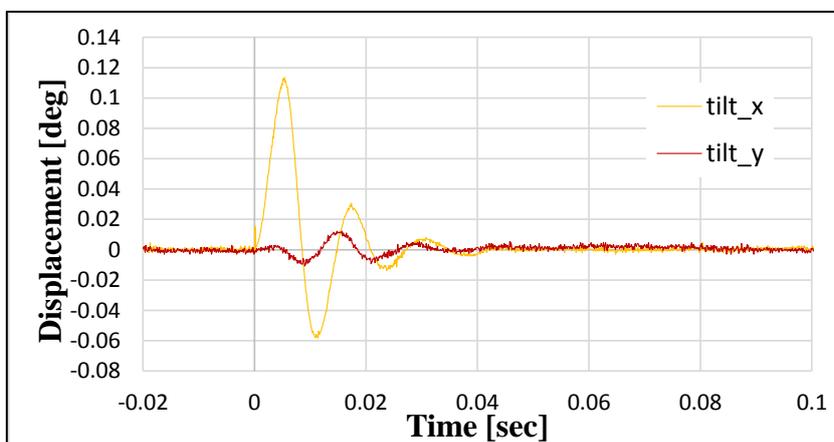
図 2.37 軸方向インパルス応答(巻線一括型)

図 2.38 に傾き $\theta_x$ が約 0.1deg 変位するインパルス外乱を与えたときの実験結果を示す。

実験結果より，ロータ変位振動が最大変位の $\pm 5\%$ 以下になるまでに要した時間は 0.032 sec と，非常に短い時間で外乱印可前の浮上位置に戻ることが確認された。これにより速応性がよいことが明らかになった。また，外乱印可後も安定した浮上が続いていることが確認できた。軸方向と y 軸周りの傾きどちらにも影響が出ていないことが確認できる。



Axial



Tilt

図 2.38 傾きインパルス応答(巻線一括型)

・巻線分割型磁気浮上ポンプ

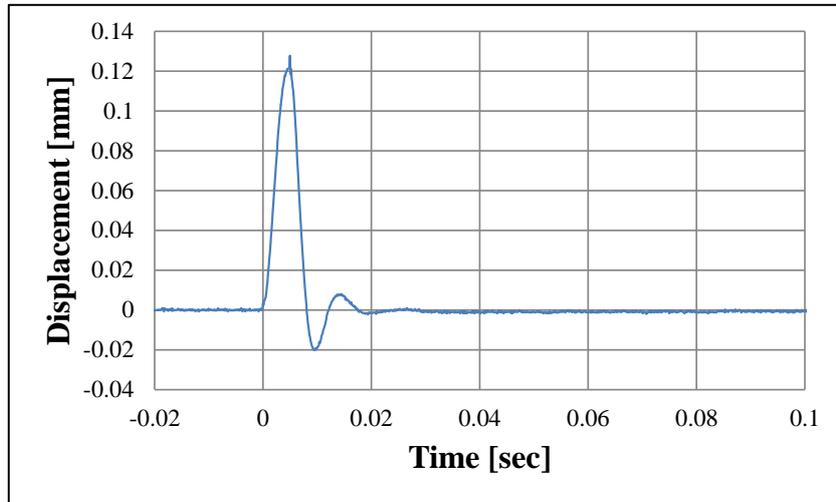
実験を行った際のベアリングレスモータのPIDコントローラの制御ゲインを表2.1に示す。

	<b>Kp</b>	<b>kd</b>	<b>Ki</b>
軸方向制御	5.8 [A/mm]	0.008 [A/(sec·mm)]	3.0 [A·sec/mm]
傾き制御	2.2 [A/deg]	0.009 [A/(sec·deg)]	3.0 [A·sec/deg]

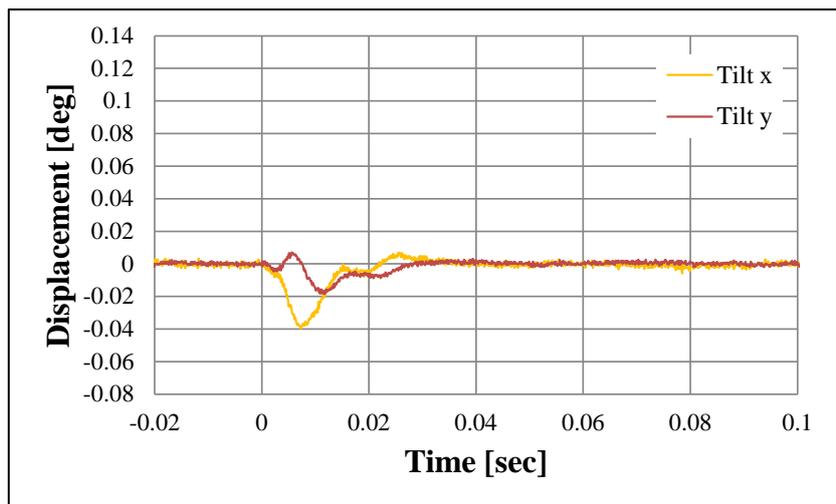
表 2.1 PID 制御ゲイン

図 2.39 に軸方向 z が約 0.1mm 変位するインパルス外乱を与えたときの実験結果を示す。

実験結果より，ロータ変位振動が最大変位の±5%以下になるまでに要した時間は 0.0151 sec と，非常に短い時間で外乱印可前の浮上位置に戻ることが確認された。これにより巻線一括型磁気浮上モータよりも速応性がよいことが明らかになった。また，傾きにもほとんど影響を及ぼしていないことが確認でき，外乱印可後も安定した浮上が続いていることが確認できた。



Axial

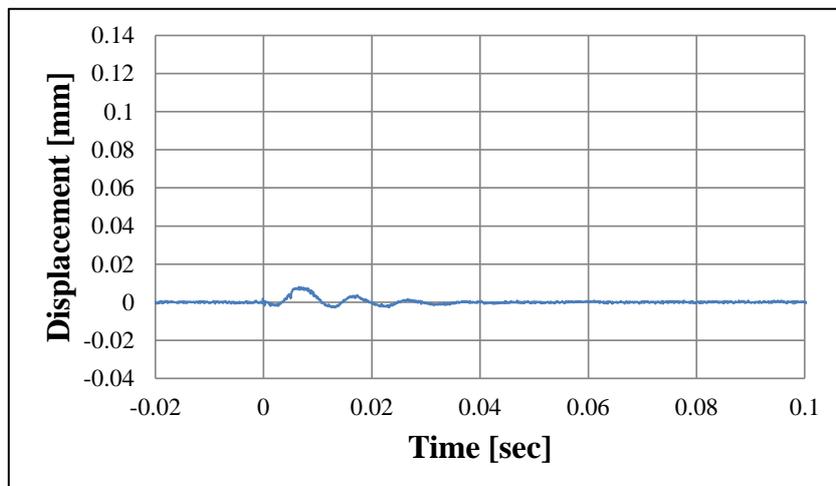


Tilt

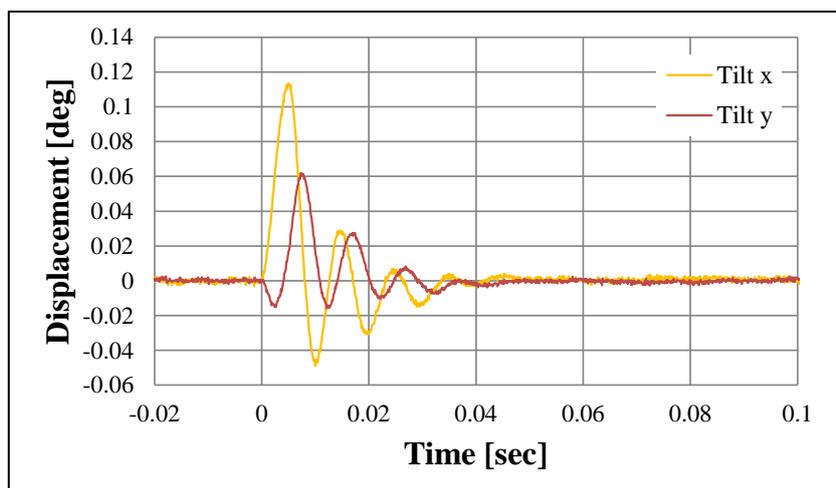
図 2.39 軸方向インパルス応答 (巻線分割型)

図 2.40 に傾き $\theta_x$ が約 0.1deg 変位するインパルス外乱を与えたときの実験結果を示す。

実験結果より、ロータ変位振動が最大変位の $\pm 5\%$ 以下になるまでに要した時間は 0.0225 sec と、非常に短い時間で外乱印可前の浮上位置に戻ることが確認された。これにより速応性が巻き線一括型磁気浮上モータよりもよいことが明らかになった。また、外乱印可後も安定した浮上が継続できていることが確認できた。y 軸周りの傾きに少し影響を及ぼしていることがわかる。これは実験装置を手作業で製作したため、製作誤差による重心のずれによって生じてしまったのだと考えられる。



Axial



Tilt

図 3.40 傾きインパルス応答 (巻線分割型)

## 2.3.2 振動振幅特性

製作した実験装置の浮上回転制御性能を明らかにするために浮上回転時の各軸の振動振幅特性の確認を行った。

空気中でロータの軸方向  $z$ ・傾き方向  $\theta_x, \theta_y$  を中心位置において安定に磁気浮上制御し、ロータをある回転数で回転させた時の各軸方向の変位を一定時間記録する。その一定時間内における定常浮上位置から正方向への変位の最大値と、負方向への変位の最大値の差をその回転数の振動振幅とした。ロータの可動範囲と最大振幅を表 2.2 に示す。

	軸方向	径方向	傾き $\theta_x$	傾き $\theta_y$
可動範囲	$\pm 0.6$ [mm]	$\pm 2.7$ [mm]	$\pm 1.9$ [deg]	$\pm 1.9$ [deg]
最大振幅	1.2 [mm]	5.4 [mm]	3.8 [deg]	3.8 [deg]

表 2.2 可動範囲, 最大振幅

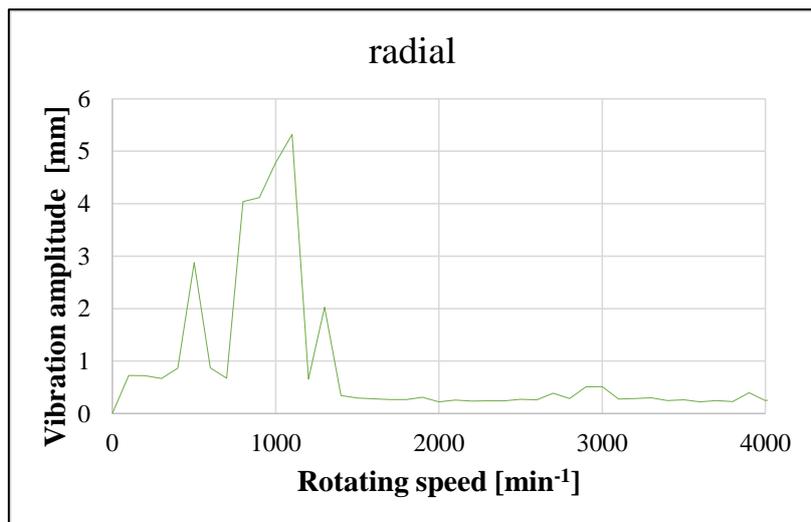
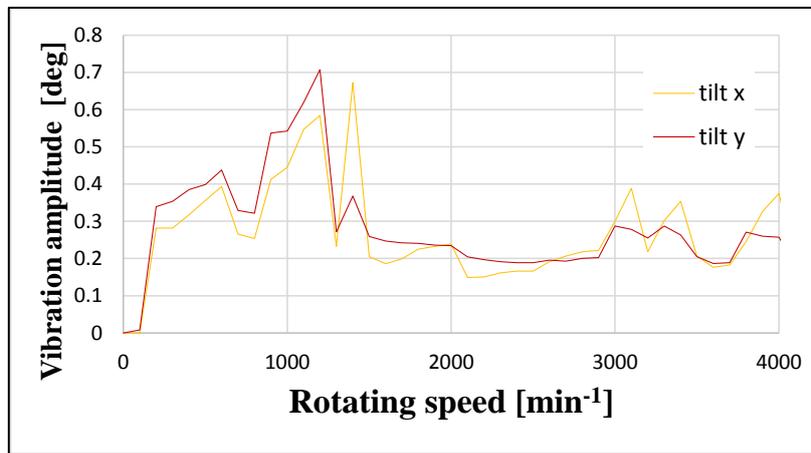
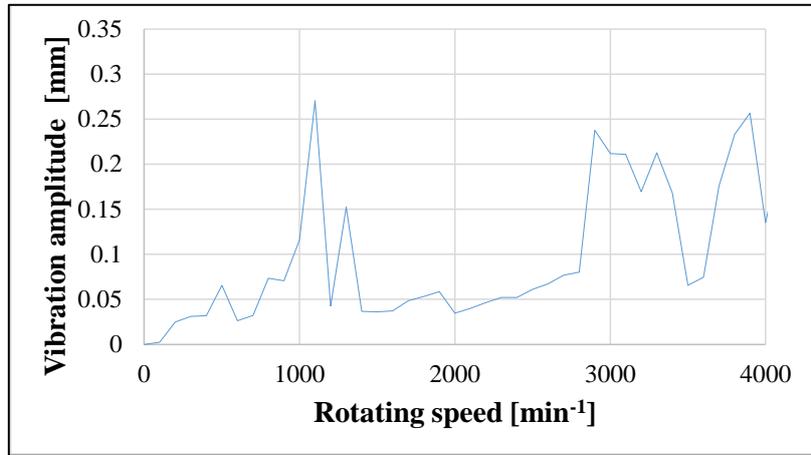
### ・ 巻線一括型磁気浮上ポンプ

PID コントローラの制御ゲインを一組決め、すべてその値において 4000rpm まで 100 rpm ごとに測定を行った。浮上回転時の振動振幅が最大値未満であるかどうかを確認することで、ロータがどこにも接触することなく回転していること、すなわち回転時においても浮上制御が破綻しないことを明らかにする。実験を行った際のベアリングレスモータの PID コントローラの制御ゲインを表 2.3 に示す。

	<b>Kp</b>	<b>kd</b>	<b>Ki</b>
軸方向制御	6.0 [A/mm]	0.01 [A/(sec·mm)]	3.0 [A·sec/mm]
傾き制御	1.1 [A/deg]	0.005 [A/(sec·deg)]	2.5 [A·sec/deg]
回転制御	0.1 [A/deg]	-	0.01 [A·sec/deg]

表 2.3 PID 制御ゲイン

図 2.41 にケーシングのない空気中での振動振幅特性の測定結果を示す。図からわかるように各軸ともに回転数が 1100rpm 未満では不安定になっており, 1100rpm のとき最も大きく振動していることがわかる。これはロータの重心による共振が原因ではないかと考えられる。また, 径方向の変位をみると, 回転数が 1100 rpm のとき変位が約 5.4 mm となっており最大振幅の値からこれはロータが接触してしまっていることが読み取れる。回転数が 3000 rpm を超えてからは軸方向変位と傾き変位に振動が発生していることがわかる。今回の測定ではロータ・ステータ間のエアギャップを 3 mm としている。そのため高い回転数では回転トルクが足りずに振動が発生し, 4000 rpm で浮上回転ができなくなってしまうものと考えられる。



Radial

図 2.41 振動振幅特性

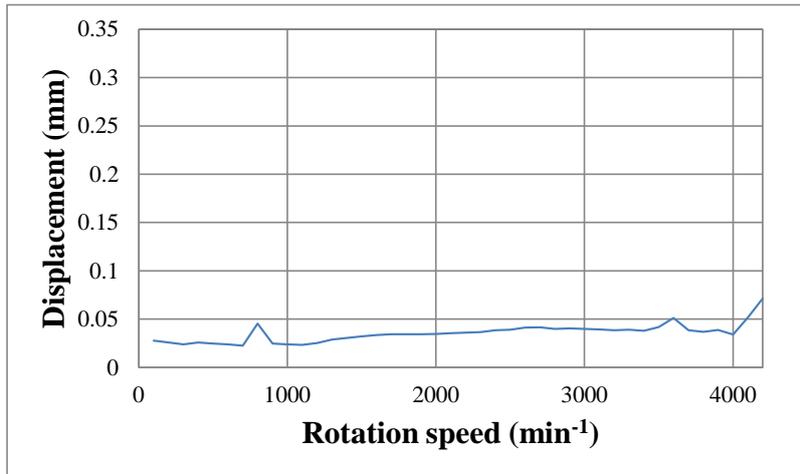
## ・巻線分割型磁気浮上ポンプ

PID コントローラの制御ゲインを一組決め、すべてその値において 4200rpm まで 100 rpm ごとに測定を行った。浮上回転時の振動振幅が最大値未満であるかどうかを確認することで、ロータがどこにも接触することなく回転していること、すなわち回転時においても浮上制御が破綻しないことを明らかにする。実験を行った際のベアリングレスモータの PID コントローラの制御ゲインを表 2.4 に示す。

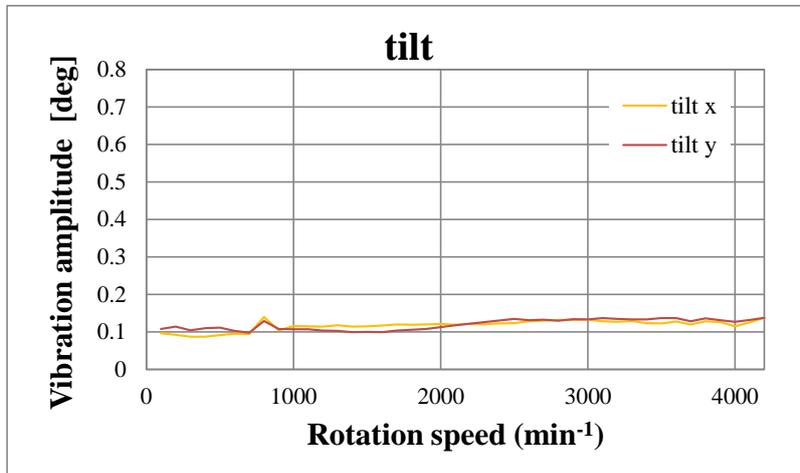
	<b>Kp</b>	<b>kd</b>	<b>Ki</b>
軸方向制御	6.0 [A/mm]	0.011 [A/(sec·mm)]	3.0 [A·sec/mm]
傾き制御	3.0 [A/deg]	0.009 [A/(sec·deg)]	3.0 [A·sec/deg]
回転制御	0.01 [A/deg]	-	0.001 [A·sec/deg]

表 2.4 PID 制御ゲイン

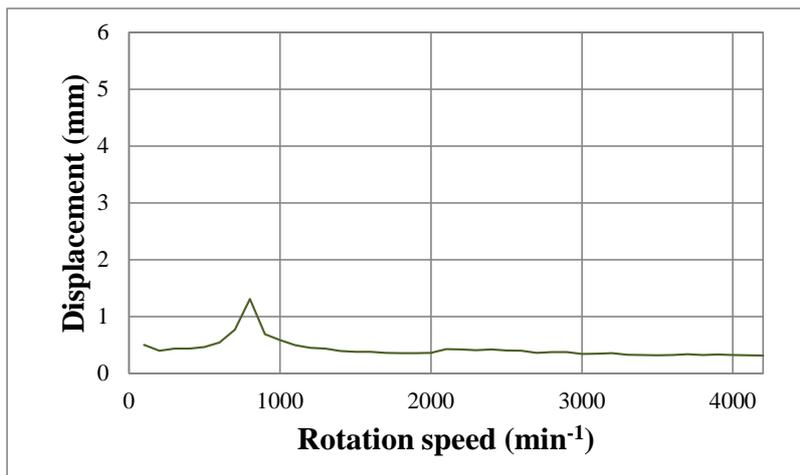
図 2.42 にケーシングのない空気中での振動振幅特性の測定結果を示す。図からわかるように各軸ともに回転数が 800rpm の時に振動が大きくなっている。これはロータの重心による径方向の共振が原因ではないかと考えられる。各軸においてすべての回転数で最大振幅が可動範囲よりも小さいことから、本磁気浮上モータはケーシング内において非接触で回転可能であるといえる。しかし、巻き線一括型磁気浮上モータよりも傾きが大きく振動しながら回転していることが明らかになった。また、今回の測定ではロータ・ステータ間のエアギャップを 3 mm としている。そのため高い回転数では回転トルクが足りずに振動が発生し、4200 rpm で浮上回転ができなくなってしまうものと考えられる。



Axial



Tilt



Radial

図 2.42 振動振幅特性

### 2.3.3 ポンプ特性

図 2.43 に流水実験装置を示す。磁気浮上ポンプは一組のインレットとアウトレットを持ち、ロータインペラが回転することでインレットから水が流入し、アウトレットから排出される。アウトレットから流れた水は流量計と圧力計を通して流量と揚程を測定される。磁気浮上モータの制御は 2 台のコントロール PC で行われ、16 個のリニアアンプから電流が印加される。

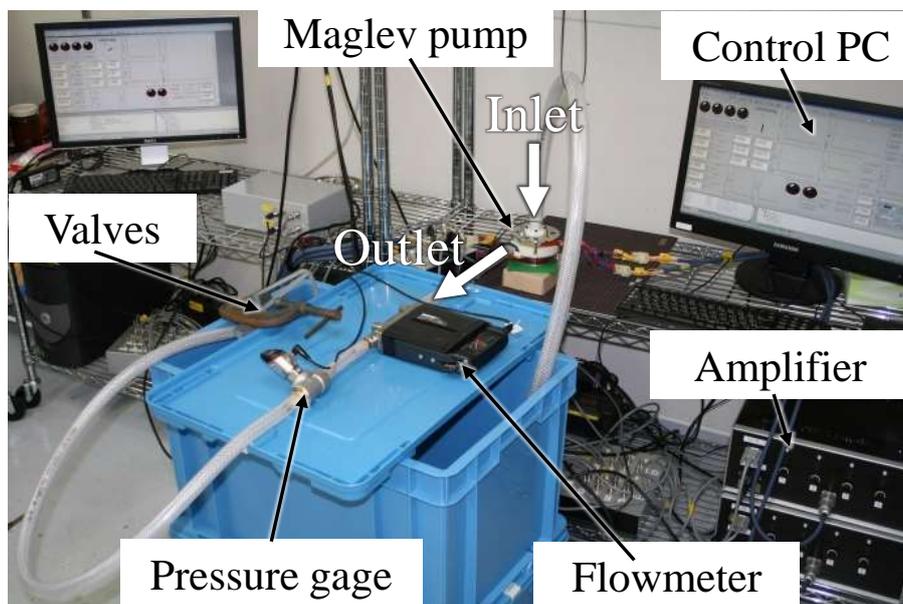


図 2.43 流水実験装置

・巻線一括型磁気浮上ポンプ

製作した実験装置のポンプ性能を明らかにするために、水を用いて、回転数  $1600 \text{ min}^{-1}$  ,  $2000 \text{ min}^{-1}$  ,  $2400 \text{ min}^{-1}$  において HQ カーブを測定した。測定結果を図 2.44 に示す。表 2.5 に実験時の浮上回転制御に用いた制御ゲインを示す。また、ロータ・ステータ間のエアギャップは片側  $3.0 \text{ mm}$  とした。

	<b>Kp</b>	<b>Kd</b>	<b>Ki</b>
軸方向制御	8.0 [A/mm]	0.013 [A/(sec·mm)]	2.5 [A·sec/mm]
傾き制御	2.5 [A/deg]	0.007 [A/(sec·deg)]	3.0 [A·sec/deg]
回転制御	0.03 [A/deg]	-	0.002 [A·sec/deg]

表 2.5 PID 制御ゲイン

図より最大流量は  $5.8 \text{ L/min}$  最大揚程は  $159 \text{ mmHg}$  という結果が得られた。また、回転数  $2400 \text{ min}^{-1}$  , 流量  $4.0 \text{ L/min}$  発生時、揚程  $110 \text{ mmHg}$  送出可能であることを確認した。この結果から、本磁気浮上ポンプは人の左心室を補助可能な性能を有することを明らかにした。

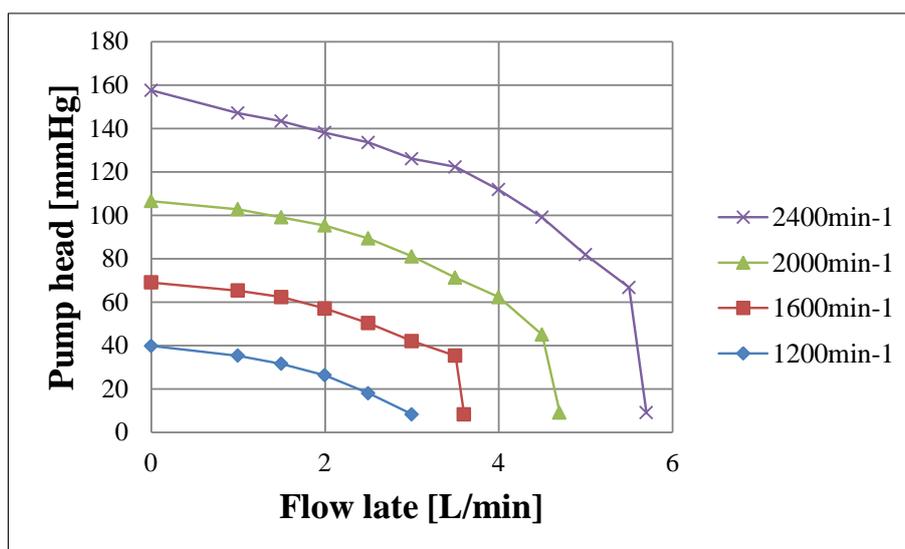


図 2.44 HQ カーブ (巻線一括型)

## ・巻線分割型磁気浮上ポンプ

製作した実験装置のポンプ性能を明らかにするために、水を用いて、回転数 1200, 1400, 1600, 1800  $\text{min}^{-1}$  において HQ カーブを測定した。測定結果を図 2.45 に示す。表 2.6 に実験時の浮上回転制御に用いた制御ゲインを示す。また、ロータ・ステータ間のエアギャップは片側 3.0 mm とした。

	<b>Kp</b>	<b>Kd</b>	<b>Ki</b>
軸方向制御	7.0 [A/mm]	0.011 [A/(sec·mm)]	3.0 [A·sec/mm]
傾き制御	4.0 [A/deg]	0.011 [A/(sec·deg)]	3.0 [A·sec/deg]
回転制御	0.02 [A/deg]	-	0.001 [A·sec/deg]

表 2.6 PID 制御ゲイン

図 2.43 より、最大流量は 7.0 L/min 最大揚程は 177 mmHg であることがわかる。また、回転数 1800  $\text{min}^{-1}$ 、流量 5.0 L/min 発生時、揚程 117 mmHg 送出可能であることを確認した。この結果から、本磁気浮上ポンプは人の左心室を補助可能な性能を有することを明らかにした。

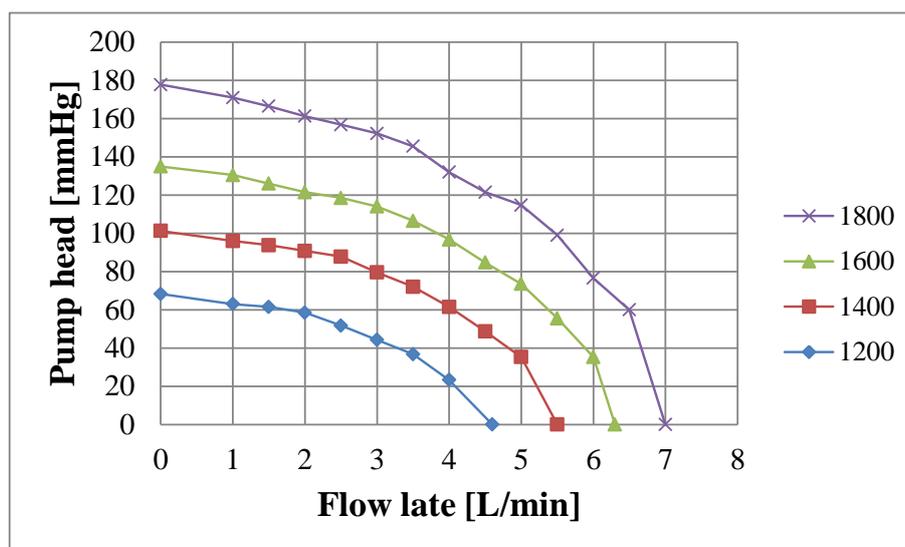


図 2.45 HQ カーブ (巻線分割型)

## 2.3.4 考察

巻線一括型磁気浮上ポンプと巻線分割型磁気浮上ポンプの比較を行う。まず、二つの磁気浮上ポンプの違いについて説明する。巻線一括型磁気浮上ポンプは浮上回転制御及び傾き制御を行うために上下のステータコイル一つ一つに独立した電流を流すために16個のリニアアンプを用いている。巻線分割型磁気浮上ポンプは浮上回転制御に6個、傾き制御に2個の計8個のリニアアンプを用いることで浮上回転制御及び傾き制御を行うことができる。これにより、巻線一括型では2台コントロールPCを用いていたところを1台に減らせることができ、装置全体の小規模化に成功した。

インパルス応答結果から全体的に巻線一括型磁気浮上モータよりも巻線分割型磁気浮上モータの方が速応性が良いことが明らかになった。しかし、巻線分割型磁気浮上モータは傾きにインパルス外乱を印加した際に他軸にも影響を及ぼしている。振動振幅の結果では巻線分割型磁気浮上モータは巻線一括型磁気浮上モータよりもすべての軸において振動が小さくなっていることが確認できる。流水実験においては実験結果を比較すると、人の左心室を補助可能な性能を有しているが、巻線分割型の方が浮上回転時の振動が小さいために低い回転数において高いポンプ特性を有していると考えられる。これらの結果から装置の小型化、高性能化、低消費電力化が可能な巻線分割型磁気浮上ポンプを用いて両心室補助可能な磁気浮上ポンプの開発を行う。

### 第3章 両心室補助人工心臓用磁気浮上ポンプの開発

#### 3.1 磁気浮上ポンプの構成

- ・従来の両心室補助人工心臓用磁気浮上ポンプ

図 3.1 に従来までに開発された両心室補助人工心臓用磁気浮上ポンプの構成を示す。構造としてはロータの下側に浮上回転用のステータを配置し、上側には傾き制御用のステータを配置する。ポンプケーシングはインレットとアウトレットを二組もち、ロータの上下にインペラを取り付ける。そして、ケーシング内でロータインペラが浮上回転することで二つの水流を作り出すことができる。

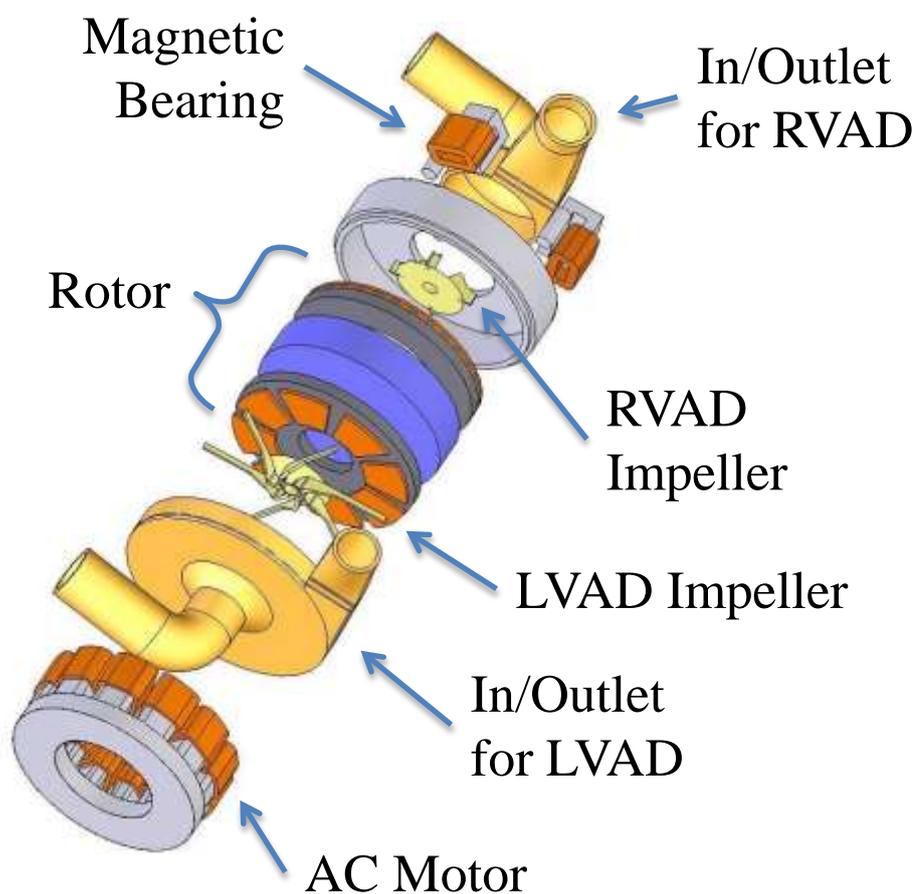


図 3.1 BiVACOR 型磁気浮上ポンプの構成

## ・提案する両心室補助人工心臓用磁気浮上ポンプ

図 3.2 に提案する磁気浮上ポンプの構成を示し、図 3.3 に磁気浮上ポンプの断面図を示す。磁気浮上モータの構成としては、非磁性体のシャフトで上部ロータと下部ロータを接続したロータの上下に同形状なステータを二つ配置し、浮上回転制御を行う。装置全体の低消費電力化、小規模化を図るために巻き線分割型磁気浮上モータを用いた。ロータの内側にインペラを配置し、上部ロータと下部ロータを仕切り板を挟んで接続し、ポンプケーシング内で浮上回転させることで二つの水流を作り出す構成とした。液体の流路としてはインレットから流入した液体がロータディスクの内側を通過しケーシング内に入り、ロータインペラが回転することで液体がアウトレットから排出される。従来の磁気浮上ポンプではインペラをロータの上下に配置していた。本磁気浮上ポンプはインペラをロータの内側に配置することでロータ・ステータ間のエアギャップを従来の磁気浮上ポンプより小さくすることが可能となり、従来の磁気浮上ポンプよりも高い回転トルクが得られることが期待できる。

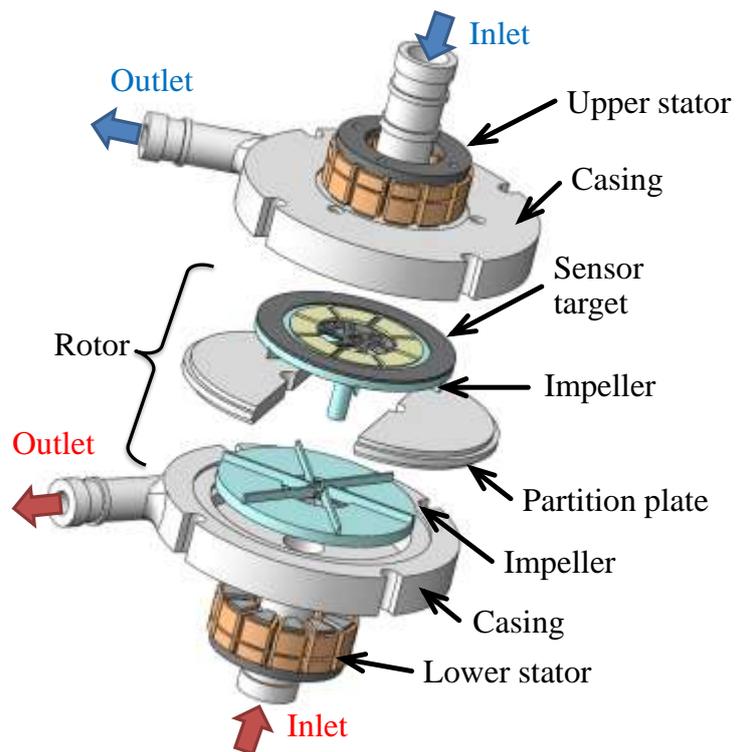


図 3.2 提案する磁気浮上ポンプの構成

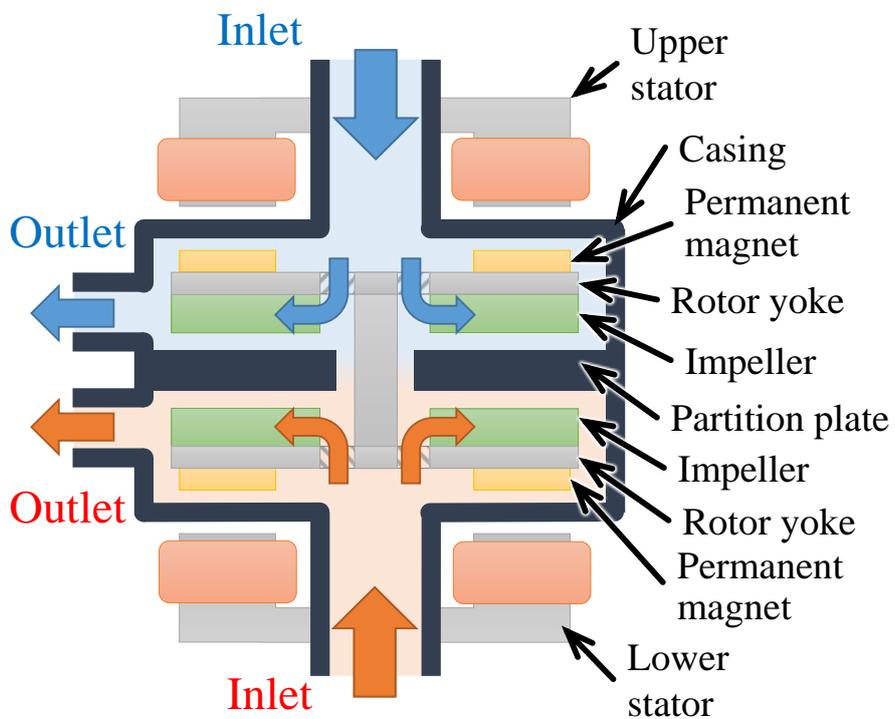


図 3.3 提案する磁気浮上ポンプの断面図

### ・磁気浮上モータの構成

提案する巻き線分割型磁気浮上モータの全体の構成を図 3.4 に示す。全体の構造としては、ディスク状のロータが中心に位置しており、ロータを挟み込むように同構造のステータが 2 つ上下に配置される。ロータは上部ロータ及び下部ロータを非磁性体のシャフトで接続することで構成され、上部ステータおよび下部ステータにより発生するアキシャル方向吸引力を釣り合わせることで支持される。ロータの軸方向位置、回転および径方向軸まわりの傾きを能動的に制御し、径方向位置は軸方向吸引力によって発生する受動安定性により受動的に支持する構造としている。ダブルステータ型の構造とすることで、小型ながらも高い制御性能と回転トルクを得ることができるモータとなっている。

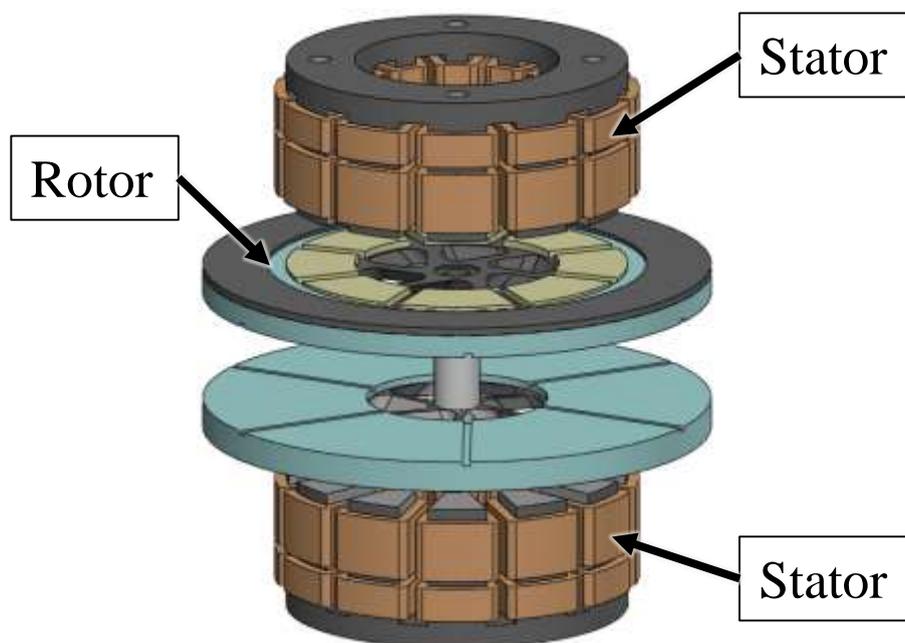


図 3.4 磁気浮上モータ構成

## ・ロータの構成

図 3.5 に両心室補助可能な磁気浮上ポンプ用に設計したロータのモデルを示す。図の左がロータ上部であり、右はロータ下部である。ロータの回転によって二組の水流を発生させることができるように、各ロータの内側インペラの設計を行った。今回製作した遠心ポンプは側板を一枚持つセミオープンインペラを採用した。

上部ロータ上面の外側にはセンサターゲットが取り付けられる用に設計し、下部ロータ下面の外側にはエンコーダ用の永久磁石が計 50 個取り付けられるように設計を行った。上部ロータ下面、下部ロータ上面にはインペラブレードを配置した。また、上下ともに内側には極対数が 4 となるように永久磁石が 8 枚ずつ配置されている。ロータディスクはインレットから流入してきた液体がロータの内側に入るように設計を行った。エンコーダ検出用の永久磁石の規格は直径 3.0mm 厚さ 1.0mm なので取り付けのために 3D で製作した際の誤差を考慮して、直径 3.3mm 深さ 1.3mm の穴を開けている。インペラブレードの高さは 3.0mm とした。

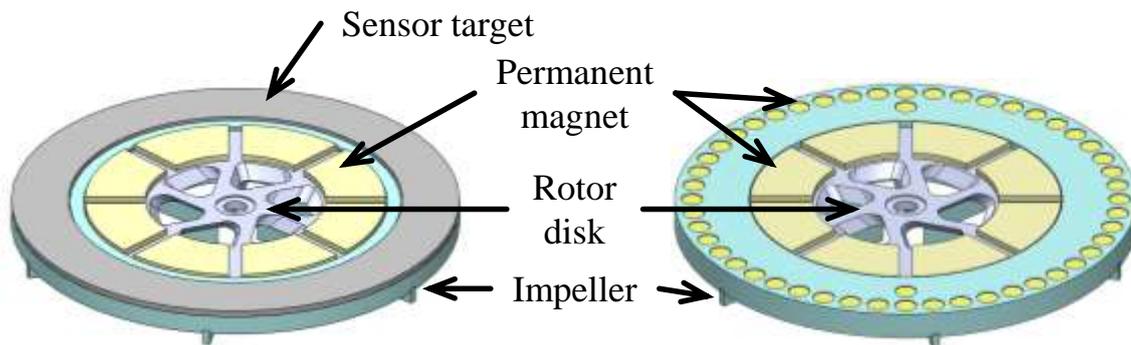


図 3.5 ロータモデル(左：上部ロータ上面，右：下部ロータ下面)

## ・ステータの構成

ステータは巻き線分割型磁気浮上モータ用に製作したものをしたので、説明を省略する。

## ・ポンプケーシングの構成

設計したポンプケーシングの説明をする。図 3.6, 図 3.7 は設計したポンプケーシング及び仕切り板であり図 3.8 はポンプケーシング全体である。図 3.6 より, 左が上部ケーシングであり, 右が下部ケーシングである。上部ケーシングにはインレットとアウトレットがあり, 渦電流変位センサが収まる空間が設けられている。下部ケーシングにはインレットとアウトレットがあり, エンコーダとして用いるホール IC が収まる空間が設けられている。上下ケーシングを仕切り板を挟んで配置した時に漏れを防ぐための O-リング用の溝ができるように設計した。仕切り板は  $\phi 6 \text{ mm}$  のシャフトが通るように中心に  $8 \text{ mm}$  の穴を開けた。ケーシング内部でインペラを内蔵したロータが回転することで二組の水流を作り出す仕組みになっている。今回製作するポンプケーシングの規格としては直径  $100 \text{ mm}$ , 厚さ  $28 \text{ mm}$  である。

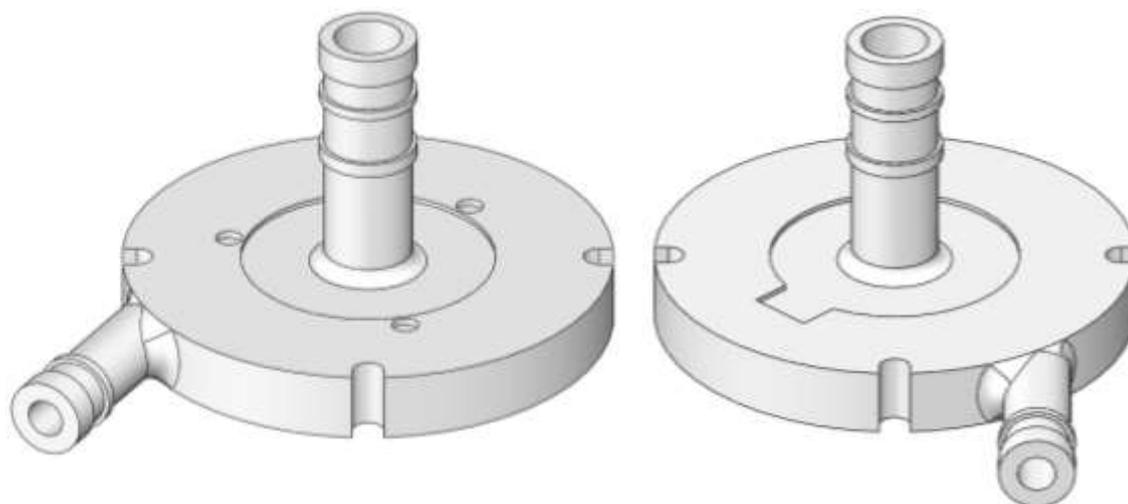


図 3.6 ポンプケーシングモデル(左：上部, 右：下部)



図 3.7 仕切り板

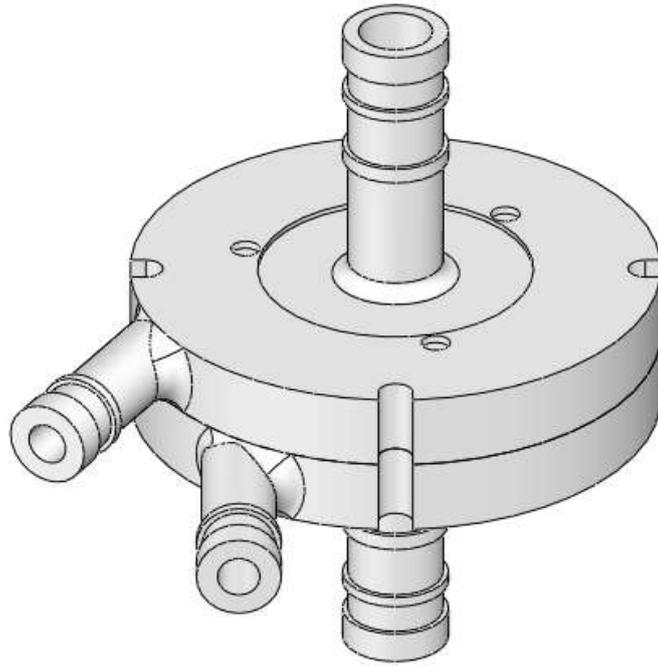


図 3.8 ポンプケーシング全体図

### ・磁気浮上ポンプの構成

本磁気浮上ポンプの3次元CADシステムを用いて設計した図を図3.9、断面図を図3.10に示す。図3.9のようにケーシングを上下二つのステータで挟み込むようにホルダーに固定している。それぞれがアキシアルベアリングレスモータとして機能することで、アキシアル方向変位とロータ傾きを支持しながらケーシング内のロータが回転する。

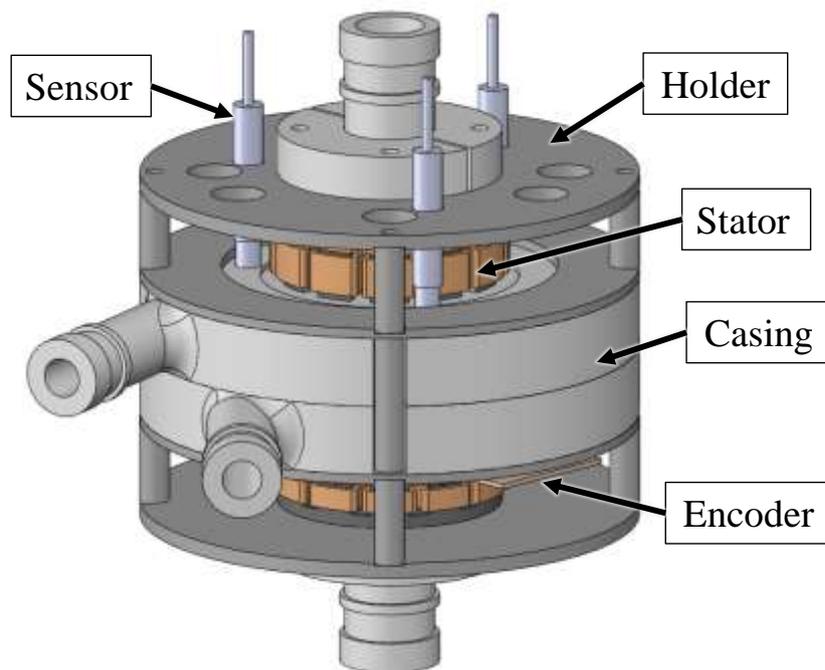


図3.9 磁気浮上ポンプモデル

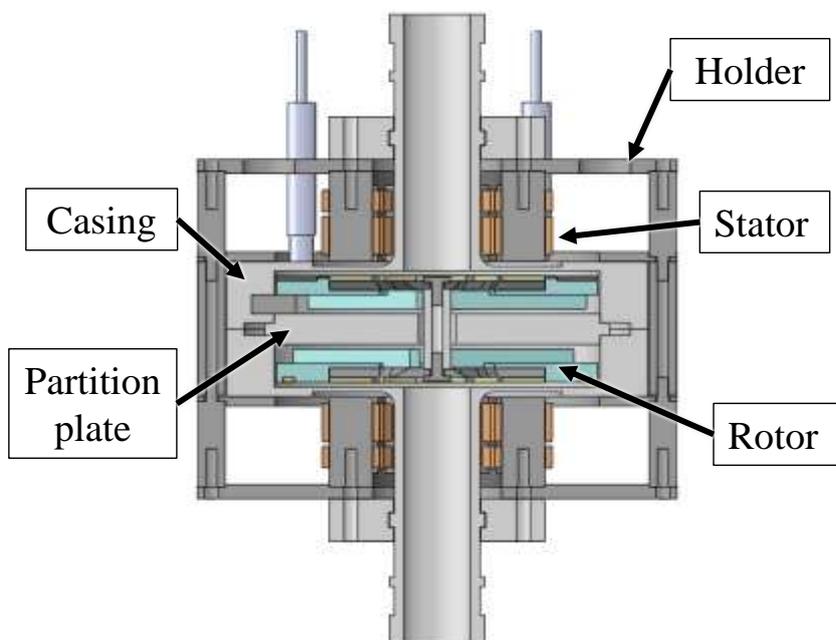


図3.10 磁気浮上ポンプ断面図

## 3.2 実験装置

- ・制御系の構成

左心室補助人工心臓用巻線分割型磁気浮上ポンプと同じものを用いたため、説明を省略する。

- ・センシング部の構成

渦電流変位センサとホールICは左心室補助人工心臓用巻線分割型磁気浮上ポンプと同じものを用いたため、説明を省略する。

## ・ロータの製作

実際に制作したロータを図 3.11 に示す。左の図が上部ロータ上面になっており、右は下部ロータ下面になっている。上部ロータには渦電流式変位センサを用いるためのセンサターゲットを配置している。その内側に磁性体であるロータディスクを配置し、その上に永久磁石を配置している。磁気浮上モータ用永久磁石は上下に 8 枚ずつ、計 16 枚用いた。ロータ全体にはアクリル接着剤によって薄い膜が貼られている状態となっており、直接流体と接触することを防いでいる。またセンサターゲットにおいても、錆防止の塗料を表面に付与することにより、錆び付くことを防止している。

完成したロータの詳細を以下に示す。

直径：67 [mm]

厚さ：各 4.5 [mm]

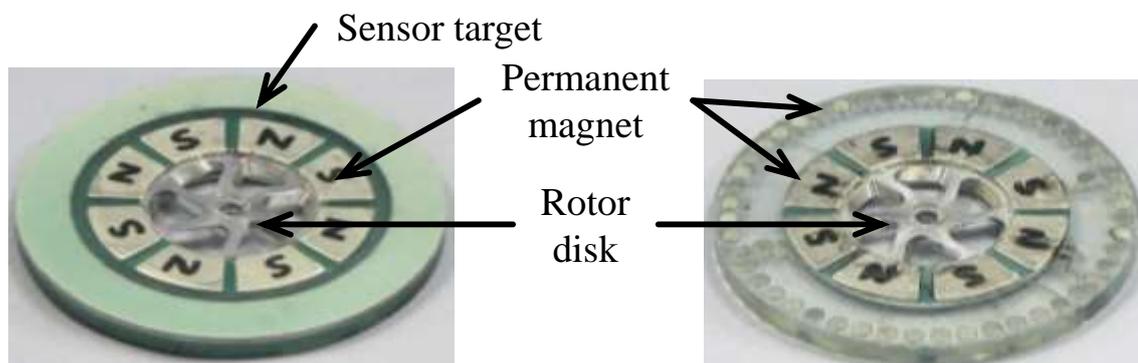


図 3.11 製作したロータ(左：ロータ上部, 右：ロータ下部)

## ・ステータの製作

ステータは左心室補助人工心臓用巻き線分割型磁気浮上ポンプのものと同じものを使用したため、説明を省略する。

## ・ポンプケーシングの製作

図 3.12 図 3.13 は実際に制作したポンプケーシング及び仕切り板である。図 3.12 の左は上部ケーシングであり、右は下部ケーシングである。原料としては Vero White Plus (白色硬化樹脂) を用いている。また、3D プリンターを用いてケーシングの製作を行った。仕切り板はアクリルを用いて製作した。

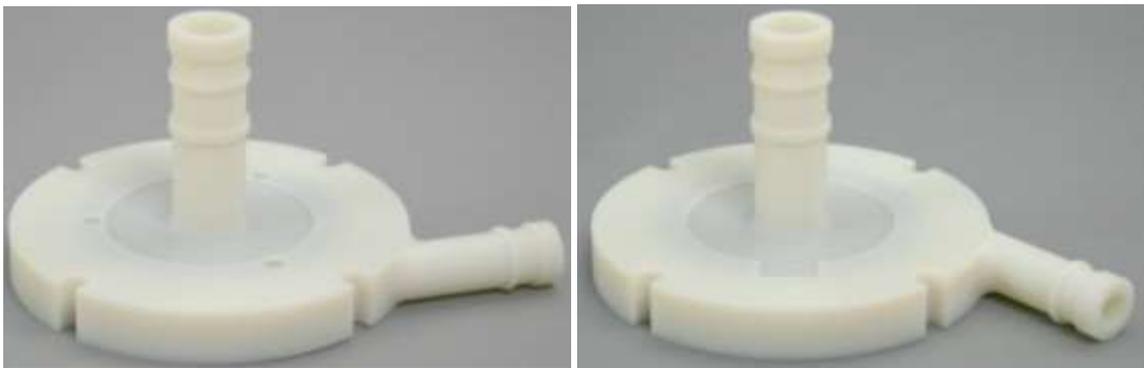


図 3.12 製作したポンプケーシング (左：上部, 右：下部)



図 3.13 製作した仕切り板

## ・磁気浮上ポンプの製作

図 3.14 に製作した磁気浮上ポンプを示す。ホルダー上部に 3 つの渦電流変位センサを固定して、ケーシング内のロータの変位を測定している。また、上部ホルダー及び下部ホルダーはケーシングのインレット部を固定具で固定している。これは実験する過程でケーシングに力がかかることで発生する破損を防ぐためである。軸方向の可動域は $\pm 1.0$  mm, 径方向の可動域は $\pm 0.5$  mm, 傾きの可動域は $\pm 1.94$  deg である。

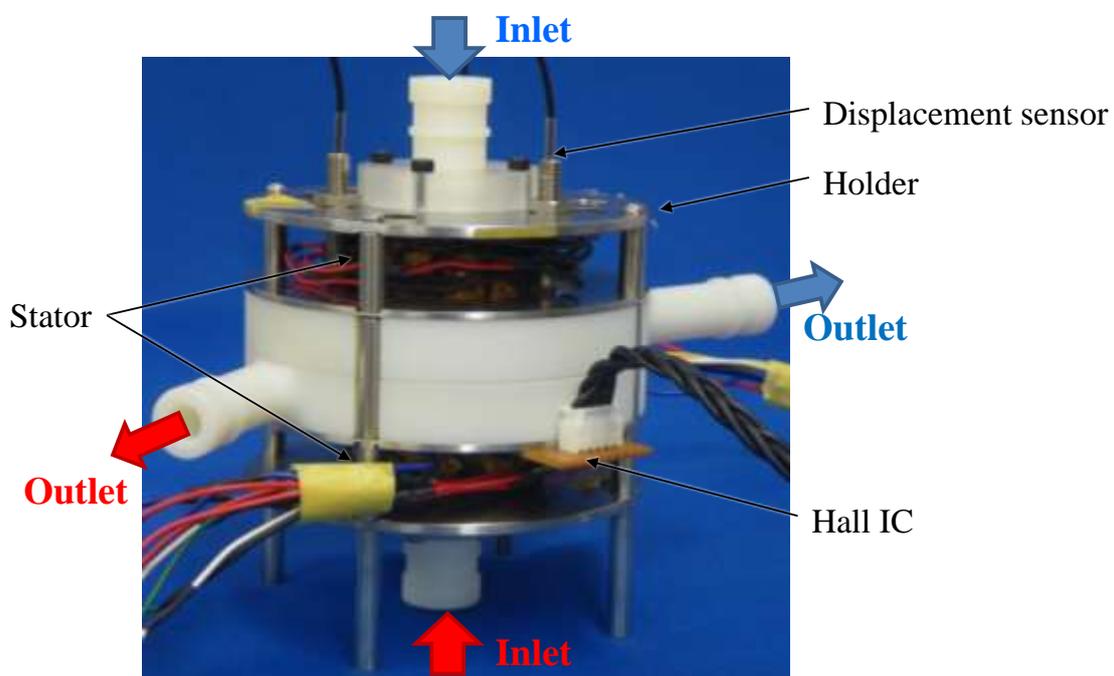


図 3.14 製作した磁気浮上ポンプ

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 浮上特性

製作した実験装置の磁気浮上制御性能を明らかにするために空気中でインパルス応答の確認を行った。ロータを上下ステータの中央位置で安定に磁気浮上制御した状態でロータにインパルス外乱を印加したとき、軸方向変位  $z$  と傾き  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  をそれぞれ測定しプロットした。インパルス外乱を印加後、ロータの中心位置に素早く戻ることができるかを確認する。軸方向のインパルス応答を測定する際にはロータの重心が約 0.1mm 変位するインパルス外乱を印加した。傾きのインパルス応答を測定する際には各傾き方向に約 0.1deg 変位するインパルス外乱を印加した。

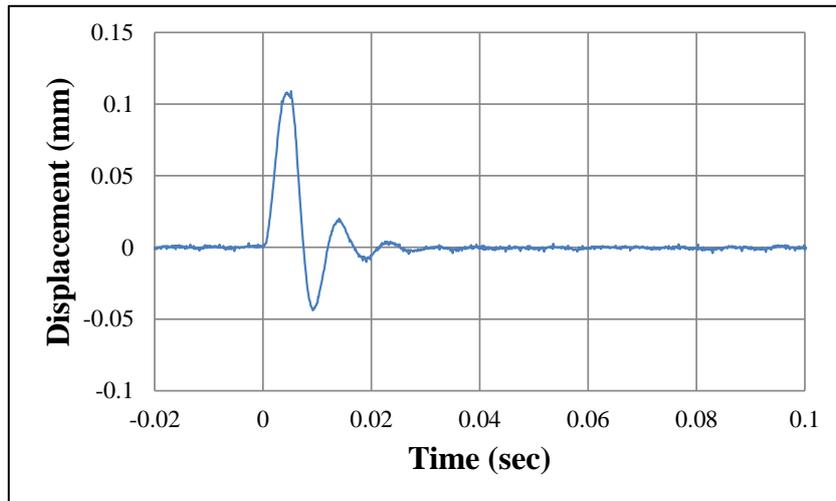
実験を行った際のベアリングレスモータのPIDコントローラの制御ゲインを表3.1に示す。

	<b>Kp</b>	<b>kd</b>	<b>Ki</b>
軸方向制御	6.0 [A/mm]	0.011 [A/(sec·mm)]	3.0 [A·sec/mm]
傾き制御	3.0 [A/deg]	0.008 [A/(sec·deg)]	3.0 [A·sec/deg]

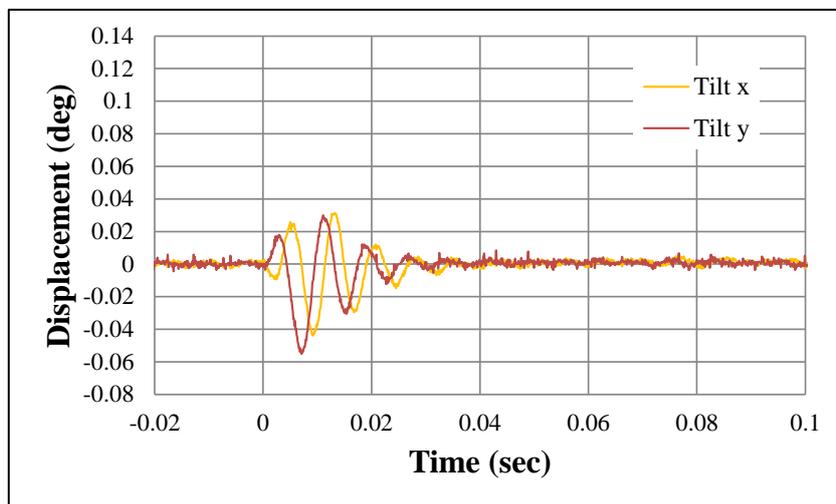
表 3.1 PID 制御ゲイン

図 3.15 に軸方向  $z$  が約 0.1mm 変位するインパルス外乱を与えたときの実験結果を示す。

実験結果より、ロータ変位振動が最大変位の±5%以下になるまでに要した時間は 0.0200 sec と、非常に短い時間で外乱印可前の浮上位置に戻ることが確認された。これにより速応性がよいことが明らかになった。また、傾きにもほとんど影響を及ぼしていないことが確認でき、外乱印可後も安定した浮上が継続できていることが確認できた。



Axial

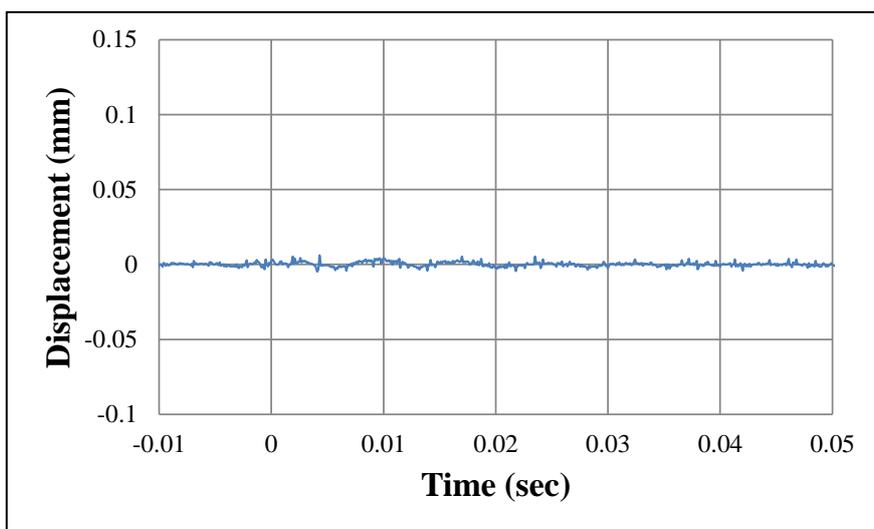


Tilt

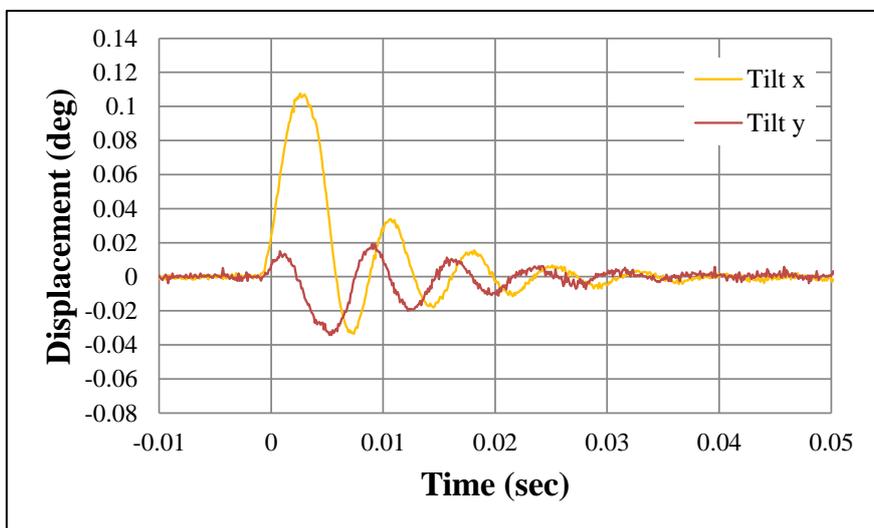
図 3.15 インパルス応答 (軸方向変位)

図 3.15 に傾き $\theta_x$ が約 0.1deg 変位するインパルス外乱を与えたときの実験結果を示す。

実験結果より，ロータ変位振動が最大変位の $\pm 5\%$ 以下になるまでに要した時間は 0.0236 sec と，非常に短い時間で外乱印可前の浮上位置に戻ることが確認された。これにより速応性がよいことが明らかになった。また，外乱印可後も安定した浮上が継続できていることが確認できた。軸方向と y 軸周りの傾きどちらにもあまり影響が出ていないことが確認できる。



Axial



Tilt

図 3.16 インパルス応答 (傾き $\theta_x$ )

### 3.3.2 振動振幅特性

製作した実験装置の浮上回転制御性能を明らかにするために浮上回転時の各軸の振動振幅特性の確認を行った。空気中でロータの軸方向 $z$ ・傾き方向 $\theta_x, \theta_y$ を中心位置において安定に磁気浮上制御し、ロータをある回転数で回転させた時の各軸方向の変位を一定時間記録する。その一定時間内における定常浮上位置から正方向への変位の最大値と、負方向への変位の最大値の差をその回転数の振動振幅とした。

PID コントローラの制御ゲインを一組決め、すべてその値において 6200rpm まで 100 rpm ごとに測定を行った。ロータの可動範囲と最大振幅を表 3.2 に示す。浮上回転時の振動振幅が最大値未満であるかどうかを確認することで、ロータがどこにも接触することなく回転していること、すなわち回転時においても浮上制御が破綻しないことを明らかにする。

実験を行った際のベアリングレスモータのPID コントローラの制御ゲインを表 3.3 に示す。

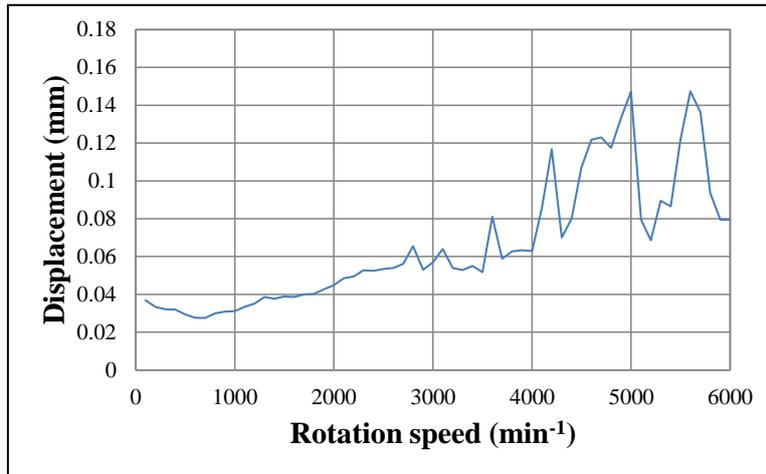
	軸方向	径方向	傾き $\theta_x$	傾き $\theta_y$
可動範囲	$\pm 1.0$ [mm]	$\pm 2.7$ [mm]	$\pm 1.9$ [deg]	$\pm 1.9$ [deg]
最大振幅	2.0 [mm]	5.4 [mm]	3.8 [deg]	3.8 [deg]

表 3.2 可動範囲, 最大振幅

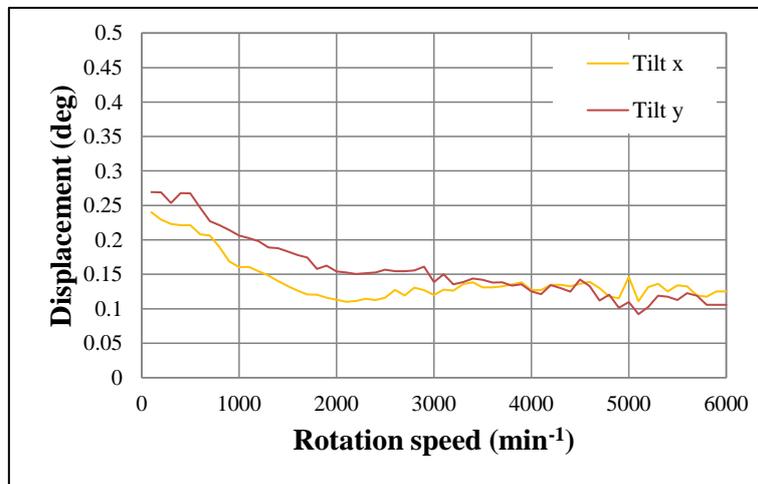
	<b>Kp</b>	<b>kd</b>	<b>Ki</b>
軸方向制御	6.0 [A/mm]	0.01 [A/(sec·mm)]	3.0 [A·sec/mm]
傾き制御	1.1 [A/deg]	0.005 [A/(sec·deg)]	2.5 [A·sec/deg]
回転制御	0.1 [A/deg]	-	0.01 [A·sec/deg]

表 3.3 PID 制御ゲイン

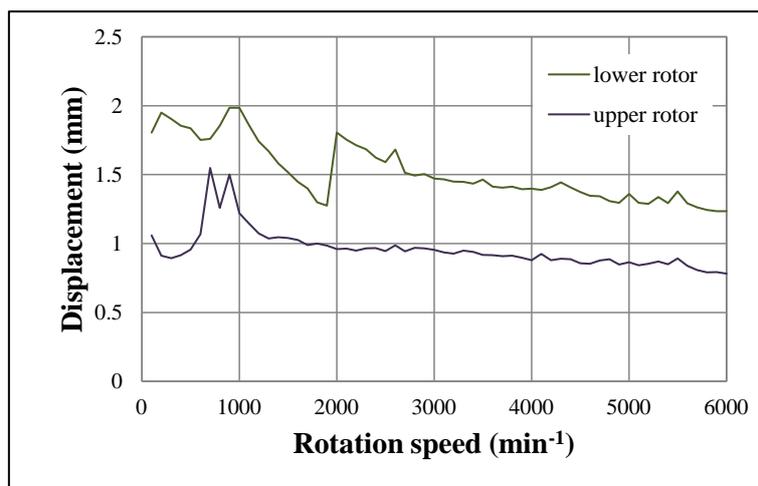
図 3.17 にケーシングのない空気中での振動振幅特性の測定結果を示す。図からわかるように径方向変位の振動の大きさが下部ロータの方が上部ロータよりも振動が大きくなっている。原因として製作誤差による重心のずれや制御のおける上下の剛性の違いが考えられる。また、低速回転時は傾きと径方向の振動が大きく、高速回転時は軸方向の振動が大きくなっていることがわかる。これはロータのずれに重心による共振が原因であり、低速時は径方向の共振、高速時は軸方向の共振が影響を与えていると考えられる。



Axial



Tilt

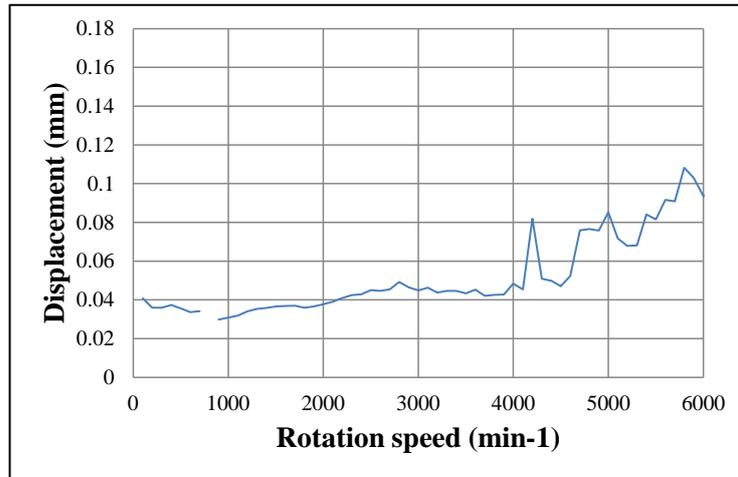


Radial

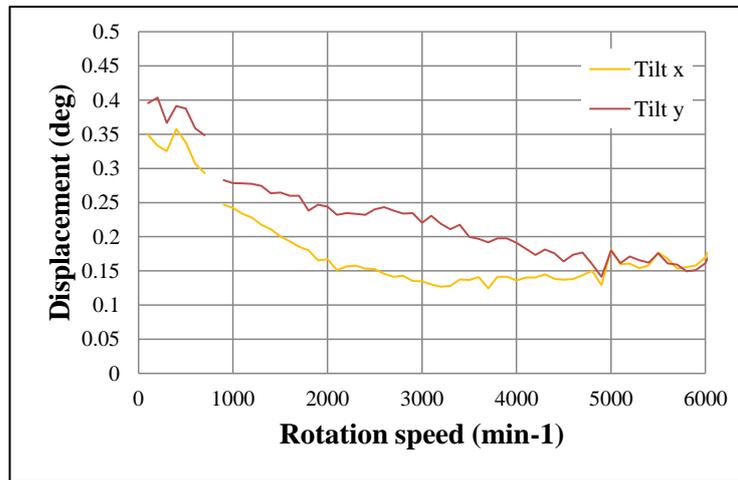
図3.17 振動振幅特性

上向きで測定した際に発生した上下ロータの径方向変位のずれの原因を明らかにするために製作した実験装置の逆向きでの浮上回転時の各軸の振動振幅特性の確認を行った。空气中でロータの軸方向 $z$ ・傾き方向 $\theta_x, \theta_y$ を中心位置において安定に磁気浮上制御し、ロータをある回転数で回転させた時の各軸方向の変位を一定時間記録する。その一定時間内における定常浮上位置から正方向への変位の最大値と、負方向への変位の最大値の差をその回転数の振動振幅とした。制御ゲインは上向きで振動振幅特性を測定した時と同じ値を用いた。

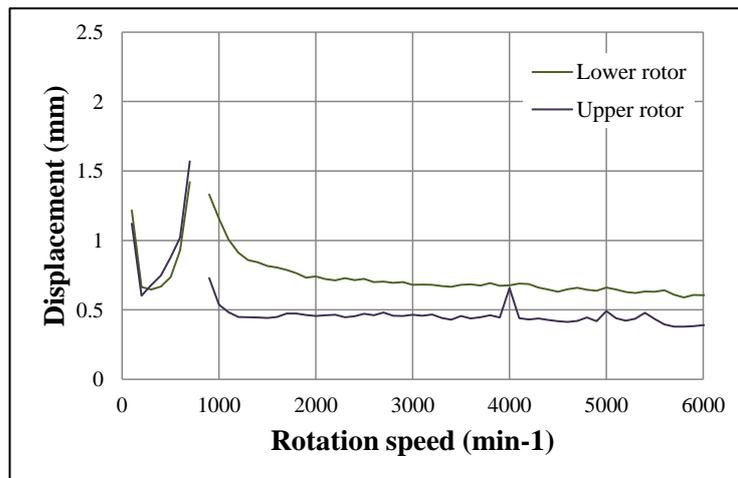
図3.18に逆向きにおけるケーシングのない空气中での振動振幅特性の測定結果を示す。回転数 $800 \text{ min}^{-1}$ 時は浮上回転を行うことができなかったため測定を行わなかった。図からわかるように径方向変位の振動の大きさが下部ロータの方が上部ロータよりも振動が大きくなっている。上向きと逆向きのどちらも下部ロータの方が上部ロータよりも振動が大きいことから、径方向の振動の違いの原因は、制御方法により上下ステータから発生する磁力の強さが異なるため、上下で剛性が異なることが原因であると考えられる。また、上向きと逆向きのどちらも低速回転時は傾きと径方向の振動が大きく、高速回転時は軸方向の振動が大きくなっていることがわかる。これはロータのずれに重心による共振が原因であり、低速時は径方向の共振、高速時は軸方向の共振が影響を与えていると考えられる。



Axial



Tilt



Radial

図 3.18 振動振幅特性 (逆向き)

### 3.3.3 ポンプ特性

製作した磁気浮上ポンプが人の心臓を補助できる性能を有しているか確かめるために、流水実験を行った。実験の様子を図 3.19 に示す。図より磁気浮上ポンプは二組のインレットとアウトレットに接続される。磁気浮上ポンプ内のロータインペラが回転することによって二組のインレットから水が流入し、アウトレットから排出される。アウトレットから流れ出た水は流量計と圧力計と通じて流量と揚程を測定する。その後、バルブで流量を調整する。磁気浮上モータはコントロール PC を用いて制御され、リニアアンプより電流を流す。今回の実験では上側インレットから流入した水のアウトレットを完全に開放した状態でもう一方のアウトレットの流量を調整することで人の心臓を補助できる性能を有しているか確認する。ロータ・ステータ間のエアギャップは 2.5 mm とし、回転数  $1200\text{min}^{-1}$ 、 $1400\text{min}^{-1}$ 、 $1600\text{min}^{-1}$ 、 $1800\text{min}^{-1}$  時における流量と揚程を測定した。測定結果を図 3.20 に示す。

図より、最大流量は  $8.3\text{ L/min}$ 、最大揚程は  $170\text{ mmHg}$  ということがわかる。回転数  $1800\text{min}^{-1}$  で回転している時において流量  $4.0\text{ L/min}$ 、揚程  $117\text{ mmHg}$  という結果が得られた。これにより、片側を完全に開放した状態で人の左心室を補助するに十分な性能を有していることが明らかになった。また、右心室補助に必要なポンプ性能は左心室よりも低く、今回は右心室補助用のアウトレットを完全に開放して実験を行った事から、本磁気浮上ポンプは左心室と右心室を同時に補助可能な性能を有していると考えられる。

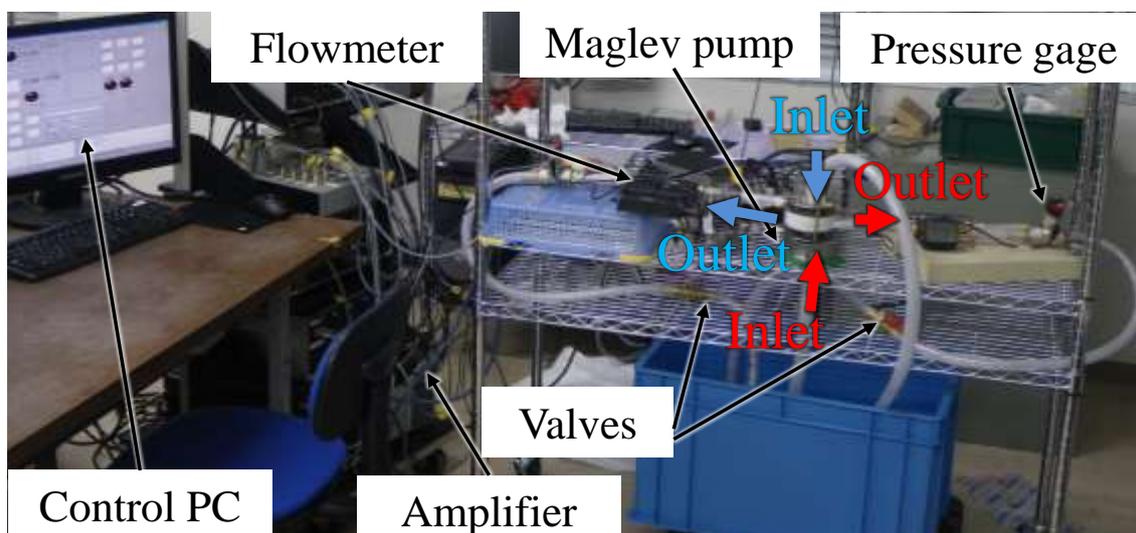


図 3.19 流水実験の様子

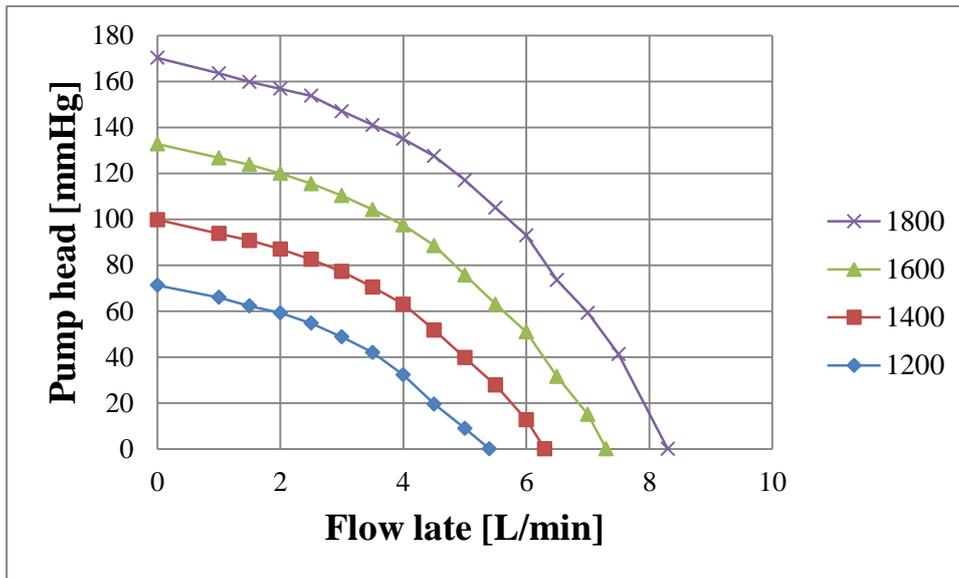


図 3.20 HQ カーブ (両心室補助用)

### 3.3.4 考察

製作した磁気浮上ポンプについて考察する。インパルス応答では他軸の外乱が傾きにあまり影響を及ぼしていなかったが、振動振幅特性では傾きに大きく振動しながら回転していることが確認できる。原因としてはインパルス応答では傾きへの影響があまり大きくないことから、重心のずれが原因であるとは考えにくい。そこで、今回提案した磁気浮上モータのロータは実験装置を組み立てる際に上部ロータと下部ロータの位置を人の目で合わせて接続しているため、上下ロータで永久磁石の位置がずれてしまうことが原因の一つであると考えられる。流水実験を行った際にも、傾きに大きく振動しながら回転していることが確認できた。これは浮上回転で発生している傾きの振動が水の流れにより大きくなっているためであると考えられる。そのため、安定した浮上回転を実現するために今後はロータの組み立て方や、液体との対向面積を小さくする方法を考慮する必要がある。また、流水実験においてロータ・ステータ間のエアギャップを片側 **3.0 mm** として実験を行ったところ、必要なポンプ性能を測定することができなかった。エアギャップが **2.5 mm** の時は必要な性能が得られたことから、エアギャップが広いことで回転トルクが足りなくなってしまうことが原因であると考えられる。そのため、さらにエアギャップを短くすることでより高いポンプ特性が得られると期待できる。また、今回製作したポンプケーシングは耐久性に問題があったため、ポンプケーシングの耐久性についても今後考慮する必要がある。

## 第4章 結論

### 4.1 まとめ

左心室及び両心室補助人工心臓への応用を目的とした磁気浮上ポンプの開発し、試作機の浮上特性及び振動振幅特性、ポンプ特性を確認した。

左心室補助人工心臓への応用を目的とした磁気浮上ポンプにおいて、製作した磁気浮上ポンプは心臓病患者の心機能を補助するために必要な性能を有していることを明らかにした。また、巻き線一括型磁気浮上モータでは16個のリニアアンプを用いていたが、巻き線分割型磁気浮上モータでは用いるリニアアンプの数を8個に減らすことに成功し、装置全体の小規模化を行うことができた。

両心室補助人工心臓への応用を目的とした磁気浮上ポンプにおいて、一つのデバイスで二つの水流を発生させる磁気浮上ポンプの製作に成功し、人の左心室を補助可能なポンプ特性有していることを明らかにした。しかし、浮上回転を行った際に傾きに振動が発生しているため、制御方法の再検討が必要である。

### 4.2 今後の展望

インペラやポンプケーシングの形状や制御方法を再度検討し、現在よりも高い性能を有する磁気浮上ポンプを製作する。また、今回製作した磁気浮上ポンプでは大きさや形式上、人体に埋め込むことはできないため、ポンプケーシングの形状の見直しやポンプ全体の小型化などをはかり、実際に補助人工心臓として用いられる磁気浮上ポンプの開発を目指す。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，終始熱意あるご指導と助言を賜りました群馬大学電気電子工学科 石川 赴夫 教授，群馬大学工学部電気電子工学科 栗田 伸幸 准教授に心から感謝と御礼を申し上げます。

主査，副査としてご指導頂きました橋本 誠司 教授，高橋 俊樹 准教授に感謝致します。

最後に，本研究を進めるにあたり様々な協力や激励をいただきました石川研究室の皆様に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] Nobuyuki Kurita, Daniel L Timms, Nicholas Greatrex, Toru Maszawa, “Axial Magnetic Bearing Development for the BiVACOR rotary BiVAD/TAH”, Proc. of 11th ISMB, 217-224 (2008)
  
- [2] 岡田養二，回転型人工心臓ポンプの試作，日本機械学会 Dynamics and Design Conference '99 講演論文集，1999
  
- [3] 高田敬夢，ロータの傾き制御機能を有するダブルステータ型アキシヤル磁気浮上モータの開発，平成23年度群馬大学電気電子工学科卒業論文，2012
  
- [4] 高橋洋平，両心室補助人工心臓への応用を目的としたアキシヤル磁気浮上モータの開発，平成 23 年度群馬大学大学院電気電子工学専攻修士論文，2012
  
- [5] 鈴木玄理，傾き制御機能を有するダブルステータ型アキシヤル磁気浮上モータの開発，平成 24 年度群馬大学電気電子工学科卒業論文，2013
  
- [6] 高田敬夢，補助人工心臓への適用を目的としたアキシヤルベアリングレスモータの開発，平成 25 年度群馬大学大学院電気電子工学専攻修士論文，2014
  
- [7] Nobuyuki Kurita, Daniel L Timms, Nicholas Greatrex, Toru Maszawa, “Axial Magnetic Bearing Development for the BiVACOR rotary BiVAD/TAH” , Proc. of 11th ISMB, 217-224 (2008)

[8] 増澤 徹, 佐々木 瑛祐, ダニエル L ティムス, “両心補助人工心臓 BiVACOR 用磁気浮上モータ”, 日本 AEM 学会誌 Vol. 18 No.2