超伝導バルクを用いた 磁気浮上工具の 有限要素法による評価

高橋 悠

(学籍番号:13232042)

九州工業大学 情報工学部

電子情報工学科

小田部研究室

平成 29 年 2 月 16 日

目次

| 第1章 | 序 | "訟 "冊 | 1 |
|----------|--------------|------------------------|-----------|
| 1.1 超伝導体 | | | 1 |
| 1.1 | .1 | 超伝導体の歴史 | 1 |
| 1.1 | .2 | 第1種·第2種超伝導体 | 2 |
| 1.1 | .3 | 磁束ピンニング | 3 |
| 1.1 | .4 | 銅酸化物超伝導体 | 4 |
| 1.1 | .5 | Y 系超伝導体(YBa2Cu307 - x) | 4 |
| 1.1 | .6 | 着磁 | $\dots 5$ |
| 1.1 | .7 | 超伝導バルク | 7 |
| 1.2 | 有限 | 要素法(FEM) | 8 |
| 1.3 | JMA | AG | 9 |
| 1.4 | A•¢ | 法 | 9 |
| 1.5 | 中空 | 加工技術 | .11 |
| 1.5 | 5.1 | 現在の中空加工技術 | . 11 |
| 1.5 | 5.2 | 磁気浮上工具 | . 12 |
| 1.6 | 本研 | 「究の目的 | 13 |
| 第2章 | \mathbf{F} | EM 解析 | 15 |
| 2.1 | 解析 | 方法 | 15 |
| 2.1 | 1 | モデル作成 | . 15 |
| 2.1 | 2 | メッシュ作成 | . 17 |
| 2.2 | 解析 | 内容 | 17 |
| 2.2 | 2.1 | 反発力計算 | . 17 |
| 2.2 | 2.2 | 引力計算 | . 18 |
| 2.2 | 2.3 | 回転トルク計算 | . 18 |
| 2.2 | 2.4 | 復元力計算 | . 19 |
| 2.2 | 2.5 | 実験結果の再現 | . 20 |
| 2.2 | 2.6 | 着磁距離を変化させた際の電磁界解析 | . 21 |
| 2.2 | 2.7 | 超伝導バルク間隔を変化させた際の電磁界解析 | . 22 |
| 第3章 | 結 | 〒果と考察 | 23 |
| 3.1 | 実験 | 結果との比較 | 23 |
| 3.1 | .1 | 反発力の比較 | . 23 |
| 3.1 | 2 | 引力の比較 | . 24 |
| 3.1 | .3 | 回転トルクの比較 | . 27 |
| 3.1 | 4 | 復元力の比較 | . 29 |

| 3.2 着 | 磁距離を変化させた際の電磁界解析 | 31 | | | |
|-------|----------------------|----|--|--|--|
| 3.2.1 | 引力の比較 | | | | |
| 3.2.2 | 回転トルクの比較 | | | | |
| 3.2.3 | 復元力の比較 | | | | |
| 3.3 超 | 伝導バルク間隔を変化させた際の電磁界解析 | 37 | | | |
| 3.3.1 | 引力の比較 | | | | |
| 3.4 小 | 括 | 39 | | | |
| 第4章 | まとめ | 40 | | | |
| 参考文献 | | | | | |
| 謝辞 | | | | | |
| 研究業績 | | | | | |

図目次

| 义 | 1.1 | 超伝導状態と常伝導状態の関係 |
|---|------|---|
| 义 | 1.2 | 混合状態の様子3 |
| 义 | 1.3 | 第1種・第2種超伝導体の相転移(a)第1種超伝導体の温度Tと外部磁場He |
| | によ | よる状態変化(b) 第2 種超伝導体の温度Tと外部磁場Heによる状態変化3 |
| 义 | 1.4 | Y 系超伝導体の構造模式図5 |
| 义 | 1.5 | FCM による着磁(a)FCM における外部磁場Heと温度Tの変化の様子(b)FCM |
| | にし | より印加される磁場 |
| 义 | 1.6 | ZFCM による着磁(a) ZFCM における外部磁場 <i>H</i> eと温度Tの変化の様子 |
| | (b)Z | ZFCM により印加される磁場6 |
| 义 | 1.7 | 外部磁場 H_e が充分でなかった場合のZFCM による着磁(a) $H_p < H_e < 2H_p$ のと |
| | きに | こ印加される磁場(b) H _e < H _p のときに印加される磁場 |
| 义 | 1.8 | PFM による着磁(a) PEM における外部磁場Heと温度Tの変化の様子(b)PEM |
| | によ | より印加される磁場 |
| 义 | 1.9 | 有限要素法の概念 |
| 义 | 1.10 | 熱溶解積層法の概要[8]12 |
| 义 | 1.11 | ダイカスト法の概要12 |
| 义 | 1.12 | 磁気浮上工具の概要13 |
| 义 | 2.1 | 超伝導バルクの概要15 |
| 义 | 2.2 | 永久磁石の概要16 |
| 义 | 2.3 | JMAG を用いて作成した解析モデル16 |
| 义 | 2.4 | 77.3 K における YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} のJc-B特性[10]17 |
| 义 | 2.5 | 反発力計算の概要18 |
| 义 | 2.6 | 引力計算の概要18 |
| 义 | 2.7 | 回転トルク計算の概要19 |
| 义 | 2.8 | 復元力計算の概要 |
| 义 | 2.9 | 鈴木研究室で使用されている磁気浮上工具21 |
| 义 | 2.10 | 着磁距離変化での FEM 解析の概要 (a)着磁距離 5 mm における初期状態(b) |
| | 着磁 | 滋距離 15 mm における初期状態 21 |
| 义 | 2.11 | 超伝導バルク間隔変化での FEM 解析の概要(a)超伝導バルク間隔 1 mm にお |
| | ける | 5 初期状態(b)超伝導バルク間隔 10 mm における初期状態 22 |
| 义 | 3.1 | 実験環境に対する永久磁石を着磁距離から近づけたときの反発力の実験結果 |
| | と I | FEM 結果の比較 24 |
| 义 | 3.2 | 実験環境に対する永久磁石を着磁距離から離したときの引力の実験結果と |
| | FE | M 結果の比較 |

| 図 | 3.3 永久磁 | 石 – 超伝導バルク間距離が 10 mm での超伝導バルク内の磁束密度分 |
|---|----------|---|
| | 布 | |
| 义 | 3.4 永久磁 | 石 – 超伝導バルク間距離が 14 mm での超伝導バルク内の磁束密度分 |
| | 布 | |
| 义 | 3.5 実験環 | 境に対する永久磁石を着磁距離で回転させたときの回転トルクの実験 |
| | 結果と FEI | M 結果 |
| 义 | 3.6 実験環 | 境に対する永久磁石が着磁距離から横方向に移動したときの復元力の |
| | 実験結果と | FEM 結果 |
| 义 | 3.7 実験環 | 境に対する永久磁石が着磁距離から横方向に移動したときの縦方向に |
| | 働く力の F | EM 結果 |
| 义 | 3.8 磁気浮 | 上工具の磁極の状態(a)横方向 0 mm 移動(b)横方向 35 mm 移動 31 |
| 义 | 3.9 着磁距 | 離を 5 – 15 mm で変化させた場合に対する永久磁石を着磁距離から離 |
| | したときの | 引力の FEM 結果 |
| 义 | 3.10 永久 | 磁石を着磁距離から離したときの着磁距離変化における最大引力の |
| | FEM 結果. | |
| 义 | 3.11 着磁路 | E離を5-15mmで変化させた場合に対する永久磁石を着磁距離で回転 |
| | させたとき | の回転トルクの FEM 結果 |
| 义 | 3.12 永久碩 | 滋石を着磁距離で回転させたときの着磁距離変化における最大回転トル |
| | クの FEM | 結果 |
| 义 | 3.13 着磁路 | 巨離を5-15mmで変化させた場合に対する永久磁石を着磁距離から横 |
| | 方向へ移動 | したときの復元力の FEM 結果36 |
| 义 | 3.14 永久碩 | 滋石を着磁距離から横方向へ移動したときの着磁距離を変化させた場合 |
| | における復 | 元力最大の FEM 結果 |
| 义 | 3.15 メッシ | ノュ条件が他解析と同条件での着磁距離 15 mm における復元力の FEM |
| | 解析 | |
| 义 | 3.16 超伝導 | 算バルク間隔を変化させた場合に対する永久磁石を着磁距離から離した |
| | ときの引力 | の FEM 結果 |
| 义 | 3.17 超伝導 | 算バルク間隔を変化させた場合における永久磁石を着磁距離から離した |
| | ときの最大 | ·引力の FEM 結果 |

第1章 序論

1.1 超伝導体

1.1.1 超伝導体の歴史

1908年、オランダのヘイケ・カマーリン・オンネスがヘリウムの液化に初めて成功した。 これによって非常に低い温度を利用できるようになり、1911年、低温での水銀の電気抵抗 の研究において、およそ4Kにて水銀の電気抵抗が突然降下し、ゼロになることを発見し た。この現象を超伝導現象と呼び、超伝導現象を起こす物体を超伝導体と呼ぶ。また、超 伝導体の電気抵抗がゼロとなり、超伝導現象が起こる状態の事を超伝導状態と呼び、これ に対して、電気抵抗がゼロでない状態のことを常伝導状態と呼ぶ。超伝導現象はさまざま な機器への応用が期待されたが、当初に発見された超伝導体の多くは低温でしか超伝導現 象が起こらない、僅かな磁場で超伝導状態が破壊されるといったことが工学的な応用を困 難にしていた。

また 1933 年には、フリッツ・ヴァルター・マイスナーとロバート・オクセンフェルトの 両名によって、超伝導体は完全反磁性を持つことが発見された。完全反磁性とは、超伝導 体に外部磁場H_eを加えても超伝導内部の磁束密度Bはゼロのまま変化しないといった特性 であり、マイスナー効果とも呼ばれている。この発見で、超伝導体は電気抵抗ゼロ、マイ スナー効果、この2つの特性を併せ持った物体と定義されている。図 1.1 に示すように、超 伝導体はある温度、磁場の範囲内においてそれらの特性を示し、超伝導状態となる温度、 磁場をそれぞれ臨界温度T_c、臨界磁場H_cと呼ぶ。また、超伝導体は超伝導状態であっても電 流を無限に流すことができるわけではなく、ある一定の電流値を超えると電気抵抗が発生 する。この超伝導状態で流せる最大の電流密度をJ_cと呼ぶ。そのため、T_c、H_c、J_cの範囲内 で超伝導状態を示し、それ以外では電気抵抗が発生し、完全反磁性も消え、常伝導状態と なる。

その後も超伝導現象について研究が進められてきたが大きな進展や具体的な理論は現れ なかった。しかし、1957 年、ジョン・バーディーン、レオン・ニール・クーパー、ジョン・ ロバート・シュリーファーらによって BCS 理論が提唱され、超伝導体の発現機構が説明さ れた[1]。BCS 理論ではT_cの上限は 30 – 40 K と考えられていたが、1986 年、ドイツの物理・ 鉱物学者のヨハネス・ゲオルグ・ベドノーツとスイスの物理学者のカール・アレクサンダ ー・ミュラーによって 30 K 以上のT_cを持つLa_{2-x}Ba_xCuO₄などのLa-Ba-Cu-O系超伝導体が発 見された。このような高いT_cを持つ超伝導体を高温超伝導体と呼び、この発見以降高温超伝 導体の探索が続けられ、翌年の 1987 年にはT_cが 90 K 以上と液体窒素の沸点(77.3 K)を超え る Y 系超伝導体が発見された。この発見により液体窒素や冷凍機など、液体へリウムと比 べ安価かつ高温で超伝導状態にすることが可能となったため、様々な機器への応用の可能 性やコストの削減などの点から大きく注目された。また 2015 年にはドイツのミハイル・エレメッツらによって H₂S が高圧化において 203 K で超伝導状態となることが発見された[2]。



図 1.1 超伝導状態と常伝導状態の関係

1.1.2 第1種·第2種超伝導体

前述したが、超伝導体には電気抵抗ゼロ、マイスナー効果の 2 つの特性を持っている。 マイスナー効果によって超伝導内部の磁束密度はゼロに保たれているが、H_eを大きくし、H_c を超えると、マイスナー効果が失われ、常伝導状態となる。超伝導体は超伝導状態から常 伝導状態へと遷移する状態によって第1種超伝導体、第2種超伝導体の2種類に分類でき る。

第1種超伝導体はH_c以上のH_eをかけるとマイスナー効果を完全に失い、常伝導状態へと 遷移する。対して第2種超伝導体は下部臨界磁場H_{c1}以上のH_eをかけた際、超伝導体が破壊 され磁束が一部侵入する。しかし、超伝導状態は完全には破壊されず、超伝導状態と常伝 導状態が混在した状態となる。H_eを大きくすると図1.2のように常伝導状態の範囲が増え、 入り込む磁束線の数が増える。H_eが上部臨界磁場H_{c2}以上となると超伝導状態は完全に破壊 され、常伝導状態に遷移する。超伝導状態と常伝導状態が混在している、H_eがH_{c1}以上H_{c2}未 満での状態を混合状態と呼ぶ。このように、第1種超伝導体と第2種超伝導体は混合状態 の有無で分類されており、図1.3に示すような状態変化を行う。



図 1.2 混合状態の様子



図 1.3 第1種・第2種超伝導体 の相転移(a)第1種超伝導体の温度Tと外部磁場H_eによる状態変化(b) 第2種超伝導体の温度Tと外部磁場H_eによる状態変化

1.1.3 磁束ピンニング

混合状態において超伝導体は一部が常伝導状態となり、その部分に磁束が侵入している。 その状態で超伝導体に電流を流すと、超伝導体に侵入した磁束にローレンツ力 F_L が働く。 F_L は超伝導体に流れる電流密度をJとすると $F_L = J \times B$ で表される。この F_L によって磁束が速 度vで運動を行うと、電磁誘導によって $E = B \times v$ となる電圧Eが発生する。Eの発生は抵抗 の発生を示しており、この抵抗の発生を防ぐために磁束の運動を妨げる必要がある。この 磁束の運動を妨げる力をピン力と呼び、磁束を固定する現象のことを磁束ピンニングと呼 ぶ。ピンカ F_p は J_c の範囲内において F_L と等しくなり、最大で $F_p = F_L = J_c B$ となる。そのため、 F_p を強くすることによって J_c を向上させることが可能となり、導入するピンの種類に関して 研究が続けられている。

また、磁東ピンニングと前述のマイスナー効果を用いることで磁気浮上を行うことがで きる。マイスナー効果によって磁石と超伝導体を反発させ、磁石を浮かし、磁東ピンニン グによって永久磁石から発生する磁束を超伝導体内に固定することで磁石を空中に固定し ている。この磁気浮上では大規模なものでは 300 kg を超える物体を浮上させることができ る。

1.1.4 銅酸化物超伝導体

1.1.1 項にて述べたように、1986 年、ベドノーツ、ミュラーによって銅酸化物超伝導体 La_{2-x}Ba_xCuO₄が 30 K 以上で超伝導状態となることが発見された。さらにその1 年後の 1987 年には T_c が 93 K のYBa₂Cu₃O_{7-x}を発見すると、翌年 1988 年にはBi₂Sr₂Ca₃O_xが 110 K、 1993 年にはHgBa₂Ca₂Cu₃O_{8+x}が 133 K の T_c を持つことが発見された。このようにわずか 7 年でNb₃Geが持っていた従来の最高臨界温度(23 K)が 5 倍以上に急上昇することとなった。 これら銅酸化物超伝導体は低温高磁場においても高い臨界電流密度を保っており、Y 系超伝 導体、Bi 系超伝導体を中心に大電流用超伝導ケーブル、高磁場用マグネットなどへの応用 が期待されている。

1.1.5 Y 系超伝導体(YBa₂Cu₃O_{7-x})

Y 系超伝導体(YBa₂Cu₃O_{7-x})は、1987年に発見された銅酸化物超伝導体である。Y 系超伝 導体のT_cは 93 K と、液体窒素(77.3 K)を用いて超伝導状態にすることが可能となる。Y 系 超伝導体は図 1.4 に示すようにペロブスカイト機構を基本として大きな異方性がある。この 構造内のCuO₂で形成される面で電気伝導する。この電気伝導にも異方性があり、さらに面 内においても異方性がある[3]。そのため、超伝導体の本質的な能力を引き出すには、結晶 粒の三次元的な配向性が必要となる。このような Y 系超伝導体には低コスト、磁場中高特 性、高機械強度、低交流損失など、様々な利点がある。しかし、粒間結合の改善にはc軸配 向に加えa、b軸方向も揃える必要があり、作製難易度が高く開発は遅れていた。しかし、 数百 A の臨界電流I_cを持つ1 km 級の長尺線材が作製され、この成果を受けて、Y 系超伝導 線材を用いた機器開発が行われ、ケーブル、モータ、変圧器などの代替応用だけでなく、 限流器や超伝導電力貯蔵システムといった超伝導特有の機能を利用した機器への応用も期 待されている[4]。



図 1.4 Y系超伝導体の構造模式図

1.1.6 着磁

着磁とは、外部磁場H_eを印加することで、超伝導体内部にピンニング効果によって磁束 をピン止めさせること、およびその状態のことを指す。着磁方法は主に磁場中冷却法(Field Cooled Magnetization: FCM)、ゼロ磁場中冷却法(Zero Field Cooled Magnetization: ZFCM)、パルス着磁法(Pulsed-Field Magnetization: PFM)の 3 種類がある。FCM は図 1.5 に示すように T_c 以上の温度で H_e を印加し、その後 T_c 以下まで冷やして超伝導状態へと遷 移させてHeを除去することで着磁を行う方法である。Tc以上の温度では超伝導体は常伝導状 態となっている。そのため、マイスナー効果や磁束ピンニングを発生させることなく、Heを すべて超伝導体内に侵入させる。この状態でTc以下まで冷やすことによって、超伝導体を常 伝導状態から超伝導状態へと遷移させる。さらに、H。を除去することで超伝導体の表面か ら磁場が侵入し、超伝導体が捉えた磁束を内部に定着させる。このようにして着磁を行っ ている。ZFCM は図 1.6 に示すように磁場ゼロの状態で超伝導状態に遷移させ、その後H。を 印加することで着磁を行う方法である。図 1.7 に示すように印加するH。が不十分な場合、 着磁した磁場が不十分となる。そのため FCM と比べ、より強い磁場を印可する必要がある。 PFM は図 1.8 に示すように磁場ゼロの状態で超伝導状態に遷移させ、その後、パルス状の 磁場を印加することで着磁を行う方法である。PFM は磁束線の運動が起こることで急激な 熱上昇を引き起こし、その熱上昇による超伝導体の破損や補足磁場の低下といった問題が 存在する。そのため、最も高い捕捉磁場を得る方法は FCM であり、実際の実験には FCM を用いることが多い。



図 1.5 FCM による着磁(a)FCM における外部磁場*H*_eと温度*T*の変化の様子(b)FCM により印加される磁場



図 1.6 ZFCM による着磁(a)ZFCM における外部磁場H_eと温度Tの変化の様子(b)ZFCM に より印加される磁場



図 1.7 外部磁場 H_e が充分でなかった場合のZFCM による着磁(a) $H_p < H_e < 2H_p$ のときに印加される磁場(b) $H_e < H_p$ のときに印加される磁場



図 1.8 PFM による着磁(a) PEM における外部磁場*H*_eと温度*T*の変化の様子(b)PEM により印加される磁場

1.1.7 超伝導バルク

超伝導バルクとは、溶融凝固法によって作成された超伝導体である。超伝導バルクに磁 束を捕捉させることで疑似永久磁石として用いることができる。これは、超伝導バルクを

磁場中で冷却し、その後磁場を取り去ることで磁束が超伝導体内に捕捉され、永久磁石と 同様の役割を果たすためである。現在、永久磁石で最も特性が高いとされているのは Nd-Fe-B で最大発生磁場は 1.5 T である。それに比べ、Y-Ba-Cu-O 超伝導バルクは永久磁 石と同じ形状で永久磁石を上回る高い磁場を発生することができ、温度 29 K の条件下にお いては 17 T 以上の高い磁場を捕捉したとの報告もある[5]。また、超伝導バルクには 1.1.3 項にて説明した、磁束ピンニングによる磁気浮上が可能となる特徴がある。この特徴を用 いることで、非接触べアリング、ミキサー/スターラー、スピンコーター、フライホイール 蓄電システムなど様々な機器の開発が行われている[6]。他にも、超伝導バルクには磁場中 において高電流密度で電流が流せる、小型かつ強磁場を発生可能といった特徴がある[7]。 そのため、超伝導バルクは超伝導コイルに代わる存在として期待されている。超伝導バル クは主に RE 系や Bi 系が研究開発されており、他にも MgB₂超伝導バルクなどの研究も進 められている。RE 系超伝導バルクは比較的強磁場が発生可能であり、モータ、超伝導マグ ネット、磁気分離装置、磁気軸受、磁気分離装置などの開発が行われている。Bi 系超伝導 バルクは磁場中において超伝導特性が低下しやすく、電流リードや限流器の開発が進めら れている[8]。また、MgB2バルクは結晶粒界が存在しないため、磁場均質性において優れて いる。

1.2 有限要素法(FEM)

有限要素法(FEM)は、解析的に解くことが難しい微分方程式の近似解を数値的に得る数 値解析手法の1つである。円柱や無限平板といった簡単な形状では解析的に解くことは容 易であるが複雑な形状となると非常に困難となる。そこで、図1.9に示すように複雑な形状 を単純な形状の要素に分割し、各要素で境界条件を満たすように方程式を立てる。その後、 これらの方程式を対象物全体の連立一次方程式として組み立てて解く。このように複雑な 形状を単純な形状の集合とみなして解くことで複雑な形状の物体を解くことが可能となる。 この分割された要素をメッシュと呼び、メッシュは小さいほど単純な形状となるためメッ シュを細かくするほど計算精度は向上する。また、FEM は数値解析のみを行っているため、 解析対象のモデリングが適切でない場合、誤った結果となる。そのため、解析対象への十 分な理解が必要となる。



図 1.9 有限要素法の概念

1.3 JMAG

JMAG は 1983 年に株式会社 JSOL が開発した電気機器設計・開発のためのシミュレー ションソフトウェアである[9]。有限要素法を用いることで機器内部の複雑な物理現象を正 確に捉え、高速な解析を可能としている。また、JMAG には高い分析能力、高速計算、高 い生産性、オープンインターフェースといった特色がある。

1.4 A-**φ法**

渦電流問題を高速に解く方法として、磁気ポテンシャルAと電気スカラーポテンシャル**¢** を未知数として解くベクトルポテンシャル法(*A*-**¢**法)がある。

磁束密度Bは、磁気ポテンシャルAを用いると、

$$\boldsymbol{B} = \nabla \times \boldsymbol{A} \tag{1.1}$$

となる。この式を Maxwell 方程式

$$\nabla \times \boldsymbol{E} + \dot{\boldsymbol{B}} = 0 \tag{1.2}$$

に代入すると、

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\boldsymbol{B} = -\nabla \times \boldsymbol{A} \tag{1.3}$$

となる。よって、

$$\nabla \times \left(\boldsymbol{E} + \dot{\boldsymbol{A}} \right) = \boldsymbol{0} \tag{1.4}$$

になる。ここでのEは磁場の強度、 \dot{B} は $\partial B/\partial t$ を示している。また、任意のスカラ関数 ϕ は、 $\nabla \times \nabla \phi = 0$ で表せるためEは、

$$\boldsymbol{E} = -\dot{\boldsymbol{A}} - \nabla \boldsymbol{\phi} \tag{1.5}$$

と示すことができる。

透磁率を μ 、電気伝導率 σ の導体中の磁場強度をH、電流密度をJとすると、 $\nabla \times H$ に関する Maxwell 方程式は、

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \dot{\boldsymbol{D}} + \boldsymbol{J} = \boldsymbol{0} \tag{1.6}$$

となる。また、周波数が極めて低い場合を考えるので電束密度**D**の時間微分は無視できる。 よって、

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} \tag{1.7}$$

となる。式(1.7)に、式(1.1)および関係式

$$\nabla \cdot \boldsymbol{J} = \boldsymbol{0} \tag{1.8}$$

$$\boldsymbol{H} = \frac{1}{\mu} \boldsymbol{B} \tag{1.9}$$

$$\boldsymbol{J} = \boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{E} \tag{1.10}$$

を代入すると、

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \boldsymbol{A}\right) \tag{1.11}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{J} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{E} = -\boldsymbol{\sigma} \nabla \cdot (\nabla \phi + \dot{\boldsymbol{A}}) = 0$$
(1.12)

となる。そのため、任意のベクトルAにおいて、

$$\nabla \times \nabla \times \boldsymbol{A} = \nabla (\nabla \cdot \boldsymbol{A}) - \nabla^2 \boldsymbol{A}$$
(1.13)

が成り立つ。これにクーロンゲージ条件

$$\nabla \cdot \boldsymbol{A} = \boldsymbol{0} \tag{1.14}$$

を代入すると、

$$\nabla \times \nabla \times A = -\nabla^2 A \tag{1.15}$$

となる。また、式(1.11)、式(1.12) に代入すると、

$$\frac{1}{\mu}\nabla^2 \boldsymbol{A} = \sigma(\dot{\boldsymbol{A}} + \nabla\phi) \tag{1.16}$$

となる.ここで $\phi = \dot{\Phi}$ と定義して,式(1.12),式(1.15)に代入すると,それぞれ

$$\frac{1}{\mu}\nabla^2 \boldsymbol{A} = \sigma \left(\dot{\boldsymbol{A}} + \nabla \dot{\boldsymbol{\Phi}} \right) \tag{1.17}$$

$$\nabla \cdot \sigma (\dot{A} + \nabla \dot{\Phi}) = 0 \tag{1.18}$$

と表せる。これらが胴体中の支配方程式である.

次に、空気領域では J_{ex} を外部電流密度とすると、Maxwell 方程式より、

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J}_{ex} \tag{1.19}$$

と表せる。また、 $H = \frac{1}{\mu_0}B = \frac{1}{\mu_0}\nabla \times A(\mu_0$ は空気中の透磁率)と Maxwell 方程式から、

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \boldsymbol{A} = \boldsymbol{J}_{ex} \tag{1.20}$$

となり、よって空気中の支配方程式は、

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla^2 \boldsymbol{A} = -\boldsymbol{J}_{ex} \tag{1.21}$$

となる。

支配方程式を空間で離散化する際、誤差が発生する。たとえば、導体中の支配方程式では、

$$\frac{1}{\mu_0}\nabla^2 A - \sigma (\dot{A} + \nabla \dot{\Phi}) = \delta x$$
(1.22)

となり、 δx が誤差を表している。FEMでは、左辺の微分方程式と右辺の誤差に重み δw をかけ、体積積分したものをゼロとみなすことで、誤差 δx を考慮せずに解析を行っている。

$$\int_{V} \delta w \cdot \left\{ \frac{1}{\mu_{0}} \nabla^{2} \boldsymbol{A} - \sigma \left(\dot{\boldsymbol{A}} + \nabla \dot{\boldsymbol{\Phi}} \right) \right\} dV = \int_{V} \delta w \cdot \delta x \, dV = 0$$
(1.23)

 $A-\phi$ 法の FEM では、重み $\delta w \delta A$ の各成分の微小変化

$$\delta w = (\delta A_x, \ \delta A_y, \ \delta A_z) \tag{1.24}$$

としている。

また、他の支配方程式についても同様の操作を行う。

1.5 中空加工技術

1.5.1 現在の中空加工技術

中空加工技術とは、内部に空洞が残るように加工を行う方法である。3Dプリンタやダイ カスト法などがこれに当てはまり、他にも多くの中空加工技術が存在している。3Dプリン タはコンピュータ上で作成した 3D データを設計図として、その断面形状を積層すること で立体物を作製する加工方法である。また、3Dプリンタには図 1.10 に示すように熱で融 解した樹脂を一層ずつ積み重ねていく熱溶解積層法(FDM 方式)、液状の樹脂に紫外線など を照射し一層ずつ硬化させていく光造形方式、粉末の樹脂に接着剤を吹きつけていく粉末 固着方式など様々な作製方法がある[10]。ダイカスト法は金型鋳造法の一種であり、図 1.11 に示すように、金型に溶融した金属を圧入することで高い寸法精度の鋳物を大量に生産す る鋳造方式である。3Dプリンタ、ダイカスト法ともに成型過程において中空加工を行うた め、成型後の再加工は困難である。また、3Dプリンタ、ダイカスト法ともにボトムアップ 方式で成型を行っているため、長時間かかる、手間が大きいといった問題点も存在してい る。そのため、これらの問題点を解決する技術に期待されている。



図 1.10 熱溶解積層法の概要[8]



図 1.11 ダイカスト法の概要

1.5.2 磁気浮上工具

前述のように、中空加工技術には加工が長時間かつ手間がかかるといった問題がある。 その解決策の一つとして磁気浮上工具が考えられている[11]。磁気浮上工具とは、1.1.3 項 にて説明した超伝導体の磁束ピンニングを利用した磁気浮上を用いて加工を行う中空加工 技術であり、図 1.12 に示すように主に超伝導バルクと永久磁石で構成されており、永久磁 石は超伝導バルク上部の空中に固定されている。空中に固定された永久磁石は磁束ピンニ ングにより磁束の運動を妨げるピン力が働く。この特性によって永久磁石は超伝導バルク の運動に追従して運動を行う。外部から力を加えずに永久磁石を運動させることで中空加 工を可能にしている。物体の加工の際には超伝導バルクを回転させる。超伝導バルクが回 転することで永久磁石も回転を行い、この回転によって回転トルクが発生し、この回転ト ルクを用いて加工を行っている。また、磁気浮上工具の加工方法には大きく分けて切削と 研磨の2種類ある。切削は加工対象を永久磁石に押し付け、永久磁石が回転することによ って発生する回転トルクによって加工を行い、研磨は加工対象を永久磁石と超伝導バルク の間に入れ、永久磁石を加工対象に押し付け、永久磁石の回転トルクによって加工を行う。 実使用においては永久磁石にスラリーなどを使用することで加工性能を向上させて使用す ることが検討されている。



図 1.12 磁気浮上工具の概要

1.6 本研究の目的

現在使用されている中空加工技術には 3 D プリンタやダイカスト法といったものが挙げ られる。3D プリンタはコンピュータ上で作成した 3 D データを設計図として、その断面形 状を積層し、立体物を作製する加工方法であり、ダイカスト法は金型鋳造法の一種で、金 型に溶融した金属を圧入し、高い寸法精度の鋳物を大量に生産する鋳造方式である。この ように、3 D プリンタ、ダイカスト法ともに下層から積み上げていくボトムアップ方式での 加工を行っている。そのため、成型後の加工は困難となっており、成型に時間や手間がか かるといった問題も抱えている。

これらの問題を解決する方法の1つとして磁気浮上工具が提案されている。磁気浮上工 具は超伝導体の磁束ピンニングを利用した磁気浮上を用いて、加工を行う中空加工技術で あり、主に超伝導バルクと永久磁石で構成されている。磁気浮上工具の加工方法は切削ま たは研磨による加工であるため、成型後の加工が容易となる。また、1から作り上げるボト ムアップ方式と異なり、物体を削って成型を行うため、加工時間の短縮へと繋がることが 期待されている。しかし、磁気浮上工具は発展途上の技術であり、その性能は未知数とな っている。特に、永久磁石を浮上させる磁気浮上力、加工の際に永久磁石が加工対象を押 し付ける圧力、加工を行う回転力の 3 つは磁気浮上工具を用いた加工において重要な役割 を果たしており、それらの評価が必要となる。

本研究では、FEM を用いて磁気浮上工具の反発力、引力、復元力、回転トルクの解析を *A*-*ϕ*法を解くことによって行い、実験結果との比較を行うことで、磁気浮上力、圧力、回 転力の評価を行った。また、実験環境から条件を変えた場合についても解析を行い、評価 した。

第2章 FEM 解析

2.1 解析方法

2.1.1 モデル作成

現在、九州工業大学機械情報工学科系鈴木恵友研究室にて磁気浮上工具の実験が行われ ている。そこで、本研究では鈴木恵友研究室の実験環境を元にモデルを作成し、解析を行 った。FEM 解析には 1.3 項にて説明した JSOL 社製の JMAG-Designer15.0 を用いて解析 を行った。モデルは計算の簡易化のために磁気浮上工具に最低限必要である超伝導バルク、 永久磁石、そしてそれらを取り巻く空気の 3 要素のみで構成し、解析を行う。実験におい て超伝導バルクは図 2.1 に示すように、1 辺が 35 mm、厚さが 10 mm の YBa₂Cu₃O_{7-x}を 4 つ使用し、超伝導バルク 4 つで厚さ 10 mm の正四角柱とみなせるように配置している。 永久磁石は図 2.2 に示すように、内径 10 mm、外径 29.5 mm、厚さ 10 mm で、磁石表面 にかかる磁場が 450 mT のリング型 4 極ネオジム磁石を使用し、超伝導バルクの上部に配 置した。この条件にて作成したモデルを図 2.3 に示す。また、YBa₂Cu₃O_{7-x}の特性には図 2.4 のJ_c-B特性の実験値を使用した[12]。



図 2.1 超伝導バルクの概要



図 2.2 永久磁石の概要



図 2.3 JMAG を用いて作成した解析モデル



図 2.4 77.3 Kにおける YBa₂Cu₃O_{7-x}のJ_c-B特性[12]

2.1.2 メッシュ作成

今回の解析では、超伝導バルク、永久磁石、空気の順で重要な要素となっている。FEM は 1.2 項にて述べたようにメッシュは細かいほど正確な解析を行うことができる。そのため、 超伝導バルク、永久磁石、空気の順でメッシュを細かく分割し、解析を行った。

2.2 解析内容

2.2.1 反発力計算

着磁後、永久磁石を近づけると、磁東ピンニングによって永久磁石の運動と反対方向に ピンカが働き、永久磁石を元の位置に戻そうとする。このピンカによって永久磁石が浮上 を行う。また、磁気浮上工具においては、切削の際にこの力を圧力として利用し、永久磁 石と切削対象を密着させ、縦方向への加工を行う。この力が弱いと、永久磁石は切削対象 を滑るような回転を行い、十分な加工が行われない。本研究ではこの力を反発力として計 算を行った。反発力計算の概要を図 2.5 に示す。超伝導バルクの上部に永久磁石を配置し、 着磁を行う。着磁後、永久磁石を 0.1 mmずつ超伝導バルクに近づける。その際に発生する 反発力を磁石 – バルク間距離が 1 mm となるまで計算を行った。



図 2.5 反発力計算の概要

2.2.2 引力計算

着磁後、永久磁石を遠ざけると、磁東ピンニングによって永久磁石の運動と反対方向に ピンカが働き、永久磁石を元の位置に戻そうとする。磁気浮上工具において、研磨の際に このピンカと重力を圧力として用いて永久磁石と加工対象を密着させ、縦方向への加工を 行う。この力が弱いと永久磁石が加工対象を滑るように回転するため、十分な加工が行わ れない。本研究ではこのピンカを引力として計算を行った。引力計算の概要を図 2.6 に示す。 超伝導バルクの上部に永久磁石を配置し、着磁を行う。着磁後、永久磁石を 1 mmずつ超 伝導バルクから遠ざける。その際に発生する引力を移動距離が 20 mm となるまで計算を行 った。



図 2.6 引力計算の概要

2.2.3 回転トルク計算

着磁後、超伝導バルクを回転させると永久磁石にピン力が働き、超伝導バルクの回転に 追従して永久磁石が回転を行う。この回転によって回転トルクが発生する。回転トルクNは、 回転軸からみた力の加わる点までの距離をr、物体に加わる力をFとするとN=r×F、で表 される。この回転トルクによって物体の加工を行う。本研究でこの回転トルクの計算を行 った。磁気浮上工具では、超伝導バルクを回転させて加工を行っているが、JMAG では超 伝導バルクを回転させての計算が困難である。そこで、永久磁石を回転させ、その際に発 生する回転トルクを計算し、-1倍することで疑似的に超伝導バルクを回転させた際に発生 する回転トルクの計算を行った。回転トルク計算の概要を図 2.7 に示す。超伝導バルクの上 部に永久磁石を配置し、着磁を行う。着磁後、永久磁石を 5 度ずつ回転させる。その際に 発生した回転トルクを 360 度、1 回転するまで計算を行った。



図 2.7 回転トルク計算の概要

2.2.4 復元力計算

着磁後、永久磁石を横方向へと移動させると、磁東ピンニングによって永久磁石の運動 と反対方向にピン力が働き、永久磁石を元の位置に戻そうとする。磁気浮上工具において、 切削の際にこのピン力を圧力として用いて永久磁石と加工対象を密着させ、横方向への加 工を行う。この力が弱いと永久磁石が加工対象を滑るように回転するため、十分な加工が 行われない。本研究ではこのピン力を復元力として計算を行った。引力計算の概要を図 2.8 に示す。超伝導バルクの上部に永久磁石を配置し、着磁を行う。着磁後、永久磁石を 1 m mずつ横方向へと移動させる。その際に発生する復元力を移動距離が 100 mm となるまで 計算を行った。





2.2.5 実験結果の再現

本項ではモデル作成の元となった九州工業大学機械情報工学系鈴木恵友研究室の実験環 境を2.1項にて述べた事項以外に関しても等しくして解析し、実験結果との比較を行うこと で実験結果の再現を試みた。鈴木研究室で使用されている磁気浮上工具を図2.9に示す。こ の図では研磨加工の様子を示しており、白の円盤状の中に超伝導バルク、その上部に加工 対象となる平板、さらにその上部に永久磁石を配置している。

実験では FCM での着磁が行われている。そのため、FEM 解析においても FCM での着磁を考慮して解析を行う必要がある。FCM は磁場印加後、常伝導状態から超伝導状態へと 遷移して着磁を行う着磁法である。これを JMAG 内で再現する。初期状態では超伝導バル クは常伝導状態であるため、導体と同じ条件に設定し、常伝導状態とする。次にモデルの 運動前に超伝導バルクに超伝導の特性を加え、超伝導バルクを超伝導状態にする。本研究 ではこのような方法で FCM の再現を行った。

また、実験において、永久磁石を超伝導バルクの 10 mm上部に配置して着磁を行った。 そのため本項においても磁石 – バルク間距離が 10 mm にて着磁を行った。また、超伝導 バルクには樹脂加工によって周囲 0.5 mmが覆われている。そのため、超伝導バルク同士は 1 mm の間隔が開いている。そのため本項ではバルク間隔を 1 mm 開けて解析を行った。反 発力、引力、回転トルク、復元力について解析し、比較を行った。

20



図 2.9 鈴木研究室で使用されている磁気浮上工具

2.2.6 着磁距離を変化させた際の電磁界解析

磁気浮上工具の性能向上のために、実験環境から着磁距離を変えた場合の解析を行う。 実験環境では永久磁石と超伝導バルクの距離が 10 mm にて着磁を行っている。図 2.10 に 示すようにこの距離を 5 – 15 mm まで変化させた場合における引力、回転トルク、復元力 を解析し、比較を行った。他の条件は実験環境に合わせ、FCM による着磁、超伝導バルク 間の距離を 1 mm に設定し、解析を行った。



図 2.10 着磁距離変化での FEM 解析の概要 (a)着磁距離 5 mm における初期状態(b)着磁 距離 15 mm における初期状態

2.2.7 超伝導バルク間隔を変化させた際の電磁界解析

磁気浮上工具の性能向上のために、実験環境から超伝導バルク間隔を変えた場合の解析 を行う。実験環境では樹脂加工のため、超伝導バルク間の距離が 1 mm となっている。図 2.10 に示すように、超伝導バルク間の距離を 0.1 – 10 mm まで変化させた際の引力を解析 し、比較を行った。他の条件は実験環境に合わせ、FCM による着磁、着磁距離を 10 mm に設定し、解析を行った。



図 2.11 超伝導バルク間隔変化での FEM 解析の概要(a)超伝導バルク間隔 1 mm における 初期状態(b)超伝導バルク間隔 10 mm における初期状態

第3章 結果と考察

3.1 実験結果との比較

3.1.1 反発力の比較

実験結果と実験環境に合わせたモデルのFEMによる反発力計算との比較を図3.1に示す。 横軸は永久磁石 – 超伝導バルク間距離を表しており、縦軸は永久磁石に働く反発力を表し ている。また、実験結果を赤のシンボルで、FEM 結果を黒の実線で示している。実験結果 とFEM 結果を比較すると、反発力はどちらも永久磁石 – 超伝導バルク間距離に反比例し、 増大しており、値もおおよそ同じ値を示している。そのため、実験結果、FEM 結果の反発 力の性質および大きさは等しく、解析モデルは実験環境の再現ができたといえる。

また、FEM 結果では、着磁距離である永久磁石 – 超伝導バルク間距離が 10 mm では力 はほぼゼロであり、着磁距離から永久磁石を近づけると反発力が働き、近づくほど反発力 は大きな値を示すことが確認できる。永久磁石 – 超伝導バルク間距離が 10 mm の場合で は磁束の変化が起こらないためピン力が発生せず、反発力がゼロとなる。さらに、永久磁 石が超伝導バルクに近づくと侵入する磁束が増え、それを阻止しようとピン力が発生する。 侵入する磁束は超伝導バルクに近づくほど増加し、その影響によってピン力が増大し反発 力が大きくなる。そのため、図 3.1 のような推移を取ったと考えられる。

永久磁石 – 超伝導バルク間距離が短くなると反発力は増加する。さらにその増加量は大きく、最大で100Nを超える反発力を示している。そのため、加工対象の大きさや必要な反発力に応じて距離を適切に変化させることで十分な性能を発揮できると考えられる。



図 3.1 実験環境に対する永久磁石を着磁距離から近づけたときの反発力の実験結果と FEM 結果の比較

3.1.2 引力の比較

実験結果と実験環境に合わせたモデルの FEM による引力計算との比較を図 3.2 に示す。 横軸は永久磁石の移動距離を表しており、縦軸は永久磁石に働く引力を表している。また、 実験結果を赤のシンボルで、FEM 結果を黒の実線で示している。実験結果と FEM 結果を 比較すると、実験結果の測定範囲では、どちらも着磁距離から離れると引力が増加するこ とが確認できる。実験において、移動距離が 5 mm を超えると引力が減少し、測定不可能 となった。そのため、実験では、移動距離が 5 mm を超えると引力は減少するといえる。 FEM 結果でも移動距離が 4 mm を超えると引力の減少が発生しており、引力の推移がおお よそ一致していることから実験結果、FEM 結果ともに性質は同じだといえる。引力の値も おおよそ同じ値を示しており、引力の大きさも等しいといえる。このことから解析モデル は実験環境の再現ができているといえる。しかし、移動距離が 2 mm 以上において、実験 結果が常に FEM 結果より大きな引力を示している。これは、解析モデルが超伝導バルク内 の磁束を十分に固定できていないことが原因であると考えられる。本来、超伝導状態では



図 3.2 実験環境に対する永久磁石を着磁距離から離したときの引力の実験結果とFEM 結 果の比較

超伝導バルク内の磁束は固定され、変化しない。しかし、図 3.3、図 3.4 に示すように解析 モデルの超伝導バルク内の磁束は永久磁石が離れると減少している。超伝導バルク内の磁 束に働くローレンツ力は $F_L = J \times B$ であり、ピン力はローレンツ力と等しく、超伝導バルク 内の磁束が減少することでピン力は減少する。そのため、超伝導バルク内の磁束が実際よ り少なくなり、その影響で FEM 結果の引力が実験結果の引力より低い値を示した。 また、FEM 結果では、着磁距離である移動距離が 0 mm では力はほぼゼロであり、着磁距 離から永久磁石を離すと引力が働き、4、5 mm 程度まで引力は増大している。移動距離が 0 mm の場合では磁束の変化が起こらないためピン力が発生せず、引力がゼロとなる。さら に、永久磁石が超伝導バルクから遠ざかると侵入する磁束が減少し、それを阻止しようと ピン力が発生する。侵入する磁束は超伝導バルクから離れるほど減少し、その影響によっ てピン力が増大し引力が大きくなる。そのため、着磁距離から離れると引力が発生し、移 動距離が大きいほど引力は増大する。また、FEM 結果では永久磁石が着磁距離から4 mm 以上離れると引力は減少している。永久磁石が離れることにより磁束が変化し、引力が発



図 3.3 永久磁石 – 超伝導バルク間距離が 10 mm での超伝導バルク内の磁束密度分布



図 3.4 永久磁石 – 超伝導バルク間距離が 14 mm での超伝導バルク内の磁束密度分布

生する。しかし、永久磁石が離れることにより、超伝導バルクが永久磁石に十分に力を与 えられなくなる。そのため、移動距離が 4 mm を超えると超伝導バルクの影響が小さくな り、引力が減少したと考えられる。

永久磁石を着磁距離から離していくと引力は増大するが、離しすぎると逆に減少してい くため、加工の際は、引力が十分に発揮される距離を見極めて、その距離を保つ必要があ る。

3.1.3 回転トルクの比較

実験結果と実験環境に合わせたモデルの FEM による回転トルク計算との比較を図 3.5 に 示す。横軸は永久磁石が回転した角度を表しており、縦軸は永久磁石にかかる回転トルク を表している。また、実験結果を赤のシンボルで、FEM 結果を黒の実線で示している。実 験結果と FEM 結果を比較すると、実験の測定範囲である回転角 45 度までどちらも回転ト ルクは増加傾向を示している。実験では、45 度を超えると永久磁石が着磁距離から外れ測 定不可となった。この様子は前節の引力が 15 mm 以上では測定できない状況と酷似してい る。そのため、回転トルクは 45 度を最大としてそれを超えると回転トルクは減少するとい える。FEM 結果においても同様の推移となっており、値も実験結果とおおよそ等しい結果 が得られている。このことから実験結果、FEM 結果ともに回転トルクの性質および大きさ は等しく、解析モデルは実験環境の再現ができたといえる。

また、FEM 結果では回転角度が0度では回転トルクは発生せず、回転することで回転ト ルクが発生し、45度程度までは回転トルクが増加していることがわかる。回転角が0度の 場合では、着磁した状態から磁束の変化がない。そのため、ピン力が起こらず、永久磁石



図 3.5 実験環境に対する永久磁石を着磁距離で回転させたときの回転トルクの実験結果 と FEM 結果

は回転せず、回転トルクが発生しない。回転角が増加することで磁束が変化し、その変化 を阻止しようとピン力が働き、永久磁石が回転する。その回転によって回転トルクが発生 する。回転角が増加するほど磁束の変化は大きくなるためピン力は増大し、同様に回転ト ルクも増大する。また、FEM 結果では、回転角度が45度で、回転トルクが0.15 N・m 程 度でピークを迎え、45度を超えると回転トルクは減少し、最小で135度回転時に回転トル クが-0.15 N・m 程度まで減少する。135度を超えると再度回転トルクは増加を始め、回転 トルクは増加、減少を繰り返している。このことから、回転トルクは周期 180度、振幅 0.15 N・m の正弦波を示していることがわかる。永久磁石は磁石中心を基準として点対称 となっており、永久磁石が0度回転状態と180度回転した状態では磁束の状態は等しい。 そのため、1 周期が 180度となっている。このことから、回転トルクの解析は1 周期とな る 180度までを解析すればよいこととなる。

3.1.4 復元力の比較

実験環境に合わせたモデルの FEM による引力計算と実験結果との比較を図 3.6 に示す。 横軸は永久磁石が初期位置から移動した距離を表しており、縦軸は永久磁石に働く復元力 を表している。また、実験結果を赤のシンボルで、FEM 結果を黒の実線で示している。実 験結果と FEM 結果を比較すると、どちらも実験の測定範囲内において移動距離が増加する と復元力は上昇しており、性質、大きさともにおおよそ等しい結果が得られている。実験 は移動距離 5 mm までの結果となっているが、これは永久磁石を横方向へと移動した際に 永久磁石に縦方向の力が働き、永久磁石が縦方向へ移動し、測定不可となったためである。 図 3.7 に縦方向に働く力の FEM 結果を示す。この結果から、FEM 結果も実験結果と同様 に反発力が働いていており、実験結果の範囲内においてその力は上昇していることがわか る。これは永久磁石が横方向に移動することにより、永久磁石と超伝導バルクの向かい合 う磁極が等しくなる部分が出てくるからだと考えられる。図 3.8 に示すように永久磁石を横 方向に移動すると一部磁極が等しくなる。向かい合う磁極が等しいとお互いに反発しあう ため反発力が発生し、移動距離が大きくなると磁極が等しい部分が増えるため反発力が増 大する。

実験結果と FEM 結果は復元力の性質、大きさがおおよそ一致し、反発力も性質が一致して いるため、解析モデルは実験環境の再現ができたといえる。図 3.7 より移動距離が 5 mm で の反発力は 0.75 N 程度であるため、実験環境においては 0.75 N を超える反発力を与える ことで永久磁石が外れることがわかる。また、FEM 結果の復元力は移動距離 15 mm で最 大 4.4 N 程度を示しており、実験の測定範囲である 5 mm を超えている。そのため、測定 不可の原因となった反発力を抑えることで永久磁石が外れにくくし、復元力を向上させる ことができる。

また、FEM 結果から、永久磁石の移動が起こっていない初期状態では復元力はほぼゼロ であり、横方向へと移動すると復元力が働くことがわかる。永久磁石が移動していない状 態では、磁束の変化は起こらないため、ピン力が発生せず復元力はゼロとなる。永久磁石 が横方向に移動すると磁束が変化し、それを阻止しようとピン力が発生する。そのため、 永久磁石が横方向に移動すると復元力が発生し、移動量が大きいほど復元力は増大する。 また、FEM 結果から移動距離が 15 mm で最大となり、15 mm を超えると復元力は減少し ている。永久磁石が横方向へと移動することにより磁束が変化し、ピン力が増大するが、 移動方向と逆方向にある超伝導バルクは永久磁石から離れることとなる。永久磁石と超伝 導バルクの距離が離れることで、超伝導バルクが永久磁石に与える影響は少なくなり、そ れによって 15 mm を超えると復元力は減少傾向を示した。移動距離が増加すると復元力は 35 mm でおよそゼロとなり、それを超えると負の値をとり、永久磁石と超伝導バルクが反 発しあっている。永久磁石を離しすぎると復元力は減少するため、復元力を加工に用いる 際は適切な距離を保って加工を行う必要がある。



図 3.6 実験環境に対する永久磁石が着磁距離から横方向に移動したときの復元力の実験 結果と FEM 結果



図 3.7 実験環境に対する永久磁石が着磁距離から横方向に移動したときの縦方向に働く 力の FEM 結果



図 3.8 磁気浮上工具の磁極の状態(a)横方向 0 mm 移動(b)横方向 35 mm 移動

3.2 着磁距離を変化させた際の電磁界解析

3.2.1 引力の比較

実験環境から着磁距離を5-15 mmで変化させた場合のモデルのFEMによる引力の計算 結果を図 3.9 に示す。横軸は着磁距離から永久磁石までの距離を表しており、縦軸は永久磁 石に働く引力を表している。この図からすべての着磁距離において、着磁距離では引力は ゼロとなり、4 mm まで引力は増加し、それ以上では引力が減少していることがみられる。 そのため、超伝導バルクが永久磁石に与える引力の傾向は着磁距離の変化に関わらず、同 質であるといえる。このことから、一度最大引力を発揮する距離を記録することで、再び 最大引力となる距離を測定することなく最大引力を引き出すことができる。また、すべて の距離において、着磁距離が近いほど強い引力を示している。着磁において、超伝導バル ク内に侵入する磁束は着磁距離が近いほど多く侵入する。そのため、着磁距離が近づくこ とによって超伝導バルク内部の磁束が増加し、磁束が増加することで永久磁石が移動した 際に永久磁石に与えるピン力が増加する。このため、着磁距離が近いほど引力は増加して。

また、各着磁距離における最大引力を図 3.10 に示す。横軸は着磁距離、縦軸は永久磁石 に働く引力の最大値を表している。この図から、着磁距離が短くなるほど最大引力は増大 し、逆に着磁距離が長くなると最大引力は減少することが分かる。また、着磁距離が近づ くほど最大引力の増大幅は大きくなり、逆に着磁距離が長くなると最大引力の増大幅は小 さくなる。このことから、着磁距離と最大引力には反比例の関係があるといえる。そのた め、引力を上げるには、着磁距離を短くすればよいことがわかる。しかし、図 3.9 より最大 引力を発揮する距離は着磁距離から 4 mm となっており、着磁距離の変化に依らない。そ のため着磁距離が短くなることで最大引力となる永久磁石 – 超伝導バルク間距離は短く なる。引力を用いた研磨加工は永久磁石 – 超伝導バルク間に加工対象を置き加工を行うた め、永久磁石 – 超伝導バルク間距離が短くなることで研磨できる物体が少なくなる。着磁 距離の変化により引力を増加させることはできるが研磨可能な物体が減少する。そのため、



図 3.9 着磁距離を 5-15 mm で変化させた場合に対する永久磁石を着磁距離から離した ときの引力の FEM 結果



図 3.10 永久磁石を着磁距離から離したときの着磁距離変化における最大引力の FEM 結 果

加工範囲を狭くすることなく、引力を上げる方法を模索する必要がある。

3.2.2 回転トルクの比較

実験環境から着磁距離を5-15 mm で変化させた場合のモデルのFEM による回転トル クの計算結果を図 3.11 に示す。横軸は永久磁石の回転角を表しており、縦軸は永久磁石に かかる回転トルクを表している。この図では、すべての着磁距離において周期 180 度の正 弦波を示しており、回転トルクの最大値が減少している。そのため、着磁距離を変化させ ることによる回転トルクの性質の変化は起こらず、大きさのみ変化することがわかる。ま た、すべての距離において、着磁距離が近いほど回転トルクの絶対値が増加していること がわかる。着磁において、超伝導バルク内に侵入する磁束は着磁距離が近いほど多く侵入 する。そのため、着磁距離が近づくことによって超伝導バルク内部の磁束が増加し、磁束 が増加することで永久磁石が移動した際に永久磁石に与えるピン力が増加する。これによ り回転トルクが増加するため、着磁距離が近づくことで回転トルクは増加することがわか る。

また、各着磁距離における最大の回転トルクを図 3.12 に示す。横軸は着磁距離、縦軸は 回転トルクの最大値を表している。この図から、着磁距離が短いほど最大回転トルクは増 大しており、着磁距離と最大回転トルクは反比例の関係にあると言える。そのため、着磁 距離を短くすることで回転トルクの性能を向上させることができる。

3.2.1 節にて述べたように引力は着磁距離から4mm離した地点が最も引力が大きくなる ため、研磨加工の際は着磁距離から4mm離して行うのが望ましい。しかし、図3.11、図 3.12の結果は、着磁距離にて回転を行った際の回転トルクの結果であり、着磁距離外での 回転トルクについては不明である。そのため、着磁距離から縦方向に移動した状態で回転 を行ったときの回転トルクについて解析を行っていく必要がある。



図 3.11 着磁距離を5-15 mmで変化させた場合に対する永久磁石を着磁距離で回転させた
ときの回転トルクの FEM 結果



図 3.12 永久磁石を着磁距離で回転させたときの着磁距離変化における最大回転トルクの FEM 結果

3.2.3 復元力の比較

実験環境から着磁距離を 5 – 15 mm で変化させた場合におけるモデルの FEM による復 元力の解析結果を図 3.13 に示す。横軸は永久磁石の横方向への移動距離を表しており、縦 軸は永久磁石に働く復元力を表している。この図からすべての着磁距離において、初期位 状態で復元力はゼロとなり、15 mm まで復元力は増加し、それ以上では引力が減少し、お よそ 35 mm でゼロに収束し、それ以上では復元力は負の値をとり、反発していることがわ かる。このことから、一度復元力が最大となる距離を記録することで、再び復元力が最大 となる距離を測定することなく最大の復元力を引き出すことができる。また、すべての距 離において、着磁距離が近いほど復元力の絶対値は増加している。着磁において、超伝導 バルク内に侵入する磁束は着磁距離が近いほど多く侵入する。そのため、着磁距離が近づ くことによって超伝導バルク内部の磁束が増加し、磁束が増加することで永久磁石が移動 した際に永久磁石に与えるピン力が増加する。このため、着磁距離が近いほど復元力は増 加した。

また、各着磁距離における最大の復元力を図 3.14 に示す。横軸は着磁距離、縦軸は永久 磁石に働く復元力の最大値を表している。この図から、着磁距離が短くなるほど最大引力 は増大し、逆に着磁距離が長くなると最大引力は減少することが分かる。また、着磁距離 8 mm、12 mm を境目に復元力の増加量が変化していることがわかる。3.2.1 節、3.2.2 節 より引力、回転トルクともに着磁距離と反比例の関係にある。そのため、復元力も同じく 着磁距離と反比例の関係にあると予測できる。予想と異なる原因としてメッシュの粗さが 原因であると考えられる。当初は他の解析と同様のメッシュにて解析を行った。しかし、 これで得られた結果は図 3.15 に示すように大量にノイズが入り十分な結果が得られなかっ た。メッシュを粗くすると図 3.13 に示すようにノイズは抑えられている。しかし、メッシ ュが粗くなると、計算の精度が落ちため、他の解析結果と比べ精度が落ちている。図 3.14 の結果は反比例に見えなくもない推移をしているため、計算の精度が向上した場合、引力、 回転トルクと同様に反比例のグラフになることも考えられる。

また、着磁距離が短くなると復元力は増大しているため、復元力を向上させるには着磁 距離を短くすればよいことがわかる。しかし、本解析では縦方向は着磁距離から移動させ ず、横方向のみを移動させて解析を行っている。そのため、着磁距離が短くなると永久磁 石 – 超伝導バルク間距離は短くなる。永久磁石 – 超伝導バルク間距離が短くなることで 加工可能な物体が減少する。そのため、永久磁石 – 超伝導バルク間が同距離における着磁 距離変化による復元力の変化などの解析などを行い、加工範囲を狭くすることなく復元力 を向上させる方法を模索する必要がある。



図 3.13 着磁距離を5-15 mmで変化させた場合に対する永久磁石を着磁距離から横方向 へ移動したときの復元力の FEM 結果



図 3.14 永久磁石を着磁距離から横方向へ移動したときの着磁距離を変化させた場合にお ける復元力最大の FEM 結果



図 3.15 メッシュ条件が他解析と同条件での着磁距離15 mmにおける復元力のFEM解析

3.3 超伝導バルク間隔を変化させた際の電磁界解析

3.3.1 引力の比較

実験環境から着磁距離を 0.1 – 10 mm で変化させた場合のモデルの FEM による引力の 計算結果を図 3.16 に示す。横軸は永久磁石 – 超伝導バルク間距離を表しており、縦軸は 永久磁石に働く引力を表している。この図では、すべての超伝導バルク間隔において 4 mm まで引力は増加し、その後減少している。そのため、引力の性質は超伝導バルク間隔に依 らないことがわかる。また、すべての距離において、超伝導バルク間隔が狭いほど強い引 力を示している。超伝導バルク間隔が狭くなることは縦方向に永久磁石と重なる超伝導バ ルクの面積が増加する。そのため、超伝導バルク内に侵入する磁束が増加し、磁束が増加 することで永久磁石が移動した際に永久磁石に与えるピン力が増加する。このため、超伝 導バルク間隔が狭いほど引力は増加した。

また、各超伝導バルク間隔における最大引力を図 3.17 に示す。横軸は超伝導バルク間隔、 縦軸は永久磁石に働く引力の最大値を表している。この図から、超伝導バルク間隔が狭い ほど、永久磁石に働く最大の引力は増大することが分かる。また、超伝導バルク間隔が 2 mm 以上では超伝導バルク間隔が 1 mm 変化で最大引力は 0.05 N 程変化している。それに対し、 超伝導バルク間隔が 2 mm 以下では 0.1 mm まで変化させても 0.03 N 程しか変化せず、最 大引力の変化が緩やかになっている。そのため、超伝導バルク間隔が 2 mm 以下では、超



図 3.16 超伝導バルク間隔を変化させた場合に対する永久磁石を着磁距離から離したとき の引力の FEM 結果



図 3.17 超伝導バルク間隔を変化させた場合における永久磁石を着磁距離から離したとき の最大引力の FEM 結果

伝導バルク間隔による最大引力への影響が小さいことがわかる。実際の使用においては、 超伝導バルクは樹脂加工が施されており、そのため超伝導バルク間隔は最小でも1mm開 くことになり、超伝導バルク間隔が1mmにて実験を行った。超伝導バルク間隔が狭いほ ど最大引力は上昇する、超伝導バルク間隔が2mm以下では最大引力への影響は少ないと いった観点から、現在の実験環境は適切なものであり、超伝導バルク間隔の変化による引 力の向上は望めない。

3.4 小括

磁気浮上工具の性能評価のため、鈴木研究室で行われた実験の結果を FEM で再現を行った。反発力、引力、回転トルク、復元力について再現を試みた。実験結果と FEM 結果を比較すると、性質、大きさともにおおよそ一致したため、再現ができたといえる。

また、着磁距離を変化させた場合の引力、回転トルク、復元力について解析を行った。 その結果、引力、回転トルク、復元力の性質は着磁距離によって変化せず、着磁距離を短 くすることにより大きさは増大することがわかった。

また、超伝導バルク間隔を変化させた場合の引力について解析を行った。その結果、バ ルク間隔が狭いほど引力は増大することがわかった。

第4章 まとめ

3D プリンタ、ダイカスト法などの中空加工技術には成型後の加工が困難などの問題が存 在しており、その問題の解決方法に超伝導バルクを用いた磁気浮上工具が提案されている。 磁気浮上工具は超伝導体の磁東ピンニングを利用した磁気浮上を用いて、切削や研磨とい った加工を行う加工器具である。しかし、その性能は未知数である。そのため、本研究で は、実験環境に合わせた磁気浮上工具のモデル FEM による電磁界解析を行い、その解析結 果について実験結果と比較、評価を行った。また、実験環境から一部条件を変えたモデル の FEM による電磁界解析の解析結果についても評価を行った。

解析に使用したモデルは永久磁石1つと超伝導バルク4つを組み合わせたものである。 永久磁石は内径10mm、外径29.5mm、厚さ10mmで、磁石表面にかかる磁場が450mT のリング型4極ネオジム磁石とした。超伝導バルクは1辺が35mm、厚さが10mmの YBa2Cu3O7-xを使用し、永久磁石の下部に配置した。着磁法としてFCMによる着磁を用い た。初期状態では超伝導バルクに常伝導特性を与え、磁束侵入後超伝導特性を加えること により、FCMの再現を行った。

本研究では反発力、引力、回転トルク、復元力の4種類について解析し、評価を行った。 反発力解析では、着磁後永久磁石を超伝導バルクに近づけた場合について解析を行った。 引力解析では、着磁後永久磁石を超伝導バルクから離した場合について解析を行った。回 転トルク解析では、着磁後永久磁石を回転させた場合について解析を行った。復元力解析 では着磁後永久磁石を横方向に移動させた場合について解析を行った。

実験結果と実験と同環境のモデルの FEM による解析結果を比較したところ、おおよそ一致し、実験結果の再現を行うことができた。また、FEM 結果から反発力は永久磁石を近づけるほど強くなり、100 N を超える反発力が得られることがわかった。引力および復元力は移動距離が長いほど強い力を示すが、ある距離を超えると力は減少することがわかった。 また、引力、復元力の最大値はそれぞれ 1.5 N、4.4 N 程度であり、反発力と比べとても小さいことがわかった。さらに復元力は実験では永久磁石が縦方向に外れ測定不可となった距離で増加しており、永久磁石に縦方向に働く力を抑えることで復元力を向上させることができることがわかった。回転トルクは周期 180 度、振幅 1.5 N・m の正弦波を示すことがわかった。

また、着磁距離を変化させた場合の引力、回転トルク、復元力について解析を行った。 その結果、引力、回転トルク、復元力のすべてで性質の変化は起こらず、大きさは着磁距 離に反比例することがわかった。そのため、着磁距離を短くすることで引力、回転トルク、 復元力を増加させることが可能となるが、着磁距離を短くすることで加工できる物体が減 少するという問題も存在している。本研究では回転トルクは着磁距離で回転した場合で解 析を行ったが、引力、復元力は着磁距離から一定距離離れた地点で最大となる。そのため、 着磁距離以外で回転した際の回転トルクの解析が必要となる。 また、超伝導バルク間隔を変化させた場合の引力について解析を行った。その結果、引 力の性質は変化せず、大きさは超伝導バルク間隔が狭いほど増加することがわかった。超 伝導バルクには樹脂加工が施されており、超伝導バルク間隔は最低でも1 mm は存在する。 現在は超伝導バルク間隔が1 mm にて実験が行われており、超伝導バルク間隔の変化によ る引力の増加は見込めない。

参考文献

[1] J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Scherieffer, Phys. Rev. 108 (1957) 1175-1204

[2] A. P. Drozdov, M. I. Eremets, I. A. Troyan, V. Ksenofontov, S. I. Shylin, Nature 525 (2015) 73.

[3] (社) 応用物理学会編: 超伝導分科会スクールテキスト高温超伝導体データブック(下)

・材料と応用・,超伝導分科会,(2005)第11 章ビスマス系線材

[4]和泉 輝郎, 「YBCO 線材」, 超伝導現象と高温超伝導体, (2013) 152-163

[5] M. Tomita, M. Murakami, Nature 421 (2003) 517

[6]T. Oka, Physica C 463-465 (2007) 7

[7] 佐保 典英, 磯上 尚志, 西嶋 規世, 田中 弘之, 窪田 純, 「手のひらサイズの超小型超伝 導バルク磁石の開発」, 低温工学 Vol. 46 (2011) No. 3 102–110

[8] 富田 優,「高温超伝導バルク磁石の開発」,超伝導現象と高温超伝導体,(2013) 210-217

[9]JMAG Simulation Technology for Electromechanical Design, 「JMAGとは」,

<https://www.jmag-international.com/jp/products/index.html>

[10]ものづくりウェブ MONOWEB, 3Dプリンターの原理(個人向け)」,

<http://d-engineer.com/3dprint/3dprintergenri1.html>

[11] 日高 裕, 九州工業大学大学院 情報工学府 学際情報工学専攻 機械情報工学分野 修士論文 (2016)

[12]W. Zhai et al, Cryst. Growth Des., (2015) 15 907-914

謝辞

まず、九州工業大学大学院情報工学研究院電子情報工学研究系エレクトロニクス分野、 小田部荘司教授にお礼申し上げます。研究に限らず、有意義な学生生活の過ごし方や社会 人としての心構えなど、公私ともに数多くのサポートを頂きました。深く感謝致します。 これらを胸に、エレガントな人になれるよう努めていきます。

また、九州工業大学大学院情報工学研究院電子情報工学研究系エレクトロニクス分野、 木内勝准教授にお礼申し上げます。超伝導の基礎など数多くのサポートで研究を支えて頂 きました。深く感謝致します。

そして、九州工業大学大学院情報工学研究院機械情報工学研究系鈴木恵友教授にお礼申 し上げます。磁気浮上工具の研究にあたり、磁気浮上工具の基礎など様々なサポートをし ていただきました。深く感謝いたします。

九州工業大学情報工学部機械情報工学科田中佑季氏にお礼申し上げます。磁気浮上工具 の研究にあたり、磁気浮上工具における様々な実験結果を提供していただきました。深く 感謝いたします。

九州工業大学情報工学府先端情報工学専攻、平松佑太氏にお礼申し上げます。JMAG の 使用方法を始めとする研究へのアドバイスを数多く頂きました。深く感謝致します。

最後に。公私ともお世話になった小田部・木内研究室の皆様、ここまで育て、支えてく れた両親に深く感謝致します。

研究業績

・論文

- Y. Hiramatsu, Y. Takahashi, E. S. Otabe, K. Suzuki, Y. Tanaka and M. Kiuchi, "Evaluation of Magnetic Cutting and Polishing with Superconducting Bulks", to be published in "Journal of Physics: Conference Series"
- ・国際学会
- Y. Hiramatsu, Y. Takahashi, E. S. Otabe, K. Suzuki, Y. Tanaka and M. Kiuchi, "Evaluation of Magnetic Cutting and Polishing with Superconducting Bulks", ISS (International Symposium on Superconductivity) 2016, Tokyo International Forum, December 14 2016.
- Y. Hiramatsu, Y. Takahashi, E. S. Otabe, K. Suzuki, Y. Tanaka and M. Kiuchi, "Evaluation of Magnetic Cutting and Polishing with Superconducting Bulks", SAES 2016, Kyushu Institute of Technology, December 18 2016.
- ・国内学会
- 4. 高橋悠,平松佑太,小田部荘司,鈴木恵友,田中佑季,木内勝,
 「超伝導バルクを利用した磁気浮上工具における磁気浮上力の計算」
 平成28年度応用物理学会九州支部学術講演会,対馬市交流センター,2016年12月3日
- 5. 平松 佑太, 高橋 悠, 小田部 荘司, 木内 勝, 鈴木 恵友, 田中 佑季, 「超伝導バルクを用いた磁気研磨切削装置の評価」
 第 64 回応用物理学会春季講演会, パシフィコ横浜, 2017 年 3 月 16 日(予定)