

令和3年度 卒業論文

超伝導線材を用いた磁気浮上工具の  
有限要素法による電磁界解析に関する研究

九州工業大学情報工学部

電子情報工学科

学生番号 17232006

石井 皓也

指導教員：小田部 荘司教授

# 目次

第1章 序論.....	4
1.1 超伝導体.....	4
1.1.1 超伝導体の歴史.....	4
1.1.2 第一種・第二種超伝導体.....	6
1.1.3 磁束ピンニング.....	7
1.1.4 銅酸化物超伝導体.....	8
1.1.5 RE系超伝導体.....	8
1.1.6 超伝導体のn値.....	9
1.1.7 超伝導バルク.....	10
1.1.8 超伝導線材.....	10
1.2 有限要素法(FEM).....	11
1.3 JMAG.....	11
1.4 A- $\Phi$ 法.....	12
1.5 本研究の目的.....	14
第2章 FEMによる解析方法と内容.....	15
2.1 解析方法.....	15
2.1.1 超伝導バルクを用いた磁気浮上工具のモデル作成.....	15
2.1.2 超伝導線材を用いた磁気浮上工具のモデル作成.....	17
2.1.3 メッシュ生成.....	20
2.2 解析内容.....	20
2.2.1 超伝導バルクを用いた磁気浮上工具の反発力計算.....	20
2.2.2 超伝導線材を用いた磁気浮上工具の反発力計算.....	21
2.2.3 超伝導線材の層を追加させた際の電磁界解析.....	22
第3章 結果及び考察.....	23
3.1 実験結果との比較.....	23
3.1.1 反発力の比較.....	23
3.2 超伝導線材の層を追加させた際の電磁界.....	24
3.2.1 反発力の比較.....	24
第4章 まとめ.....	27
参考文献.....	28
謝辞.....	29

## 図目次

図 1.1 超伝導状態と常伝導状態の関係 .....	5
図 1.2 第一種・第二種超伝導体 .....	6
図 1.3 磁束ピンニング .....	7
図 1.4 電界・電流密度特性 .....	9
図 1.5 超伝導線材の概要 .....	10
図 1.6 有限要素法の概要図 .....	11
図 2.1 超伝導バルクの概要 .....	15
図 2.2 永久磁石の概要 .....	16
図 2.3 超伝導バルクを用いた磁気浮上工具のモデル .....	16
図 2.4 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ の $J_c$ - $B$ 特性の実験値 .....	17
図 2.5 超伝導線材の概要 .....	18
図 2.6 超伝導線材を用いた磁気浮上工具のモデル TYPE R .....	18
図 2.7 超伝導線材を用いた磁気浮上工具のモデル TYPE A .....	19
図 2.8 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ の $J_c$ - $B$ 特性の実験値 .....	19
図 2.9 超伝導バルクを用いた磁気浮上工具の反発力計算の概要 .....	20
図 2.10 超伝導線材を用いた磁気浮上工具の反発力計算の概要 .....	21
図 2.11 超伝導線材の層の追加方法 .....	22
図 3.1 永久磁石を着磁距離から近づけた時の反発力の FEM 結果 .....	23
図 3.2 超伝導線材の層を 1 層から 4 層まで追加した場合の反発力の FEM 結果 .....	24
図 3.3 永久磁石を着磁距離から近づけた時の反発力の FEM 結果(超伝導バルク) .....	25
図 3.4 超伝導バルクと超伝導線材の反発力の比較方法 .....	26
図 3.5 超伝導線材の層を増やした場合の反発力の推測結果 .....	26

# 第1章 序論

## 1.1 超伝導体

### 1.1.1 超伝導体の歴史

1908年、オランダの物理学者ヘイケ・オンネスらがヘリウムの液化に初めて成功した。これにより非常に低い温度を利用することができるようになり、1911年には液体ヘリウムを用いて水銀の電気抵抗が4.2 K(-268.8°C)以下で急激にゼロになることを発見した。このように、非常に低い温度に冷やすことで電気抵抗が急激にゼロになる現象を超伝導、この現象が起きる特定の金属や化合物などの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、超伝導が起こる状態のことを超伝導状態と呼び、逆に電気抵抗がゼロでない状態のことは常伝導状態と呼ばれている。超伝導はいろいろな機器への応用が期待されたが、当時の超伝導体では非常に低い温度の時のみ超伝導状態になるが、わずかな磁場で常伝導状態になってしまう。なので、当時は工学的な応用は困難であった。

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・オクセンフェルトによって、超伝導体には完全反磁性(マイスナー効果)があることが発見された。マイスナー効果とは、超伝導体に外部磁場 $H_e$ をかけても超伝導体の内部には磁束が侵入できず、磁束密度 $B$ をゼロのままにするという特性のことである。つまり、超伝導体とは、電気抵抗がゼロでマイスナー効果を持つ物質のことである。超伝導体は図 1.1 のように、厚温度や磁場の範囲内でそれらの特性を示し、超伝導状態となる最大の温度を臨界温度 $T_c$ 、最大の磁場を臨界磁場 $H_c$ と呼ぶ。また、超伝導体は流すことのできる電流にも限りがあり、ある一定の電流値を超えると電気抵抗が発生する。この流せる最大の電流密度のことを臨界電流 $J_c$ と呼ぶ。そのため、 $T_c$ 、 $H_c$ 、 $J_c$ の範囲内では超伝導状態、それ以外では常伝導状態となる。

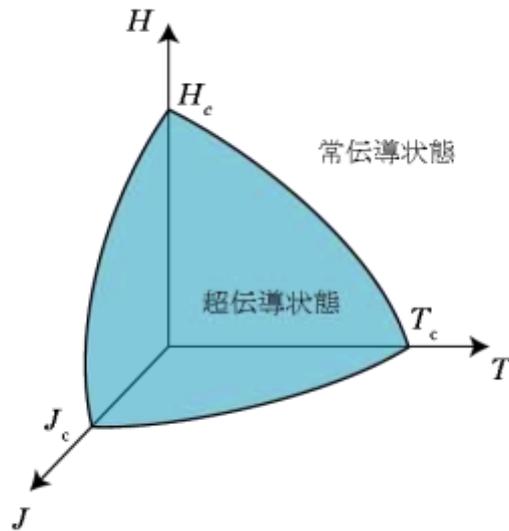


図 1.1 超伝導状態と常伝導状態の関係

1957年にジョン・バーディーンとレオン・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超伝導の仕組みが解明された。その理論を3人の頭文字を取ってBCS理論という。BCS理論とは、量子力学を使って超伝導を説明する理論である。BCS理論によると超伝導体が超伝導状態になる最大の温度（臨界温度 $T_c$ は40 K (-233°C) )を超えないという予測がされた。

さらに1986年にはヨナネス・ゲオルグ・ベドノーツとカール・アレクサンダー・ミュラーらによって銅を含む酸化物が30 K (-243°C) で発現するということが発表された。この発表以降、世界中で銅を含む酸化物の超伝導体の研究が始まった。そしてわずか数ヶ月後には液体窒素の沸点である77.3 Kを超える $T_c = 92$  Kの $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ が発見された。そして、現在の温度の最高記録は $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ で $T_c = 150$  K (-123°C)となっている。このように高い $T_c$ を持つ超伝導体を高温超伝導体と呼び、その中でも銅酸化物であるものを銅酸化物超伝導体と呼ぶ。

## 1.1.2 第一種・第二種超伝導体

1.1.1 項では、超伝導体には電気抵抗ゼロ、マイスナー効果という2つの性質を持っていることを記述した。しかし、超伝導体は外部磁場 $H_e$ を大きくしていくと、超伝導状態が壊れ、マイスナー効果が失われるので、磁束が内部に入り込み、常伝導状態になる。よって、超伝導状態から常伝導状態に遷移するときの磁場を臨界磁場 $H_c$ という。超伝導体は超伝導状態から常伝導状態に遷移する過程によって第一種超伝導体、第二種超伝導体に分類することができる。

第一種超伝導体は $H_c$ 以上の $H_e$ かけると、マイスナー効果が完全に失われるので、常伝導状態へ遷移する。対して、第二種超伝導体では、下部臨界磁場 $H_{c1}$ 以上の $H_e$ かけると、超伝導体が破壊され磁束が一部侵入するが超伝導状態は完全に壊れず、超伝導状態と常伝導状態の2つが混ざり合った状態になる。超伝導状態と常伝導状態が混ざり合っており、 $H_e$ が $H_{c1}$ 以上 $H_{c2}$ 未満のとき、この状態を混合状態と呼ぶ。 $H_e$ を大きくすると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 $H_{c2}$ を超え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。よって、第一種超伝導体と第二種超伝導体は混合状態が存在するかどうかで分類されている。

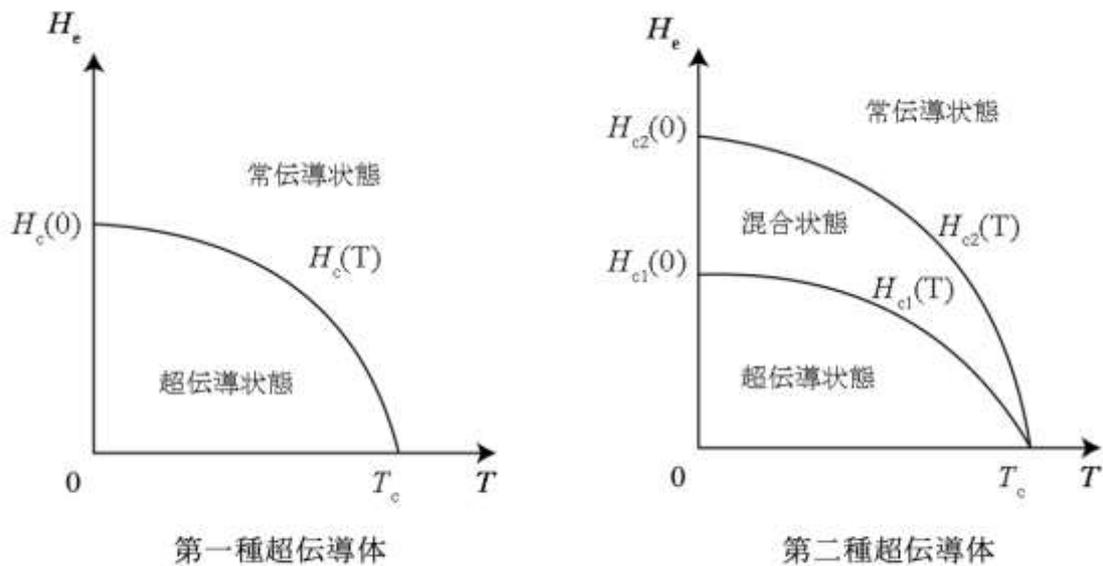


図 1.2 第一種・第二種超伝導体

### 1.1.3 磁束ピンニング

第二種超伝導体の混合状態において磁場をかけると、そのときの超伝導体は一部が常伝導状態であるので、その部分に磁束が侵入する。こ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 $J$ としたら、 $F_L = J \times B$ と表される。このローレンツ力により、磁束が速度 $v$ で運動をすると、電磁誘導により、 $E = J \times v$ となる電圧 $E$ が発生する。 $E$ が発生するという事は損失の発生、つまり抵抗が存在することを示しており、この抵抗の発生を防ぐためにローレンツ力に対抗して、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、磁束の動きを止める作用のことを磁束ピンニングと呼ぶ。ピン力 $F_p$ は $J_c$ を超えない範囲内において $F_L$ と等しくなり、最大で $F_p = F_L = J_c B$ となる。よって、 $F_p$ を強くすることで $J_c$ を向上させることが可能になる。

また、磁束ピンニングと完全反磁性を用いることで磁気浮上を行うことが可能となる。完全反磁性によって磁石と超伝導体を反発させ、磁石を浮かし、磁束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する。

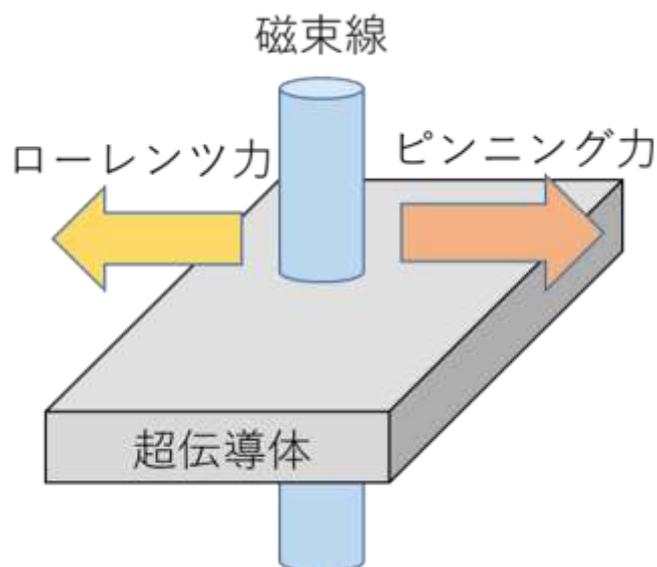


図 1.3 磁束ピンニング

### 1.1.4 銅酸化物超伝導体

今までの超伝導物質の $T_c$ では液体窒素の沸点77 Kよりも低い温度でしか超伝導状態にならないため、冷却用の触媒として液体ヘリウムの使用が必要だった。しかし、1986年、ドイツの物理学者 J. G. Bednorz、スイスの物理学者 K. A. Müller らによって銅酸化物超伝導体 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ が30 K以上で湯伝導状態になるということが発見された。その1年後には $T_c$ が93 Kの $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ を発見し、1993年には $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$ が133 Kの $T_c$ を持つということが発見された。しかし、線材化が困難であったため、バルク状高温超伝導体として使用された。

### 1.1.5 RE 系超伝導体

銅酸化物超伝導体の内の一つである $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (REBCO)超伝導体 (RE : Rare Earth : 希土類) は組成比が $\text{RE} : \text{Ba} : \text{Cu} = 1 : 2 : 3$ の超伝導体である。RE には Y(yttrium)、Sm(Samarium)、Dy(Dysprosium)、Eu(Europium)などが存在し、それらは総じて RE 系超伝導体と呼ばれる。1986年に発見されて以降、液体窒素を用いて超伝導状態にすることが可能になったので、RE 系超伝導体はさまざまなことに応用するため、研究されている。しかし、高温で利用が可能な代わりに、金属超伝導体は普通、どの方向に電流を流しても $J_c$ - $B$ 特性はすべて等しくなるが、銅酸化物超伝導体は磁界を加える方向によって $J_c$ - $B$ 特性が変化してしまう。よって、臨界電流密度の磁界依存性の異方性が存在する。

## 1.1.6 超伝導体の $n$ 値

第二種超伝導体の電界・電流密度 ( $E$ - $J$ ) 特性には図 1.4 に示すように、ゼロでない値の電流密度から急速に電界・電流密度特性が立ち上がるような、強い非線形性を示すものがある。第二種超伝導体の  $E$ - $J$  特性は以下のように表すことができる。

$$E \propto J^n \quad (1.1)$$

このような指数  $n$  は超伝導体の  $n$  値と呼ばれる。  $n = 1$  のとき、常伝導状態とオームの法則を示すような線形的な立ち上がりとなる。  $n$  値が大きい場合、わずかに電流値を減少させることで発生電圧を大幅に抑えることができる。  $n$  値が小さい場合は、臨界電流を多少上回るときでも緩やかな電圧の発生がみられる。

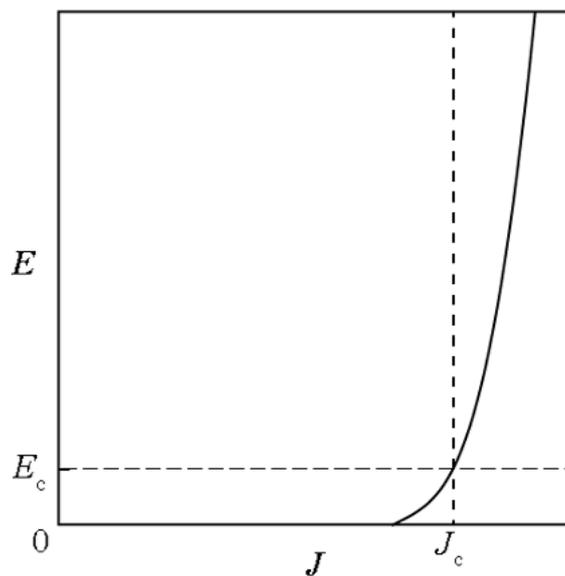


図 1.4 電界・電流密度特性

## 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の塊のことである。バルクを磁場中で冷却し磁束を捕捉させた後、磁場を取り除くことで強力な磁場を持つ磁石としての役割を果たすことができる。バルクは超伝導体の磁氣的側面を強く押し出し、磁束ピンニングなどの磁気現象を利用する際に用いる。

現在、永久磁石において最も高い磁場を持つものは Nb-Fe-B であり、最大発生磁場は 1.5 T である。対して、超伝導バルクは永久磁石を上回る磁場を発生させ得る。2003 年には、YBCO バルクで 29 K の温度化において最大 17 T の磁場捕捉が実現している。

上記のような高磁場用超伝導磁石としての利用のほかに、磁束ピンニング現象を利用した磁気浮上を利用する方法もある。磁気浮上とは、超伝導バルクと永久磁石などの高磁場を持つ磁性体を任意の距離に離して冷却させることで超伝導バルクを着磁し、超伝導バルクと磁性体が空中で固定される現象のことである。これにより、非接触ペアリング、フライホイール蓄電システムなどの機器の開発が進められている。

超伝導バルクは永久磁石や超伝導コイルなどの実用化されている技術と比較して素材の小型が望め、その小型形状と対照的に高磁場を発生させる性質は多くの利点を含んでおり、超伝導コイルに代わる存在として期待されている。

## 1.1.8 超伝導線材

超伝導線材は、保護層、超伝導層、中間層、金属基板、安定化層で構成されている。超伝導線材の中には高温超伝導線材というものがあり、高温超伝導ケーブルに使用される代表的な高温超伝導線材には、ビスマス系とイットリウム系と呼ばれる 2 種類がある。

超伝導バルクより加工がしやすく、加工による性能の劣化が少ない。

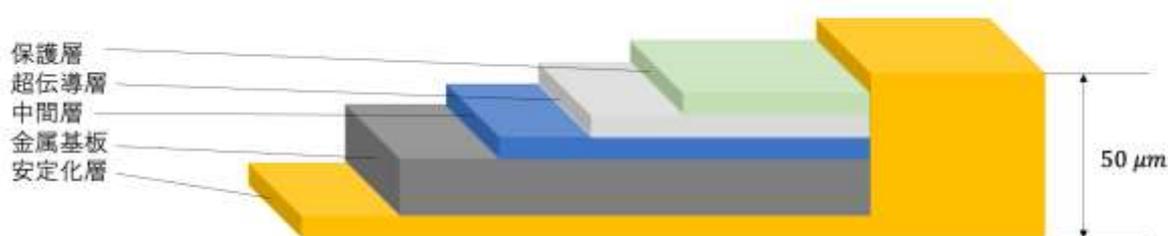


図 1.5 超伝導線材の概要

## 1.2 有限要素法(FEM)

有限要素法とは、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方法の一つである。円柱や無限平板のような単純な形状ではなく、複雑な形状をした物体の解析に用いられる。

複雑な形状・性質を持つ物体を、四角形や三角形のような単純な形状をした要素に分割し、それぞれの要素を方程式で用いて近似表現を行う。解析対象物は単純な要素の集合体であると捉え、それぞれの要素で作成された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計算を行い、対象物の全体の挙動を予測するものである。また解析対象物を分解し、生成した要素のことをメッシュと呼ぶ。計算を行う際は、細かいメッシュを生成することで高精度な解析が可能となるが、メッシュ数が増えると計算数も増えるため、計3時間も増加する。計算の際には計算時間が過剰にならないかつ必要最低限のメッシュカットを行う必要がある。

有限要素法では、数値解析のみを行うための解析対象物のモデリングが適切でない場合には誤った結果を導く可能性が高い。そのため、解析対象物への十分な理解が必要である。

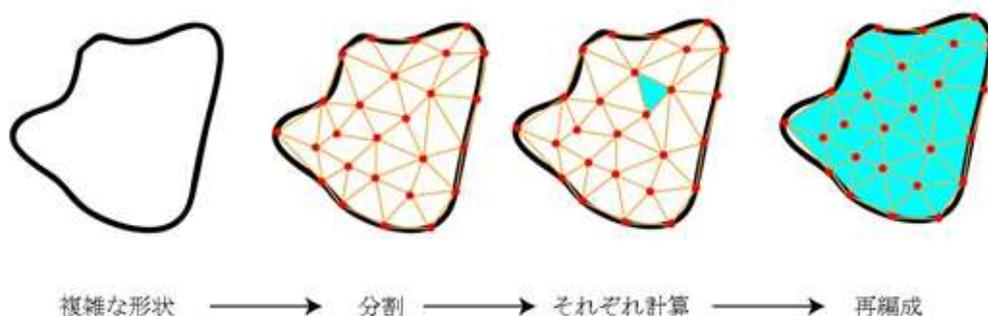


図 1.6 有限要素法の概要図

## 1.3 JMAG

JMAG は株式会社 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。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かつ高速に解析することができる。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」の4つのコンセプトから成り立っている。

## 1.4 $A$ - $\Phi$ 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 $\phi$ を未知数として解くものがある。これをベクトルポテンシャル法 ( $A$ - $\Phi$ 法) という。

磁束密度 $B$ は、磁気ポテンシャル $A$ を用いると、

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (1.2)$$

と表せる。これを Maxwell 方程式

$$\nabla \times \mathbf{E} = \dot{\mathbf{B}} = 0 \quad (1.3)$$

に代入すると、

$$\nabla \times \mathbf{E} = \dot{\mathbf{B}} = -\nabla \times \dot{\mathbf{A}} \quad (1.4)$$

すなわち、

$$\nabla \times (\mathbf{E} + \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad (1.5)$$

と表せる。ここで $E$ は電場の強度、 $\dot{\mathbf{B}}$ は $\partial \mathbf{B} / \partial t$ である。任意のスカラー関数 $\phi$ について、 $\nabla \times \nabla \phi = 0$ であるから、 $E$ は

$$\mathbf{E} = -\dot{\mathbf{A}} - \nabla \phi \quad (1.6)$$

と表せる。

透磁率 $\mu$ 、電気伝導率 $\sigma$ の導体中の磁場強度を $H$ 、電流密度を $J$ とする。

$\nabla \times \mathbf{H}$ に関する Maxwell 方程式は

$$\nabla \times \mathbf{H} = \dot{\mathbf{D}} + \mathbf{J} = 0 \quad (1.7)$$

であるが、周波数が極めて低い場合を考えるので磁束密度 $D$ の時間微分は無視できると考えると、

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (1.8)$$

となる。式(1.8)に、式(1.2)および関係式

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (1.9)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \quad (1.10)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (1.11)$$

を代入すると、

$$\nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \left( \frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) \quad (1.12)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \mathbf{J} \cdot \sigma \mathbf{E} = -\sigma \nabla \cdot (\nabla \phi + \dot{\mathbf{A}}) = 0 \quad (1.13)$$

となる。任意のベクトル $A$ において

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (1.14)$$

が成立する。これはクーロンゲージ条件( $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$ )を代入すると

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = -\nabla^2 \mathbf{A} \quad (1.15)$$

となる。式 (1.11) 、式(1.12)に代入すると、

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

となる。ここで  $\phi = \Phi$  と定義して、式(1.12)、式(1.15)に代入すると、それぞれ

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = \sigma(\dot{\mathbf{A}} + \nabla\Phi) \quad (1.17)$$

$$\nabla \cdot (\dot{\mathbf{A}} + \nabla\Phi) = 0 \quad (1.18)$$

となる。これらが導体中の支配方程式である。

次に、空気領域では、を外部電流密度  $\mathbf{J}_{\text{ex}}$  とすると、Maxwell 方程式より

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_{\text{ex}} \quad (1.19)$$

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

$$\frac{1}{\mu_0} \nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{J}_{\text{ex}} \quad (1.20)$$

よって空気中の支配方程式は、

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = -\mathbf{J}_{\text{ex}} \quad (1.21)$$

となる。

支配方程式を空間で離散化すると誤差が生じる。たとえば、導体中の支配方程式では、

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

となり、 $\delta x$  が誤差である。有限要素法では、左辺の微分方程式が右辺の誤差に重み  $\delta w$  をかけて体積積分したものをゼロと考えることにより、誤差  $\delta x$  を考慮しなくてもよいようにしている。

$$\int_V \delta w \cdot \left\{ \frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} - \sigma(\dot{\mathbf{A}} + \nabla\Phi) \right\} dV = \int_V \delta w \cdot \delta x dV = 0 \quad (1.23)$$

$A$ - $\phi$ 法の有限要素法では、重み  $\delta w$  を  $\mathbf{A}$  の各成分の微小変化

$$\delta w = (\delta A_x, \delta A_y, \delta A_z) \quad (1.24)$$

とする。

他の支配方程式についても同様の操作を行う。

## 1.5 本研究の目的

超伝導の特徴として、電気抵抗ゼロと完全反磁性の2つがある。そのうちの完全反磁性という特徴を用いることで超伝導体の上に永久磁石を浮上させる、永久磁石の反発力による磁気浮上をすることができる。空中に物体を浮かせるにはこの技術を用いて、磁気浮上工具を製作すればよいと考える。1987年に $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO) が発見されたことによって、超伝導体の研究が進み、浮上状態を安定して保ち続けることができる超伝導バルクが製作された。これによって磁気浮上工具は中空加工技術や準無重力空間の構想などに応用することが可能になった。現在では、超伝導体の研究が進んだことによって超伝導体の線材化に成功しており、バルクとの互換性について注目されている。そこで、現在使用されている磁気浮上工具には超伝導バルクを用いたものが多いが、超電動バルクを超伝導線材に変更した際の磁気浮上に必要な永久磁石を浮かせる反発力について性能評価をする必要がある。

本研究では、JMAG というシミュレーションソフトを使用し、FEM を用いて磁気浮上工具の反発力の解析をA- $\Phi$ 法によって計算する。超伝導線材は超伝導バルクよりも小さいことから、超伝導線材の配置を変えて2つのモデルを製作した。その際、できるだけ少ない超伝導線材でより性能の良いモデルを作るという点と永久磁石と類似した形に配置するという点の2点を考慮して配置したモデルの磁気浮上力の評価を行った。また、超伝導線材は本来、層を積み重ねて用いるので、その場合についても解析を行い、超伝導線材と超伝導バルクが同じサイズになった場合についても比較をする。

## 第2章 FEMによる解析方法と内容

### 2.1 解析方法

#### 2.1.1 超伝導バルクを用いた磁気浮上工具のモデル作成

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研究室の実験環境をもとにモデルを作成し、JSOL社製のJMAG-Designer20.0を用いて解析を行なった。

超伝導バルクは図2.1に示す1辺35 mm、厚さ10 mmの $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ を4つ使用した。またメッシュサイズは2 mm、表皮厚さのみ1 mmとして設定した。永久磁石は図2.2に示すように、厚さ10 mm、内径20 mm、外径59 mmで磁石表面にかかる磁場が450 mTのリング型4極ネオジウム磁石を使用した。メッシュサイズは3 mmである。永久磁石は4つの超伝導バルクから10 mm離れた上部に配置する。また、計算の簡略化のため、モデルは超伝導バルク、永久磁石、空気の3要素のみで構成したものを図2.3に示す。また $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ の特性は図2.4の $J_c$ - $B$ 特性の実験値を使用した。

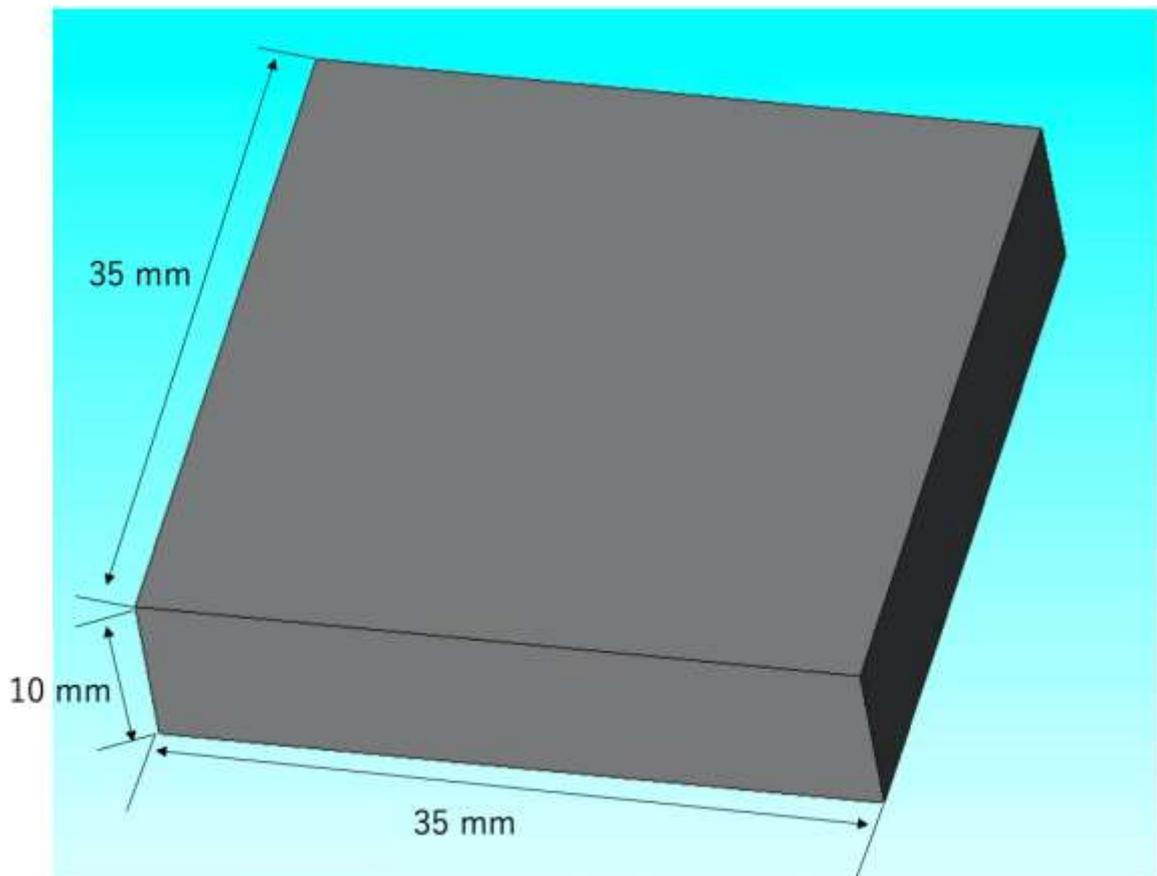


図 2.1 超伝導バルクの概要

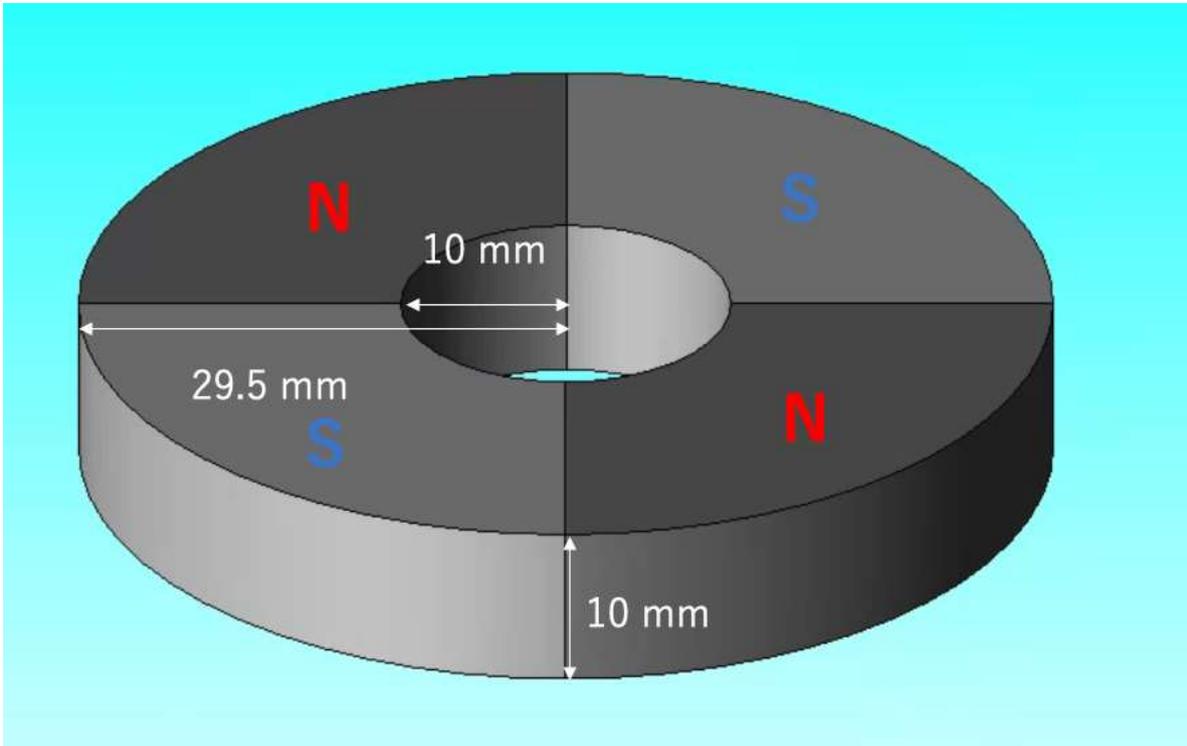


図 2.2 永久磁石の概要

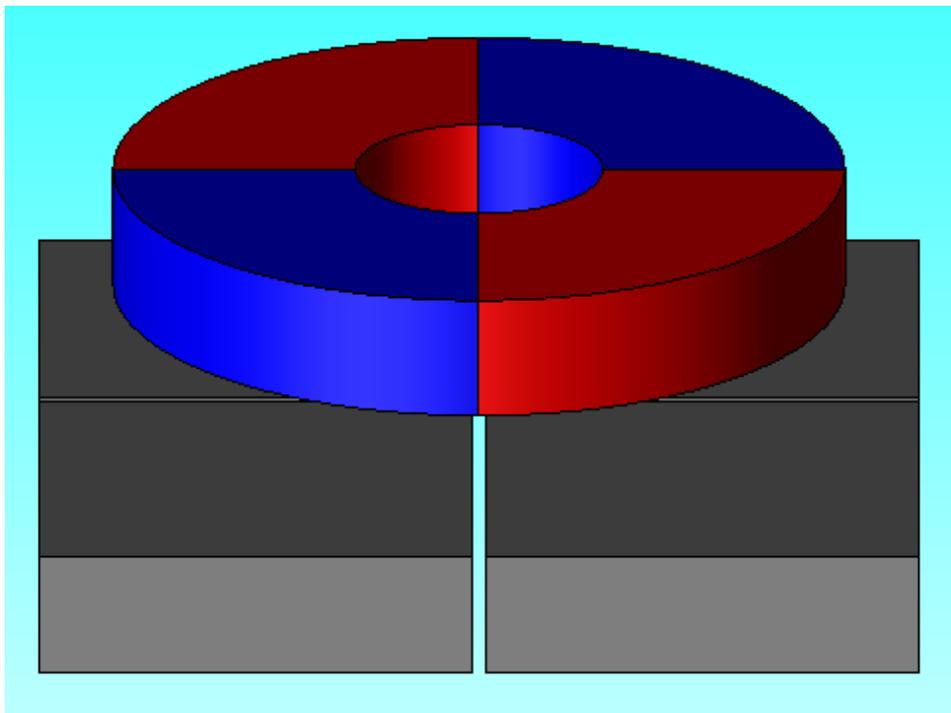


図 2.3 超伝導バルクを用いた磁気浮上工具のモデル

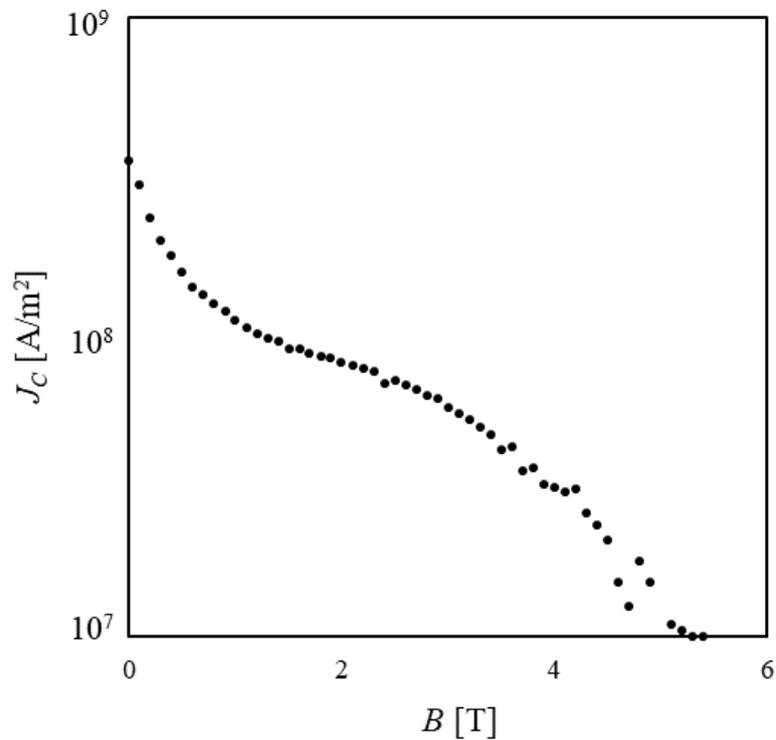


図 2.4  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  の  $J_c$ - $B$  特性の実験値

### 2.1.2 超伝導線材を用いた磁気浮上工具のモデル作成

現在、株式会社フジクラにて Gb 系超伝導線材の開発が行われている。そこで、本件空では開発された超伝導線材をもとに磁気浮上工具のモデルを作成し、解析を行なった。FEM 解析には超伝導バルクと同じく JSOL 社製の JMAG-Designer20.0 を用いた。

超伝導線材は図 2.5 に示す長さ 20 mm、幅 10 mm、厚さ 1  $\mu\text{m}$  の  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  超伝導線材を 6 つ使用した。またメッシュサイズは 2 mm、表皮厚さのみ 1 mm として設定した。永久磁石は厚さ 10 mm、内径 20 mm、外径 59 mm で磁石表面にかかる磁場が 450 mT のリング型 4 極ネオジウム磁石を使用した。メッシュサイズは 3 mm である。永久磁石は 6 つの超伝導線材から 10 mm 離れた上部に配置する。モデルの作成には、超伝導バルクと同じく、超伝導線材、永久磁石、空気の 3 要素のみで構成したものを図 2.6、図 2.7 に示す。また  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  の特性は図 2.8 の  $J_c$ - $B$  特性の実験値を使用した。

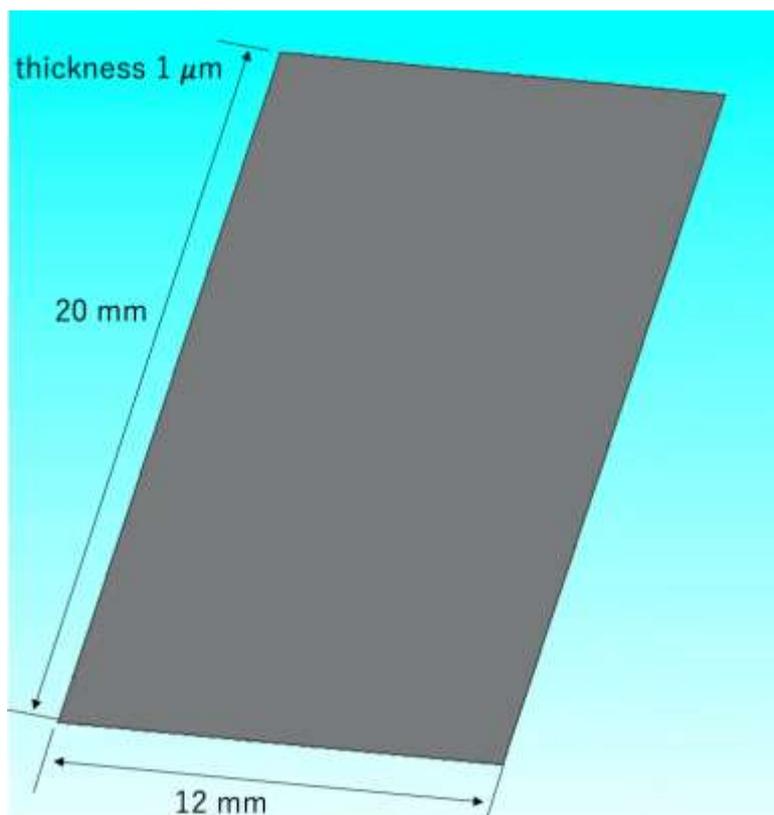


図 2.5 超伝導線材の概要

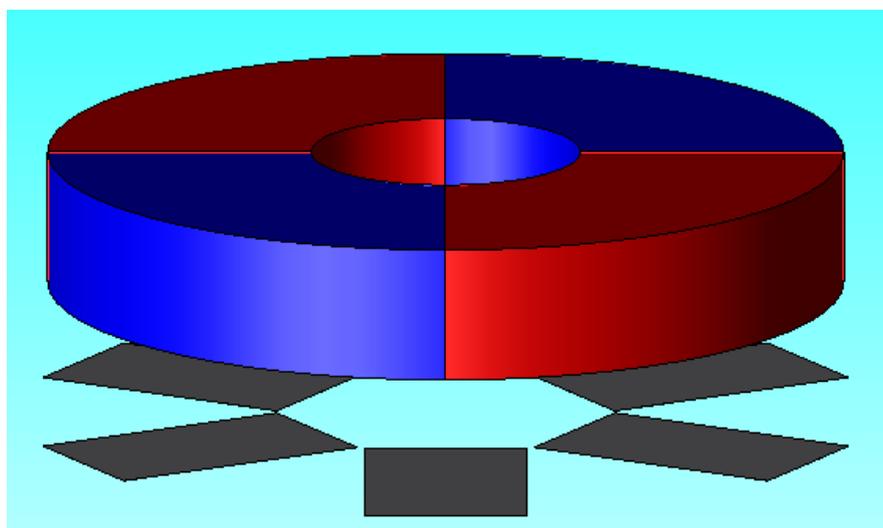


図 2.6 超伝導線材を用いた磁気浮上工具のモデル Type R

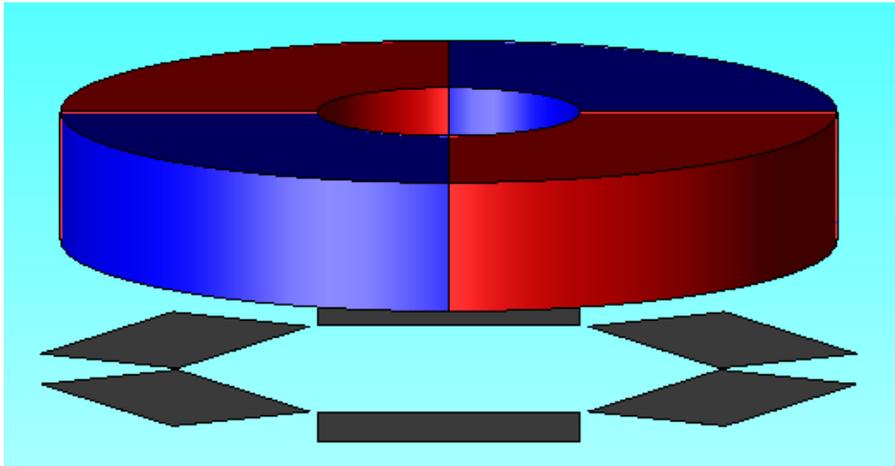


図 2.7 超伝導線材を用いた磁気浮上工具のモデル Type A

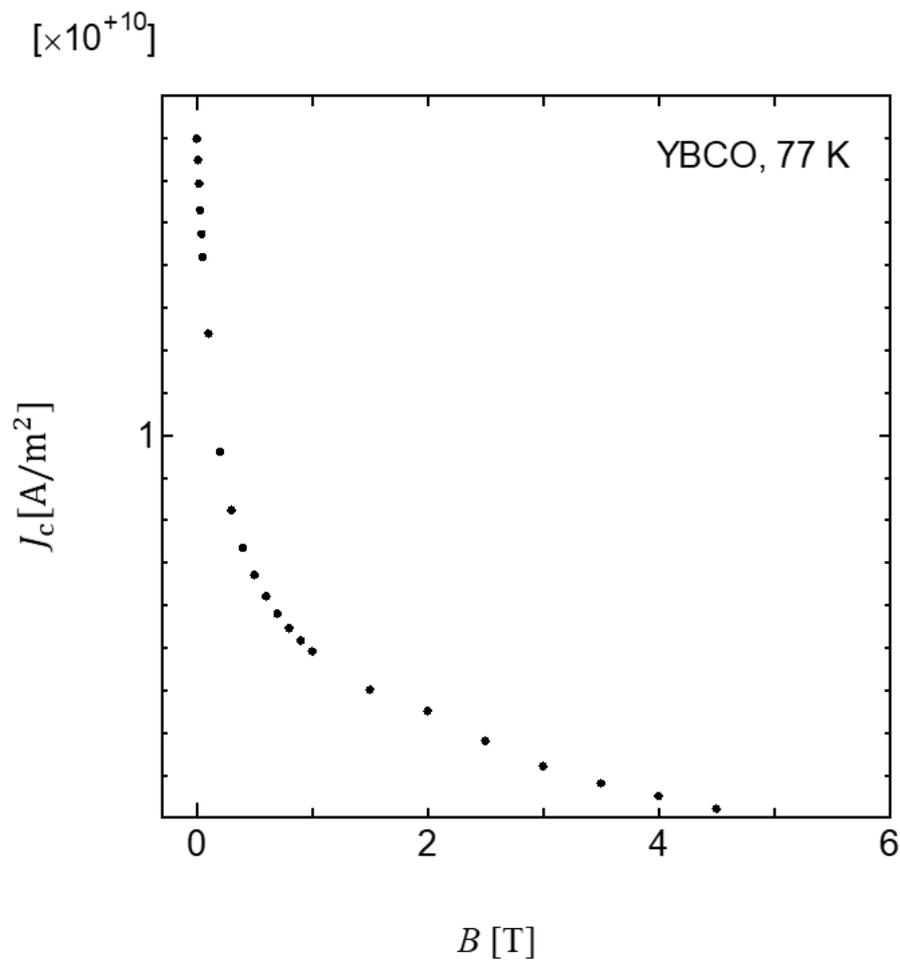


図 2.8  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  の  $J_c$ - $B$  特性の実験値

### 2.1.3 メッシュ生成

JMAG-Designer では、対象物について有限要素法を用いて解析を行うため、メッシュは細かい方がより正確な解析を行うことが可能になる。本研究では、超伝導バルクによる永久磁石の反発力と超伝導線材による永久磁石の反発力を解析し比較することが目的であるため、超伝導バルク、超伝導線材、永久磁石の順でメッシュを細かく分割し、解析を行なった。

## 2.2 解析内容

### 2.2.1 超伝導バルクを用いた磁気浮上工具の反発力計算

永久磁石に超伝導バルクを着磁し、永久磁石に近づけると、磁束ピンニングによって永久磁石の運動に対して反対方向にピン力が働き、永久磁石の位置をもとに戻そうとする。このピン力によって永久磁石が浮上する。また、磁気浮上工具での研磨の際、この力を圧力として利用して、永久磁石と加工対象物を密着させ、縦方向への研磨を行う。この力が弱いと、永久磁石は研磨対象を滑るよう回転し、十分な研磨が行われない。本研究ではこの力を反発力として解析を行なった。反発力の計算の概要を図 2.9 に示す。超伝導バルクの上に永久磁石を配置し、着磁させる。その後、永久磁石を 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永久磁石と超伝導バルクの距離が 1 mm になるまで近づけて解析を行なった。

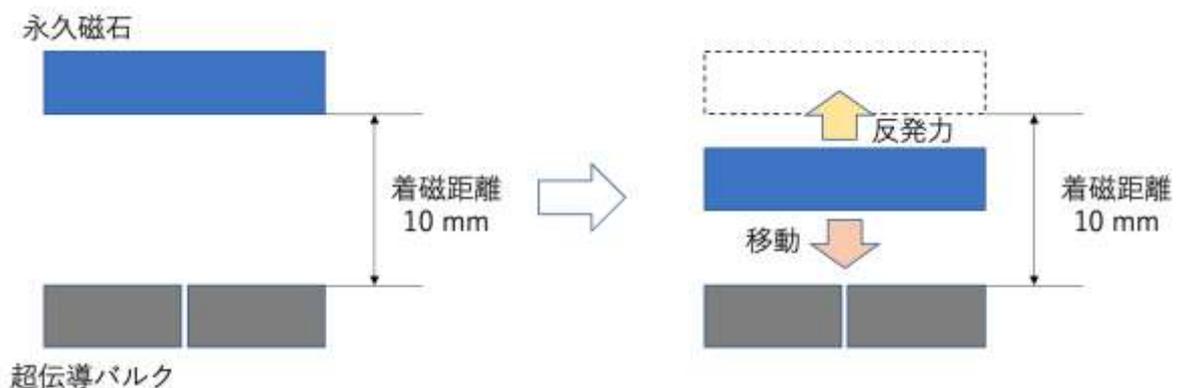


図 2.9 超伝導バルクを用いた磁気浮上工具の反発力計算の概要

## 2.2.2 超伝導線材を用いた磁気浮上工具の反発力計算

永久磁石に超伝導線材を着磁し、永久磁石に近づけると、磁束ピンニングによって永久磁石の運動に対して反対方向にピン力が働き、永久磁石の位置をもとに戻そうとする。このピン力によって永久磁石が浮上する。また、磁気浮上工具での研磨の際、この力を圧力として利用して、永久磁石と加工対象物を密着させ、縦方向への研磨を行う。この力が弱いと、永久磁石は研磨対象を滑るよう回転し、十分な研磨が行われない。本研究ではこの力を反発力として解析を行なった。反発力の計算の概要を図 2.10 に示す。超伝導線材の上に永久磁石を配置し、着磁させる。その後、永久磁石を 1 mm ずつ超伝導線材に近づける。その際に発生する反発力を永久磁石と超伝導バルクの距離が 1 mm になるまで近づけて解析を行なった。

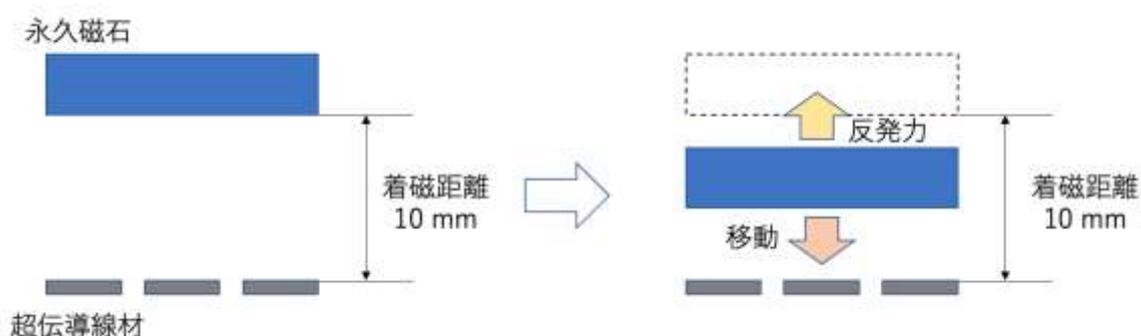


図 2.10 超伝導線材を用いた磁気浮上工具の反発力計算の概要

## 2.2.3 超伝導線材の層を追加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、超伝導線材の層を増やした場合の解析を行う。超伝導線材の厚さは $1\mu\text{m}$ だが、超伝導線材は本来、保護層、超伝導層、中間層、金属基盤、安定化層から構成されているので、新しい層を追加するときに超伝導線材間の距離をそれらの層も考慮した全体の大きさである $50\mu\text{m}$ 離して、モデルを作成する。モデルの作成には計算の簡易化のため、磁気浮上工具に必要な最低限の超伝導線材、永久磁石、空気の3要素のみで構成し、解析を行う。図2.11に示すように、超伝導層間の距離を $50\mu\text{m}$ 離し、層を増やすことによる性能の変化について評価を行う。そして、超伝導バルクと比較することで超伝導線材の性能評価をする。

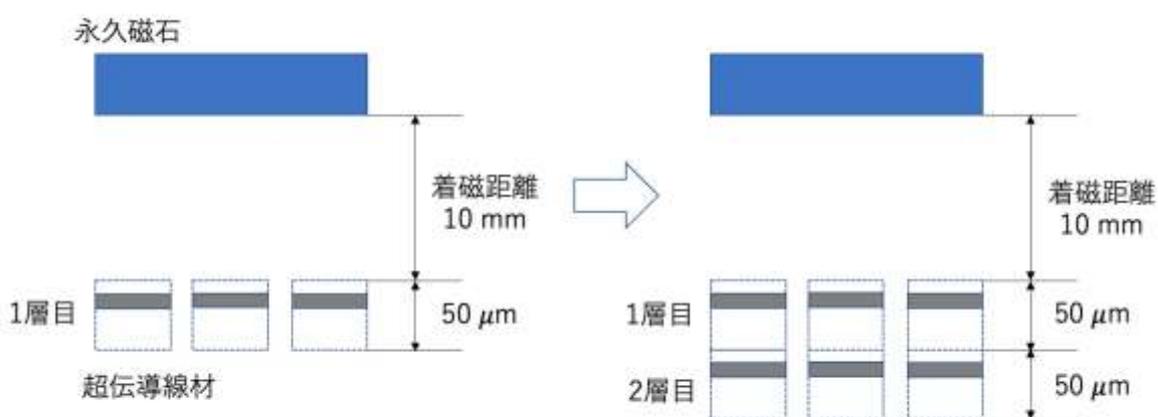


図 2.11 超伝導線材の層の追加方法

## 第3章 結果及び考察

### 3.1 実験結果との比較

#### 3.1.1 反発力の比較

磁気浮上工具の Type R と Type A それぞれのモデルの FEM による反発力計算結果を図 3.1 に示す。横軸は永久磁石と超伝導線材の距離、縦軸は永久磁石に働く反発力を表している。また、Type R のモデルの結果を点線で、Type A のモデルの結果を実線で示している。これら 2 つのモデルの FEM 結果を比較すると、反発力はどちらも永久磁石から超伝導線材までの距離に反比例し、増えていることがわかる。そして、超伝導線材 1 層においてはモデル Type R、Type A の間で大きな違いは見られなかった。また、着磁距離である永久磁石から超伝導線材までの距離が 10 mm では力が 0 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。永久磁石から超伝導線材まで距離が 10 mm の場合は磁束の変化が起こらないためピン力が発生しない。そのため、反発力が 0 となる。そして、永久磁石が超伝導線材に近づくにつれて侵入する磁束は超伝導線材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 のような結果が得られたと考えられる。

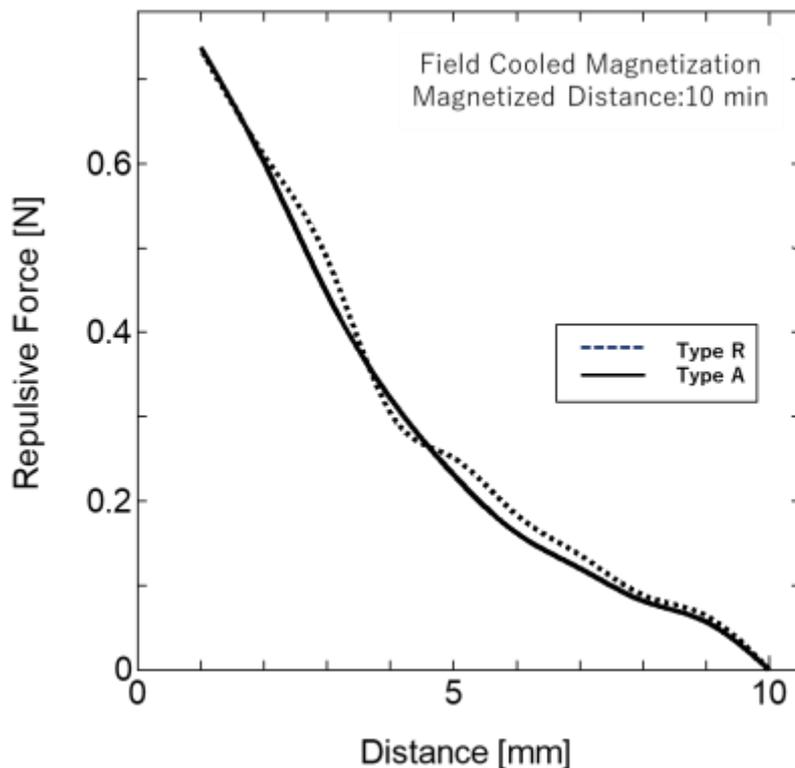


図 3.1 永久磁石を着磁距離から近づけた時の反発力の FEM 結果

## 3.2 超伝導線材の層を追加させた際の電磁界

### 3.2.1 反発力の比較

磁気浮上工具の Type R と Type A それぞれのモデルの超伝導線材の層を 1 層から 4 層まで増加させた際の FEM による反発力計算結果を図 3.2 に示す。横軸は永久磁石と超伝導線材の距離を表しており、縦軸は永久磁石に働く反発力を表している。また、Type R のモデルの結果を点線で示し、Type A のモデルの結果を実線で示し、モデルに対する超伝導線材の層の数を図 3.2 内の右上に示す。これら 2 つのモデルの 1 層から 4 層までの FEM 結果を比較すると、着磁距離では反発力は 0 である。また、超伝導線材の層を増やしても反発力は永久磁石と超伝導線材の距離に反比例し、増加していることがわかる。そのため、層を増やすことによる変化は単純に反発力が増加しているだけで、性質は同じであるといえる。このことから、超伝導線材は層を増やすことで大きな反発力を得ることができる。また、層が 2 層より多く永久磁石と超伝導線材の距離が 5 mm より近ければ Type A のモデルの方が高い反発力を得られていることがわかる。そのため、超伝導線材の層を増やすことで、同条件下における超伝導バルクの反発力よりも大きな値を得ることができるのではないかと考えられる。

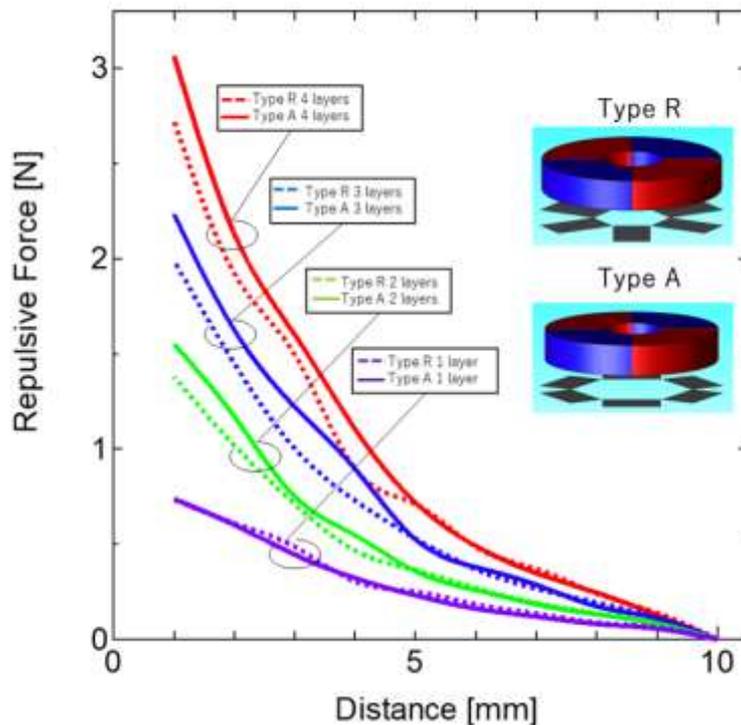


図 3.2 超伝導線材の層を 1 層から 4 層まで追加した場合の反発力の FEM 結果

超伝導線材との比較のため、超伝導バルクを用いた磁気浮上工具のモデルの FEM による反発力計算結果を図 3.3 に示す。横軸は永久磁石と超伝導バルクの距離を表しており、縦軸は永久磁石に働く反発力を表している。超伝導バルクの結果を実線で示している。FEM 結果より、超伝導バルクの反発力は着磁距離では 0 であり、永久磁石から超伝導バルクまでの距離に反比例し、増えていることがわかる。よって、超伝導線材と超伝導バルクはともに性質が同じだといえる。また、超伝導バルクと永久磁石の距離が 1 mm の時、反発力は 85 N 程度になる。

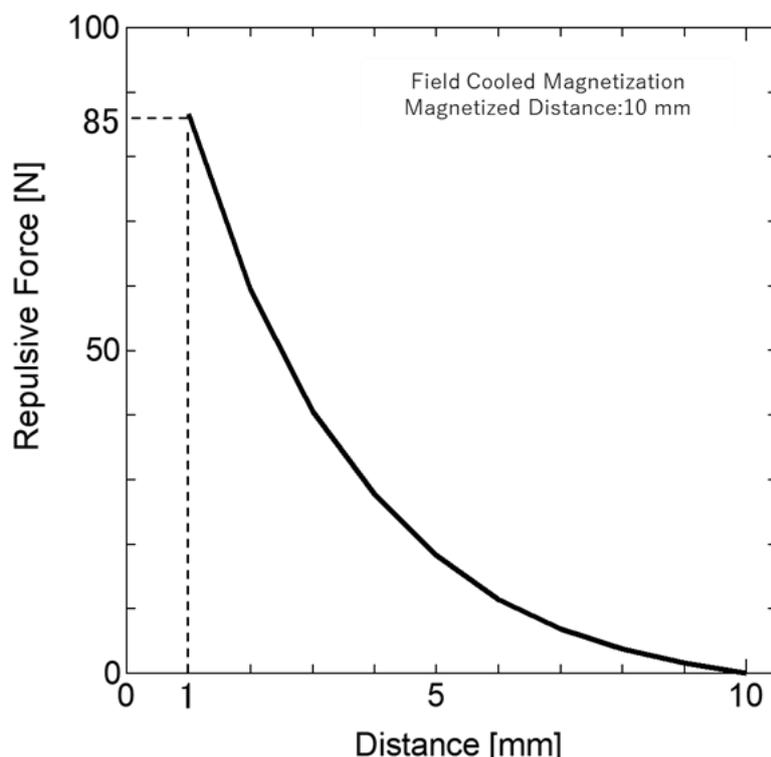


図 3.3 永久磁石を着磁距離から近づけた時の反発力の FEM 結果(超伝導バルク)

ここで、超伝導線材と超伝導バルクを比較するために、超伝導バルクの厚さ 10 mm なので、同じ厚さになるように超伝導線材の層を積み重ねる。そのため、超伝導線材の層を 200 層積み上げる必要がある。今回の研究において、超伝導線材 200 層の反発力解析は難しいため、層を追加した際の反発力の変化から、200 層での反発力を推測する。その概要を図 3.4 に示す。また層を追加した際の反発力の結果より、反発力においてモデル Type A の方が優れていることがわかっているので、超伝導線材のモデルが Type A の場合と超伝導バルクの場合についてのみ比較を行なった。1 層、2 層、3 層、4 層、8 層、16 層、における反発力から推測した近似式のグラフを図 3.5 に示す。横軸は層の数を表し、縦軸は反発力を示す。



図 3.4 超伝導バルクと超伝導線材の反発力の比較方法

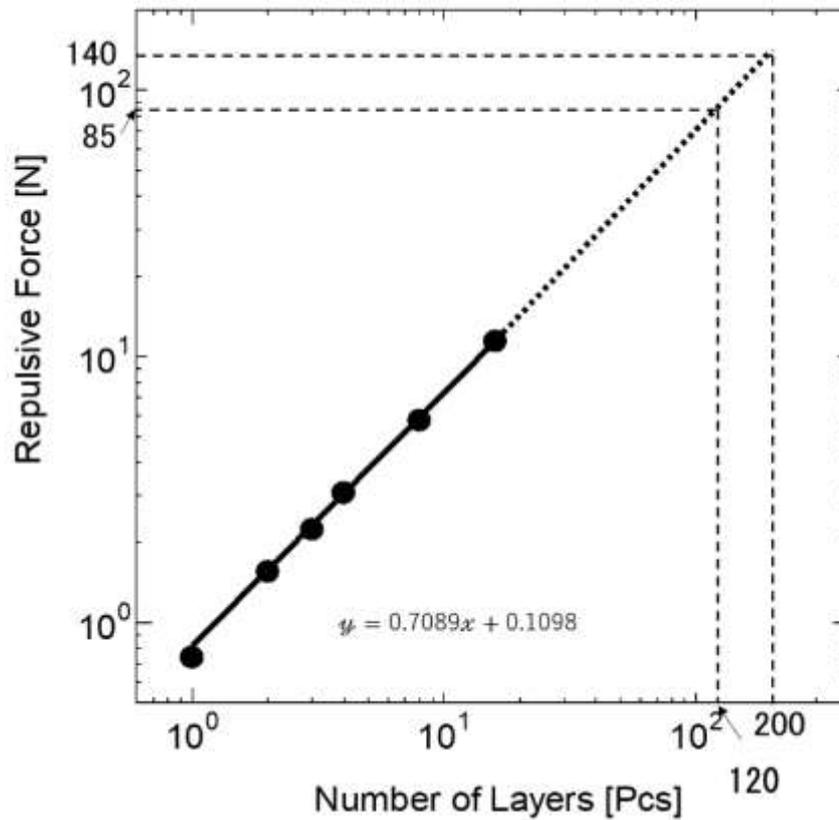


図 3.5 超伝導線材の層を増やした場合の反発力の推測結果

この結果から、超伝導体と同じ厚さ 10 mm の場合、超伝導バルクの反発力の大きさは 85 N、超伝導線材の反発力の大きさは 140 N となり、超伝導体と同じ厚さの場合、超伝導線材の方が大きな反発力を得られる。また、超伝導線材の反発力を超伝導バルクの反発力 85 N と同じにするためには、超伝導線材が 120 層（6 mm）でモデルを作成すればよいとわかる。

## 第4章 まとめ

超伝導体の特徴として、電気抵抗ゼロと完全反磁性の2つがある。完全反磁性を用いることで永久磁石を超伝導体の上に浮かす磁気浮上ができる。そこで、空中に物体を非接触で浮かせるにはこの技術を利用して、磁気浮上工具を製作すればいいと提案されている。この装置は研磨などの加工を空中で行う空中加工技術として使われる。現在使用されている磁気浮上工具には、超伝導バルクを用いたものが多いが、超伝導体の研究が進んだことによって超伝導体の線材化に成功しており、バルクとの互換性について注目されている。そこで、本研究では、磁気浮上工具による空中加工技術において、超伝導体を超伝導バルクから超伝導線材に変更したときの磁気浮上に必要な永久磁石を浮力させる力についてFEMによる電磁界解析を行い、超伝導バルクとの性能評価を行なった。

本研究では、FEMを用いて磁気浮上工具の反発力の解析をA- $\phi$ 法によって計算した。反発力解析では、永久磁石を超伝導線材に近づけた場合について解析を行なった。モデルの作成には計算の簡易化のため、磁気浮上工具に必要な最低限の超伝導線材、永久磁石、空気の3要素のみで構成し、解析を行なった。モデルの解析において超伝導線材のサイズは長さが20 mm、幅が12 mm、厚さが1  $\mu\text{m}$ の $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 超伝導線材とし、6つを1層として、磁気浮上工具の中心から炎上に等間隔で放射状に並べたモデルをType R、方位角型に6つ並べたモデルをType Aとして2つのモデルについて解析を行なった。また、永久磁石は内径10 mm、外径29.5 mm、厚さ10 mm、で磁石表面での磁場が450 mTのリング型4極ネオジム磁石を用い、超伝導線材の上部に配置した。

FEM結果より、1層では永久磁石を近づけるほど反発力が大きくなることがわかった。また、モデルType R、Type Aの間で大きな違いは見られなかった。よって、どちらのモデルも同じような性質を持っている。

また、超伝導線材の層を追加させた場合の反発力は、層が追加されるごとに大きくなる。そして、超伝導バルクと同じ厚さである10 mmまで層を積み重ねるとバルクより、大きな反発力を得ることができる。よって、反発力においては超伝導バルクよりも超伝導線材の方が優れていることがわかった。

## 参考文献

- [1] JMAG Simulation Technology for Electromechanical Design, 「JMAG とは」 ,  
<<https://www.jmag-international.com/jp/products/index.html>>
- [2] Makoto TSUDA, Atsushi ISHIYAMA, TEION KOGAKU (J.Cryo.Soc.jpn.) Vol.46 No.3 (2011)
- [3] J. Bardeen, L. N. Cooper and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. 108 (1957) 1175–1204
- [4] 希土類系高温超電導線材のご紹介株式会社フジクラ  
<<https://www.fujikura.co.jp/products/newbusiness/superconductors/01/superconductor.pdf>>
- [5] Masayoshi Inoue \*, Kenta Tanaka , Kazutaka Imamura , Physics Procedia 67 ( 2015 ) 903 – 907
- [6] W. Zhai et al, Cryst. Growth Des., (2015) 15 907–914

## 謝辞

九州工業大学大学院情報工学研究院物理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。超伝導体の基礎や研究の方向性など、丁寧にご指導していただきありがとうございます。また、研究に限らず、私生活にも配慮をしていただいて、無理なく大学生活を送ることができました。研究室に入る以前よりも、エレガントな人間になれたと思います。

岩崎慎也さんにもお礼を申し上げます。研究の際に丁寧に教えてくださり、相談にも乗ってくださって、ありがとうございます。

最後に、公私ともにお世話になった小田部研究室の皆様、ここまで支えてくれた方々に深く感謝致します。