

超伝導磁気浮上を適用した半導体製造用
非接触スピンの処理装置の要素開発研究
— 非接触スピンの実用化検討 —

齋藤 公世

新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程

電気情報工学専攻

目次

はじめに

第 1 章 序論

1. 1 背景

- 1.1.1 スピン処理装置の構造
- 1.1.2 現状のスピン処理装置の問題点
- 1.1.3 問題点解決のための方策

1. 2 本論文の構成

第 2 章 超伝導浮上方式

2. 1 浮上要素

- 2.1.1 HTS バルクと浮上マグネット
- 2.1.2 スラスト浮上方式
- 2.1.3 ラジアル浮上方式

2. 2 駆動要素

- 2.2.1 磁気カップリング

第 3 章 スラスト浮上方式

3. 1 浮上要素

- 3.1.1 ターンテーブルの磁気回路
- 3.1.2 HTS バルクの構成
- 3.1.3 実験機の構成

3. 2 スラスト浮上方式の静特性

- 3.2.1 ターンテーブルの x 軸剛性
- 3.2.2 ターンテーブルの z 軸剛性

3. 3 駆動要素

- 3.3.1 アキシヤル磁気カップリング
- 3.3.2 必要トルクの計算
- 3.3.3 磁気カップリングの磁気回路
- 3.3.4 磁気カップリングの特性

3. 4 スラスト浮上方式の動特性

- 3.4.1 スラスト浮上実験機
- 3.4.2 ターンテーブルの x 軸フレ
- 3.4.3 ターンテーブルの z 軸フレ

- 3.4.3 ターンテーブルのフレ改善
 - 3. 5 HTS バルクの改善
 - 3.5.1 HTS バルクの形状
 - 3.5.2 ターンテーブルの x 軸剛性
 - 3.5.3 ターンテーブルの z 軸剛性
 - 3. 6 磁気カップリングの改善
 - 3.6.1 磁気回路の改善
 - 3.6.2 カップリングの特性
 - 3. 7 スラスト浮上方式の改善
 - 3.7.1 ターンテーブルの x 軸フレ
 - 3.7.2 ターンテーブルの z 軸フレ
 - 3. 8 パッシブ制御
 - 3.8.1 パッシブ制御の原理
 - 3.8.2 ターンテーブルの x 軸フレ
 - 3.8.3 ターンテーブルの z 軸フレ
 - 3. 9 スラスト浮上方式のまとめ
 - 3.9.1 スピナとしての性能
- 第 4 章 ラジアル浮上方式
- 4. 1 浮上要素
 - 4.1.1 浮上体の磁気回路
 - 4.1.2 HTS バルクの構成
 - 4.1.3 実験機の構成
 - 4. 2 ラジアル浮上方式の静特性
 - 4.2.1 浮上体の x 軸剛性
 - 4.2.2 浮上体の z 軸剛性
 - 4. 3 駆動要素
 - 4.3.1 アキシヤル磁気カップリング
 - 4. 4 ラジアル浮上方式の動特性
 - 4.4.1 ターンテーブルの x 軸フレ
 - 4.4.2 ターンテーブルの z 軸フレ
 - 4. 5 パッシブ制御
 - 4.5.1 パッシブ制御の原理
 - 4.5.2 ターンテーブルの x 軸フレ
 - 4.5.3 ターンテーブルの z 軸フレ

- 4. 6 その他のフレ改善
 - 4.6.1 ターンテーブルの低慣性化
 - 4.6.2 ターンテーブルの x 軸フレ
 - 4.6.3 ターンテーブルの z 軸フレ
- 4. 7 ラジアル浮上方式のまとめ
 - 4.7.1 スピナとしての性能

第5章 低慣性スラスト浮上方式

- 5. 1 低慣性スラスト浮上方式の検討
 - 5.1.1 低慣性スラスト浮上方式検討の目的
- 5. 2 浮上要素
 - 5.2.1 ターンテーブルの磁気回路
 - 5.2.2 バルクの構成
- 5. 3 駆動要素
 - 5.3.1 電磁誘導カップリング
- 5. 4 低慣性スラスト浮上方式の静特性
 - 5.4.1 ターンテーブルの x 軸剛性
 - 5.4.2 ターンテーブルの z 軸剛性
- 5. 5 低慣性スラスト浮上方式の動特性
 - 5.5.1 ターンテーブルの x 軸フレ
 - 5.5.2 ターンテーブルの z 軸フレ
- 5. 6 低慣性スラスト浮上方式のまとめ
 - 5.6.1 スピナとしての性能

第6章 超伝導浮上体の回転時フレの解析と対策

- 6. 1 浮上体に作用する力
 - 6.1.1 超伝導浮上に於けるマイスナー効果
 - 6.1.2 超伝導浮上に於けるピン止め効果
 - 6.1.3 駆動カップリングによる調心効果
 - 6.1.4 遠心力
 - 6.1.5 ジャイロ効果
- 6. 2 浮上回転体に存在するセンタ
 - 6.2.1 幾何センタ
 - 6.2.2 磁気センタ
 - 6.2.3 重心
 - 6.2.4 回転軸

- 6. 3 フレ発生のメカニズム
 - 6.3.1 低速回転領域
 - 6.3.2 高速回転領域
 - 6.3.3 中速回転領域
- 6. 4 フレ低減対策
 - 6.4.1 センタ統合化
 - 6.4.2 調整 1
 - 6.4.3 調整 2
- 6. 5 調整 1 とその効果
 - 6.5.1 幾何センタ調整
 - 6.5.2 x 軸のフレ波形
 - 6.5.3 調整 1 後の動特性
- 6. 6 調整 2 とその効果
 - 6.6.1 重心調整
 - 6.6.2 x 軸のフレ波形
 - 6.6.3 z 軸のフレ波形
 - 6.6.4 回転軸の移動
 - 6.6.5 調整 2 後の動特性
- 6. 7 フレ解析と対策のまとめ
 - 6.7.1 センタ統合化の効果
 - 6.7.2 センタ統合化の高精度化

第 7 章 結論

- 7. 1 浮上方式のまとめ
 - 7.1.1 3 浮上方式の比較
 - 7.1.2 低慣性スラスト浮上方式の開発のポイント
- 7. 2 今後の研究課題
 - 7.2.1 課題 1
 - 7.2.2 課題 2
 - 7.2.3 課題 3

参考文献

謝辞

はじめに

本稿は、高温超伝導体を利用した磁気浮上現象を、半導体の製造時に使用するスピナ処理装置（スピナ）に応用し、処理物を搭載するターンテーブルをチャンバ内に空中浮上させたまま、高速回転させる装置を設計し、実用化するために、重要要素について検討を行ったものである。

超伝導現象は 1911 年に発見された現象であるが、絶対温度 4K 近傍の極低温まで冷却しなければ生じない現象であるため、応用商品の実用化には大きな壁があった。

超伝導の研究が大きく動き出すのは 1986 年に従来の超伝導の常識を破る、高い温度でも超伝導現象を示す高温超伝導体（HTS）が発見されてからである。

この HTS はその後、数年の間に素材研究が進み、臨界温度（ T_c ）が 100K 超えるものが発見され、液体窒素の温度 77K の冷却でも使用できることから、今後、様々な応用製品が開発されていくものと予想される。しかし、現時点では、大量生産されるまでに至っていないので、未だ素材のコストが高く応用範囲は限られてくるが、B to B の大規模な装置には十分応用が可能である。(5)

一方、半導体製造時に使用するスピナは、半導体の高密度化と高信頼性化の要求により、装置から発生するパーティクル（微細なゴミ）の問題がクローズアップされている。そこで、第二種超伝導体のピン止め効果を利用し、最大の特徴である磁気浮上により、独立空間内において非接触状態で様々な処理を行うことで、半導体、半導体製造用マスク等の製造工程を完全無塵化した、半導体製造用スピナの要素開発を開始することとした。

HTS を利用したスピナの開発要素としては、処理物を搭載するターンテーブルを浮上させるための浮上要素と、浮上したターンテーブルを浮上状態で非接触回転させるための駆動要素の 2 つが挙げられる。浮上要素は、HTS の形状・配置及び、ターンテーブルに埋め込まれた浮上マグネットの形状・配置及び、両者の対向状態について検討を行っている。駆動要素は、ターンテーブルを浮上状態で回転させることから、磁気カップリング、電磁誘導カップリングの要素について検討を行っている。

本研究では浮上要素、駆動要素の組合せにより 3 種類の実験機を製作したので、性能確認を行った結果について述べる。

実験機ではターンテーブルのフレが目標の性能に達しなかったため、浮上回転体のフレが発生するメカニズムを解明し、根本的なフレ低減の対策を考案している。最終的にはその対策案について簡易実験を行い、有効性の検証を行ったので、その結果について述べる。

第1章 序論

1.1 背景

1.1.1 スピン処理装置の構造

半導体製造に於けるスピン処理装置は主に、フォトマスク、シリコンウエハー上のコーティング、洗浄工程に用いられている。

コーティング工程は、回転ターンテーブルの上にフォトマスク、シリコンウエハー等の基板を搭載し、基板上にフォトレジスト（単にレジストとも言う）等の処理液を滴下した後、ターンテーブルを高速回転させることで、遠心力により、数千オングストローム台の非常に薄いレジスト膜を基板上に均一かつ平滑に塗布するものである。概念図を図 1-1-1 に示す。

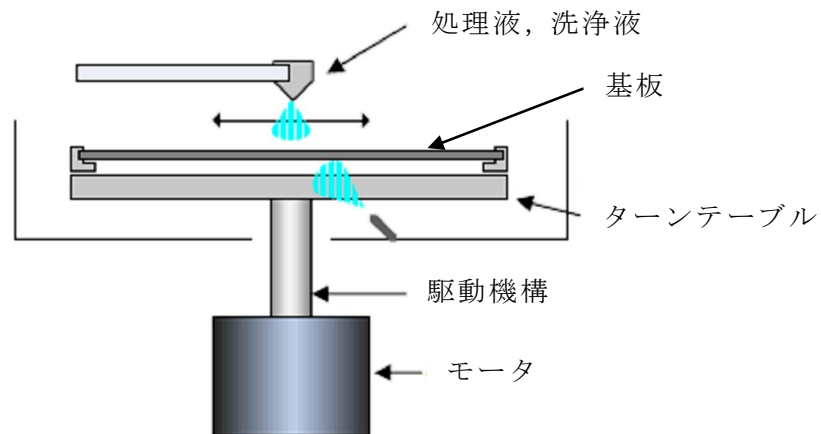


図 1-1-1 スピン処理装置概念図

レジストは光によって反応する化学物質を溶媒に溶かしたもので、基板上に半導体の回路パターンを照射、感光させた後で、回路網を生成している。

スピコーティング装置の例を図 1-1-2 に示す。

洗浄工程は基板上に残された不純物を除去するための工程で、基板上に薬液（硫酸、オゾン水、過酸化水素水等）や純水を滴下し、ターンテーブルを回転させることで、不純物を除去し、薬液、純水を吹飛ばし、洗浄するものである。更に高速回転させることで、基板の乾燥までを行うものもある。

スピン洗浄装置の例を図 1-1-3 に示す (6) (7)



図 1-1-2 スピンコーティング装置



図 1-1-3 スピン洗浄装置

1.1.2 現状のスピン処理装置の問題点

半導体デバイスは、実装する商品の高性能化、小型化のために、年々、高密度化が要求され、パターンの微細化がどんどん進むと同時に、高信頼性も要求されている。

現状のスピナではターンテーブルを回転させる駆動部のベアリングや摺動部からは大量のパーティクル（微細なゴミ）が発生している。そのため基板上に成形される回路パターンの幅が大きいうちは問題にならないが、幅が数十 nm レベルになると、パーティクルがパターン上に付着することで、その基板の信頼性が低下したり、あるいは導通不良を起こし、不良になってしまったりする。スピン処理工程に於いて、パーティクルが付着することで基板が不良となる割合は、約 60%程度あり、そのパーティクルの発生源の割合は、約 65%が装置自体と言われている。

平均的には、半導体製造時の良品率は 96~97%程度となり、全世界の半導体生産額 \$ 3000 億に対して大雑把に \$ 90 億の不良を発生させていて、その 40%は装置自身のパーティクルによることになる。

スピナのパーティクルの発生源は、回転部分や摺動部であることから、ベアリング部を負圧にすることや、ラビリンスを設けてパーティクルが移動し難くすることなどが講じられているが、根本的な解決には至っていない。

1.1.3 問題点解決のための方策

そこで、本稿では第二種超伝導体のピン止め効果を利用した、非接触型の磁気浮上回転装置をスピナとして活用することを提案している。HTS バルクと浮上マグネットによる磁気浮上で、基板を搭載したターンテーブルをチャンバ内に

空中浮上させ、機械的な摺動部分と完全分離することで、駆動部分からパーティクルが発生しても、基板に到達しないような構造とする。駆動装置の駆動力は磁気カップリング等でターンテーブルに伝達し、ターンテーブルを非接触で高速回転させる。

HTS バルクを利用することで、比較的小型の GM 冷凍機でバルクの冷却が可能であり、バルクの周囲を真空にするための真空ポンプも小型のもので済むと予想されることから、スピナの製造コストが多少上がっても、基板不良を激減させることができれば、商品価値は十分あるものと考えられる。

また、スピナの装置サイズとしても、小型の GM 冷凍機や真空ポンプの分だけ大きくはなるが、従来型のスピナに比較して極端に大きくなる訳ではなく、高価なクリーンルームの容積を効率よく使用することに対しても障害とはならない。

半導体製造用のスピナとしての評価は、実負荷によるテストが重要であるが、本稿ではスピナのハード特性により評価を行った。

評価の対象としたハード特性は、

1. 定常速度（回転数） 209rad/s 以上（2000rpm 以上）
2. 立上り時加速度 105rad/s² 以上（2000rpm/2s 以上）
3. ターンテーブルの浮上高さ 5mm 以上
（ターンテーブルの浮上空間にチャンバの壁（2mm）が構成できれば可とする）
4. ターンテーブルのフレ 0.2mm 以下（x 軸，z 軸）

の、4 項目とし、これらを満たすような要素開発検討を行った。

1. 2 本論文の構成

本論文は 6 章から構成されており、各章の概要と全体の流れ、構成を以下に示す。

第 1 章 序論

本論文の背景，構成について述べる

第 2 章 超伝導浮上方式

超伝導浮上させるために用いる HTS バルク，浮上マグネットの基本的な考え方を述べるとともに，HTS バルクと浮上マグネットの対向のさせ方による，スラスト浮上方式とラジアル浮上方式の 2 種類の方式についての概略構造について述べる。

第3章 スラスト浮上方式

スラスト浮上方式の実験機で用いた浮上要素（ターンテーブルの磁気回路，及び HTS バルクの構成），駆動要素（アキシシャル磁気カップリング）の設計事例について述べる。

次に，本方式の実験で得られた，静特性，動特性について述べる。

更にその実験機の問題に対する改善策とその効果について述べる。

スラスト浮上方式についてのまとめを行う。

第4章 ラジアル浮上方式

ラジアル浮上方式の実験機で用いた浮上要素（ターンテーブルの磁気回路，及び HTS バルクの構成），駆動要素（アキシシャル磁気カップリング）の設計事例について述べる。

次に，本方式の実験で得られた，静特性，動特性について述べる。

ラジアル浮上方式についてのまとめを行う

第5章 低慣性スラスト浮上方式

低慣性スラスト浮上方式の実験機で用いた浮上要素（ターンテーブルの磁気回路，及び HTS バルクの構成），駆動要素（電磁誘導カップリング）の設計事例について述べる。

次に，本方式の実験で得られた，静特性，動特性について述べる。

低慣性スラスト浮上方式についてのまとめを行う。

第6章 超伝導浮上体回転時フレの解析と対策

実験機に於いて発生したフレに対して対策を行っても本質的な改善にはならないので，浮上回転体のフレが発生するメカニズムを解析し、根本的な対策を試みている。浮上回転体には超伝導による浮上力，調心力が作用している。駆動カップリングでは x 軸， z 軸方向に調心力が作用し，浮上体のフレの原因となる。更に，浮上回転体には複数のセンタが存在し，回転軸が移動することでフレが発生している。その力とセンタの関わるメカニズムを解析するとともに、根本的な対策とその検証結果について述べる。

第7章 まとめ

本研究で得られた成果を総括し，半導体製造用スピン処理装置としての可能性を論じ，今後の実用化に向けた課題について述べる。

第2章 超伝導浮上方式

2.1 浮上要素

2.1.1 HTS バルクと浮上マグネット

半導体製造用スピンの処理装置では、回転動作時の安定性が求められる。超伝導浮上では、HTS バルクが反磁性を示すことで磁束を侵入させないマイスナー効果により浮上力を得ているが、さらに HTS バルク内に不純物や結晶ひずみ等の常磁性の欠陥を作り、磁束が欠陥により拘束を受けることで浮上力と安定性が発揮されるピン止め効果を利用することが得策であると考えられる。したがって、HTS バルクとしては Nb-Ti の合金である第二種超伝導体を用いている。HTS バルクを利用した磁気浮上では、ターンテーブル上に基板を搭載して回転させることから、ある程度荷重に耐えられることが必要である。そこで浮上用マグネット自身の軽量化を目指し、かつ十分な磁束密度を持つことが重要である。マグネットの素材としては磁束密度を最も大きく取れる、ネオジム系のマグネットを使用している。

また、ターンテーブルは磁気カップリングにより、回転駆動されることから、回転方向に対して磁束の変化しないマグネット（極性）の配置が必要である。

2.1.2 スラスト浮上方式

HTS バルクとマグネットを対向させて磁気浮上させる時に、その対向の状態として2種類の方法が考えられる。一つ目は、軸方向に対抗させるスラスト浮上方式である。

概念図を図 2-1-1 に示す。

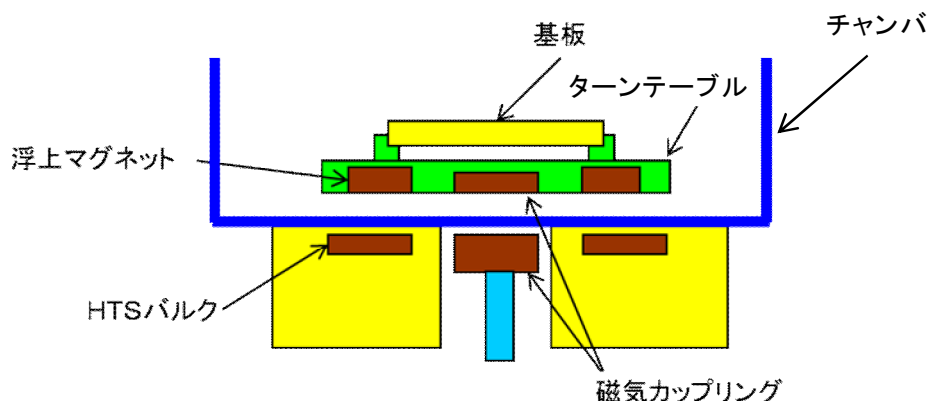


図 2-1-1 スラスト浮上方式概念図

この方式では、基板に対する処理を行うチャンバの形状がシンプルで、スピン

処理装置としての実用化が最もやり易い方式である。

しかし、ターンテーブルの直径が大きくなることと、外周近くに質量のあるマグネットを配置することから、慣性モーメントが大きくなり、駆動時に大きなトルクが必要となることが予想される。

2.1.3 ラジアル浮上方式

HTS バルクとマグネットを対向させる方法の2つ目は、軸垂直方向に対抗させる、ラジアル浮上方式である。

この概念図を、図 2-1-2 に示す。

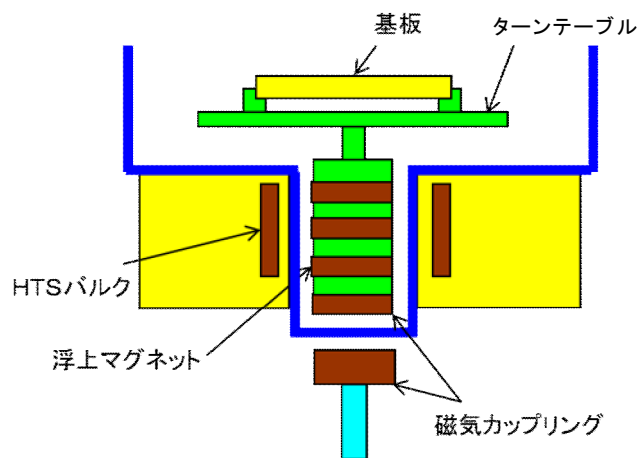


図 2-1-2 ラジアル浮上方式概念図

この方式では、最も重い浮上マグネットの直径を小さくできるので、ターンテーブルの慣性モーメントが小さく、駆動時のトルクが小さくできる反面、基板に対する処理を行うチャンバの形状が多少複雑になってしまう欠点が予想される。

2. 2 駆動要素

2.2.1 磁気カップリング

磁気カップリングは磁気浮上しているターンテーブルを浮上状態で回転させることから、ターンテーブルの駆動に必要なトルクを発生することができることと、ターンテーブルの浮上高さを減少させないように軽量化を図ることが重要である。

浮上用マグネットと同様、ネオジウム系マグネットを使用する。

第3章 スラスト浮上方式

3.1 浮上要素

3.1.1 ターンテーブルの磁気回路

ターンテーブルは浮上空間にパーティクルの侵入を防止するチャンバ壁を設けることから、チャンバ壁を超えても尚十分な浮上高さが必要であると同時に、ターンテーブルの立上時間を早くしなければならないことから、軽量化が必要である。

基本となる考え方は、以下の2つである。

- ① 磁束密度の最も大きく取れるネオジウム系マグネットを選択する
- ② 磁性体による凸極を設け、同極のマグネットで挟む構成とする
(できるだけ磁束密度を上げ、磁束の傾きを大きくするため)

浮上用マグネットの配置、凸極の磁性体をマグネットで挟む磁気回路モデルを図3-1-1に示す。

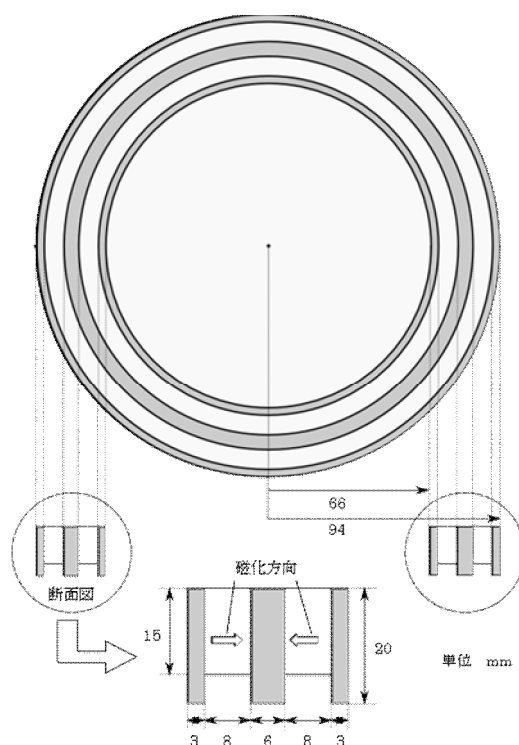


図 3-1-1 ターンテーブル凸極部の磁気回路モデル

本研究では、上記の考え方にに基づき、以下に示すような4つのモデルについて設計を行った。(1) (2)

4つのモデルの磁気回路断面図を図3-1-2に示す。

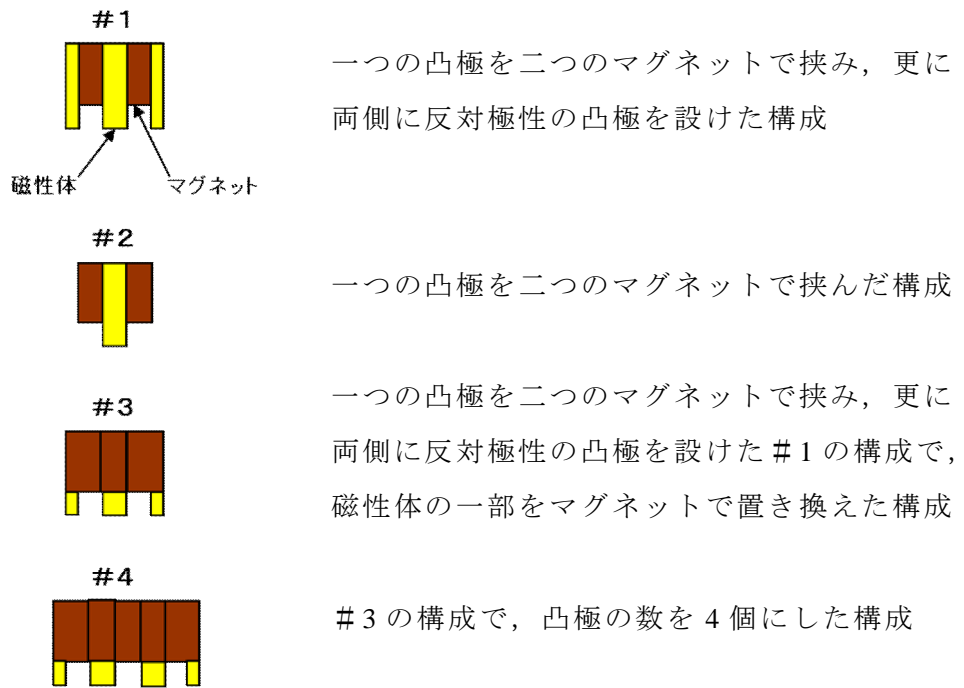


図 3-1-2 磁気回路断面図

図 3-1-3 に磁気解析を行なったモデル図の例（#1）を示す。

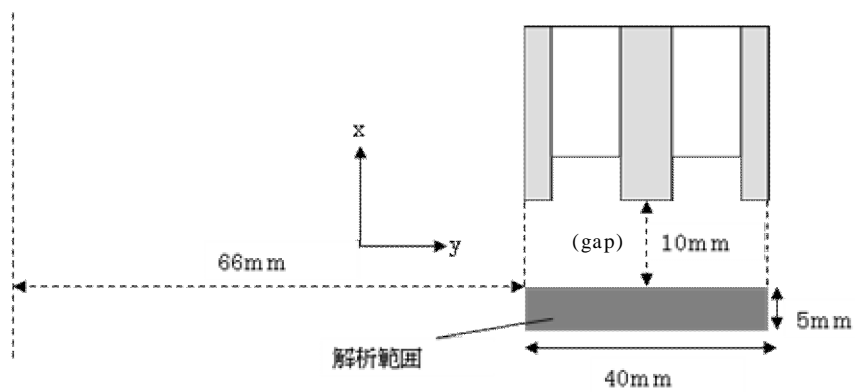


図 3-1-3 モデル図（#1）

図 3-1-3 のモデルで、磁気解析ソフトによる FEM 解析を行なった結果の磁束密度分布図を図 3-1-4 に示す。

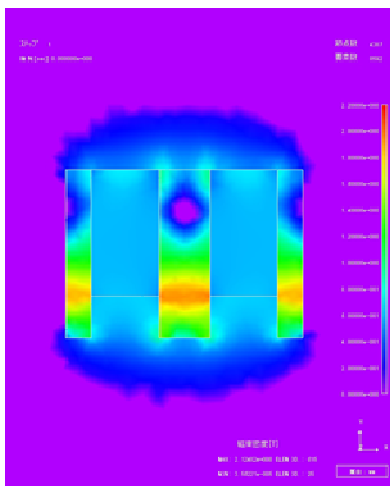


図 3-1-4 凸極部の FEM 解析（#1）

FEM 解析による磁束密度のグラフで、モデルの比較を行った結果を図 3-1-5 ~に示す

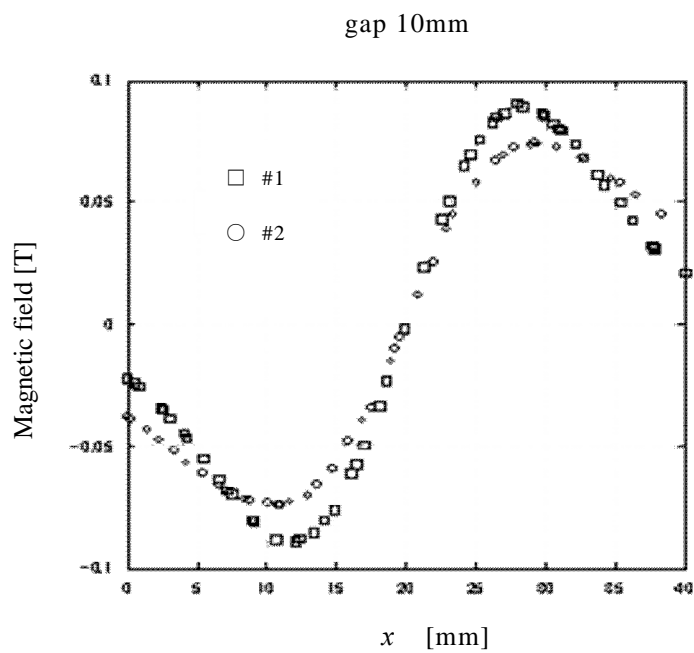


図 3-1-5 x 軸方向磁束密度

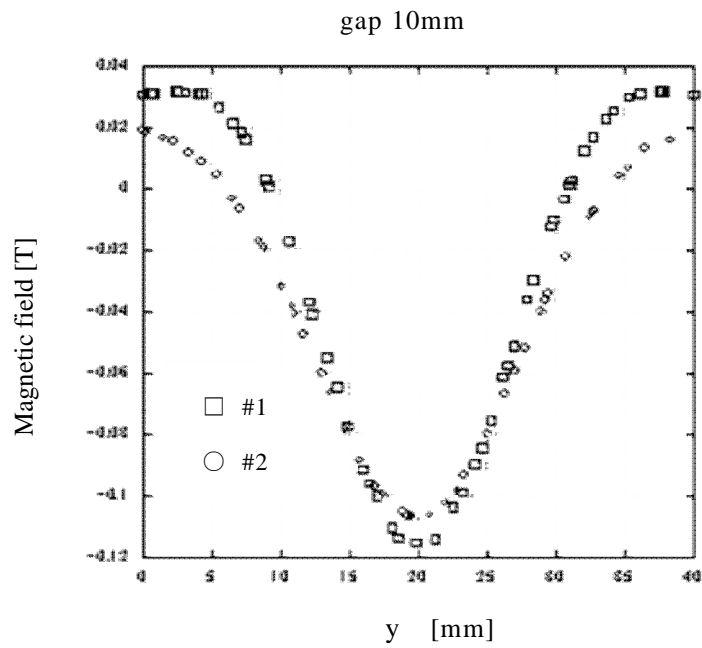


図 3-1-6 y 軸方向磁束密度

超伝導浮上に於いては，侵入磁界が大きい程，補足磁束が多くなり，浮上時のターンテーブルの剛性が強くなる。#1と#2の比較では#1の方が剛性が強いことが予想される。同様に#1と#3,#4を比較してみると，図 3-1-7, 図 3-1-8 のようになり，#3の磁気回路構成がターンテーブルとして最も剛性が強くなることが予想される。

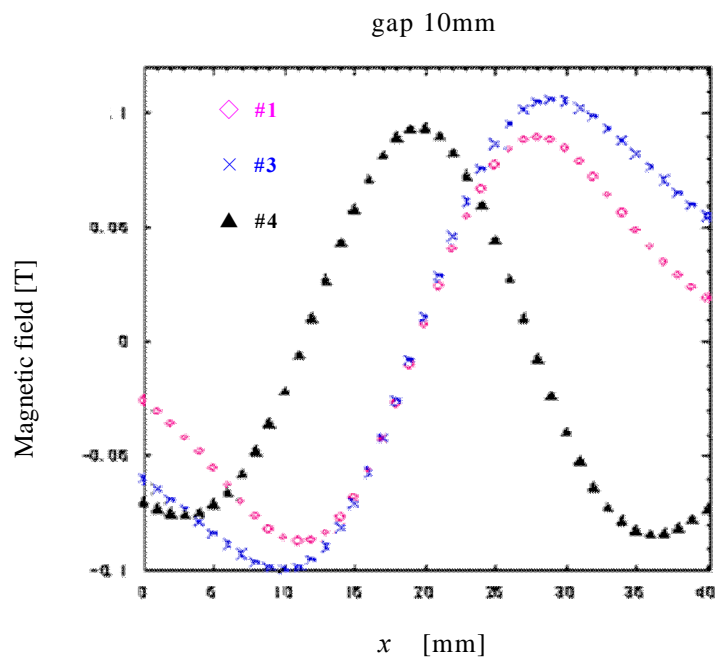


図 3-1-7 x 方向磁束密度

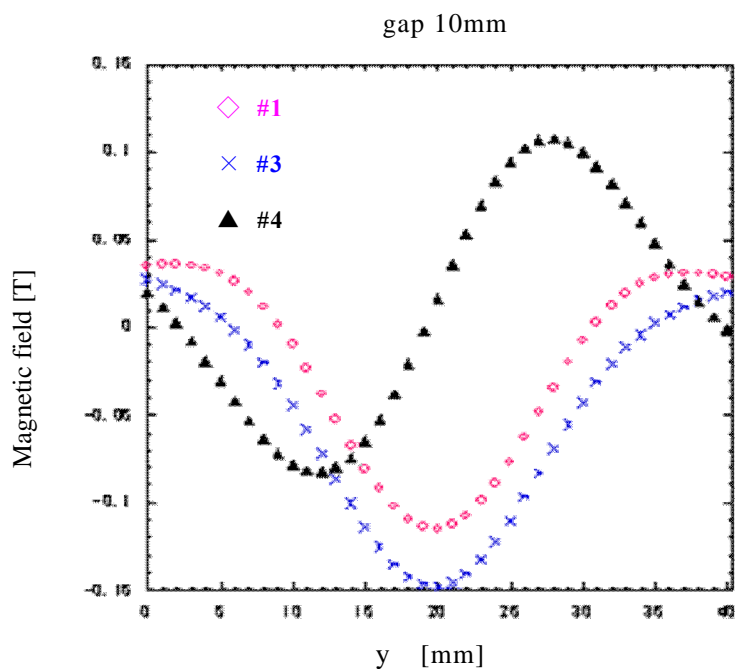


図 3-1-8 y 軸方向磁束密度

磁気解析の結果では、マグネットの総量を最も大きくした#4よりも#3のターンテーブルの方が、磁束密度が大きくなり、剛性が強いと予測される結果となった。

3.1.2 HTS バルクの構成

HTS バルクは大量生産されていないので、コスト的には非常に高価である。

そこで、HTS バルクの配置構成として、経済性を考慮した構成とした。

その構成は、比較的生産数量の多く、安価である円盤型バルクを用い、離散的に配置したもので図 3-1-9 にその構成を示す。



図 3-1-9 離散配置バルク

3.1.3 実験機の構成

HTS バルクを臨界温度 (T_c) まで冷却する構造として、HTS バルクを銅製の冷却プレート上に載せ、それをステンレス製のチャンバ内に配置し、外気と断熱できるレベルにチャンバ内を真空にするクライオスタットを構成し、GM 冷凍機で冷却プレートを冷却している。HTS バルクの温度は約 30~40K に冷却している。

スラスト浮上方式に於いて、HTS バルクを離散配置した場合の実験機の構成を図 3-1-10 に示す。

実験手順としては、クライオスタット上面にターンテーブルとの隙間（浮上高さ）を確保するためのスペーサを置き、その上にターンテーブルを載せる。次に、クライオスタット内を真空にしてから GM 冷凍機を動作させ、HTS バルクの冷却を行う。HTS バルクが所定の温度に達した時に、スペーサを取り除くと、ターンテーブルはクライオスタット上に浮上している。

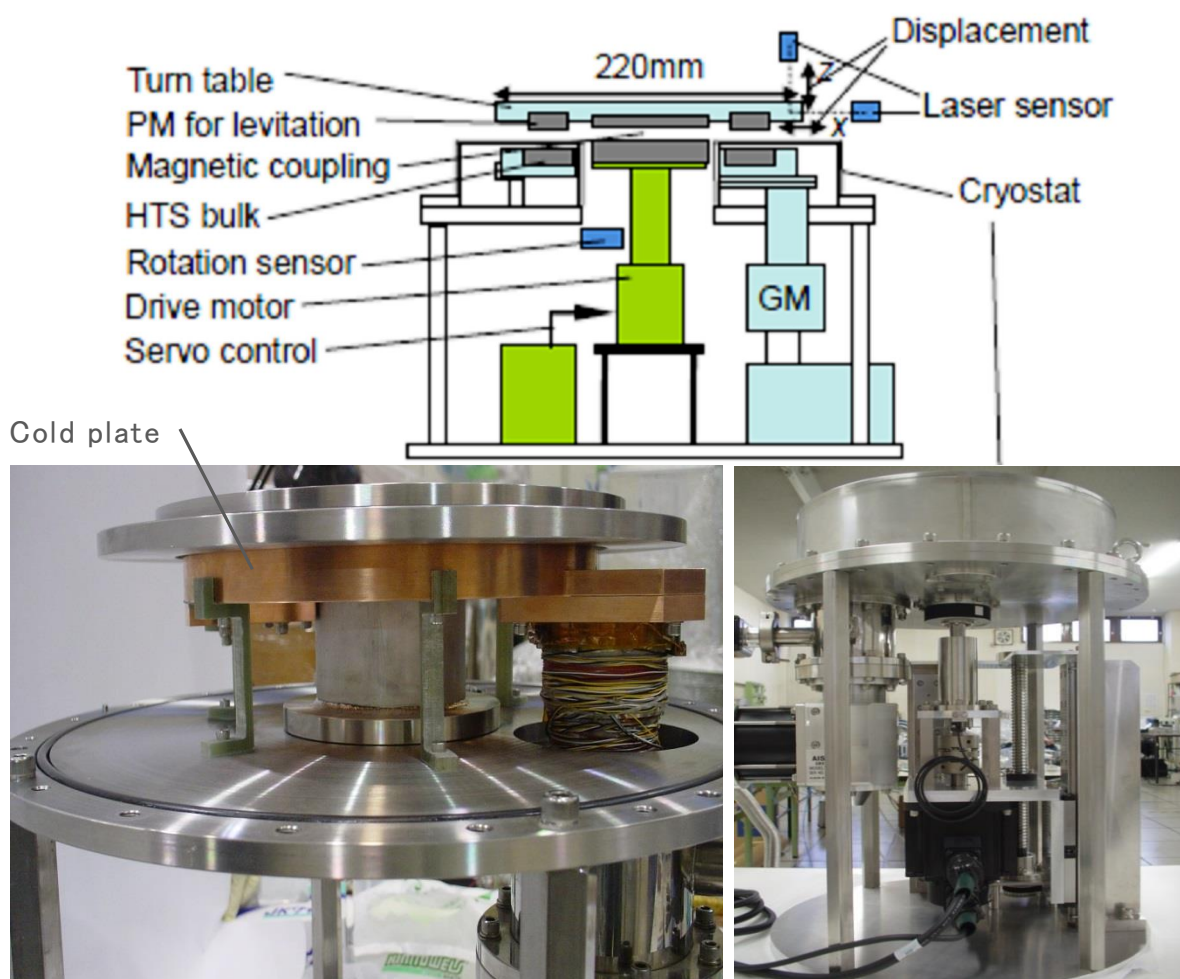


図 3-1-10 スラスト浮上方式の構成

3. 2 スラスト浮上方式の静特性

3.2.1 ターンテーブルの x 軸剛性

HTS バルクを離散配置した場合で、ターンテーブル #1, #2, #3, #4 のそれぞれの浮上状態での剛性について測定を行った。図 3-1-10 に示すターンテーブルの水平方向 (x 軸) の剛性を測定した。その結果を図 3-1-11 に示す。

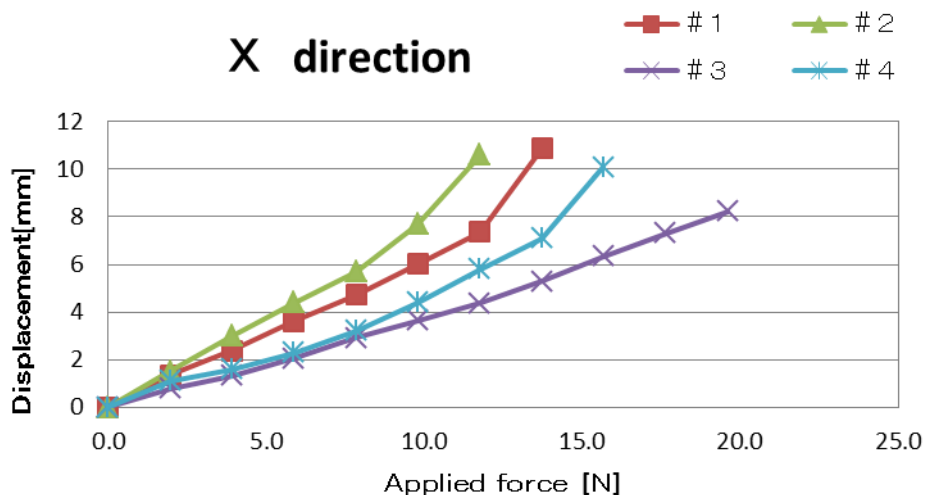


図 3-1-11 スラスト浮上方式の x 軸剛性

ターンテーブルに対する横からの荷重に対して、#3 のターンテーブルが最も安定性があることが判明した。

3.2.2 ターンテーブルの z 軸剛性

同様にターンテーブルに対する垂直方向 (z 軸) の剛性について測定を行った。その結果を図 3-1-12 に示す。

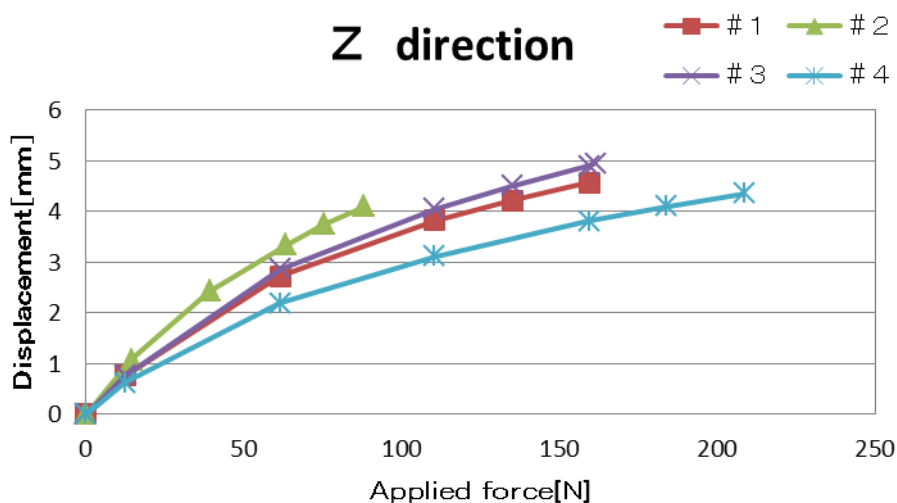


図 3-1-12 スラスト浮上方式の z 軸剛性

x 軸の剛性，即ちターンテーブルの振れ回りの安定性については，#3 のターンテーブルが水平荷重に対して最も強かったのに対して，z 軸の剛性，即ちターンテーブルの浮上力は，マグネットの総量が最も多い，#4 のターンテーブルが強い結果となった。

ターンテーブルの磁気回路としては，#3 と，#4 のターンテーブルで x 軸，z 軸の剛性が相反する結果となったが，半導体製造用スピナに要求される性能として，フレ回りの安定性が重要であることと，起動時の加速度を重視することから，より軽量である #3 のターンテーブル（#3：2.4kg #4：3.1kg）を実験用のターンテーブルとして使用することとする。

3. 3 駆動要素

3.3.1 アキシシャル磁気カップリング

アキシシャル磁気カップリングは，円周方向に極が交互に現れるマグネットを配置したものを，軸方向に隔離状態で対向させ，駆動側を回転させることにより，被駆動側（浮上側）を追従回転させるものである。

駆動側が定速度で回転している時には，被駆動側は順調に追従できるが，急激に回転速度が変化した場合には，被駆動側は追従できなくなり，脱調現象が発生し，カップリングの安定性が失われてしまう。ターンテーブルの急停止やマグネットの反発力によりターンテーブルの飛散が発生する恐れがある。半導体製造用スピナでは，ターンテーブルの上に高価なフォトマスクを搭載するので，安定性は非常に重要である。

そこで，ターンテーブルの慣性モーメントから，磁気カップリングに必要なトルクを計算し，脱調現象が発生しない磁気カップリングを製作する。

3.3.2 必要トルクの計算

先ず，ターンテーブルの慣性モーメントを算出する。

円盤の z 軸周りの慣性モーメントは次式で与えられる。

$$\textcircled{1} I = MR^2 / 2 \quad M \text{ 円盤の質量}$$

$$R \text{ 円盤の半径}$$

中空円盤の慣性モーメントは次式で与えられる。

$$\textcircled{2} I = M (R^2 + r^2) / 2 \quad r \text{ 中空部の半径}$$

ターンテーブルはアルミ製の円盤型フレームに磁気回路となるマグネットと磁性体を円周方向に対して対称に配置しているので，慣性モーメントは上式の①②の組み合わせで算出することができる。

製作したターンテーブルの中で最も x 軸方向の安定性に優れている #3 について計算すると、 $I=0.002\text{kgm}^2$ となる。

このターンテーブルを 105rad./s^2 ($2000\text{rpm}/2\text{s}$) の回転加速度で回転させるために必要なトルクは、 $T = \alpha I$ α 角加速度 (rad/s^2)

参考として、回転数で算出する場合を付記する。

$$\alpha = 2\pi (n_2 - n_1) / 60t$$

n_1 初めの回転数 (rpm)
 n_2 終わりの回転数 (rpm)
 t 加減速時間 (s)

であるから、 $T=2.1\text{Nm}$,

余裕を見て、 $T=2.5\text{Nm}$ のトルクを確保する。

3.3.3 磁気カップリングの磁気回路

磁気カップリングの磁気回路は、ターンテーブルの磁気回路と同様、ターンテーブルを規定時間内に立ち上げるのに十分なトルクが出せるのと同時に、軽量化が必要である。特に浮上する被駆動側（浮上側）の軽量化は必須である。

従って、基本となる考え方は、以下の2つである。

- ①磁束密度の最も大きく取れるネオジウム系マグネットを選択する
- ②磁性体による凸極を設け、同極のマグネットで挟む構成とする

磁気カップリングのマグネットの配置、凸極の磁性体を挟む磁気回路構成を図 3-3-1 に示す。

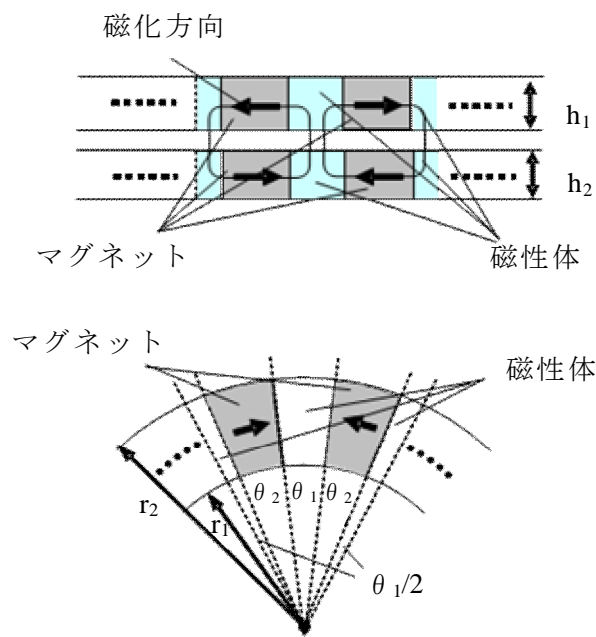


図 3-3-1 磁気カップリング凸極部の磁気回路

最適な磁気カップリングを探す目的で、異なる寸法を持つ3種類のパターンのモデルで比較解析を行った。図 3-3-2～図 3-3-4 でその構成を示す。

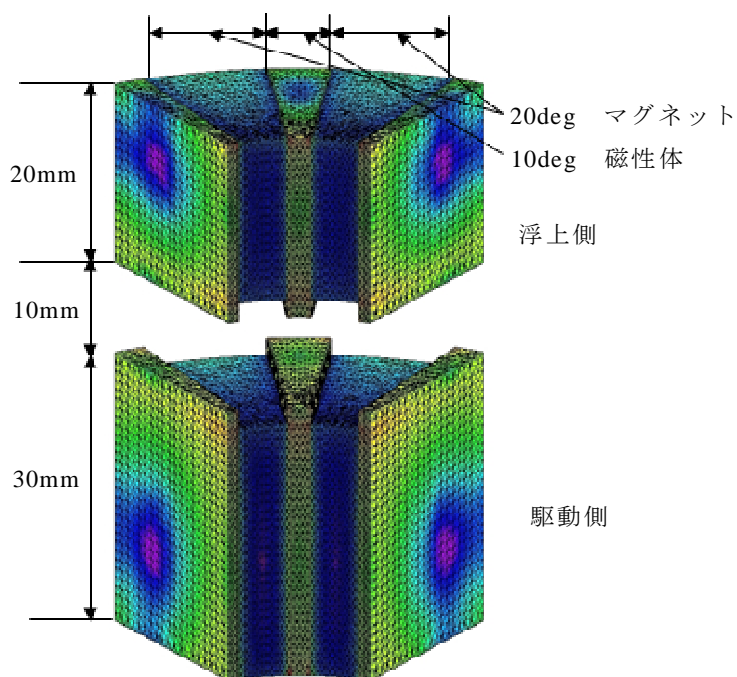


図 3-3-2 Type1

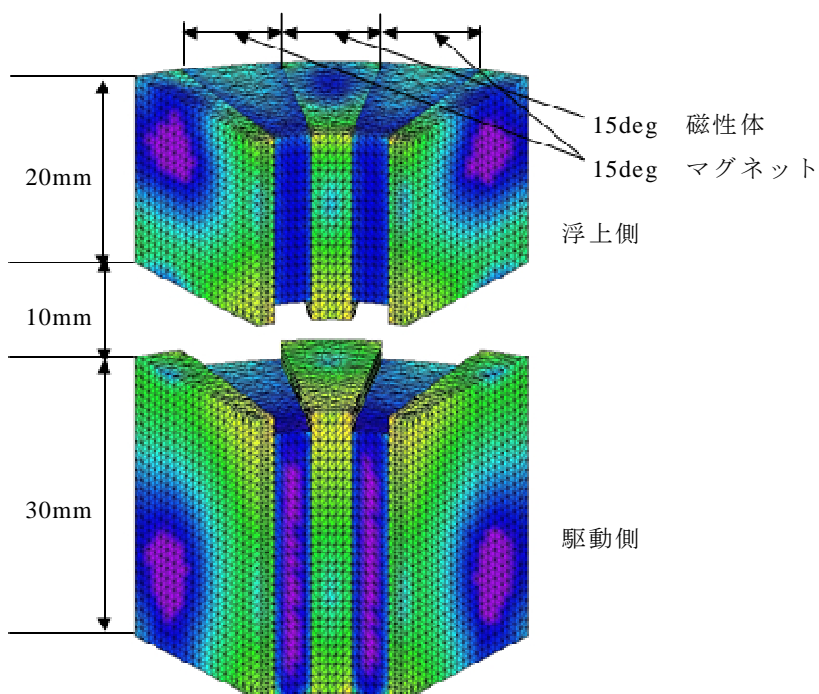


図 3-3-3 Type2

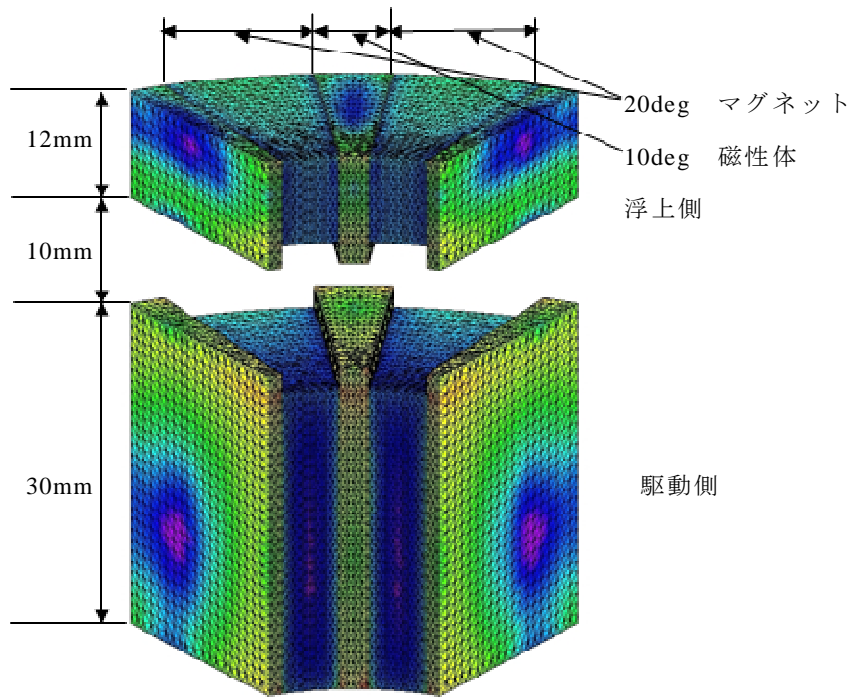


図 3-3-4 Type3

3 種類のパターンで、発生するトルクとカップリング間に作用する電磁力（吸引力）について解析を行った。図 3-3-5～図 3-3-7 に解析結果を示す。グラフの横軸は、磁気カップリングの 1 極分（マグネット+磁性体）の位相を 1 と表現している。

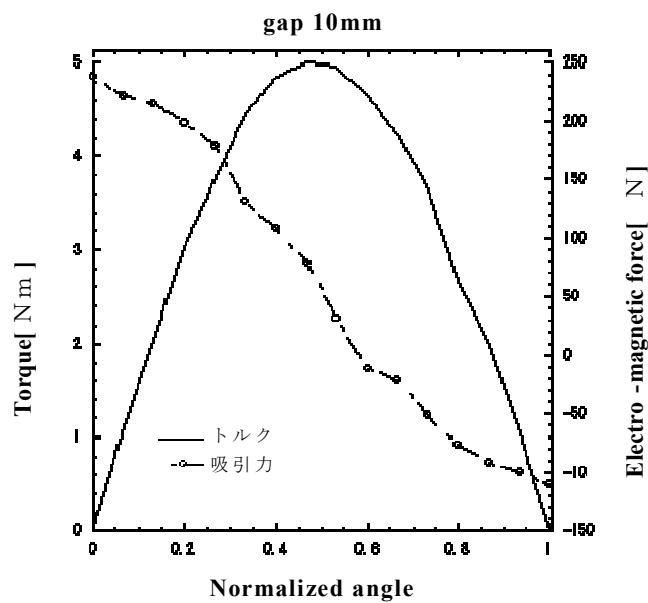


図 3-3-5 Type1 の特性

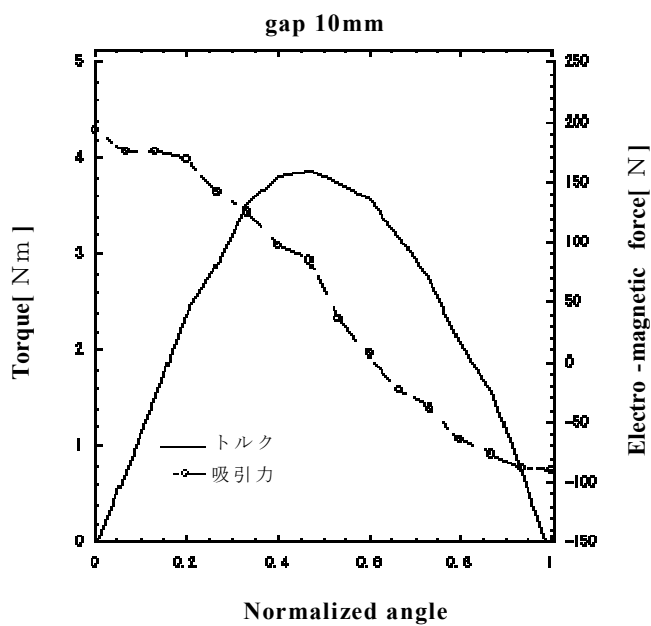


図 3-3-6 Type2 の特性

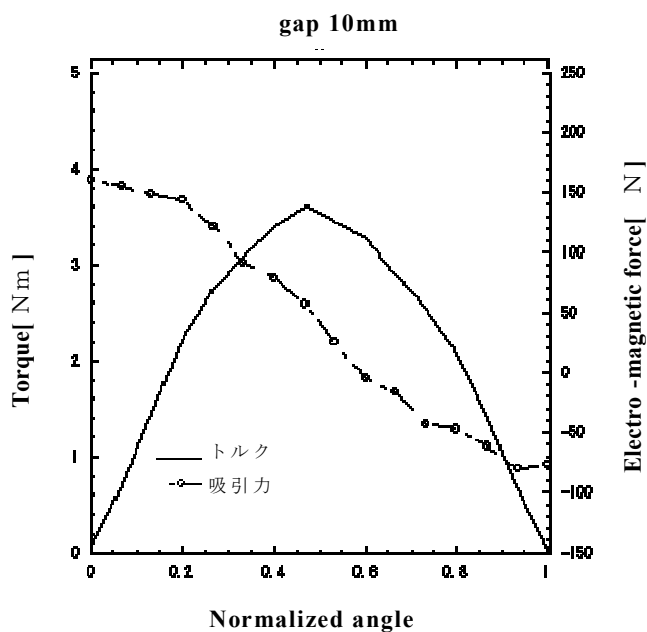


図 3-3-7 Type3 の特性

解析結果からはマグネットの総量が最も多い Type1 が大きいトルクを引き出せることが分かるが、最大 250N 近くの吸引力がターンテーブルにかかることになり、折角の超伝導磁気浮上を相殺してしまう可能性がある。

必要トルクが 2.5Nm であることを考慮すれば、Type3 でも十分であることが分かる。そこで、磁気カップリングの製作は、Type3 の仕様で行うこととする。

3.3.4 磁気カップリングの特性

Type3 の仕様で製作した磁気カップリングの外観を図 3-3-8 に示す。

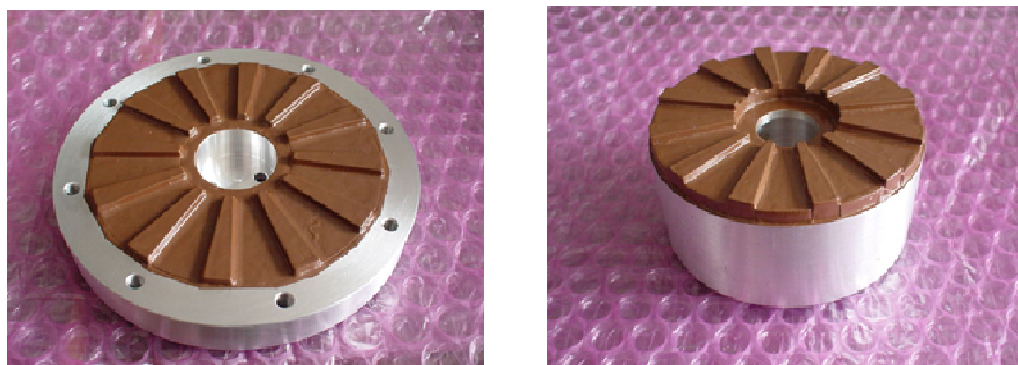


図 3-3-8 磁気カップリング 被駆動側（左）と駆動側（右）

Type3 の仕様で製作した磁気カップリングの吸引力特性、トルク特性を測定した結果を、図 3-3-9、図 3-3-10 に示す。グラフ中の gap は磁気カップリングの被駆動側と駆動側間の距離を指している。

最大トルクは 4Nm 弱、最大吸引力は約 140N となり、磁気解析した結果と概略一致していることが分かる。

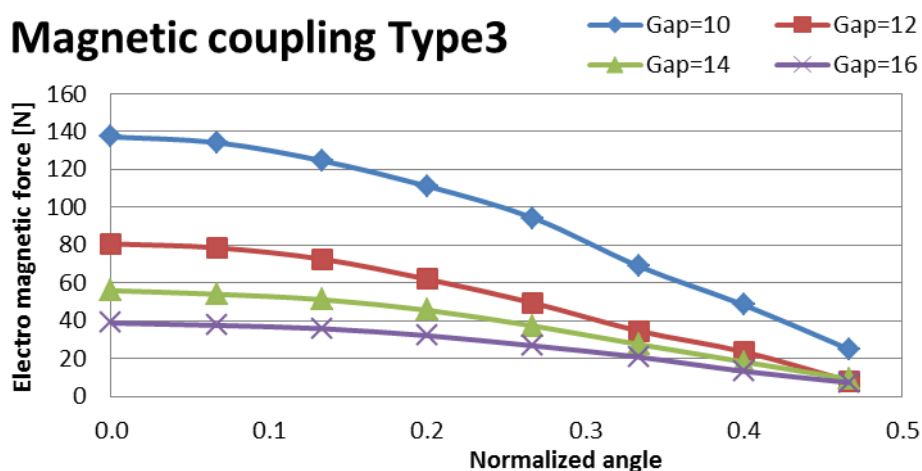


図 3-3-9 Type3 吸引力特性

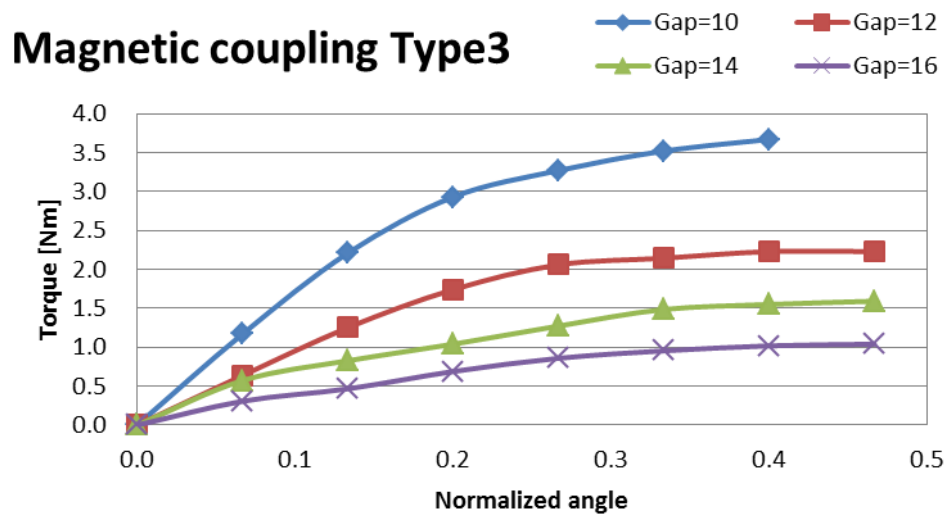


図 3-3-10 Type3 トルク特性

3. 4 スラスト浮上方式の動特性

3.4.1 スラスト浮上実験機

以上の浮上要素，駆動要素を組合せて製作した実験機を，スラスト浮上1号機と称し，その外観を図 3-4-1 に示す。



図 3-4-1 スラスト浮上1号機

3.4.2 ターンテーブルの x 軸フレ

ターンテーブルの中で最も安定性の期待できる #3 のターンテーブルをスラスト浮上 1 号機で、浮上回転させた時の x 軸方向のフレの大きさを、ターンテーブルが 209rad./s (2000rpm) まで立上る時間 (立上り時の加速度) を変えて測定した結果を図 3-4-2 に示す。

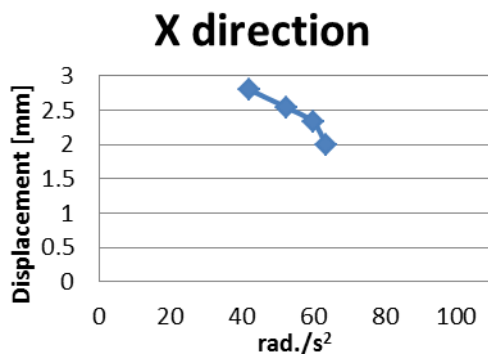


図 3-4-2 x 軸フレ

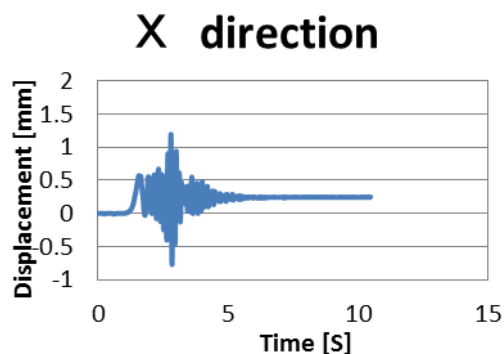


図 3-4-3 x 軸フレ波形

目標値は 105rad/s^2 (2000rpm/2s) であるが、 63rad/s^2 (2000rpm/3.4s) が限度であり、それ以上に加速を上げると、磁気カップリングの脱調現象が発生した。またフレの波形を図 3-4-3 に示すが、立上り直後の低回転側では一定振幅の機械的な偏心と考えられるフレが見られ、その後は共振現象が見られる。x 軸のフレとしては、波形の Peak to peak の Max 値を読み取ることとする。x 軸は加速度が大きくなるほど、フレは小さくなる傾向であった。

3.4.3 ターンテーブルの z 軸フレ

同様に、z 軸方向のフレの大きさを、ターンテーブルが 209rad./s (2000rpm) まで立上る時間 (立上り時の加速度) を変えて測定した結果を図 3-4-4 に示す。

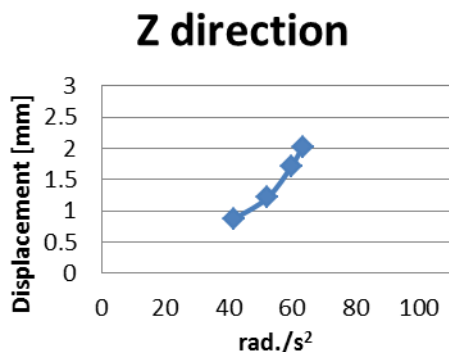


図 3-4-4 z 軸フレ

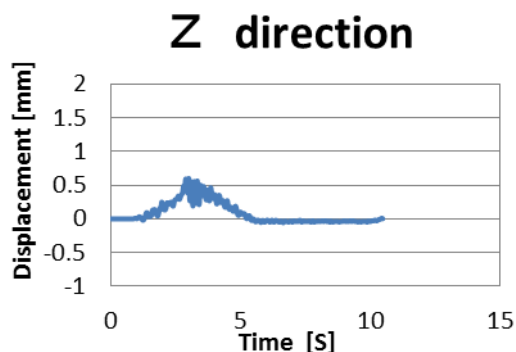


図 3-4-5 z 軸フレ波形

z 軸のフレとしては、波形の Peak to peak の Max 値を読み取ることとする。

z 軸の場合は加速度が大きくなるほど、フレは大きくなる傾向であった。

注目すべきは、図 3-4-5 に示す z 軸のフレ波形で、立上り時に大きくなり、安定時は静止時の位置に戻っている現象で、立上り時にターンテーブルの浮上り現象が生じている。

3.4.4 ターンテーブルのフレ改善策

以上の実験結果から、当初掲げた 4 つの評価項目のうち、ターンテーブルのフレと立上時間の 2 項目が未達成となった。

ターンテーブルのフレについては、HTS バルクと浮上マグネットの結合力が不足していることが挙げられることから、両者の対抗する面積を増大させる対策を行う。更に、HTS バルクの臨界温度が約 90K であるのに対して 40~50K まで冷却を行っているが、これを 35~40K まで低下させる対策を行うこととする。立上時間が未達成となった原因は、磁気カップリングの立上時に発生させたトルクの分だけ、カップリング間の吸引力が減少し、ターンテーブルの浮上りが生ずるため、磁気カップリング間のギャップ 10mm でトルク 2.5Nm を発生させる能力があっても、ターンテーブルの浮上りにより初期のギャップが変化するため、目標の立上時間を確保できなくなっている。そこで、磁気カップリングの結合度の増強についても対策を行う。

3. 5HTS バルクの改善

3.5.1 HTS バルクの形状

上記の実験ではバルクの経済性を考慮し、離散的なバルク配置を採用したが、今回は性能本位で、浮上マグネットに対抗する部分はすべて HTS バルクを配置することとした。HTS バルクは、製造上大きなものは製作できないので、円盤型のバルクを扇型に加工し、そのバルクを 6 個並べて、一体型としている。ターンテーブル #3 との対向面積は 2.1 倍に増加している。

図 3-5-1 にその構成を示す。 (3)

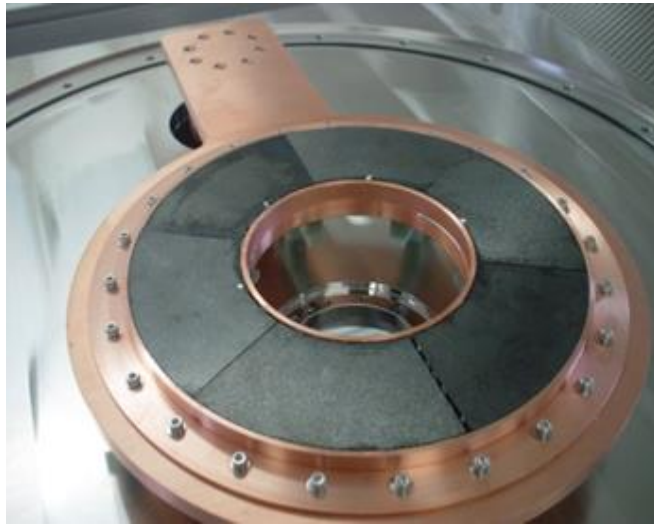


図 3-5-1 一体型バルク

更に，クライオスタット内の断熱効果を高めるために，真空断熱に加えて，クライオスタットの内面に反射フィルム（アルミ蒸着フィルム）を張付けて，輻射による吸熱を防止することを試みている。その状況を図 3-5-2 に示す。

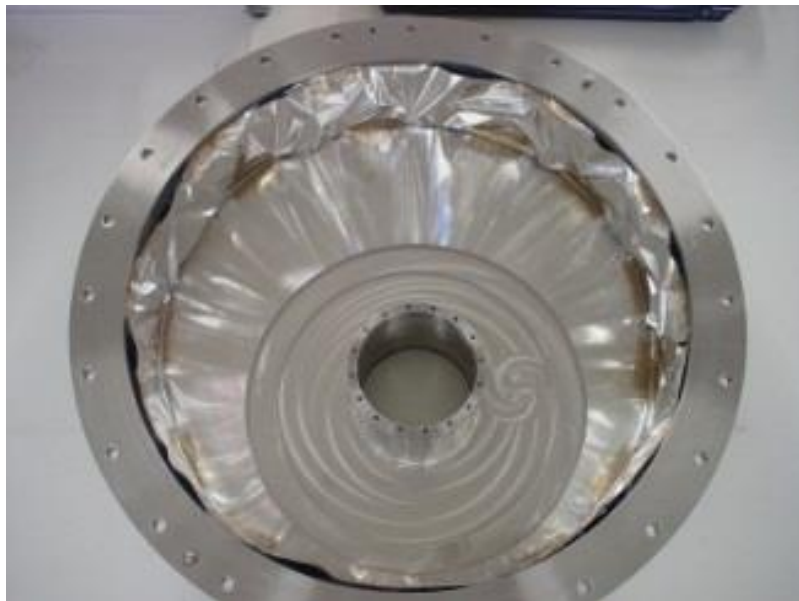


図 3-5-2 クライオスタット内面に貼付けた反射フィルム

それらを組込むと同時に，スピナとしての評価ができるように，処理チャンバ，薬液用ノズル，フォトマスク保持用のチャック等も具備した実験機（スピナ）を製作している。これをスラスト浮上 2 号機と称し，その外観を図 3-5-3 に示す。

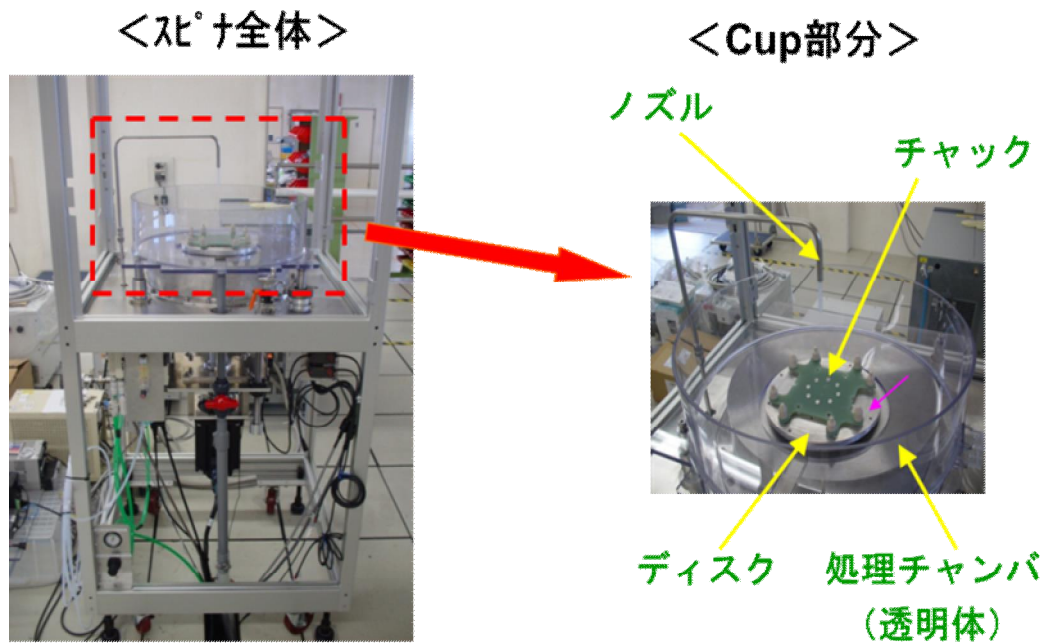


図 3-5-3 スピナとして製作したスラスト浮上 2 号機

最初に製作したスラスト浮上 1 号機，改善を盛込んだスラスト浮上 2 号機と，最も特性の優れているターンテーブル #3 との組合せによる浮上実験の比較結果を以下に述べる。

3.5.2 ターンテーブルの x 軸剛性

2 種類のスラスト浮上実験機にターンテーブル #3 を搭載した時のターンテーブルの x 軸方向の剛性について測定を行った結果を図 3-5-4 に示す。

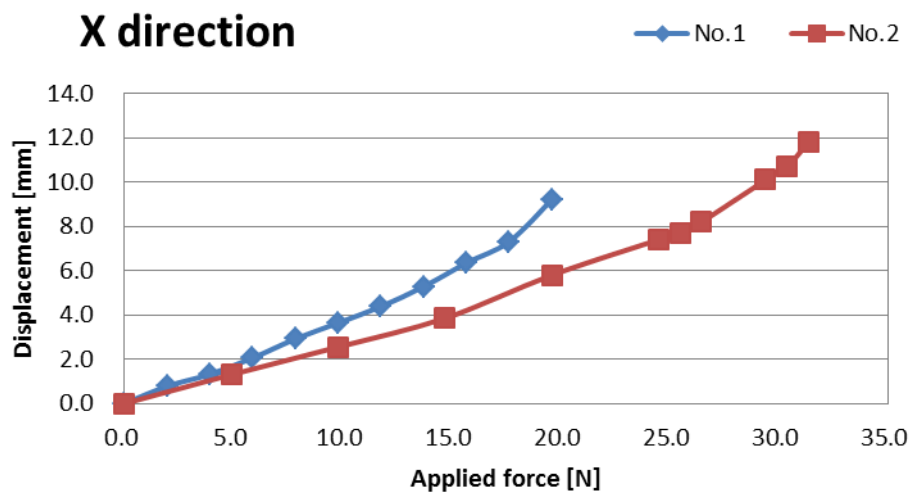


図 3-5-4 スラスト浮上方式の x 軸剛性

1号機に対して、HTSバルクと浮上マグネットの対向面積を約2.1倍に増やした2号機は、 x 軸方向の剛性が同一荷重に対して約50%のフレ低減効果が見られる。

3.5.3 ターンテーブルの z 軸剛性

同様にターンテーブルの z 軸方向の剛性について測定を行った結果を図3-5-5に示す。

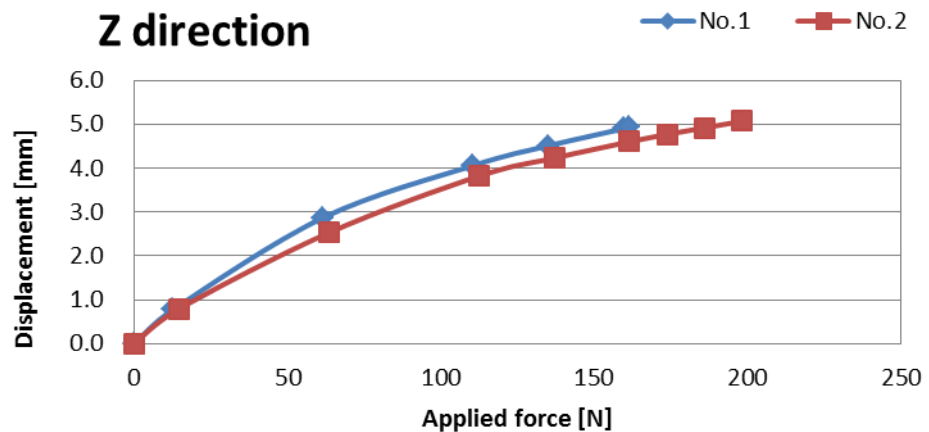


図 3-5-5 スラスト浮上方式の z 軸剛性

z 軸方向の剛性は x 軸方向の剛性に比べ、対策効果は低くかったが、同一荷重に対して約10%の変位低減効果がある。

3. 6 磁気カップリングの改善

3.6.1 磁気回路の改善

磁気カップリング間距離が変化しても立上時の加速度が確保できるように、発生トルクを大きくした磁気カップリングを目指して、6極の異なる寸法を持つ2種類のパターンのモデルで比較解析を行なう。図3-6-1～図3-6-2でその構成を示す。(3)

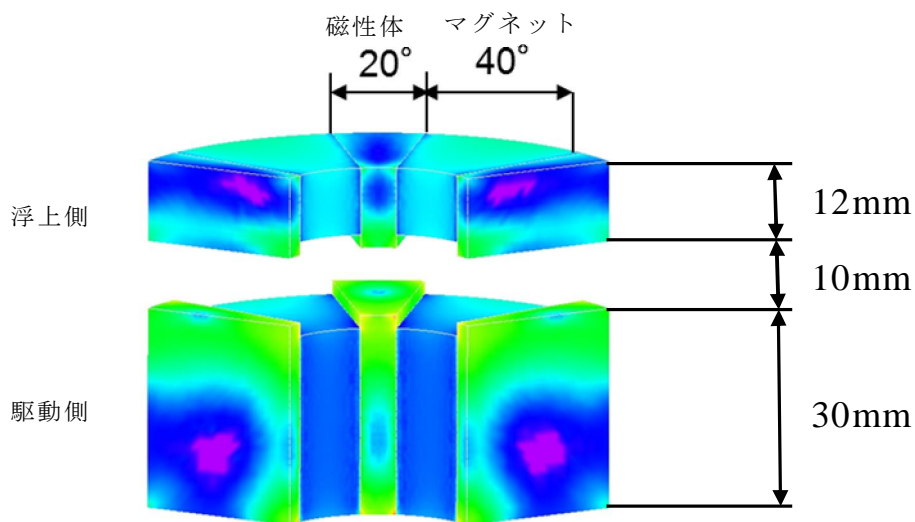


図 3-6-1 Type4

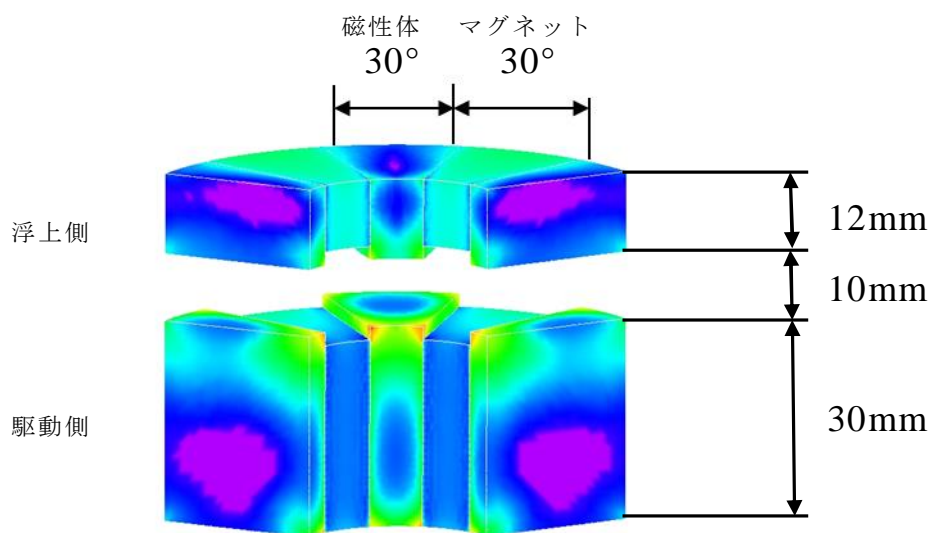


図 3-6-2 Type5

2 種類のパターンで、発生するトルクとカップリング間に作用する吸引力について解析を行なう。図 3-6-3, 図 3-6-4 に解析結果を示す。

グラフの横軸は、磁気カップリングの 1 極分 (マグネット+磁性体) の位相を 1 と表現している。

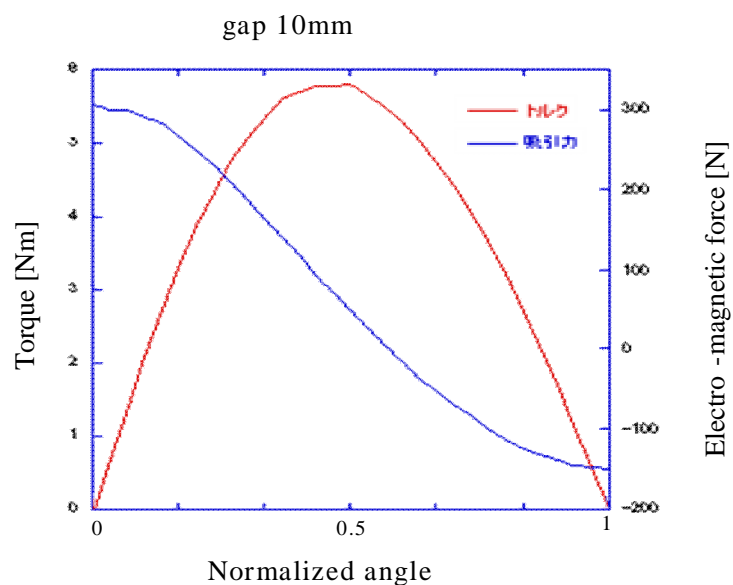


図 3-6-3 Type4 の特性

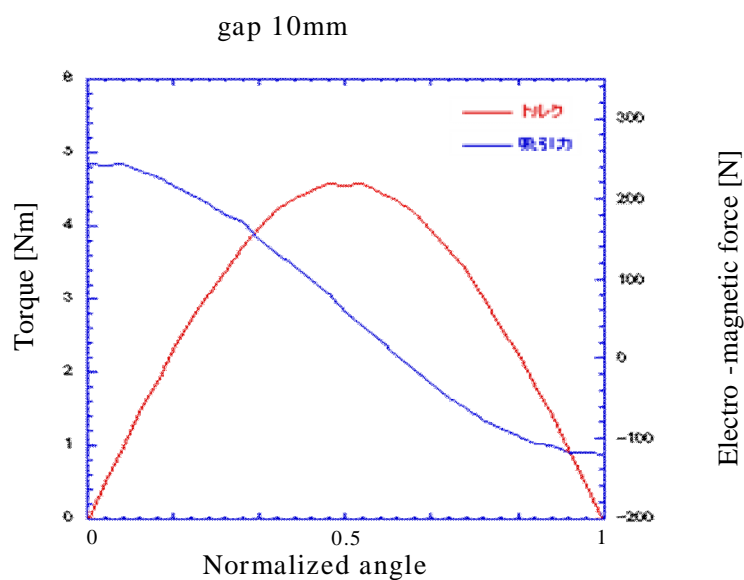


図 3-6-4 Type5 の特性

上記の解析結果から、Type4 の磁気カップリングでは、発生トルクは約 60% 増加することが期待でき、トルクアップが可能であるので、Type4 の仕様で磁気カップリングの製作を行うこととする。

3.6.2 カップリングの特性

新しく製作した 6 極磁気カップリングの外観を図 3-6-5 に、その特性の実測値を図 3-6-6～図 3-6-7 に示す。

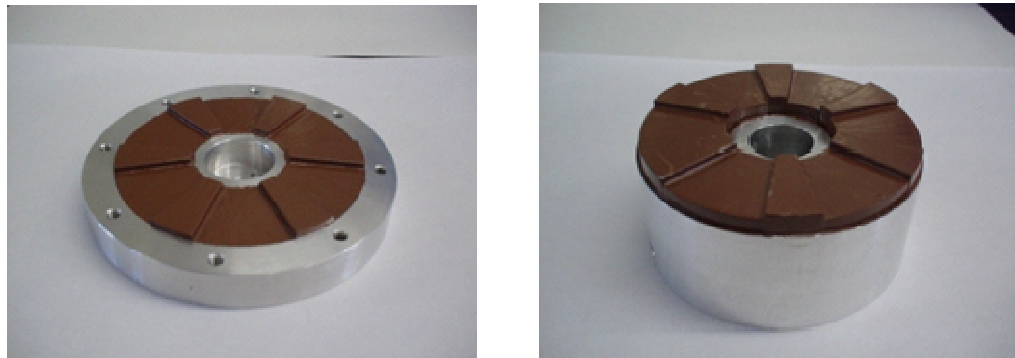


図 3-6-5 6 極磁気カップリング 被駆動側（左）と駆動側（右）

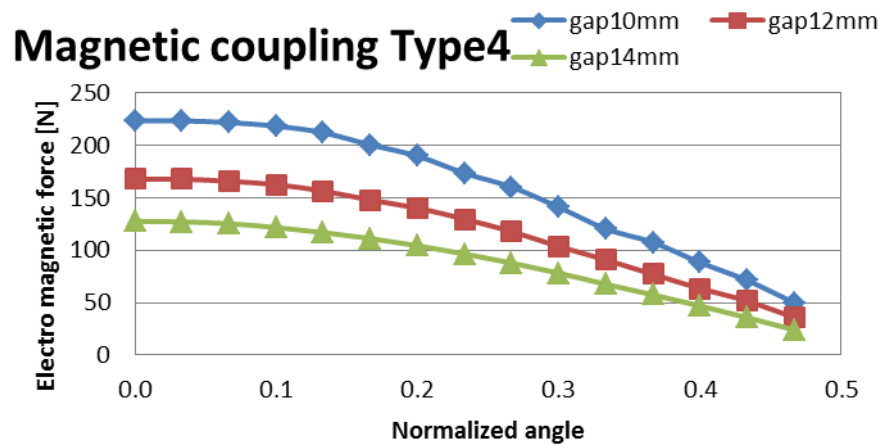


図 3-6-6 6 極磁気カップリングの吸引力特性

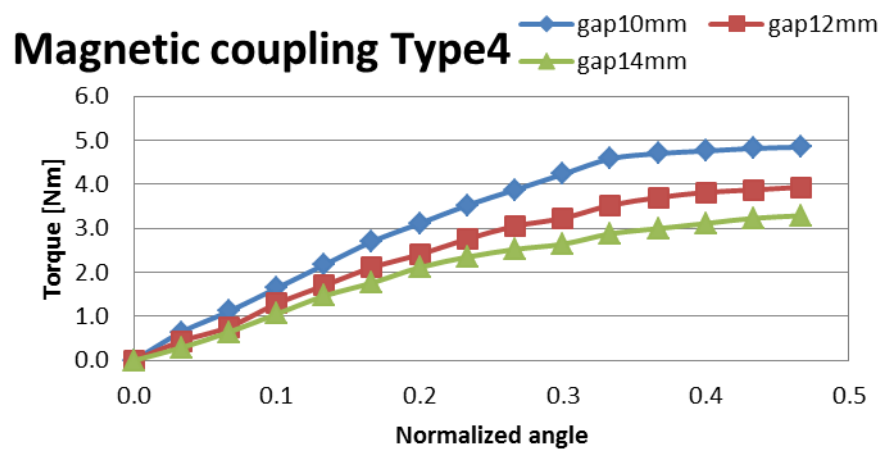


図 3-6-7 6 極磁気カップリングのトルク特性

実際に製作した磁気カップリングの特性は磁気解析の結果よりも若干低い
発生トルクが大きいので、本磁気カップリングを使用する。

3. 7 スラスト浮上方式の改善効果

3.7.1 ターンテーブルの x 軸フレ

2 台のスラスト浮上実験機とターンテーブル #3 の組合せで、結合力を改善した磁気カップリングで駆動を行い、動特性を比較測定した結果を図 3-7-1 に示す。

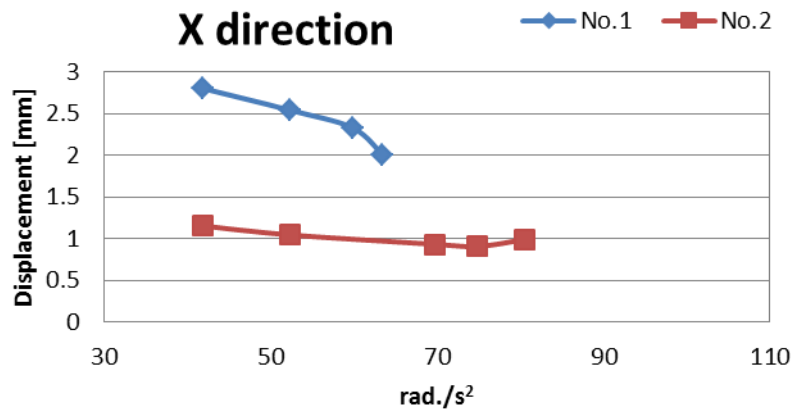


図 3-7-1 x 軸フレの比較

2 号機では加速度は 63rad./s^2 から 81rad./s^2 (2000rpm/2.6s) 向上しているが、目標値の 105rad./s^2 (2000rpm/2s) にはまだ達成していない。以前と同様、それ以上に加速を上げると、磁気カップリングの脱調現象が発生した。ターンテーブルのフレについても約 1mm で、目標値の 0.2mm 以下には達していない。

3.7.2 ターンテーブルの z 軸フレ

同様に、ターンテーブル #3 の動特性を比較測定した結果を図 3-7-2 に示す。

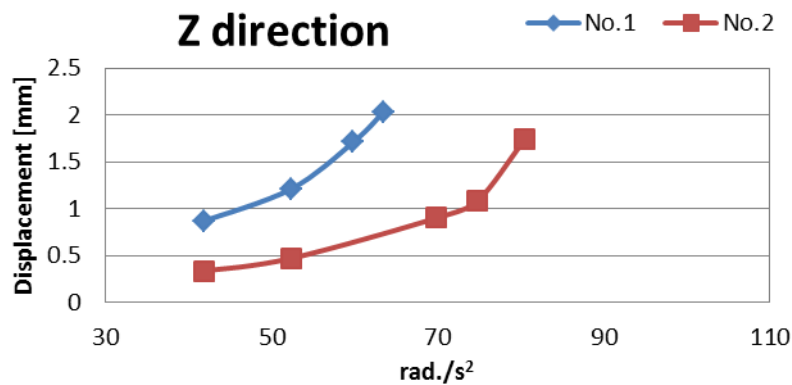


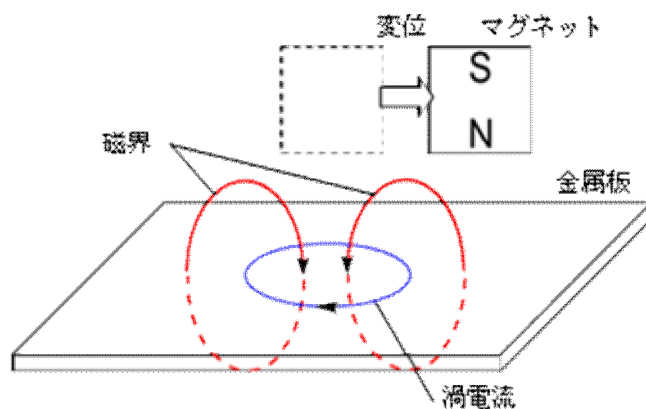
図 3-7-2 z 軸フレの比較

x 軸フレで述べたように加速度は 81rad./s^2 まで向上しているが、目標値の 105rad/s^2 (2000rpm/2s) にはまだ達成していない。ターンテーブルのフレについても約 1.8mm で、目標値の 0.2mm 以下には達していない。

3. 8 パッシブ制御

3.8.1 パッシブ制御の原理

ターンテーブルのフレを抑えるために、電磁誘導の原理を利用した制御が有効であると考えた。その概念図と実施例を図 3-8-1 に示すが、銅板のような常磁性体の金属板を貫く磁束が時間に対して変化すると、金属板表面にその磁束の変化を妨げる向きに渦電流が流れる。その渦電流が作る磁界はマグネットの動きを妨げる方向に発生するので、マグネットの不規則な動きに対するブレーキとして働き、スタビライザの効果がある。



電磁誘導スタビライザ用銅板

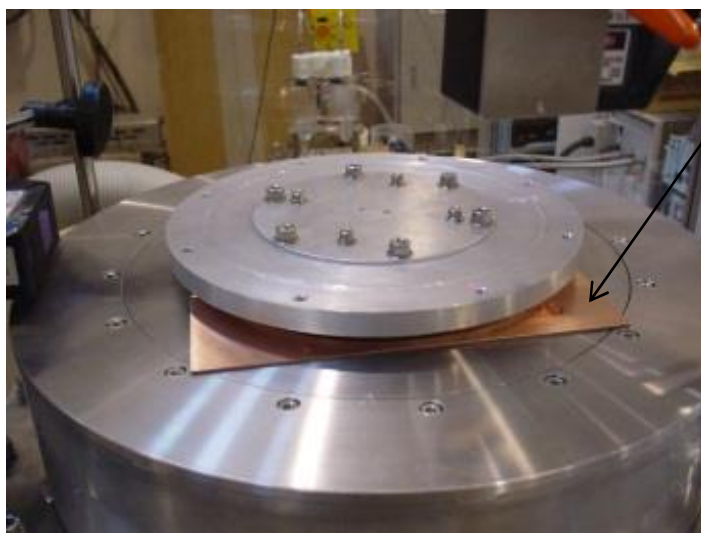


図 3-8-1 電磁誘導の原理と、電磁誘導スタビライザの実施例

3.8.2 ターンテーブルの x 軸フレ

電磁誘導スタビライザ用の銅板 (2t) を、スラスト浮上 2 号機に組み込み、ターンテーブル #3 を使用した時の特性を測定する。結果を図 3-8-2 に示す。

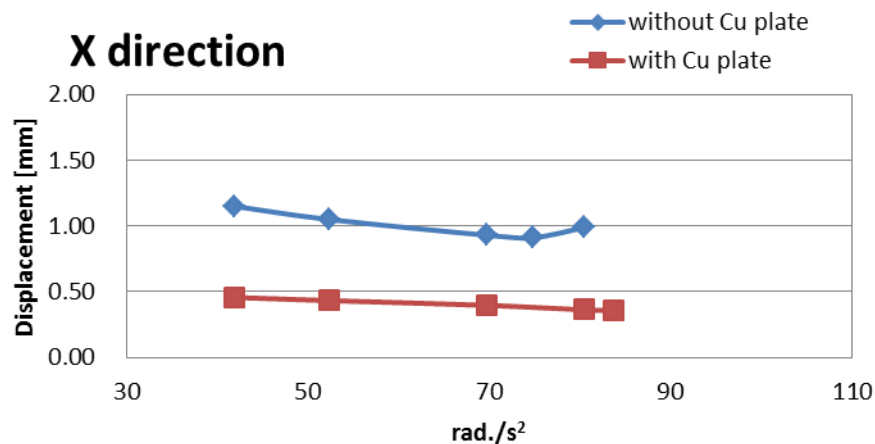


図 3-8-2 x 軸フレに対する電磁誘導ブレーキの効果

x 軸方向のフレはターンテーブルの回転に同期しているため、周波数が高いため電磁誘導スタビライザの効果は顕著で、銅板の無い時に比べ、フレは半減している。

3.8.3 ターンテーブルの z 軸フレ

同様に z 軸方向のフレの測定結果を図 3-8-3 に示す。

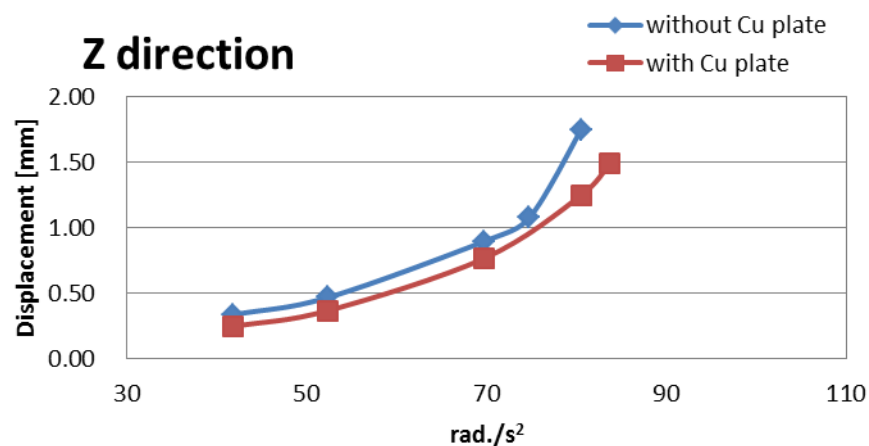


図 3-8-3 z 軸フレに対する電磁誘導スタビライザの効果

x 軸のフレがターンテーブルの回転に同期して、高速であるのに対して、 z 軸のフレは加速時の浮上りなので、周波数が低く、電磁誘導スタビライザの効果は大きくはない。

若干の効果として、加速度を $81\text{rad./s}^2 \Rightarrow 84\text{rad./s}^2$ (2000rpm/2.5s) に上げることができている。

3. 9 スラスト浮上方式のまとめ

3.9.1 スピナとしての性能

以上の結果から、実験機としてはスラスト浮上 2 号機と、ターンテーブル #3 の組合せに於いて、電磁誘導スタビライザを採用した場合が、最も良い特性が得られた。評価の対象として決めた 4 項目の特性のうち、定常回転数 209rad./s (2000rpm) 以上と、ターンテーブルの浮上高さ (チャンバの壁が構成できれば可) についてはそれぞれ、 209rad./s の回転速度が得られていることと、ターンテーブルの浮上高さ 3mm 以上を確保できていることから、チャンバの壁 2mm を構成できるので、目標を達成したと言える。

しかし、ターンテーブルの加速度 105rad./s^2 以上とフレ 0.2mm 以下については、それぞれをまとめると、加速度は 84rad./s^2 フレは x 軸 : 0.4mm z 軸 : 1.5mm となり、目標はまだ達成できていない。

本稿の趣旨である超伝導体を利用した半導体製造用スピンドル処理装置として評価を行うと、加速度、フレともに目標値を達成できていないので、レジスト膜を均一に塗布する目的のスピンドルコーティング装置としては適していないが、スピンドルコーティング装置に比べ、低速で済むスピンドル洗浄装置としての利用は可能と考えられる。

また、本スラスト浮上方式は、処理チャンバの部分の設計が比較的簡単にできるため、商品化のハードルはそれ程高くはないものと考えられる。

第4章 ラジアル浮上方式

4.1 浮上要素

4.1.1 浮上体の磁気回路

スラスト浮上方式に於いては、ターンテーブル自体に基板等を搭載するが、ラジアル浮上方式では磁気浮上用マグネットの上部に基板搭載用のターンテーブルを設ける構成である。そこでラジアル浮上方式では基板を搭載するターンテーブル部をターンテーブルと称し、浮上用マグネット部を浮上体と称することとする。

ラジアル浮上方式に於ける浮上体も、スラスト浮上方式に於けるターンテーブル同様、浮上を保持する力の確保と、ターンテーブル立上時間短縮のための軽量化が必要である。

そこで、基本となる考え方は以下の2つである。

- ①磁束密度の最も大きく取れるネオジウム系マグネットを選択する
- ②凸極は設けないが、磁性体を同極のマグネットで挟む構成とする

解析を行なった、マグネットの配置、磁性体をマグネットで挟む磁気回路モデルとその解析条件を図4-1-1に示す。

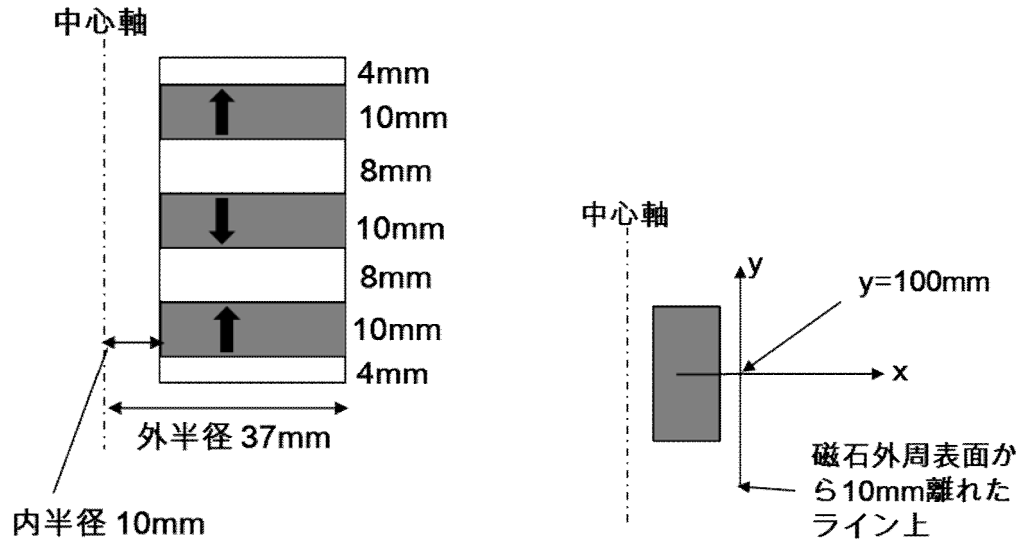


図 4-1-1 浮上体の磁気回路モデル (左) 解析条件 (右)

磁気解析を行なった結果を、図4-1-2、図4-1-3に示す。

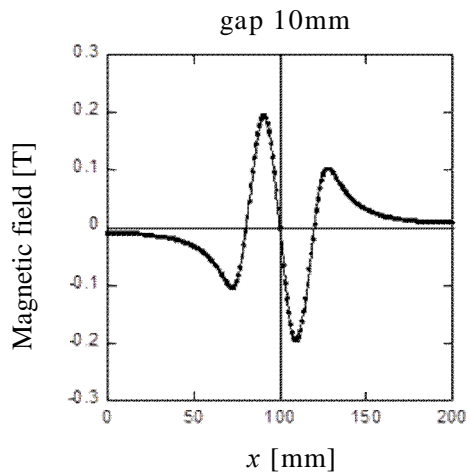


図 4-1-2 x 方向磁束密度

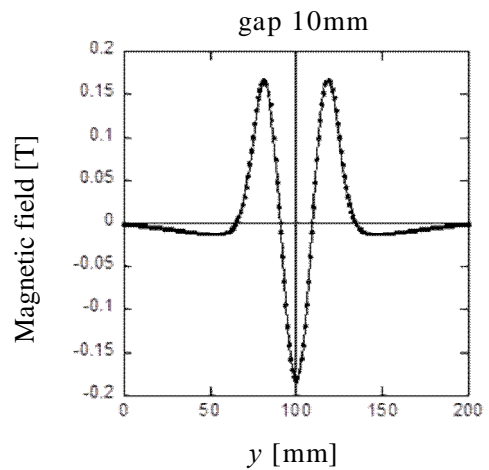


図 4-1-3 y 方向磁束密度

ラジアル浮上方式に於ける浮上体は重量物であるマグネット，磁性体が中心部に配置されるため，スラスト浮上方式よりも慣性モーメントを小さくすることが可能となる。

慣性モーメントが小さくなる割には，磁気解析結果では磁束密度がターンテーブルと同程度であるので，浮上力に対しては十分なレベルであると予想される。この仕様で製作した浮上体とターンテーブルを図 4-1-4 に示す

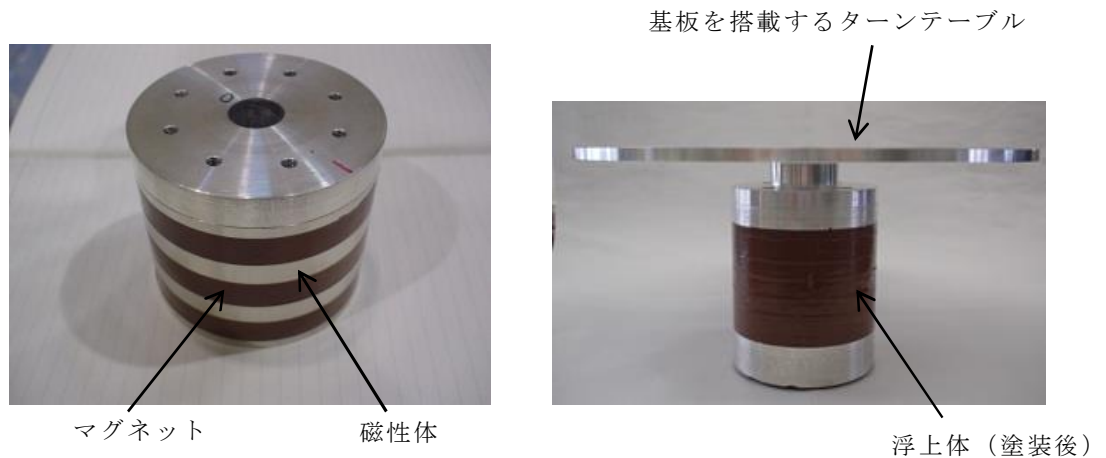


図 4-1-4 浮上体 (左) ターンテーブルを取付けた浮上体 (右)

4.1.2 HTS バルクの構成

スラスト浮上方式に於いて，HTS バルクと浮上マグネットの対向面積が大きい程，浮上能力が大きいことが分かっているので，HTS バルクはマグネットの円周全体をカバーするように配置する。

ただし，HTS バルクは円筒形のを製作することができないので長方形の HTS バルクを正 12 角形に配置することによりマグネットと対向させる。

その様子を図 4-1-5 に示す。

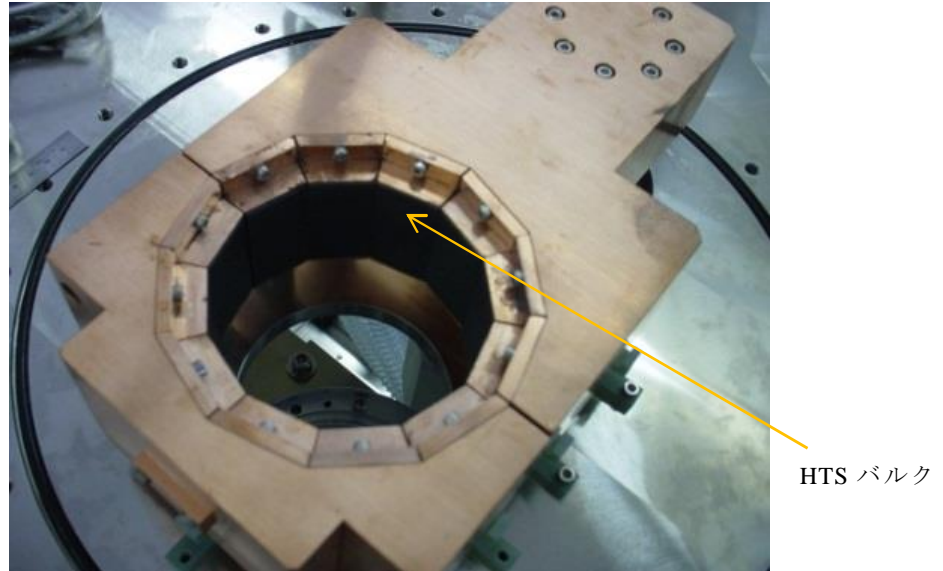


図 4-1-5 正 12 角形に配置した HTS バルク

4.1.3 実験機の構成

HTS バルクを臨界温度 (T_c) まで冷却する構造として図 4-1-5 に示すように銅製の冷却プレートに取付け、それをステンレス製のチャンバ内に配置し、外気と断熱できるレベルにチャンバ内を真空にするクライオスタットを構成し、GM 冷凍機で冷却プレートを冷却している。HTS バルクの温度は 30~40K に冷却している。

実験機の構成を図 4-1-6 に、実験機であるラジアル浮上 1 号機の外観を図 4-1-7 に示す。(4)

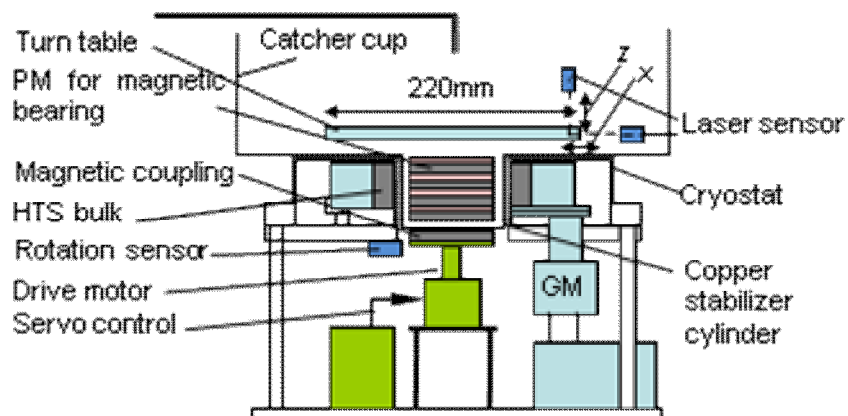


図 4-1-6 ラジアル浮上方式の構成

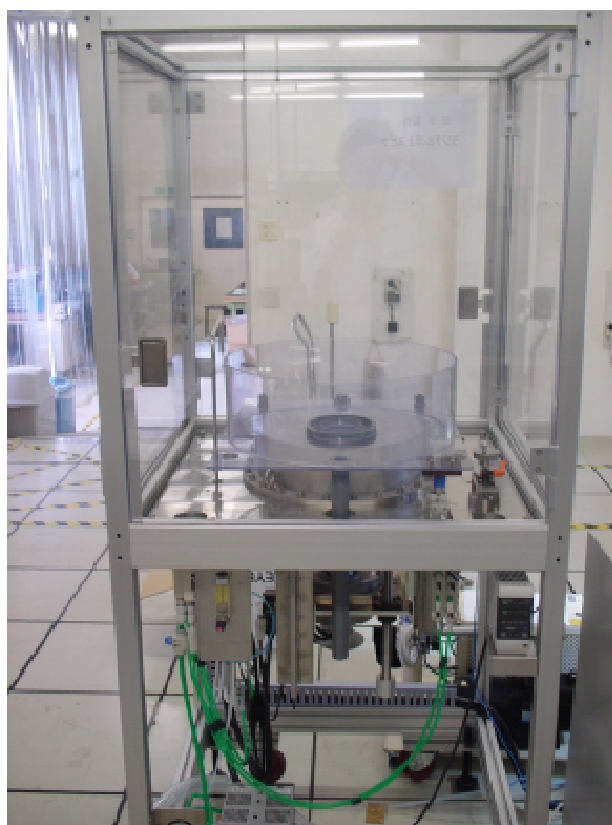


図 4-1-7 ラジアル浮上 1 号機

4. 2 ラジアル浮上方式の静特性

4.2.1 浮上体の x 軸剛性

ラジアル浮上 1 号機での x 軸剛性について測定を行った結果を図 4-2-1 に示す。スラスト浮上方式では z 軸の剛性が強く、 x 軸は弱かったが、ラジアル浮上方式では逆になることが予想されるが、結果はその通り同一変位量に対して、約 10 倍の荷重を要し、 x 軸は非常に強くなっている。

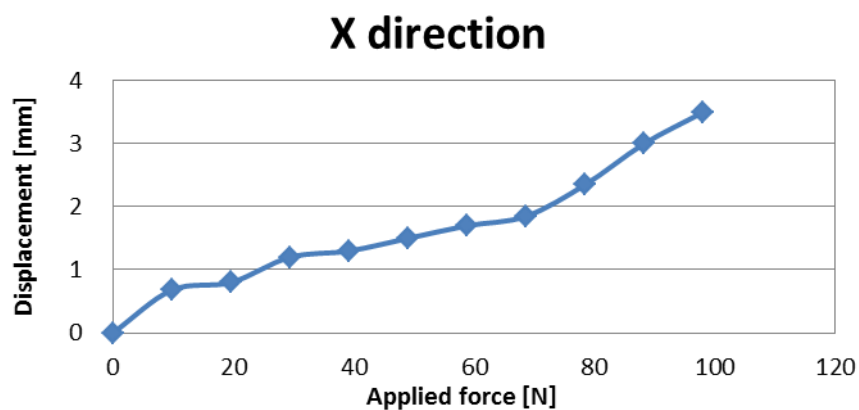


図 4-2-1 ラジアル浮上方式の x 軸剛性

4.2.2 浮上体の z 軸剛性

ラジアル浮上 1 号機での z 軸剛性について測定を行った結果を図 4-2-2 に示す。z 軸剛性はスラスト浮上方式に比べ弱くなっているが、約 30% の減少であり、予想以上に強いことが分かった。従ってラジアル浮上方式では浮上体の慣性モーメントを小さくでき、かつ z 軸剛性が強いことから、立上り時のターンテーブルの浮上に強いことが期待できる。

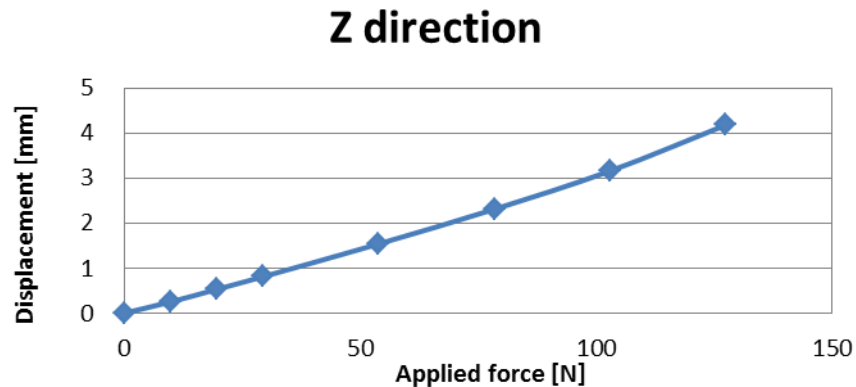


図 4-2-2 ラジアル浮上方式の z 軸剛性

4. 3 駆動要素

4.3.1 アキシシャル磁気カップリング

スラスト浮上方式で用いたターンテーブルの慣性モーメントは 0.02kgm^2 であるのに対して、ラジアル浮上方式で用いる浮上体の慣性モーメントは 0.005kgm^2 で、 $1/4$ である。また、ラジアル浮上方式の z 軸剛性は予想以上に強いことから、スラスト浮上方式に於いて使用した、アキシシャル磁気カップリングを使用しても、問題ないことが分かる。但し、磁気カップリングの吸引力を弱めるために、カップリング間距離を 10mm から 13mm に拡大して使用する。

4. 4 ラジアル浮上方式の動特性

4.4.1 ターンテーブルの x 軸フレ

ラジアル浮上 1 号機の動特性を測定した。x 軸方向のフレについて図 4-4-1 に示す。

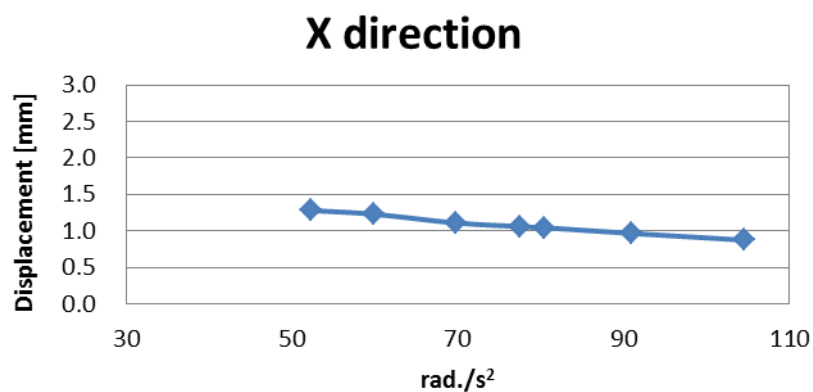


図 4-4-1 ラジアル浮上 1 号機の x 軸フレ

4.4.2 ターンテーブルの z 軸フレ

同様に z 軸方向のフレについて図 4-4-2 に示す。

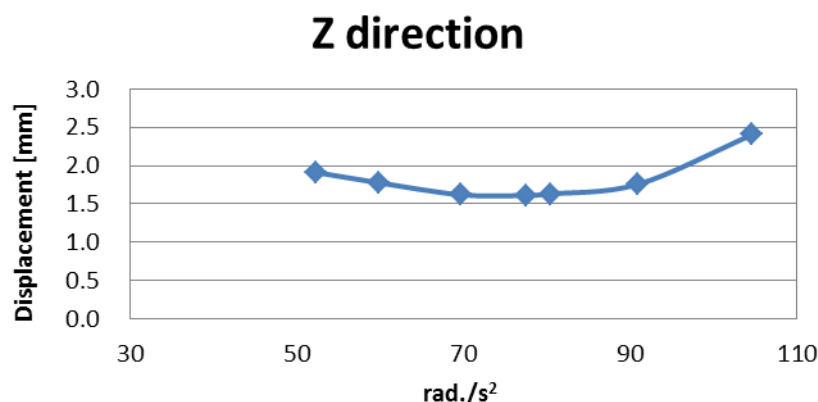


図 4-4-2 ラジアル浮上 1 号機の z 軸フレ

フレの値そのものはまだ大きいですが、スラスト浮上方式に比べ、慣性モーメントが小さい分、立上り時の加速トルクが小さくて済み、浮上体の浮上りを抑えることができ、スラスト浮上方式では達成できない、 105rad./s^2 (2000rpm/2s) を達成している。

4. 5 パッシブ制御

4.5.1 パッシブ制御の原理

スラスト浮上方式では、フレを抑えるために電磁誘導の原理を利用した電磁誘導スタビライザを採用し、一定の効果が得られているので、ラジアル浮上方式に於いても同様の効果が期待できるので、試みる。

ラジアル浮上方式に於いては、HTS バルクと浮上マグネットの対向が面ではなく円筒形となっているので、銅板は円筒状に加工している。製作した銅筒 (2t) を図 4-5-1 に示す。



図 4-5-1 電磁誘導スタビライザ用銅筒

4.5.2 ターンテーブルの x 軸フレ

x 軸方向のフレの特性を図 4-5-2 に示す。

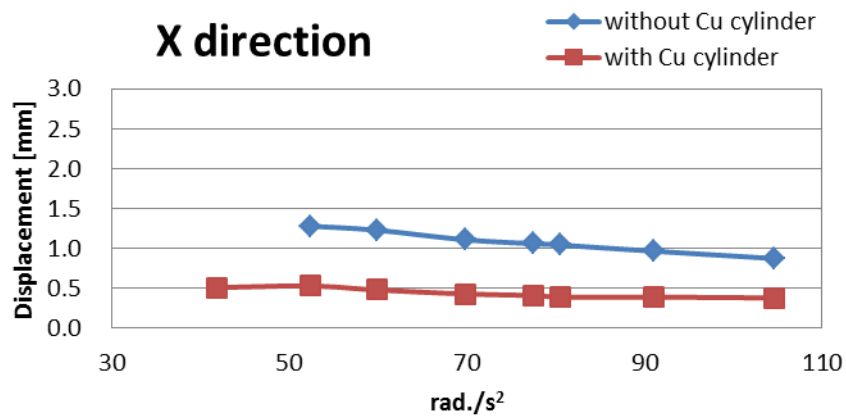


図 4-5-2 x 軸フレに対する電磁誘導ブレーキの効果

x 軸のフレは浮上体の回転に同期しているため、周波数が高いため電磁誘導スタビライザの効果は顕著で、スラスト浮上方式の時同様、同筒の無い時に比べ、フレは半減している。

4.5.3 ターンテーブルの z 軸フレ

同様に z 軸方向のフレの特性を図 4-5-3 に示す。

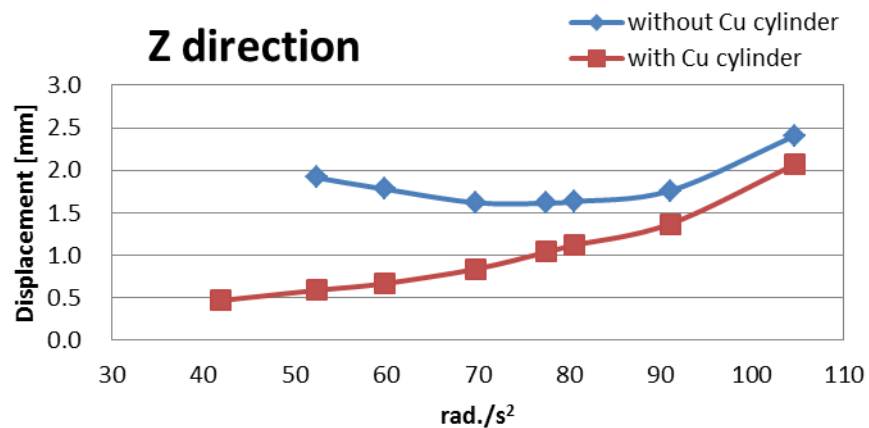


図 4-5-3 z 軸フレに対する電磁誘導ブレーキの効果

x 軸のフレが浮上体の回転に同期しているのに対して、 z 軸のフレは加速時の浮上りなので、周波数が低く、 x 軸ほどの効果はないが、約 10% のフレ低減効果がある。

4. 6 その他のフレ改善策

4.6.1 ターンテーブルの低慣性化

ラジアル浮上方式では重量のある浮上用マグネットを中心部に配置できるので慣性モーメントを低くできるので、立上り時のトルクが低くても良く、ターンテーブルの浮上りが少ないので、その分安定性が増し更に早い立上りが可能となる。その結果、スラスト浮上方式では立上り時の加速度が 84rad./s^2 が限界であったのに対して、ラジアル浮上方式では目標の 105rad./s^2 を達成できた。

しかし、目標の加速度を達成している分、浮上りは 2.1mm と大きい。

スラスト浮上方式のターンテーブルは浮上用のマグネットが配置されているので、今以上の低慣性モーメント化は難しいが、ラジアル浮上方式のターンテーブルは、基板等の処理物を搭載するためのものであり、形状的に剛性を確保できる範囲内で低慣性モーメント化を図ることができる。そこで図 4-6-1 に示すような低慣性モーメント化を図った。計算上はターンテーブル部のみの比較で、 0.0043kgm^2 から 0.0026kgm^2 に低減している。



図 4-6-1 ターンテーブルの低慣性モーメント化前（左） 後（右）

4.6.2 ターンテーブルの x 軸フレ

ラジアル浮上方式に於けるターンテーブルの低慣性モーメント化を図る前と、図った後の x 軸方向のフレ特性を図 4-6-2 に示す。グラフは両者とも電磁誘導スタビライザを使用した時のものである。

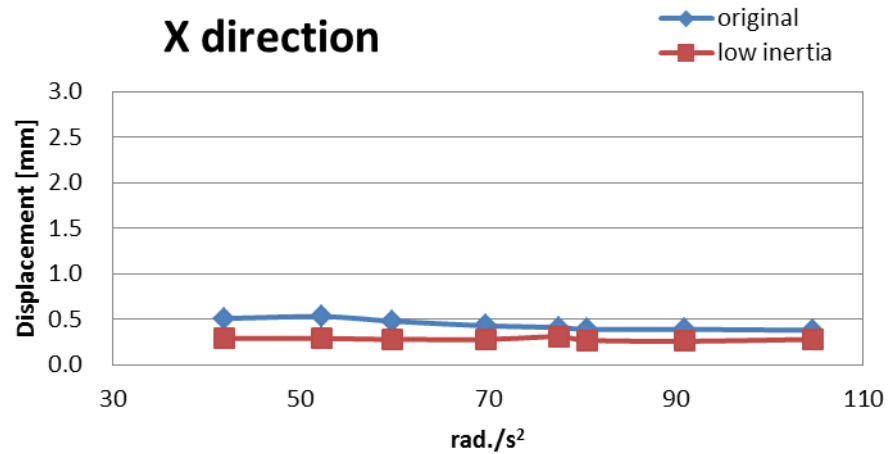


図 4-6-2 x 軸フレに対する低慣性モーメント化の効果

フレの低減効果としては、ターンテーブルの浮上り防止策であるので、予想通り x 軸の低減効果は低く、目標の立上りの加速度 105rad./s^2 に於いて、 0.4mm から 0.3mm で、低減量は僅かである。

4.6.3 ターンテーブルの z 軸フレ

同様に、ターンテーブルの低慣性モーメント化を図る前と、図った後の z 軸方向のフレ特性を図 4-6-3 に示す。こちらも電磁誘導スタビライザを使用した時のものである。

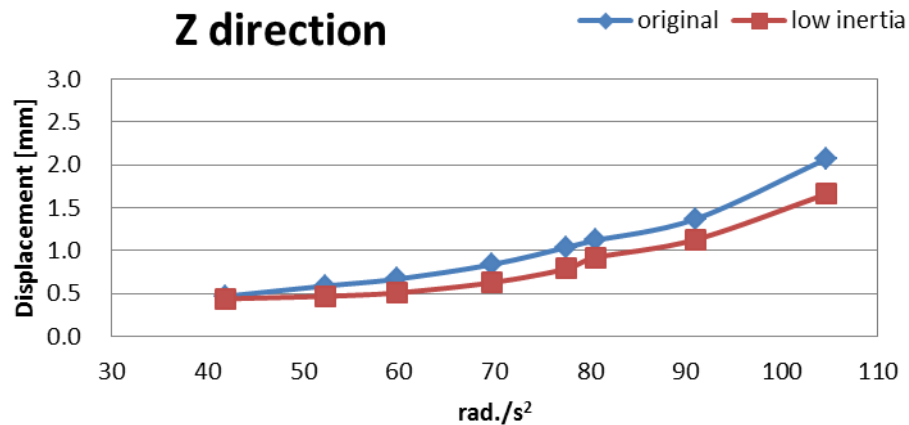


図 4-6-3 z 軸フレに対する低慣性モーメント化の効果

ターンテーブルの低慣性モーメント化による浮上り防止策なので、 z 軸方向のフレ低減効果は、 x 軸よりも大きく、 2.1mm から 1.7mm に、約 20% 低減できている。

4. 7 ラジアル浮上方式のまとめ

4.7.1 スピナとしての性能

以上の結果から、実験機としてはラジアル浮上 1 号機に於いて、ターンテーブルの慣性モーメントを小さくすることで、最も良い特性が得られた。

評価と対象として決めた 4 項目のうち、定常回転数 209rad./s (2000rpm) は達成できている。浮上高さについては、浮上体の直径方向にクライオスタット内周面から 5mm のギャップを保持してる。このギャップに 2mm 厚さの銅筒を介在させても 3mm のギャップが存在するので、装置の実用化に対して問題はない。ターンテーブルの加速度 105rad./s^2 はクリアしており、スラスト浮上方式に比べ、1 項目前進しているが、フレに対しては 0.2mm 以下に対して、 x 軸 : 0.3mm z 軸 : 1.7mm となり、目標はまだ達成されていない。

本稿の趣旨である超伝導体を利用した半導体製造用スピ処理装置として評価を行うと、定常回転数、加速度を達成できたので、レジスト膜を均一に塗布する目的のスピコーティング装置に一步近づいてはいるが、フレの値が大きく、安定した成膜は期待できず、コーティング装置への応用は難しい。

スラスト浮上方式の実験機と同様、スピ洗浄装置としての利用は可能と考えられる。

ラジアル浮上方式では、磁気浮上により浮上体を保持する部分がターンテーブルの下部に位置しているため、処理チャンバの構造が多少複雑になる。従って、商品化時には多少設計的な工夫が必要となる。

第 5 章 低慣性スラスト浮上方式

5. 1 低慣性スラスト浮上方式検討

5.1.1 低慣性スラスト浮上方式検討の目的

第 3 章で述べたスラスト浮上方式、第 4 章で述べたラジアル浮上方式のいずれの方式に於いても、浮上体の慣性モーメントが大きいと回転の立上り時に浮上体の浮上りが発生し、安定性が損なわれる傾向がある。そこで本章では浮上要素、駆動要素を共に見直し、第 3 の浮上方式の検討を行う。浮上体の浮上要素としては、慣性モーメントを更に小さくしたターンテーブルの試作を行う。

また、浮上体の浮上りは磁気カップリングの浮上側、駆動側の安定時の状態から回転位相にズレが生じることにより、吸引力が変化するために発生している。そこで、駆動要素として吸引力の変化が少ない電磁誘導カップリングを検討することとする。

第 3 の浮上方式の概念図を図 5-1-1 に示す。

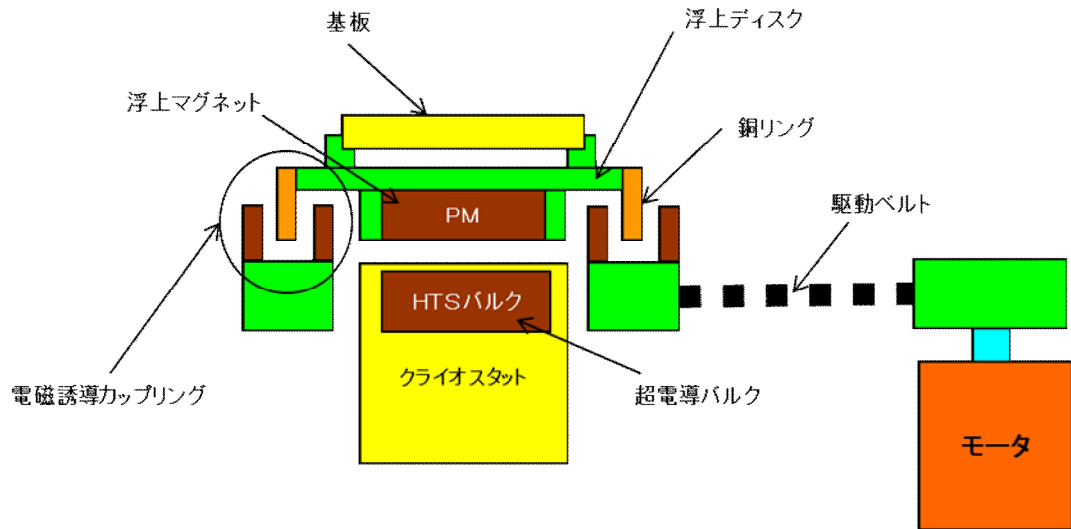


図 5-1-1 低慣性スラスト浮上方式概念図

5. 2 浮上要素

5.2.1 ターンテーブルの磁気回路

本方式もスラスト浮上方式，ラジアル浮上方式と同様に，基本となる考え方として，下記の2点を採用。

- ①磁束密度の最も大きく取れるネオジウム系マグネットを選択する
- ②磁性体による凸極を設け，マグネットで挟む構成とする

解析を行なった磁気回路モデルを図 5-2-1 に，磁気解析ソフトにより FEM 解析を行なった結果を図 5-2-2 に示す。

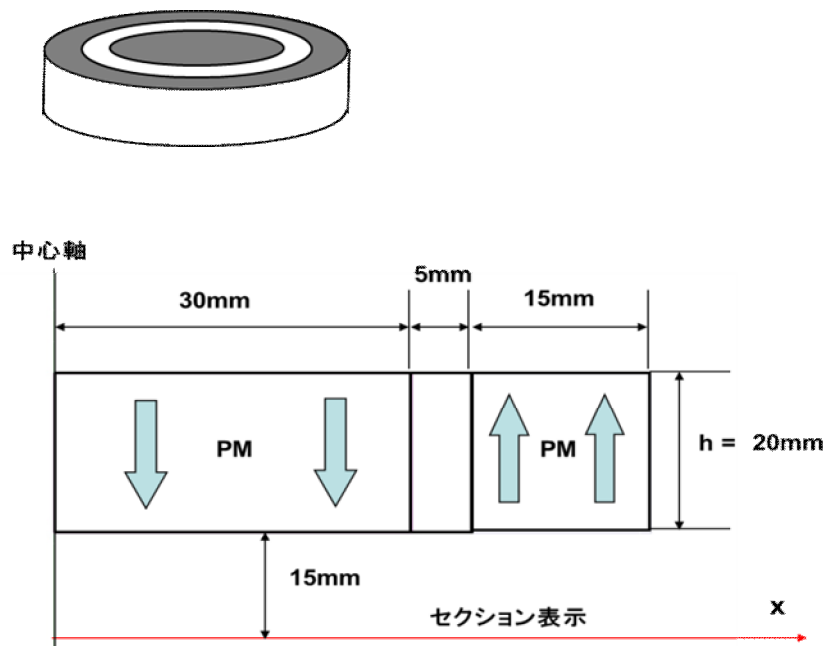


図 5-2-1 ターンテーブルの磁気回路

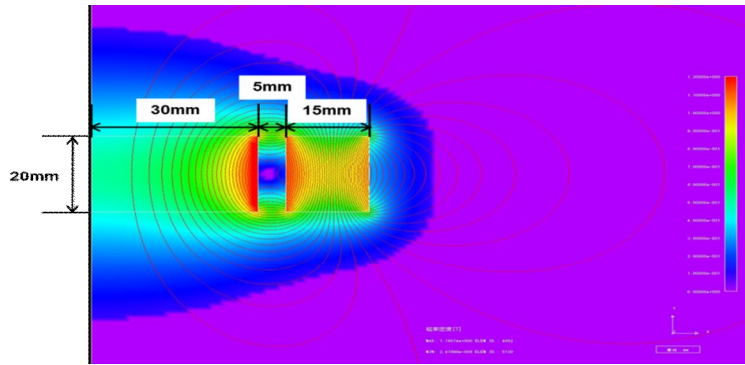


図 5-2-2 FEM 解析

5.2.2 バルクの構成

浮上体の磁気回路が $\phi 100\text{mm}$ であることから、HTS バルクは多少余裕をもって対向できるように、 $\phi 110\text{mm}$ の単体のものを用いている。

図 5-2-3 にその様子を示す。

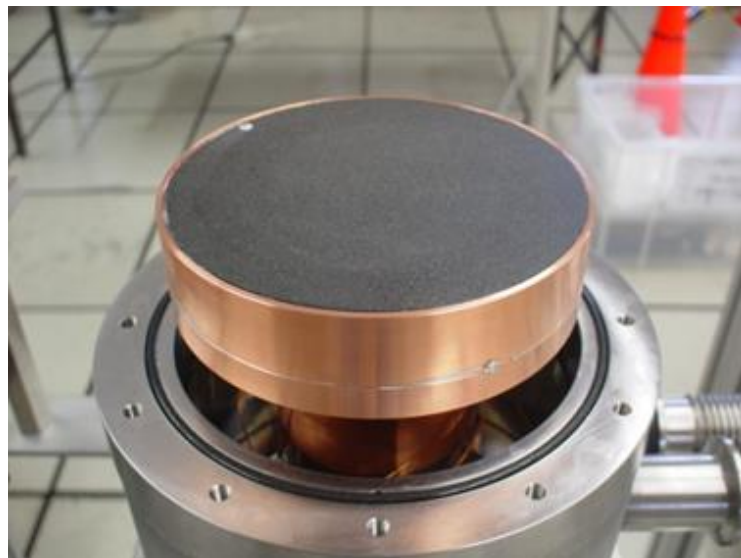


図 5-2-3 HTS バルク

5. 3 駆動要素

5.3.1 電磁誘導カップリング

電磁誘導カップリングと言えども、単純にマグネットと銅板を対向させただけのカップリングでは吸引力の変化が現れるので、図 5-3-1 に示すように、浮上側銅リングの内外面を駆動側内外輪に設けた 4 個の駆動マグネット挟む配置とすることで、銅リングの内外面に作用する吸引力を相殺する構造としている。実機では駆動マグネットを 8 組配置している。製作したカップリングを図 5-3-2 に示す。

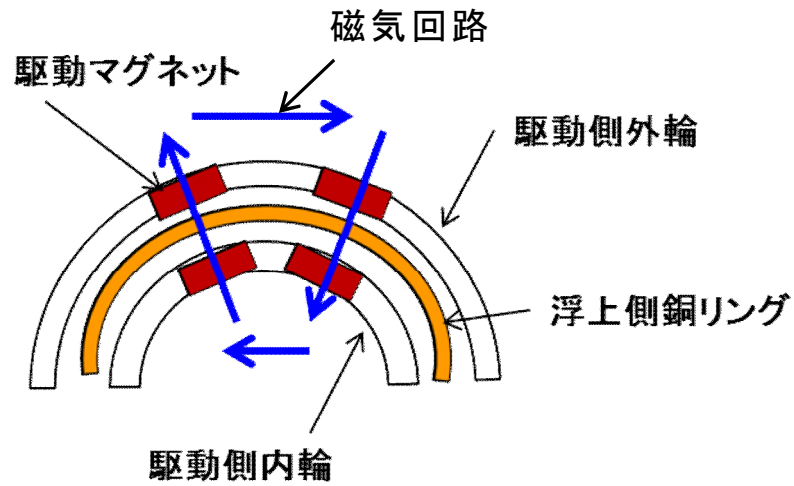


図 5-3-1 電磁誘導カップリングの磁気回路

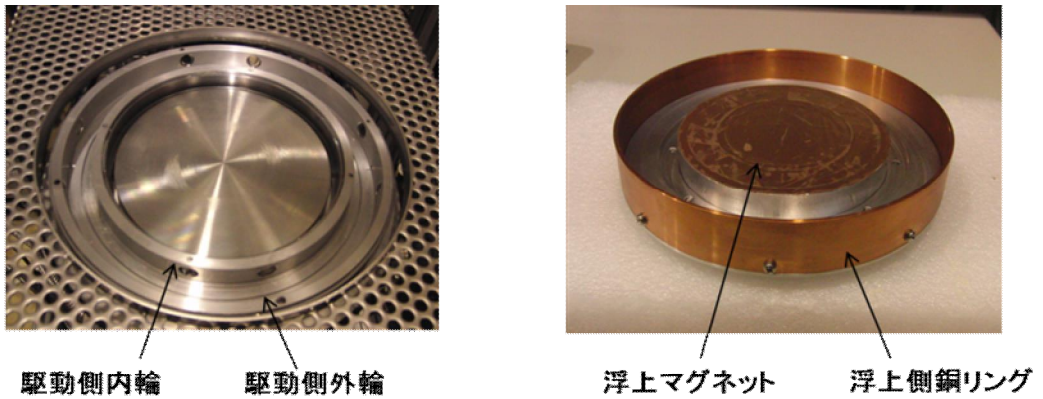


図 5-3-2 駆動側マグネット内外輪（左） 浮上側銅リング（右）

低慣性スラスト浮上方式では、浮上体の浮上マグネットを中心部に、駆動用の銅リングを外周に配置しているため、銅リングを駆動させるための駆動内外輪はベルトドライブ方式を採用している。駆動部の外観を図 5-3-3 に示す。スラスト浮上方式、ラジアル浮上方式、いずれにおいても電磁誘導スタビライザは有効であったので、本方式でも最初から採用している。



図 5-3-3 低慣性スラスト浮上実験機 駆動部の外観

磁気カップリングは、駆動側、被駆動側（浮上側）で位相差（極数の 1/2 以下）を生ずるが、全体の動きは同期しているのに対して、電磁誘導カップリングは滑りを伴って追従していく。立上り時に於いても駆動側のスピードに遅れながら追従する。更に定常のスピードに達した時にも、駆動側、被駆動側でスピードの差を持ったまま安定している。駆動側の回転数を N_0 、被駆動側回転数を N_1 とした時、スベリ率 s は、下記の式で定義される。

$$s = (N_0 - N_1) / N_0$$

本機では $s=0.34$ となっている。その関係を図 5-3-4 に示す。

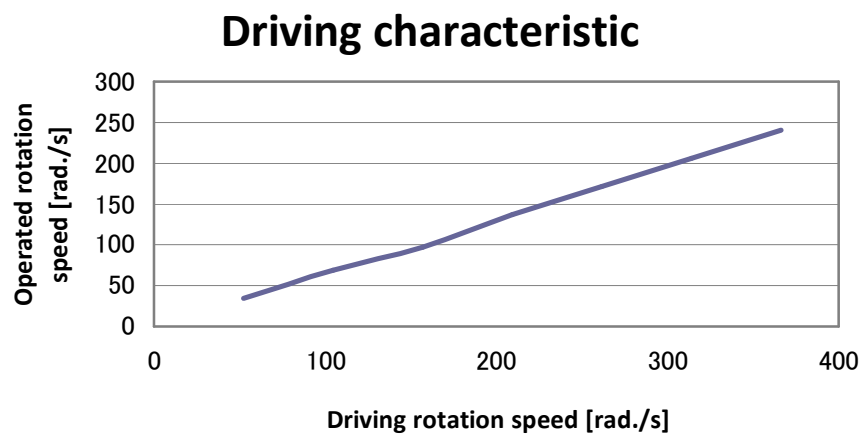


図 5-3-4 電磁誘導カップリングの駆動特性

5. 4 低慣性スラスト浮上方式の静特性

5.4.1 ターンテーブルの x 軸剛性

低慣性スラスト浮上方式の実験機に於いて、 x 軸方向の剛性を測定した結果を図 5-4-1 に示す。

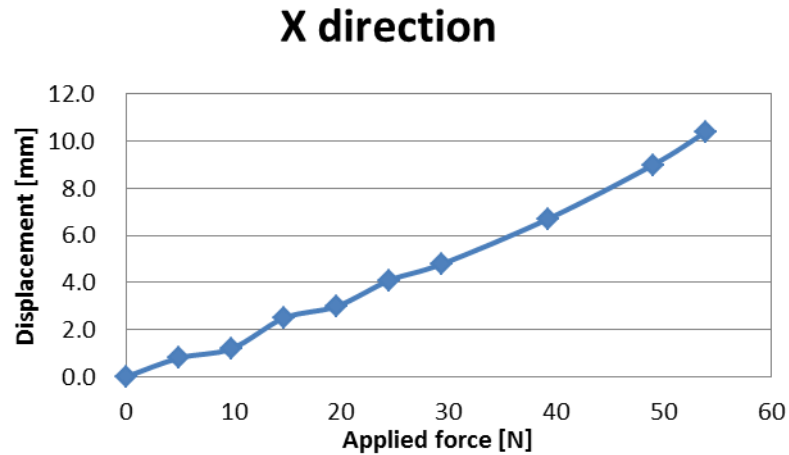


図 5-4-1 低慣性スラスト浮上方式の x 軸方向剛性

スラスト浮上方式の実験機と比較すると、30N 以上の荷重を掛けてもまだターンテーブルが保持されていることから、本方式の方が強い結果となっている。

5.4.2 ターンテーブルの z 軸剛性

同様に、 z 軸方向の剛性を測定した結果を図 5-4-2 に示す。

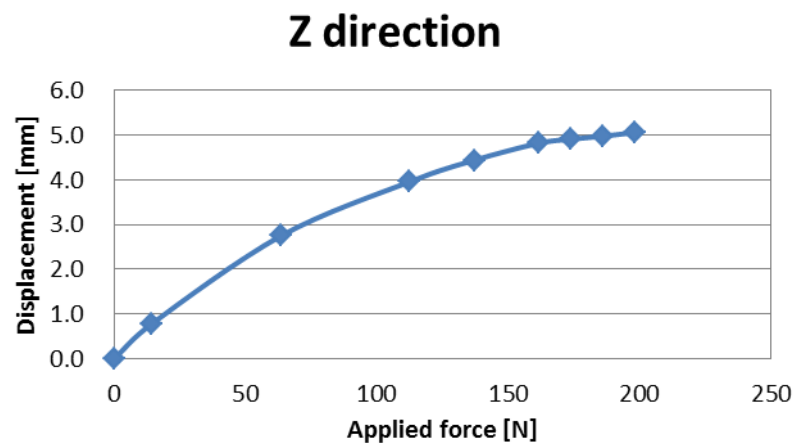


図 5-4-2 低慣性スラスト浮上方式の z 軸方向剛性

スラスト浮上方式の実験機と比較すると、約 200N の荷重でターンテーブルが保持されなくなっており、ほぼ同等の結果となっている。

5. 5 低慣性スラスト浮上方式の動特性

5.5.1 ターンテーブルの x 軸フレ

低慣性スラスト浮上方式で用いた電磁誘導カップリングはスベリがあり、立上り時の加速度を自由にコントロールできないので、定常時の速度をパラメータとして、動特性を測定する。その結果を図 5-5-1 に示す。

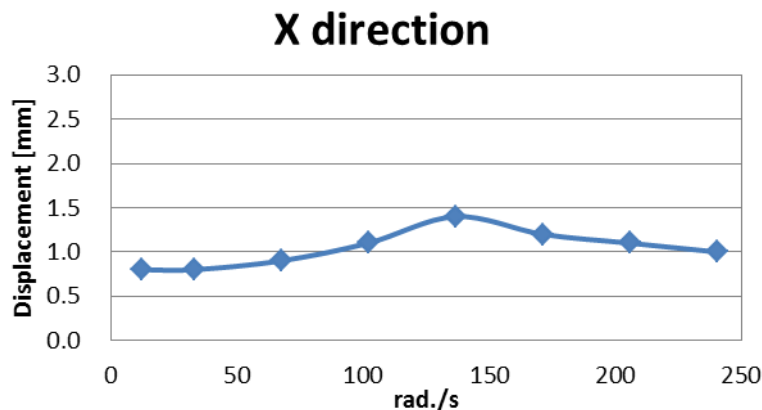


図 5-5-1 低慣性スラスト浮上方式の x 軸方向フレ

x 軸方向のフレは、10rad./s 程度の低回転領域から既に 0.8mm と大きく、目標の 209rad./s では 1.1mm と、更に大きくなっている。

5.5.2 ターンテーブルの z 軸フレ

同様に動特性、 z 軸方向フレについて測定した結果を図 5-1-2 に示す。

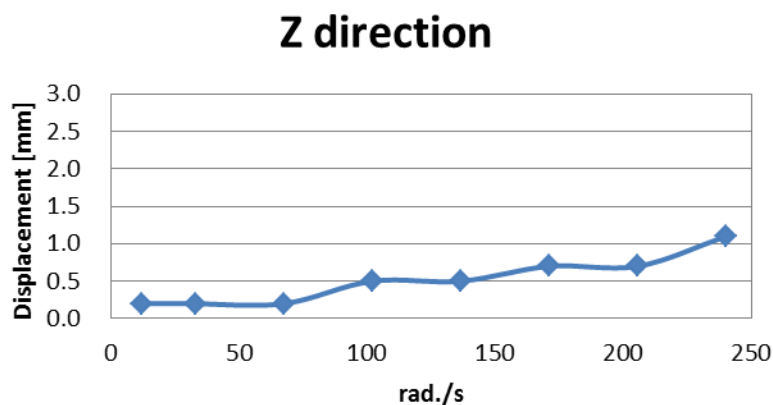


図 5-5-2 低慣性スラスト浮上方式の z 軸方向フレ

z 軸方向のフレは、低回転領域では 0.2mm と小さいが、目標の 209rad./s では 0.7mm と、評価目標値には達していないが、他方式に比べフレの値は小さく、電磁誘導カップリングの効果が出ている。

5. 6 低慣性スラスト浮上方式のまとめ

5.6.1 スピナとしての性能

本研究の評価の対象として決めた4項目のうち、定常回転速度 209rad./s は達成したが、立上り加速度は 84rad./s² で未達成となった。

ターンテーブルの浮上高さは約 5mm 浮上しており、その浮上空間に 2mm 厚のチャンバ壁を構成できるので達成している。

ターンテーブルのフレについては回転速度 209rad/s (2000rpm) まで立上る時の特性で読取ると、x 軸方向：1.1mm z 軸方向：0.7mm となり、目標は未達成である。

回転速度 209rad./s に達するまでのターンテーブルの Max のフレについて、スラスト浮上方式、ラジアル浮上方式、低慣性スラスト浮上方式の3方式で比較を行うと、表 5-6-1 のようになる。

表 5-6-1 浮上方式によるターンテーブルフレ量の比較

項目	スラスト浮上方式	ラジアル浮上方式	低慣性スラスト浮上方式
x 軸方向フレ	0.4mm	0.3mm	1.1mm
z 軸方向フレ	1.5mm	1.7mm	0.7mm

z 軸方向のフレに関しては、カップリング間吸引力の変化しない低慣性スラスト浮上方式で用いた電磁誘導カップリングが有効であり、この方式のみ、z 軸方向のフレが 1mm を割る結果となっている。

一方、x 軸方向のフレに関しては低慣性スラスト浮上方式が最も大きく、1mm を超えている。図 5-5-1 を見て分かる通り、低速度時から大きなフレが発生しており、初期的にバランスが崩れていることを示している。低回転域に於いて既にバランスが崩れていることから、ダイナミックバランスではなく、スタティックバランスが崩れていることが分かる。

第6章では浮上回転体がどのように回転し、どのようなメカニズムでフレを発生するのかを理論的に解析し、フレ低減の根本的な対策について提案を行う。

第6章 超伝導浮上体の回転時フレの解析と対策

6.1 浮上体に作用する力

6.1.1 超伝導浮上に於けるマイスナー効果

超伝導体は臨界温度 (T_c) 以下になると浮上マグネットの磁場により表面上に高密度の電流が流れ、超伝導体内部への磁場の侵入を排除し、反磁性の状態になる。これをマイスナー効果と呼ぶが、この現象により浮上マグネットは z 軸方向の浮上力を得ることができる。

6.1.2 超伝導浮上に於けるピン止め効果

本研究による磁気浮上は、第II種超伝導体によるピン止め効果を利用し、HTSバルクが臨界温度 (T_c) に達した時のバルクと浮上マグネットの位置関係を、バルク内の不純物、欠陥、結晶の接合部などに量子化磁束を保持させることで、安定的に浮上状態を保つことを期待している。

このピン止め効果は x 軸方向の安定性だけでなく、バルクを貫通した量子化磁束を保持していることから、 z 軸方向の浮上力にも寄与している。

図 6-1-1 にその様子を図示する。

しかしこのピン止め力の x 軸方向の剛性に関しては、ピン止めされた中立点付近では弱く、中立点から離れるほど強くなる性質を持っている。図 3-5-4, 図 5-4-1 の x 軸剛性から、中心点が 1mm 離れた時の荷重を計算すると、3~7N 程度で、非常に小さいことが分かる。

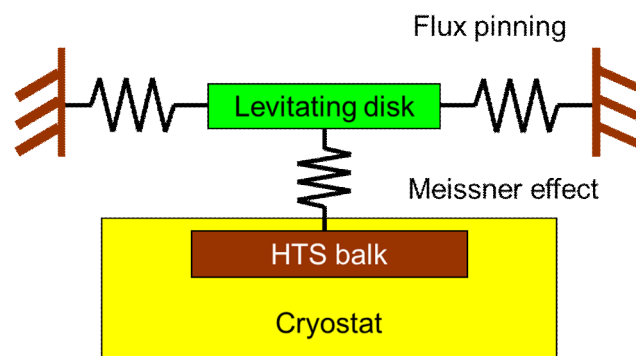


図 6-1-1 浮上体に作用する力

6.1.3 磁気カップリングによる調心効果

磁気カップリングの駆動側マグネットと浮上側マグネットを対向させて、上下のマグネットの位相が合った時には z 軸方向の吸引力が働くのみであるが、上下の芯ズレが発生すると、元の位置に戻すように x 軸方向の調心力が働く。

図 6-1-2 にその関係を示す。

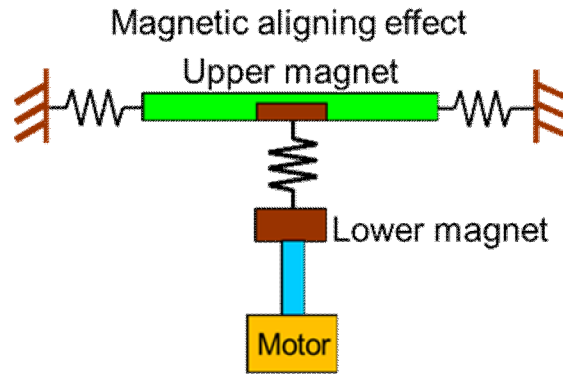


図 6-1-2 磁気カップリングにより浮上体に作用する力

一方、電磁誘導カップリングは、静止状態では何の力も生じていないが、回転速度が上昇するにつれ、 x 軸方向の調心力が働く。本研究で採用している電磁誘導カップリングは、銅リングを内輪、外輪で挟む構造を採っており、中立点に戻そうとする力は基本的にキャンセルされるので、磁気カップリングの調心力に比べれば、小さいレベルである。

z 軸方向にも駆動マグネットと、銅リングのバランスする点が存在し、高速回転領域に於いて安定する力が働く。その関係を図 6-1-3 に示す。

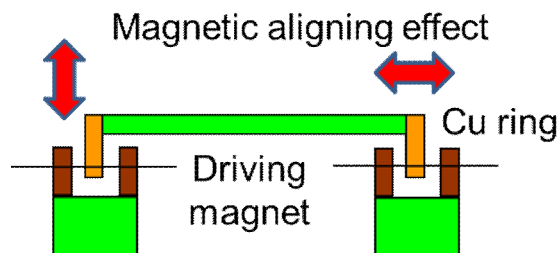


図 6-1-3 電磁誘導カップリングにより浮上体に作用する力

6.1.4 遠心力

浮上体が回転している時には重心に対して遠心力が作用し、回転中心からのブレを生ずる。遠心力は角速度の 2 乗に比例することから、低速領域では影響が小さく、中速領域から急激に影響が大きくなる。

6.1.5 ジャイロ効果

浮上体が高速定常回転をしている時、その回転軸は重心を通る慣性センタとなり、角運動量が増えない限り、安定姿勢で回転を保持しようとする。これをジャイロ効果という。本研究に於ける実験でもジャイロ効果は見られ、高速回転領域でのターンテーブルの回転は非常に安定している。

6. 2 浮上回転体に存在するセンタ

6.2.1 幾何センタ

浮上回転体には3つのセンタが存在している。

1つ目は、幾何センタである。幾何センタは浮上体の製作、加工に於ける基準となる、回転体の幾何学的なセンタである。

6.2.2 磁気センタ

2つ目は磁気センタである。磁気センタはマグネットの磁束分布に於ける分布の中心となる点である。

磁気センタはマグネットの製造過程に於ける素材の配向度、相対密度、加工精度、着磁精度等の要因により、必ずしも幾何センタに一致するとは限らない。むしろ、最初から一致していないと考えるべきである。

6.2.3 重心

3つ目は重心である。重心は浮上体の各部分に働く重力の合力が作用すると考えられる点で、浮上体の質量の中心である。

以上の3つのセンタの関係を図6-2-1に示す。

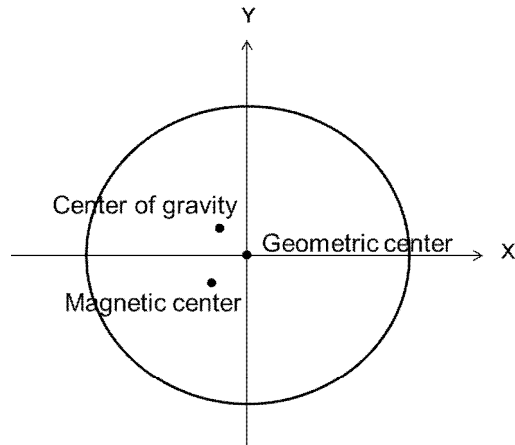


図 6-2-1 浮上回転体に於ける3つのセンタ

6.2.4 回転軸

浮上体の回転軸は、モータに於けるシャフトのような固定的に回転中心となる軸を持っていない。浮上体は自身の駆動される回転速度により作用する力の種類と大きさが変わっていくため、回転軸も変化し、移動していくことになる。そのため回転速度に応じてフレの発生メカニズムも変化していく。

6. 3 フレの発生原因

6.3.1 低速回転領域

浮上マグネットを HTS バルク上で超伝導浮上させると、ピン止め効果により安定浮上するが、このピン止め位置は磁束分布の中心となる磁気センタである。図 6-3-1 にその関係を図示する。

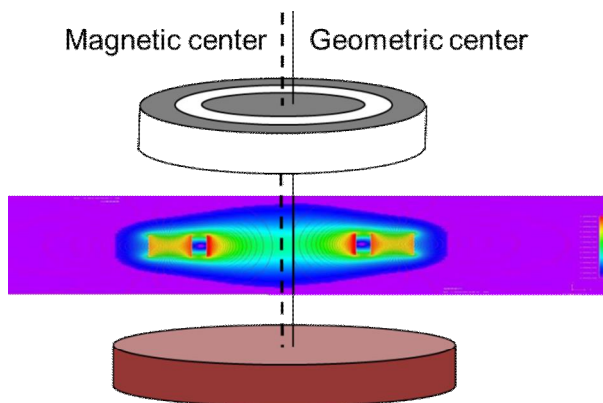


図 6-3-1 磁気センタと幾何センタの位置関係

低速回転領域ではターンテーブルを回転させると回転軸は磁気センタとなるので、磁気センタと幾何センタのズレ分がターンテーブルの x 軸のフレとなって現れる。

6.3.2 高速回転領域

浮上体が高速で回転している時はジャイロ効果により浮上体の重心で回転しようとする。現在の技術で浮上体の製造、加工を行うと、機械精度が高いので幾何センタがほぼ重心となっている。従って、高速回転領域では回転軸がほぼ重心であるため、比較的バランスが取れているのでフレが少なく、安定的に回転することが期待できる。

6.3.3 中速回転領域

中速回転領域では、回転軸が低速回転領域の磁気センタから高速回転領域の重心へ移って行く途中の段階である。この領域では、ピン止め効果、カップリングの調心効果、遠心力が交互に作用し、 x 軸のフレは安定せず、特定の速度では共振現象も発生する。

また回転軸が移動するとともに、回転軸の傾きが発生することから、すりこぎ運動が起こり z 軸のフレも大きくなる。

6. 4 フレの低減対策

6.4.1 センタ統合化

浮上回転体のフレは、低速回転領域では磁気センタと幾何センタのズレにより発生し、中速回転領域では回転軸の移動により発生することから、本研究の着眼点として、浮上体のセンタ統合化の検討を行った。

センタ統合化は2段階あり、1番目の調整1は磁気センタと幾何センタを統合させることで、低速回転領域でのフレを低減することである。

2番目の調整2は磁気センタと重心を統合させることで回転軸の移動を無くし、中速回転領域のフレを低減することである。

調整1の後に調整2を行えば、幾何センタと重心も統合されることから、高速回転領域の回転軸となる重心と幾何センタが一致し、フレも低減される。調整1, 2の関係を図6-4-1に示す。

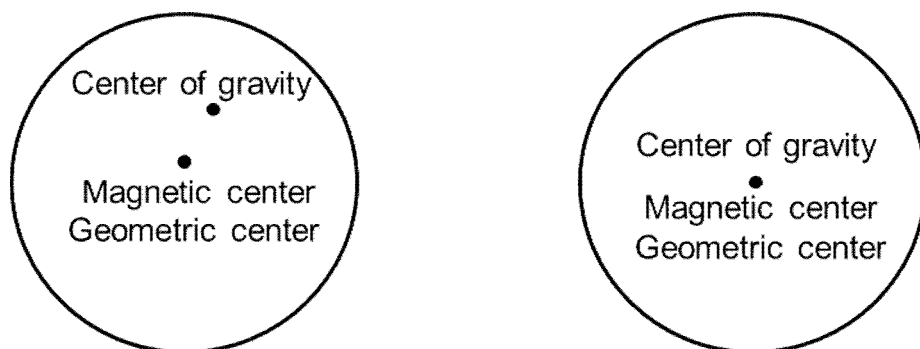


図 6-4-1 調整 1

調整 2

6.4.2 調整 1

調整1は磁気センタを幾何センタへ統合することである。磁気センタは外観上まったく見えないので、超伝導浮上で磁気センタにピン止めされた状態を作り、ターンテーブルをゆっくり回転させながら外周のフレをレーザ変位計で計測することで可視化できる。その原理図を図6-4-2に示す。その結果得られたデータが図6-4-3である。ターンテーブルが幾何センタで回転すればレーザ変位計の値は0のみを表示するが、磁気センタでピン止めされているので、計測された変位分が磁気センタと幾何センタのズレを表している。

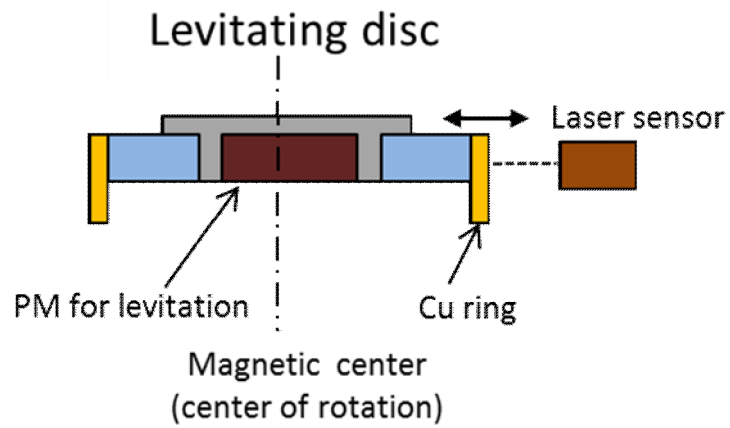


図 6-4-2 磁気センタの可視化

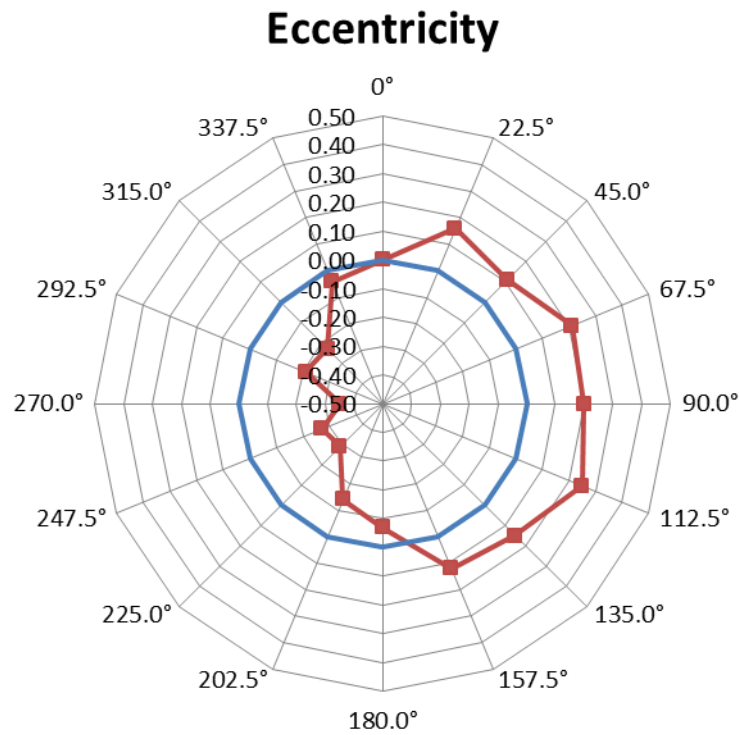


図 6-4-3 磁気センタと幾何センタのズレ

そこで両センタのズレを調整するため図 6-4-4 に示すように浮上マグネットと外周の銅リング（実際には銅リングのサポート部品）の間にギャップを設け、このギャップを調整することで幾何センタを調整し、磁気センタ＝幾何センタとする。

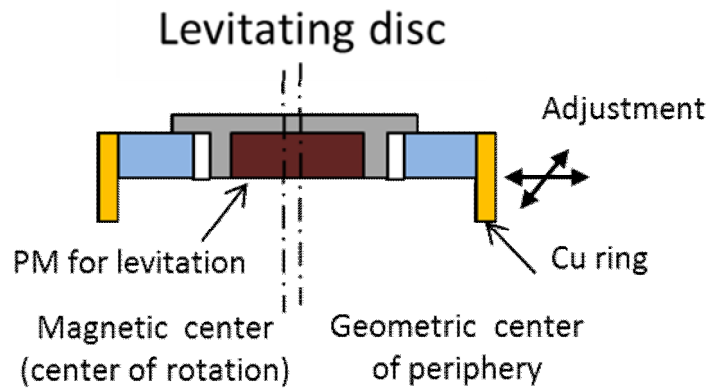


図 6-4-4 幾何センタの調整

6.4.3 調整 2

調整 2 は重心を磁気センタへ統合することである。

一般的に、重心を幾何センタへ統合することをバランス調整と称するが、この調整は回転軸を基準に調整する。しかし本研究の浮上体は中心部に浮上マグネットが位置しており、バランス調整のための軸を設けることができない。そこで、外径を基準にバランス調整を行うことが考えられる。

その重心調整法を図 6-4-5 に示す。ボールベアリング上でターンテーブルが安定した時の上部の点（軽点）にバランスウエイトを取付けることで、重心を調整する。実際にはボールベアリングのフリクションがあるので、ターンテーブルの 4 方向で確認を行う。調整 1 後に調整 2 を行うことによって、重心＝幾何センタ＝磁気センタとなり、3つのセンタの統合が図れる。

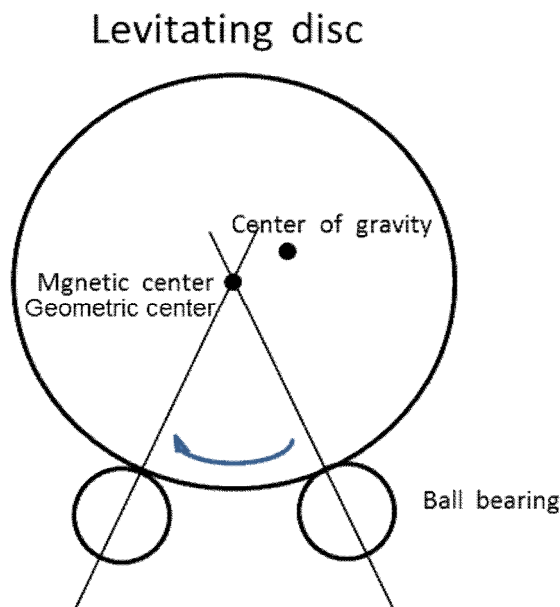


図 6-4-5 重心の調整

6. 5 調整 1 とその効果

6.5.1 幾何センタ調整

磁気センタと幾何センタのズレが図 6-4-3 より 90° 方向に 0.28mm あることが判るので、両センタを合わせるべく調整を行った。その様子を図 6-5-1 に示す。

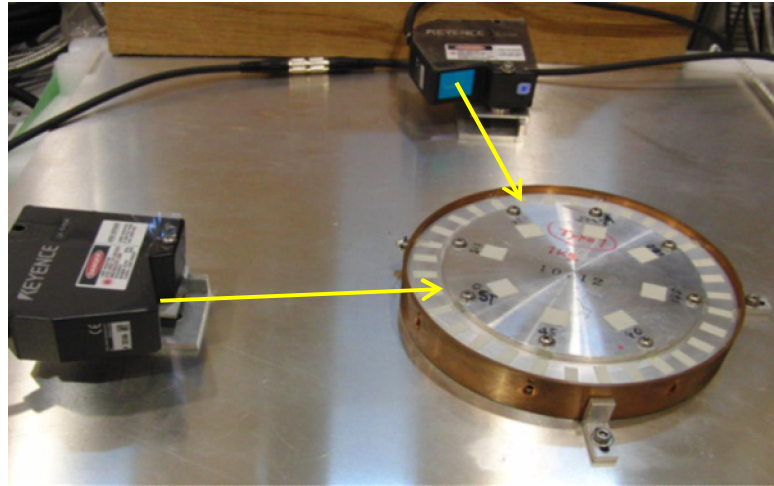


図 6-5-1 幾何センタの調整

調整した結果を図 6-5-2 に示すが、調整後はフレ幅で $\delta = 0.18\text{mm}$ (偏心 $\varepsilon = 0.09\text{mm}$) で、完璧とは言えないがほぼ磁気センタ \approx 幾何センタとなった。

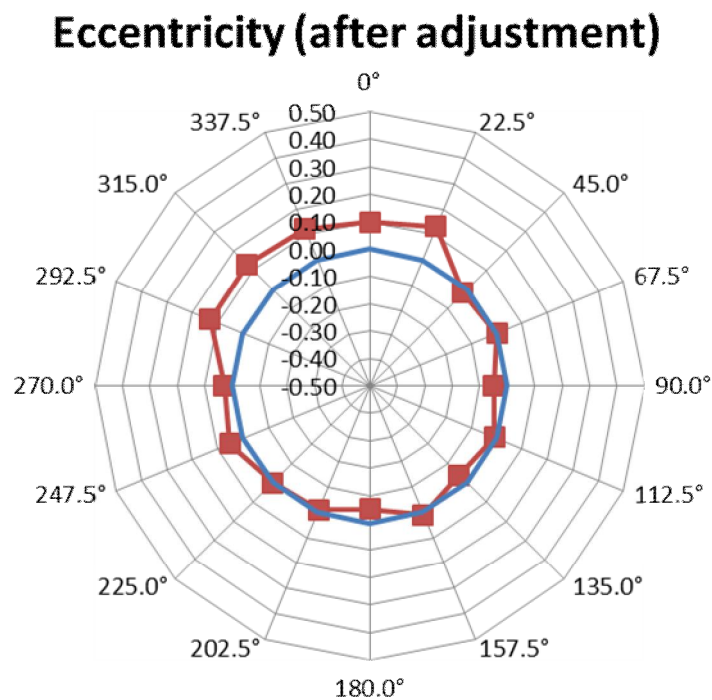


図 6-5-2 調整後の磁気センタと幾何センタのズレ

6.5.2 x 軸のフレ波形

幾何センタ調整前後の x 軸のフレ波形を図 6-5-3 に示す。

低速回転領域では磁気センタと幾何センタのズレが少なくなったため、予想通り、フレも小さくなっている。高速回転領域ではほぼ幾何センタにあった重心が、調整 1 により幾何センタから逆にずれたため調整前よりフレは大きくなっている。中速回転領域では調整前と同様、回転軸の移動が生じているためフレの大きさはほとんど変わっていない。

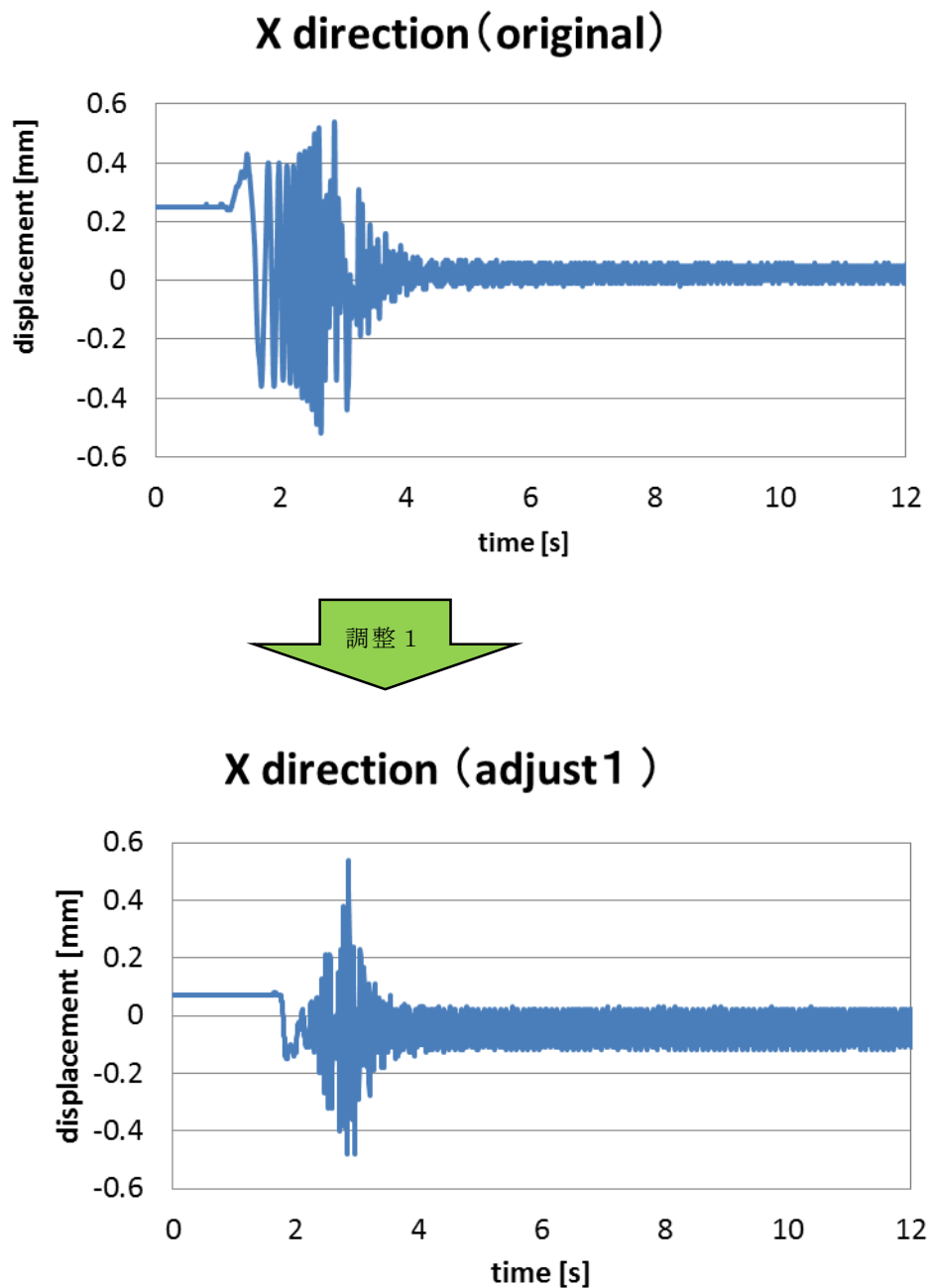


図 6-5-3 調整 1 前後の x 軸フレ波形

6.5.3 調整 1 後の動特性

幾何センタ調整前後の、ターンテーブルがスタートから設定速度に達するまでの間のフレの Max 値（動特性）を図 6-5-4 に示す。

丸で囲んだ x 軸の低速回転領域では顕著にフレ低減の効果が表れている。その他の領域では理論上変化が期待できないので、大きな差は出ていない。

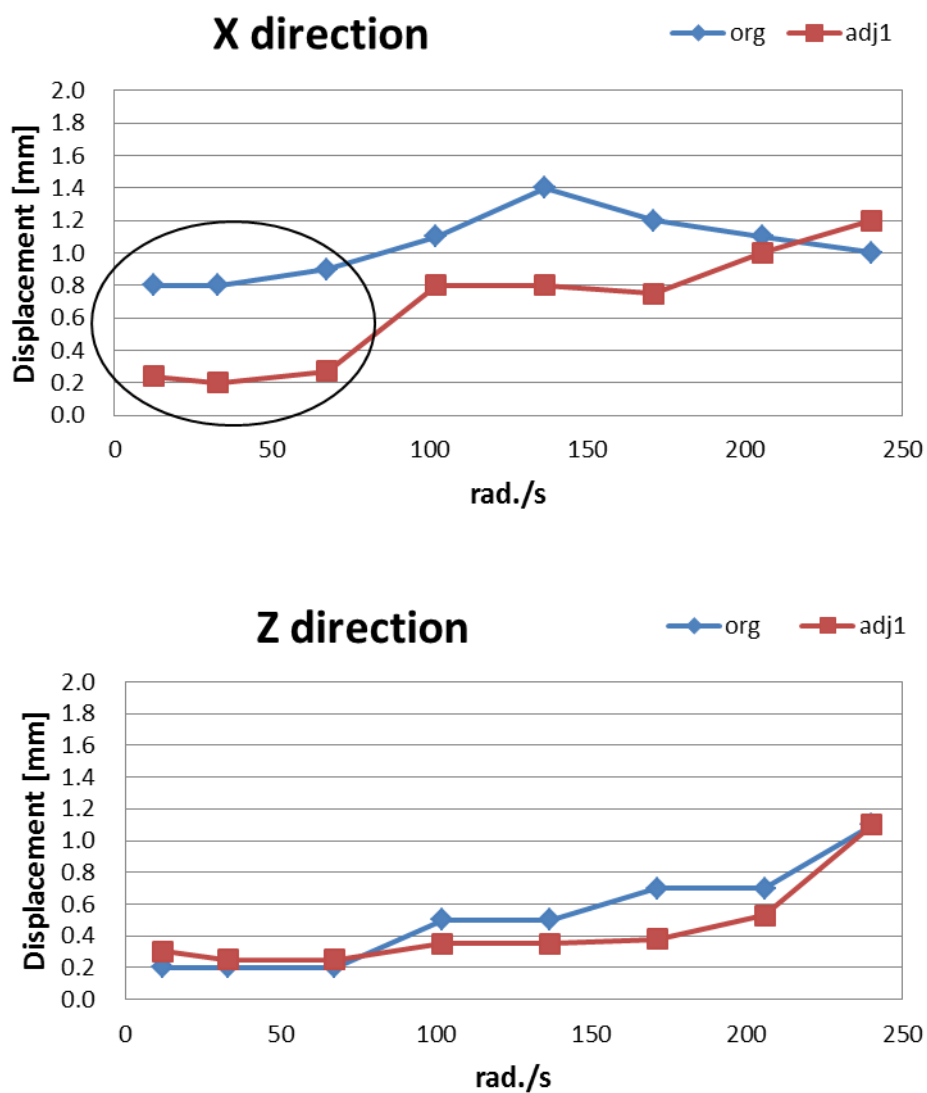
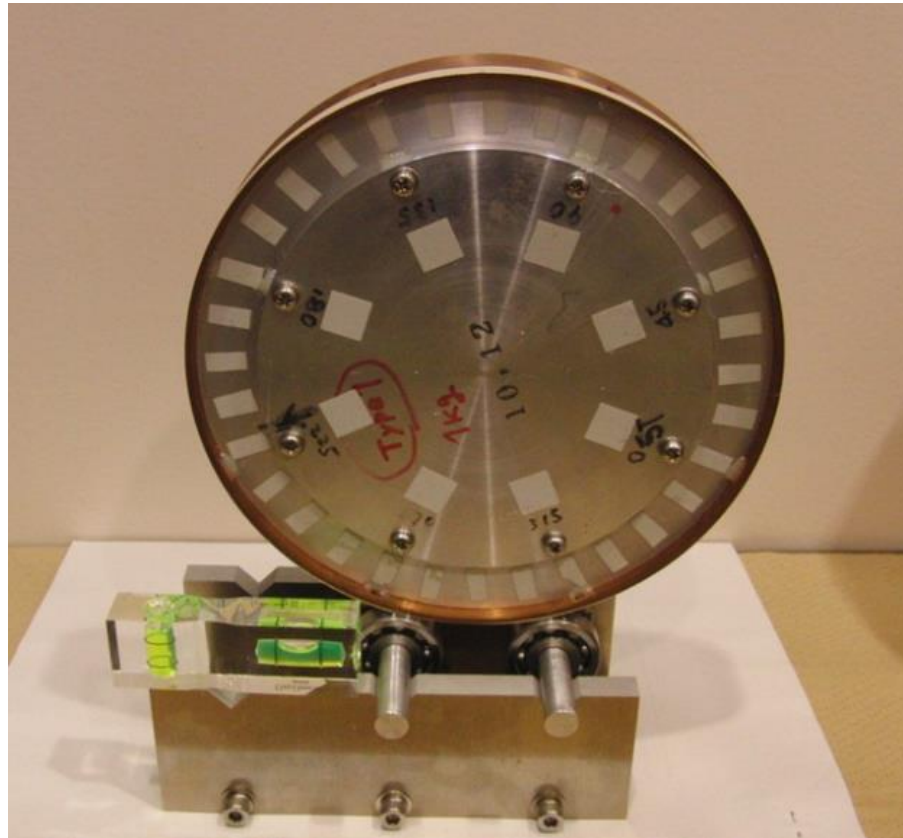


図 6-5-4 調整 1 前後の動特性

6. 6 調整 2 とその効果

6.6.1 重心調整

重心の調整を行っている様子を図 6-6-1 に示す。ボールベアリング取付台の x 軸, y 軸の水平状態を確認し, ターンテーブルのバランスを調整している。



Balancing weight

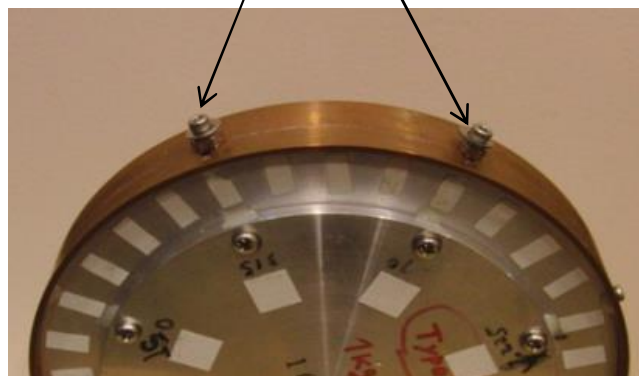


図 6-6-1 重心の調整

6.6.2 x 軸のフレ波形

調整 1, 調整 2 によるセンタの統合により x 軸のフレ波形がどのように変化したかを図 6-6-2 に示す。

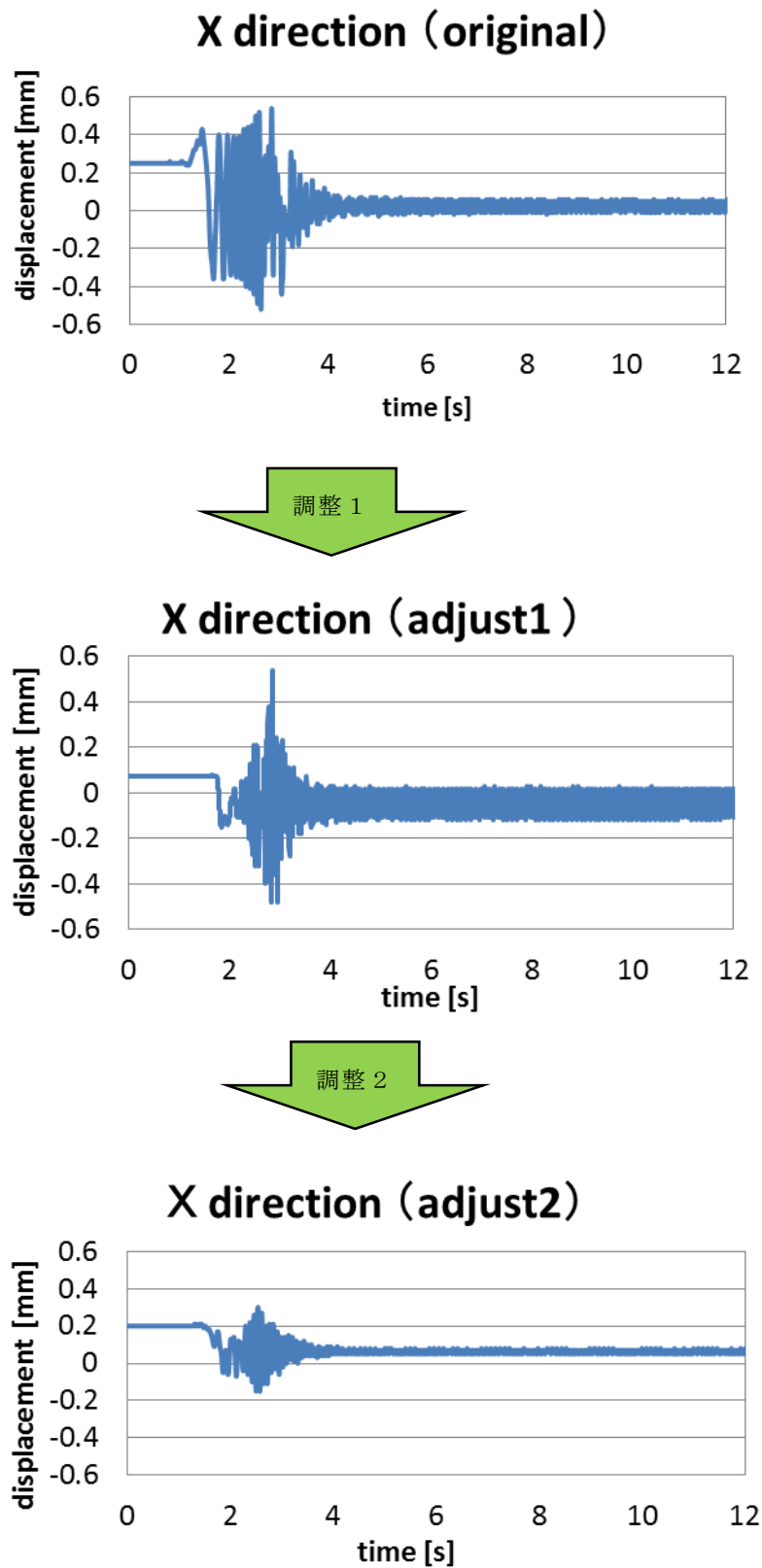


図 6-6-2 調整 1, 2 前後の x 軸フレ波形

調整 1 による結果は前述の通りであるが、調整 2 により更に中速回転領域では回転軸の移動が少なくなったことから大きなフレの低減が見られ、高速回転領域では重心と幾何センタがほぼ一致したことから更なるフレの低減効果が見られる。

6.6.3 z 軸のフレ波形

同様に z 軸のフレ波形を図 6-6-3 に示す。

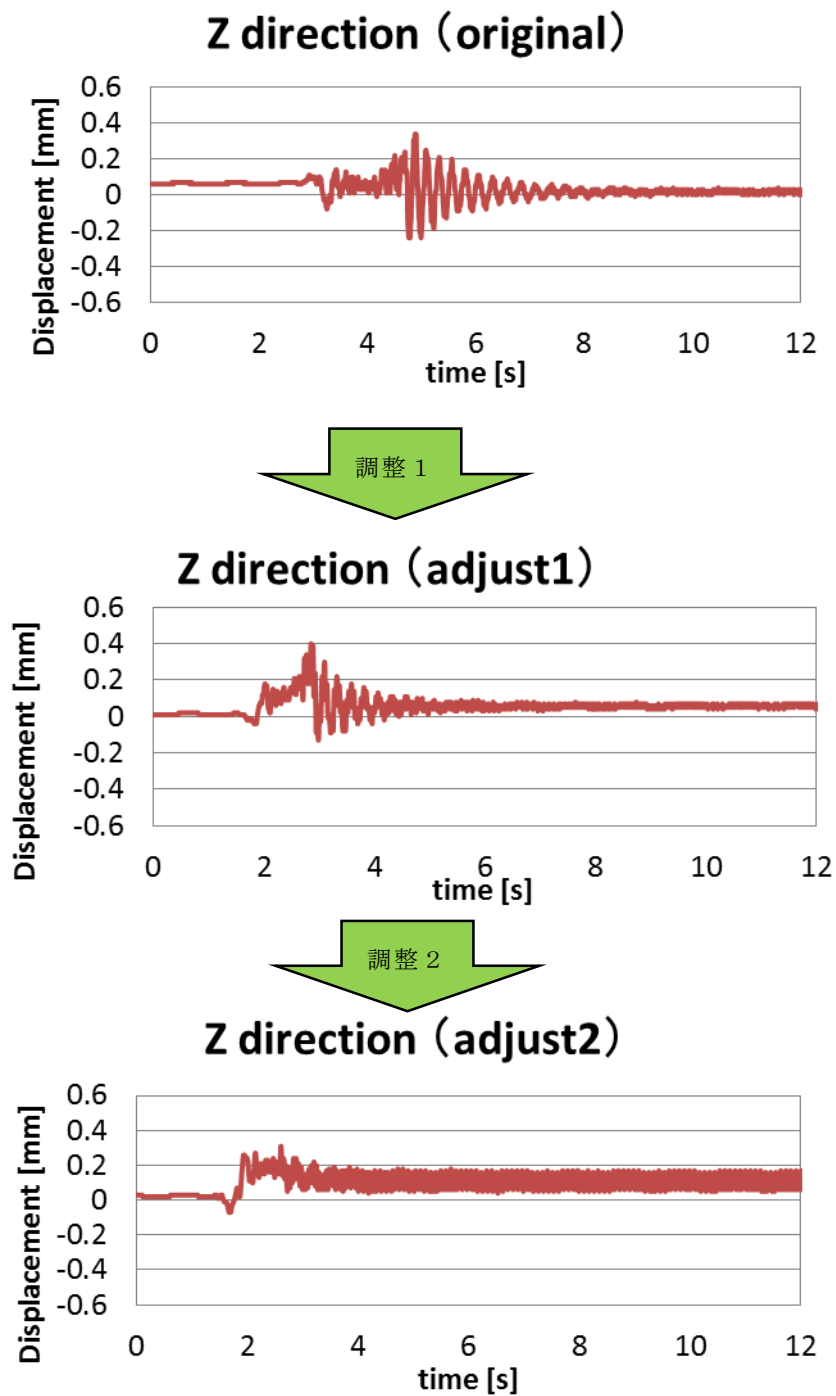


図 6-6-3 調整 1, 2 前後の z 軸フレ波形

調整 1 では幾何センタを調整して磁気センタに統合することで、低速回転領域の x 軸のフレを低減することを目的としているので、 z 軸のフレ波形にはその影響がほとんど出ていない。

調整 2 では重心を調整して磁気センタに統合しているのですが、中速回転領域での回転軸の移動が少なくなり、すりこぎ運動の発生も抑えられ、フレ低減の効果が出ている。高速回転領域では図 6-6-4 に示すような x 軸方向の慣性主軸のズレが発生し、フレは若干増加している。

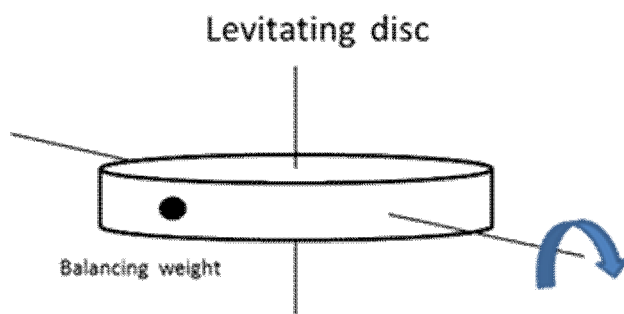


図 6-6-4 x 軸周りの慣性主軸

6.6.4 回転軸の移動

調整 2 によるフレ低減効果を見るため回転軸の移動の様子を、ターンテーブルの x 軸、 y 軸にレーザ変位計を設置しそのリサージュ図形を測定した。まず、調整 2 前で、磁気センタと重心にズレがある時の回転軸の移動の様子を図 6-6-5 に示す。これは 0.4s 間の動きを観測したものであるが、回転軸は内外に大きく移動しながらすりこぎ運動をしていることが分かる。

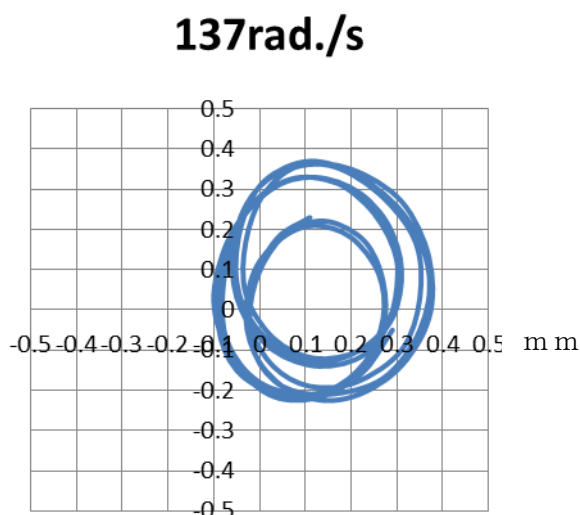


図 6-6-5 調整 2 前の回転軸の移動

中速回転領域および高速回転領域での調整 2 前後の回転軸移動の比較について、図 6-6-6, 図 6-6-7 に示す。いずれの速度に於いても調整前より、調整後の方が、回転軸の移動は小さくなっている。調整前の 102rad./s では回転軸移動の軌跡が、幅のある形となっている。これは軸の移動が重心によって単純に振り回されているのではなく、ピン止め効果、電磁誘導カップリングの調心効果等により、回転軸が内外に大きくフレながら移動していることを示している。

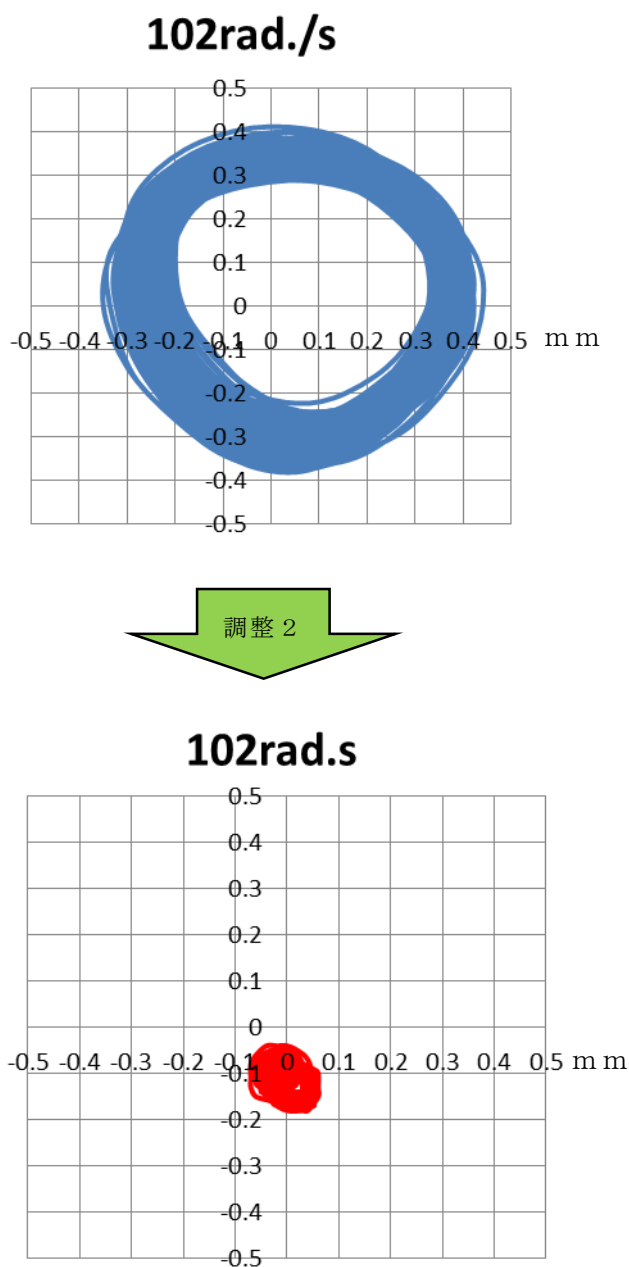
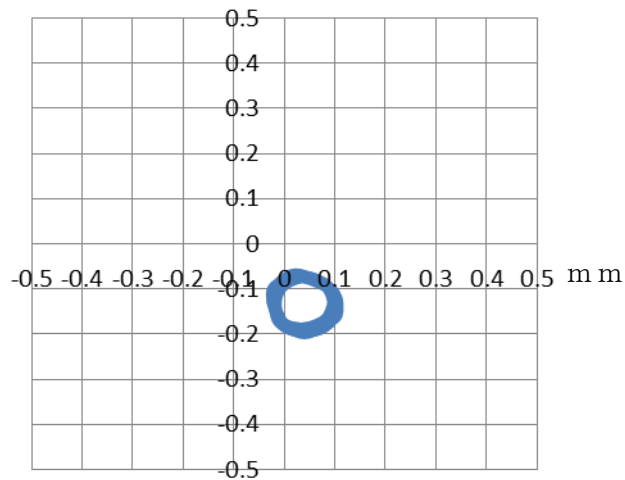


図 6-6-6 調整 2 前後の回転軸の移動 (102rad./s)

206rad./s



206rad./s

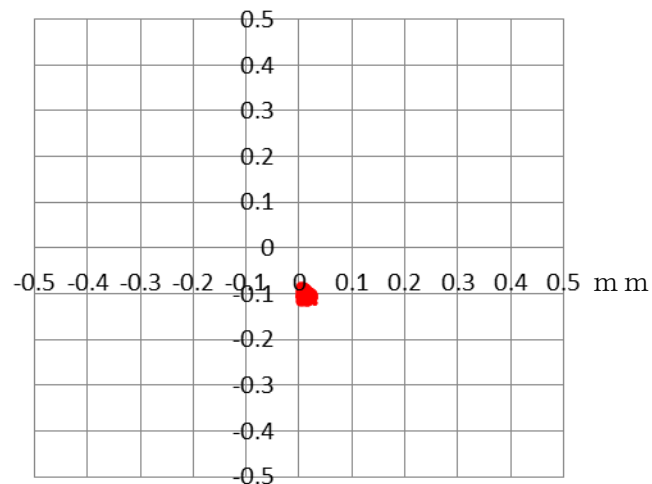


図 6-6-7 調整 2 前後の回転軸の移動 (206rad./s)

6.6.5 調整 2 後の動特性

重心調整前後の、ターンテーブルがスタートから設定速度に達するまでの間のフレの Max 値 (動特性) のうち、 x 軸のフレを図 6-6-8 に、 z 軸のフレを図 6-6-9 に示す。調整 1 により磁気センタ \equiv 幾何センタとし、調整 2 により幾何センタ \equiv 重心としたことで、磁気センタ \equiv 重心が達成できているので、調整 2 後は最もフレが小さくなっている。

x 軸のフレは目標の設定速度 209rad./s で使用してもフレは Max0.5mm となりフレの目標に近づいている。しかし中速回転領域での回転軸の移動が完全に無く

なった訳ではなく, 設定速度 105rad./s に設定して使用するとフレ Max は 0.8mm とまだ大きい値となっている。

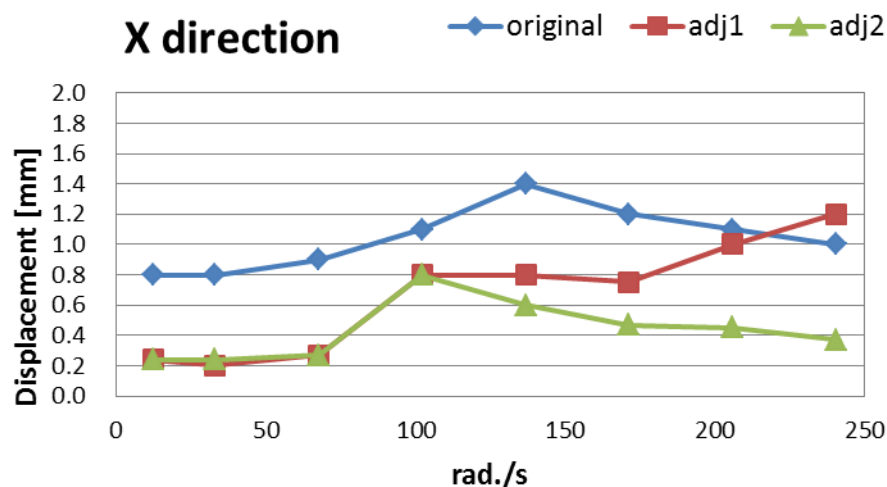


図 6-6-7 調整 1, 2 前後の動特性 (x 軸)

z 軸のフレは回転軸の移動がかなり低減されたため, すりこぎ運動の影響も少なく, すべての速度領域に於いて, フレの低減が図れて, 目標の設定速度 209rad./s で使用してもフレは Max0.4mm となりフレの目標に近づいている。

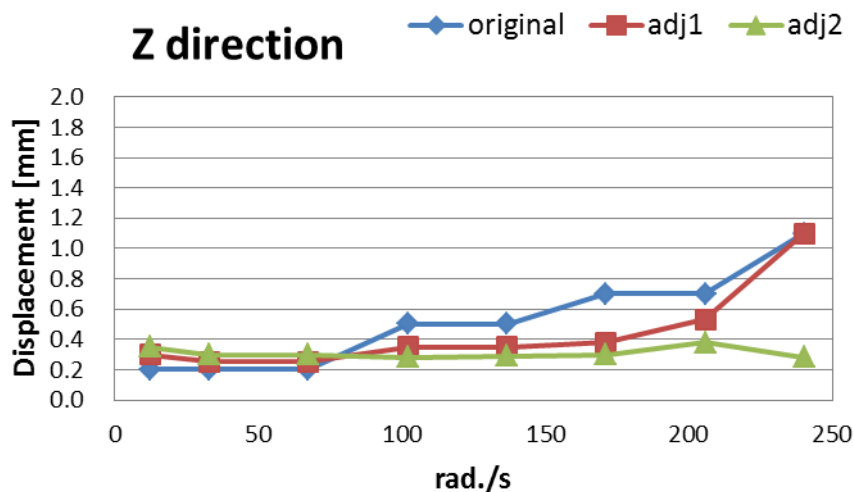


図 6-6-8 調整 1, 2 前後の動特性 (z 軸)

6. 7 センタ統合化

6.7.1 センタ統合化の効果

本研究で試みた, 磁気センタ, 幾何センタ, 重心の 3 つのセンタの統合化は非常に簡便的な方法であるが, それなりの効果が得られ, ターンテーブルのフレ対策としては, 非常に有効であることが実験的に示された。

マグネットの製造工程で磁気センタを幾何センタに合わせて作り込むことは非常に難しい。その理由は、磁気センタの位置決めが一番大きく関与している配向度がマグネットの着磁前に決まっているにもかかわらず、磁気センタの確認は着磁後、磁気浮上させて初めて可視化できるからである。

従って、調整 1 で行う磁気浮上体の磁気センタに幾何センタを統合する方法は浮上回転体のフレ低減のための必須の手法であると考ええる。

また、調整 2 で行う重心の統合に関しては、システムティックに機械計測を行う方法として、フィールドバランス法が考えられる。この方法は、浮上回転して振動している浮上体の基準位置からのズレ（位相）と、振動の大きさ、即ち偏心ベクトルを測定することにより、どの位置にバランスウェイトを装着すれば良いかを計測するものである。しかし、図 6-6-6 にみられるように回転軸の移動は大きな円を描いたり、小さな円を描いたりしている。即ちフィールドバランス法で測定した変位ベクトルは、大きさ、位相が常に変化しており、ベクトルの平均を取るとあたかもバランスが取れているように見えてしまう。従って浮上体の外径基準で重心の調整を行う方法も浮上回転体のフレ低減のための必須の手法であると考ええる。

6.7.2 センタ統合の高精度化

現時点では実用化のための目標値に達していないことから、高精度のセンタ統合化の手法の開発が必要となる。実現可能と考えられる手法をいくつか示す。図 6-6-9 は調整 1 の幾何センタ調整の高精度化の例であるが、浮上マグネットの磁気センタのズレ量を x - y 2 軸のレーザ変位計の出力により自動調整するものである。

図 6-6-10 は調整 2 の重心調整の高精度化の例で、エアーベアリングを使用し、通常のボールベアリングにみられるフリクションを低減し、浮上体の正確な軽点を見つけるための装置である。

図 6-6-11 は同様に調整 2 の重心調整の高精度化の例で、超伝導浮上を利用してターンテーブルを垂直状態で浮上させ、フリクションなしで浮上体の正確な軽点を見つけるための装置である。

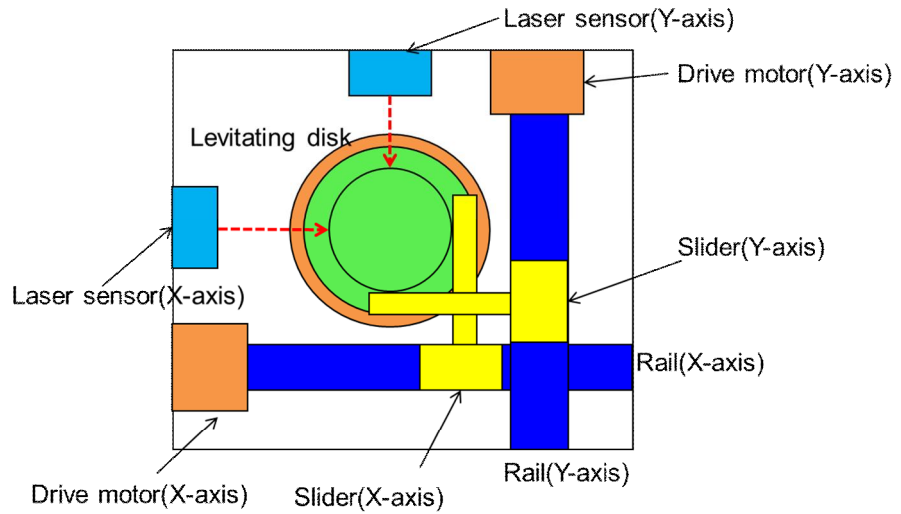


図 6-6-9 調整 1 x-y 2 軸自動調整装置

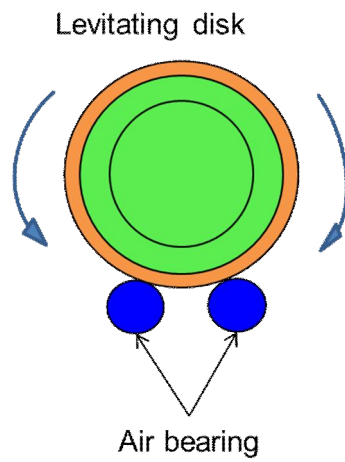


図 6-6-10 調整 2 外形基準の重心調整装置

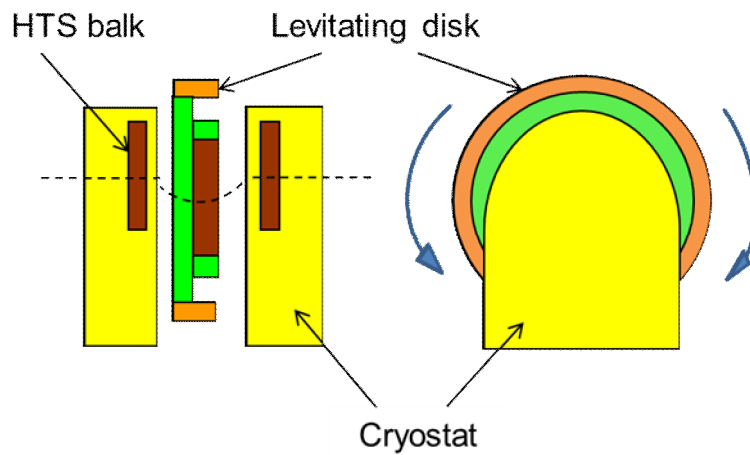


図 6-6-11 調整 2 超伝導浮上重心調整装置

第7章 まとめ

7.1 浮上方式のまとめ

7.1.1 3浮上方式の比較

本研究で行った，スラスト浮上方式，ラジアル浮上方式，低慣性スラスト浮上方式の3方式に於いて，209rad./s（2000rpm）に達するまでのx軸，z軸の最大のフレ量の比較を行った結果を表7-1-1に示す。

表 7-1-1 3方式のx軸，z軸フレ比較

	スラスト浮上方式	ラジアル浮上方式	低慣性スラスト浮上方式 (センタ統合化)
X軸フレ	0.4mm	0.3mm(0.3)	0.5mm
Z軸フレ	1.5mm	1.7mm(1.0)	0.4mm
加速度	84rad./s ²	105rad./s ² (84)	84rad./s ²

センタ統合化を行うことによって低慣性スラスト浮上方式のみが，x軸，z軸共にフレ量0.5mm程度で，両者とも1mmを割ることができた。

低慣性スラスト浮上方式の当初目標に対する達成状況を列記してみる。

定常速度 209rad./s 達成

加速度 105rad./s² 未達成

電磁誘導カップリングのパワー不足であるので，磁気回路見直しで達成することが可能

浮上高さ ほぼ5mm 確保 チャンバの構成可能

フレ 0.2mm 以下 未達成

センタ統合化の高精度化が必要

7.1.2 低慣性スラスト浮上方式の開発のポイント

今後，非接触スピナの実用化を行う場合には，特性の最も良かった低慣性スラスト浮上方式を採用することが最善の方法である。そこで，低慣性スラスト浮上方式の開発ポイントについてまとめておく。

設計上のポイント

- ① ターンテーブルの慣性モーメントをできるだけ小さくする

フレ低減の効果がある

②電磁誘導ブレーキを使用する

フレ低減の効果がある

③電磁誘導カップリングを使用する

吸引力の変化がなくなるので、フレ低減の効果がある

製造上のポイント

①センタの統合化を行う

以上の開発ポイントの中で、特にセンタの統合化が重要であり、この統合化の出来如何でスピナの性能が決まるといっても過言ではない。

7. 2 今後の研究課題

7-2-1 課題1 センタ統合化の高精度化

第6章で述べた通り、センタ統合化の高精度化は必須である。高精度化の例をいくつか示しているが、今後実装置での確認が必要となる。

7-2-2 課題2 重心調整の定量化

センタの統合化の調整2で重心の調整を行っているが、重心調整の定量化ができていない。今後は重心位置と磁気センタのズレの数値化の研究が必要となる。

7-2-3 課題3 電磁誘導カップリング調心効果の考慮

浮上体の駆動方法として電磁誘導カップリングを使用すると、磁気カップリングほど強い吸引力はなく、調心力も内外輪で駆動することでキャンセルする効果があり、本研究では無視している。しかし、駆動速度を上げれば調心力は必ずしもゼロではなく、 x 軸のフレ波形に現れているように、スター位置と定常速度で安定している時の位置が若干異なることから、電磁誘導カップリンでも調心力は働いている。

今後、センタ統合化の精度が向上した時に、電磁誘導カップリングのセンタも無視できなくなり、第4のセンタとして解析を進めなければならない可能性もあり、見極めが必要である。

参考文献

- (1) 福井聡, 風間亨介, 小川純, 岡徹雄, 佐藤孝雄, 反町聡, 斎藤公世, 宮崎紳介
超伝導磁気浮上を適用したフォトマスク洗浄プロセス用非接触スピン装置の研究
開発
低温工学・超伝導学会講演概要集, p.168,2010
- (2) S. Fukui, K. Kazama, S. Sekiya, J. Ogawa, T. Oka, T. Sato, S. Sorimachi, K. Saito, S.
Miyazaki
Research and Development of non-contact spin processor for clean process in
semiconductor-related-production system by applying HTS magnetic levitation
IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.20, no.3, pp.977-980, 2010
- (3) K. Saito, S. Fukui, J. Ogawa, T. Oka, T. Sato
Development and test of model apparatus utilizing HTS magnetic levitation for
non-contact spinning clean-up processors of photo mask production
IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.21, no.3, pp.2241-2244, 2011
- (4) K. Saito, S. Fukui, J. Ogawa, T. Oka, T. Sato
Development and test of model apparatus of non-contact spin processor for photo mask
production applying radial-type superconducting magnetic bearing
Physica C, vol.484, pp.321-324
- (5) 下山淳一：超伝導の本 日刊工業新聞社
- (6) 田辺功, 竹花洋一, 法元盛久：フォトマスク技術 工業調査会
- (7) 前田和夫：はじめての半導体製造装置 工業調査会

謝辞

本研究を終えるに当たり、超伝導技術の基礎、応用は勿論のこと、電磁気学、制御工学、機械工学、物理学等の幅広知見で、丁寧にご指導いただきました新潟大学大学院 自然科学研究科 福井聡准教授に心から感謝を申し上げます。

また、本研究中にアドバイスをいただきました岡徹雄教授、実験等で貴重なご意見、ご配慮を頂きました佐藤孝雄技官に深くお礼申し上げます。

さらに、本研究に於ける実験機や計測器のご提供をいただくと共に、半導体製造装置に関するアドバイスをいただきました株式会社エムテーシーの玉木竹男会長、並びに実験機の製作、実験等に協力していただいた元同僚の皆様に厚くお礼申し上げます。

平成 25 年 7 月

齋藤 公世