

希土類系酸化物超伝導コート線材の  
縦磁界下での臨界電流に与える  
自己磁界の影響に関する研究

木内研究室  
友尻 一貴

平成 25 年 2 月 14 日  
電子情報工学科

# 目次

<b>第1章 序章</b>	1
1.1 はじめに	1
1.2 磁束ピンニング	2
1.3 縦磁界効果	2
1.4 銅酸化物超伝導体	4
1.5 RE系超伝導体	4
1.5.1 IBAD法による二軸配向	5
1.5.2 PLD法による超伝導層の作製	5
1.6 本研究の目的	5
<b>第2章 実験</b>	7
2.1 試料	7
2.1.1 試料の詳細	7
2.2 測定および評価方法	8
2.2.1 直流四端子法	8
2.2.2 実験方法	9

<b>第3章 実験結果</b>	11
3.1 電流量の調査	11
3.2 $J_c - B$ 特性	12
<b>第4章 考察</b>	14
<b>第5章 まとめ</b>	18
<b>第6章 今後の課題</b>	19
<b>第7章 謝辞</b>	20
<b>参考文献</b>	21

# 表目次

2.1 試料諸元 . . . . .	8
--------------------	---

# 目次

1.1	超伝導体に対し磁界と電流を平行に流した状態 . . . . .	3
1.2	円柱状の自己磁場 . . . . .	3
1.3	テープ状の自己磁場 . . . . .	3
2.1	Superpower- SCS4050 コート線材の構造(SuperPower inc) . . . . .	7
2.2	GdBCO コート線材の構造(株式会社フジクラ) . . . . .	8
2.3	四端子法 . . . . .	9
2.4	配置 1 . . . . .	10
2.5	配置 2 . . . . .	10
2.6	配置 3 . . . . .	10
3.1	配置 1 における電流量を変化した場合の臨界電流密度 . . . . .	11
3.2	配置 1 における $J_c - B$ 特性 . . . . .	12
3.3	配置 2 における $J_c - B$ 特性 . . . . .	13
3.4	配置 3 における $J_c - B$ 特性 . . . . .	13
4.1	配置 1 と配置 2 における増加率 . . . . .	14
4.2	配置 2 における増加率 . . . . .	15
4.3	配置 3 における増加率 . . . . .	16
4.4	配置 1、2、3 における増加率(0~0.1T) . . . . .	17

# 第 1 章

## 序章

### 1.1 はじめに

1908年にオランダの Leiden 大学の Kamerlingh-Onnes が世界で初めてヘリウムの液化に成功し、1911年にそれを用いて極低温における水銀の電気抵抗を調べる過程で、4.2 K を境に電気抵抗が測定不能なほどゼロに近くなることを発見した。このような現象を超伝導現象と呼び、ある温度以下で超伝導現象を示す物質を超伝導物質と呼ぶ。1933年には Fritz Walther Meissner によって超伝導体が完全反磁性(Meissner 効果)を示すことが分かった。

超伝導体は磁気的な振る舞いの違いから、第一種超伝導体と第二種超伝導体に分類される。第一種超伝導体では、臨界温度  $T_c$  以下の温度で超伝導状態となり、Meissner 効果を示すが、外部の磁界がある値を超えると超伝導状態、Meissner 効果は消失する。このときの磁界を臨界磁界  $B_c$  という。第二種超伝導体では、下部臨界磁界  $B_{c1}$  までは Meissner 効果を示すが、 $B_{c1}$  を超えると Meissner 効果は破れ、量子化磁束が超伝導体内に侵入する。このような量子化された磁束線が侵入している状態を混合状態と呼び、最終的には上部臨界磁界  $B_{c2}$  で常伝導状態に転移する。

その後、様々な超伝導物質が発見され、超伝導現象発現のメカニズムに関する研究が行われてきたが、長い間その発現機構は不透明なままだった。そして、1957年に Bardeen、Cooper、Schrieffer の BCS 理論により超伝導発現機構が説明されたが、この理論では 30 K を超える超伝導体は予想できなかった。しかし、Johannes G. Bednorz、Karl Alex Müller らにより、遷移金属酸化物系物質 ( $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ ) が発見され 30 K を越える温度での超伝導が発現する可能性が示された。その後研究は盛んに行われ、液体窒素の沸点(77 K)を大きく超えた臨界温度を持つ Y-Ba-Cu-O 系や Bi-Sr-Ca-Cu-O 系などの酸化物超伝導体が発見された。このような高い臨界温度を持つ超伝導体は高温超伝導体と呼ばれ、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。これらの超伝導体は液体ヘリウムに比べて安価な液体窒素や冷凍機などで超伝導状態となるため、様々な機器への応用の可能性や冷却コストの低減などの点から大きな注目を浴びた。し

かし、酸化物超伝導体は金属超伝導体と異なり、酸化物特有の異方的な結晶構造を持ち、複雑な電流路となることも明らかにされた。

## 1.2 磁束ピンニング

磁束ピンニングによって超伝導体は電気抵抗(損失)なしに電流を流すことができる。第二種超伝導体の  $B_{c2}$  は第一種超伝導体の  $B_c$  と比べてその値が高いことから、工業的な応用には主に第二種超伝導体が使用される。第二種超伝導体は混合状態のとき、内部への磁束の侵入のために流れる電流によって磁束線が Lorentz 力  $\vec{F}_L$  を受ける。この  $\vec{F}_L$  は、超伝導内に流れる電流密度を  $\vec{j}$ 、磁束線の磁束密度を  $\vec{B}$  とすると、 $\vec{F}_L = \vec{j} \times \vec{B}$  と表せる。ここで、 $\vec{F}_L$  を受けた磁束線が速度  $\vec{v}$  で動くとき、電磁誘導により電界  $\vec{E} = \vec{B} \times \vec{v}$  が発生する。これは超伝導状態を消失させる原因となるが、実際には  $\vec{F}_L$  を打ち消し、磁束線の運動を止める力が働いており、電界の発生を抑制することで超伝導状態は維持されている。この力をピンニング力と呼び、単位体積あたりのピンニング力をピン力密度  $F_p$  という。このピンニング力を生み出す常伝導析出物や結晶界面、結晶欠陥をピンニングセンターまたはピンと呼ぶ。ここで、 $JB = |\vec{j} \times \vec{B}|$  とすると、 $JB \leq F_p$  の範囲においては電界が発生しないため、混合状態下においても電気抵抗なしで電流を流すことが可能となる。この電気抵抗なしで流せる電流密度の最大値を臨界電流密度  $J_c$  といい、

$$J_c = F_p/B \quad (1.1)$$

と表すことができる。このことから  $J_c$  を増加させるためには  $F_p$  を増加せればよいことが分かる。 $F_p$  は超伝導体によって決定されるものではないので、 $J_c$  は超伝導体の加工方法などにより異なる。超伝導の応用に向けては、超伝導体によって決まる物理量である  $T_c$  や  $B_{c2}$  と同様に、後天的に決まる  $J_c$  の特性が重要となる。

## 1.3 縦磁界効果

一般的に超伝導体に流れる電流は自己磁界を含めて、垂直磁界となるが、図 1.1 に示すように磁界と電流が平行な場合、垂直な場合とは異なる様々な現象が観測される。以下にその例を示す。

- ・電流によって磁界と等方向の磁化が正となる。これを常磁性効果と呼ぶ。
- ・外部磁界を増加させると交流電流による損失が減少する。
- ・縦磁界の場合は磁束線に対して Lorentz 力が働かないため臨界電流密度が横磁界の場合に比べ大幅に増加する。

・磁束線の運動と電磁現象を結びつける( $\vec{E} = \vec{B} \times \vec{v}$ )の式は、磁束線の運動が異なると考えられるため成り立たない。

これらを総称して縦磁界効果と呼ぶ[1]。

一方で、この縦磁界効果による臨界電流密度の増加量は、使用する超伝導体の形状によっても大きく変化する。例えば、円柱状とテープ状とでは円柱状の方が $J_c$ は大きく増加するが、このような違いは通電電流により発生する自己磁界の影響を受けるためである。図 1.2 に示すように円柱状では超伝導体内部に自己磁場が侵入しないのに対して、図 1.3 に示すようにテープ状では超伝導体内部に試料面に対する自己磁場の垂直磁界成分が侵入する。その結果、電流が強まると自己磁場も強まり、電流に平行な磁界と干渉を起こし磁界と電流が平行に流れる関係が崩れてしまうことで完全な force-free 状態とはならず、縦磁界効果が観測されなくなる。そのため円柱状の超伝導体はテープ状の超伝導体と比べて縦磁界効果による $J_c$ 増加がより観測される。このことからテープ状であっても、垂直磁界成分を打ち消し自己磁界の影響を排除すれば、より縦磁界効果によって $J_c$ を増加させることができる。

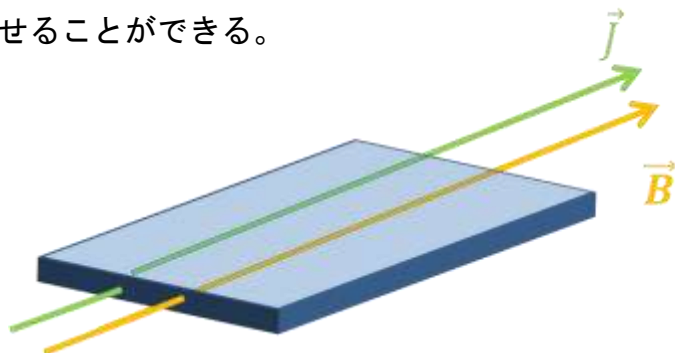


図 1.1 : 超伝導体に対し磁界と電流を平行に流した状態

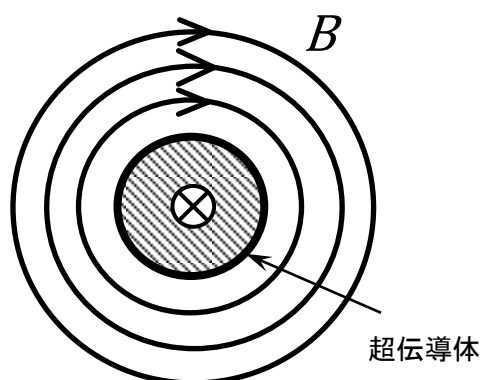


図 1.2 : 円柱状の自己磁場

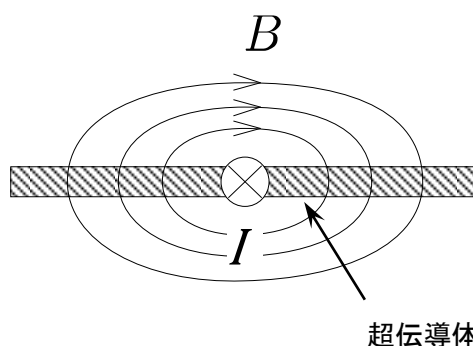


図 1.3:テープ状の自己磁場



## 1.4 銅酸化物超伝導体

1.3 節の現象は金属超伝導体でよく知られた現象である。現在、工学利用されている超伝導体には、NbTi や Nb<sub>3</sub>Sn などの金属系超伝導体がある。しかし、これらは  $T_c$  が 10-20 K であるため、冷却にはコストの高い液体ヘリウムを用いなければならない。そこで、 $T_c$  が高く、比較的安価な液体窒素での冷却が可能な銅酸化物超伝導体が近年、金属系超伝導体の代替素材として注目されており、送電ケーブルや高磁界発生超伝導マグネットなどへの応用が期待されている。その中でも RE-Ba-Cu-O 超伝導体(REBCO, RE:希土類)と Bi 系超伝導体が注目を集めている。しかしながら、これらの超伝導体は超伝導層 (CuO<sub>2</sub>) と絶縁的なブロック層が交互に積層した構造を持っている。このような構造のため積層方向 ( $c$  軸) と面方向 ( $ab$  面) で通電特性が大きく異なっており、 $ab$  面では電流が流れやすいが、 $c$  軸では流れにくくなっている。したがって、電流輸送への利用のためには結晶配向を揃える必要があり、それらは面内配向まで含めた二軸配向である必要がある。そのため現在では高配向が得られるコート線材として利用されている。

RE 系超伝導体は Bi 系超伝導体とは違い、機械的な加工では結晶配向しない。そのため以前は作製コストが高く、長尺化が比較的困難であったが、近年では作製技術が向上し長尺化、低コスト化が進んでいる。また高磁界下で臨界電流密度特性が優れているため今後の進展が期待されている。

## 1.5 RE 系超伝導体

RE 系超伝導体の中でも研究が進められているのは Y-Ba-Cu-O 超伝導(YBCO) である。YBCO は  $T_c$  が約 90 K と高く、液体窒素を冷媒として使用できる。同じ銅酸化物超伝導体である Bi 系超伝導体と比較すると高磁界下で高い  $J_c$  を持つため、高温・高磁界下での応用が期待されている。YBCO の Y の一部、または全てを同じ希土類元素で置き換えたものも同様に超伝導特性を示すことが知られている。これらの RE 系超伝導体は比較的イオン半径の大きな Gd、Sm、Dy などに置換するとより高い  $T_c$  が得られることが知られており、特に Gd-Ba-Cu-O 超伝導体(GdBCO)は YBCO と比較すると高磁界下での  $J_c$  が向上することがわかっている。また、RE 系超伝導体の  $J_c$  向上のためには結晶配向が必須であるが、現在では RE 系超伝導線材の作製の際は配向基板上に超伝導膜をエピタキシャル成長させる手法が用いられている。一般には Hastelloy などの機械的、科学的に強度が高い Ni 合金の基板上に配向させた中間層を積層し、その上に超伝導層を成膜して保護膜を乗せる。このような層状の構造を持つことからコート線材

と呼ばれている。中間層・超伝導層の形成法には IBAD 法、PLD 法といった手法がある。YBCO を用いた超伝導体のコート線材も超伝導層の結晶を  $ab$  面内で揃えなければならず、機械的な手法では難しい。現在では超伝導体の作製方法の研究も進み、面内の配向が揃ったコート線材の作製が可能となってきた。しかし作製のためには膨大なコストがかかるという問題点も残っている。銅酸化物超伝導体の特徴でもある大きな異方性を改善することが現在の課題の 1 つとなっている。

### 1.5.1 IBAD 法による二軸配向

IBAD 法は通常のイオンビームによるスパッタ蒸着法に改良を加え、アシストビームと呼ばれる第二のイオンビームを基材に照射しながら薄膜を成長させる方法である。成長途中の薄膜に対して特定方位からイオンビームを照射することにより、薄膜を構成する結晶粒の結晶軸が揃った二軸配向の中間層をテープ基材上に成長させることができる。[2]この技術は株式会社フジクラで開発されたものである。IBAD 基板を用いて作製された RE 系コート線材は高い輸送電流特性と長尺成膜を同時に実現でき、再現性も優れていることから近年研究が進められている。この方法により作製される配向中間層は結晶が傾くことなく非常に高い配向組織が得られる。またイオンスパッタ装置を用いてターゲットをスパッタすることで結晶粒が非常に細くなるため、高性能線材の作製に向いている。その一方で高コストであることや、高配向を得るためには長時間の成膜が必要であり、コストと製造速度の 2 つの面に問題を抱えている。近年では配向性が悪くなるとされていた高速での IBAD 中間層であってもその上に PLD 法で高速に  $\text{CeO}_2$  を成膜することで高配向の中間層が作製できる手法が発見されている。

### 1.5.2 PLD 法による超伝導層の作製

PLD(Pulsed Laser Deposition)法は真空チャンバー内のターゲットに対し集光されたレーザー光を断続的に照射し、固体原料を気化させて基材上に薄膜として堆積する方法である。超伝導層を作製する場合は超伝導体の塊をターゲットとし配向基板を用いることでその上に二軸配向した超伝導層を成膜できる。

## 1.6 本研究の目的

1.5 節で述べたとおり、現在ではコート線材の作製方法の研究も進み、配向の高さと同時に長尺化が実現されたコート線材が作製可能になってきている。よって現在作製されている試料は面内の配向が十分に高く、面内での電流方向は

均一化されていると考えられる。このことから RE 系コート線材でも従来の金属系超伝導体で知られるような縦磁界効果が観測できると考えられる。

現在、上記の縦磁界効果を用いた電流ケーブル等への利用が検討されているが、RE 系コート線材を用いた縦磁化効果の報告は少なく、さらにその評価方法すら確立していない。

特に、コート線材の場合はテープ形状の為、線材端部の自己磁界の影響があるために、縦磁界効果による $J_c$ 向上を正しく評価できていないのが現状である。したがって、縦磁界効果を超伝導機器応用へ利用するためには、その特性を正しく評価する必要がある。

以上の背景から、REBCO コート線材の自己磁界を試料周りの線材の配置によって打ち消し、その配置が縦磁界下の臨界電流にどのような影響を与えるかを調査することを目的とする。

## 第2章 実験

### 2.1 試料

本研究で用いた試料は SuperPower inc に提供していただいた Superpower-SCS4050 および株式会社フジクラから購入した PLD 法 GdBCO コート線材である。試料諸元や詳細を以下に記す。

#### 2.1.1 試料の詳細

SuperPower inc に提供していただいた試料は、 $20\mu\text{m}$ の銅安定化層の上に $\sim 1.8\mu\text{m}$ の銀保護膜を重ね、その上に $50\mu\text{m}$ の基盤を置き $\sim 0.2\mu\text{m}$ の5つの素材を中間層として形成し、その上に $1\mu\text{m}$ の(RE)BCOの超伝導層を作り、保護膜として $2\mu\text{m}$ のAgを製膜し、最後に $20\mu\text{m}$ の銅安定化層で覆うことで $< 0.1\text{mm}$ のコート線材を作製している。この構造の概略図は図 2.1 に示す。株式会社フジクラから購入した試料は、基材である Hastelloy テープ上に順に  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 、IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) 法による  $\text{MgO}$  を中間層として形成し、その上に PLD 法により  $\text{CeO}_2$  をキャップ層として成膜したものを基板として用いている。この基板の上に PLD 法により  $\text{GdBaCuO}$  を超伝導層として成膜し、最後に保護膜として Ag を製膜している。この構造の概略図は図 2.2 に示す。それぞれの試料の緒元を表 2.1 に示す。

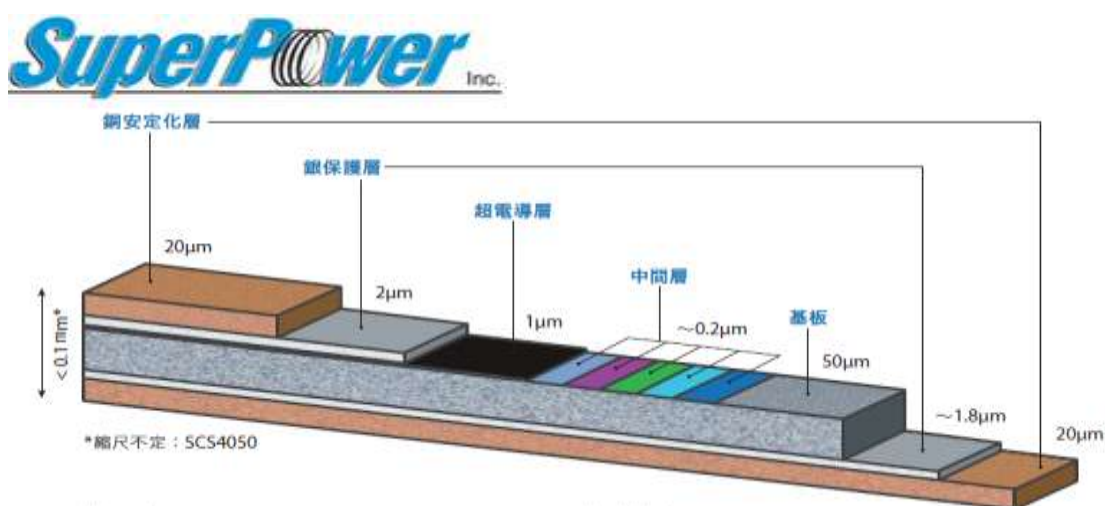


図 2.1: Superpower- SCS4050 コート線材の構造(SuperPower inc)

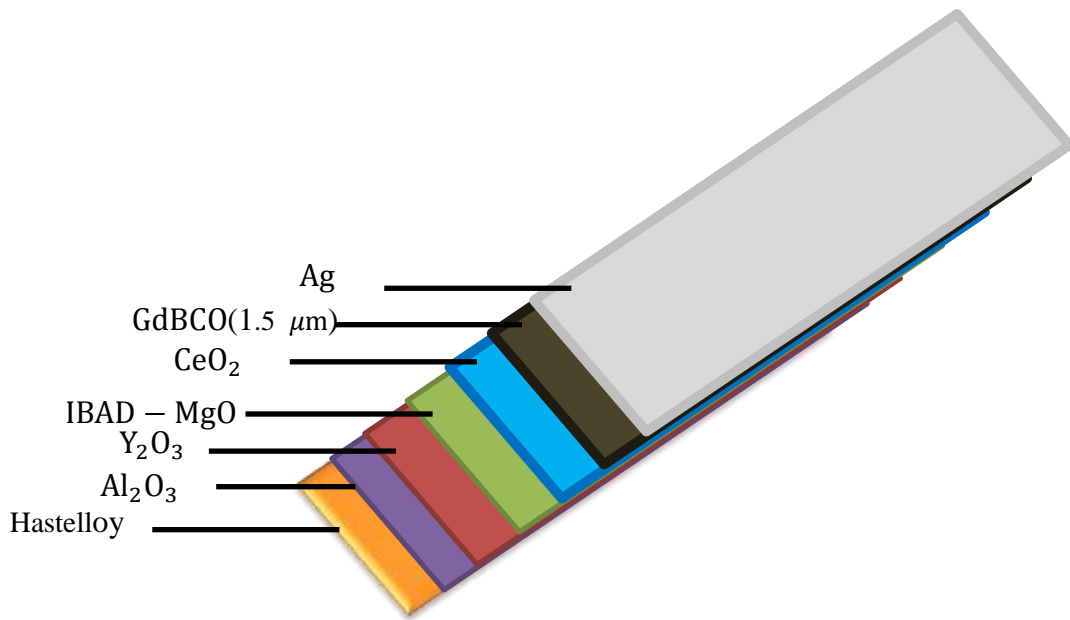


図 2.2:GdBCO コート線材の構造(株式会社フジクラ)

表 2.1 : 試料諸元

試料	Thickness $d(\mu\text{m})$	$J_c(\text{A/m})$	$T_c(\text{K})$
Superpower-SCS4050	1.00	$2.50 \times 10^{10}$	88.4
フジクラ-GdBCO	1.50	$3.97 \times 10^{10}$	91.3

## 2.2 測定および評価方法

本研究では縦磁界下での臨界電流特性を評価するために、直流四端子法(four terminal method)を用いて  $V-I$  特性を測定し、そこから得られた臨界電流密度  $J_c$  を評価した。 $J_c$  は  $E_c = 1.0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$  の電界基準を用いた。測定は液体窒素(77.3K)中で行った。磁界は通電方向、すなわち線材の長手方向に平行に加えた。

直流四端子法による測定方法については以下に示す。

### 2.2.1 直流四端子法

直流四端子法は超伝導試料の  $V-I$  特性を測定する手法の一つである。図 2.3 に四端子法の回路の簡略図を示す。測定する試料の抵抗を  $R_m$  とし、接触抵抗による抵抗を  $R_0$  とする。この時全電流は  $I = I_1 + I_2$  となる。この回路において  $R_0 \gg R_m$  となる場合、実質的に  $I_2 = 0$  となり測定する電圧は  $V = I_1 R_0$  となる。よって  $R_m$  の抵抗が  $R_0$  と比べてとても小さい場合には、直流四端子法を用いることでの

$R_m$  両端の電圧を正確に計測できる。今回の実験における試料は超伝導体であり、 $R_m = 0$  であるため直流四端子法による正確な計測が可能である。また回路における試料と電圧端子の接続は半田による蒸着で行った。

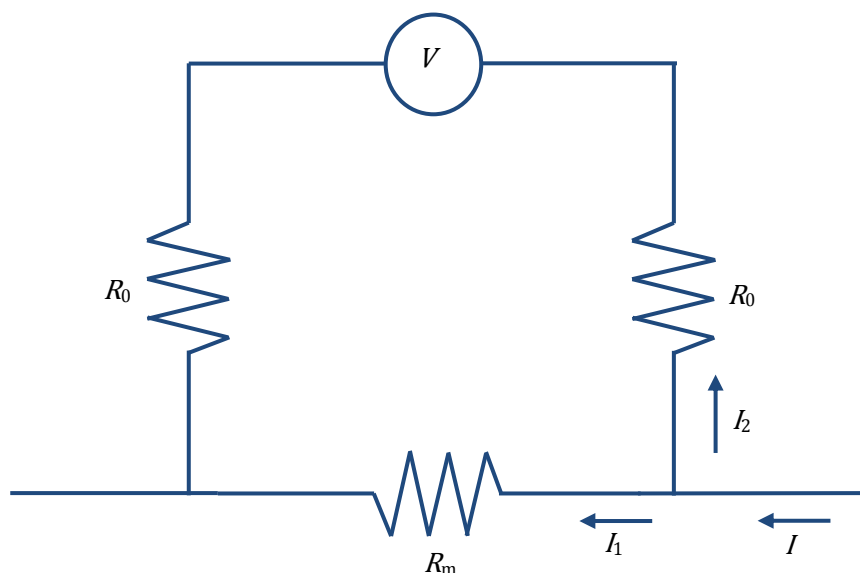


図 2.3: 四端子法

## 2.2.2 実験方法

本実験では、コート線材に電流を通電することにより発生する自己磁界を打ち消すために、以下に示すように、同様なコート線材を周りに配置した。実験の概略図を図 2.4、図 2.5、図 2.6 に示す。

図 2.4 は測定試料に対して幅が広いコート線材を上部に配置し、測定試料の広い面に対して平行な成分の自己磁界を打ち消すように配置した。この図の試料 1 が測定する GdBCO コート線材であり、試料 1 の平行な自己磁界を上部にある T1 の自己磁界による干渉により打ち消すために Superpower SCS4050 コート線材の T1 を配置した。T1 の幅は試料 1 の 6 倍程度である。

また、図 2.5 は線材端部の広い面に対して垂直成分を打ち消すために、測定試料の両脇に同様な線材を配置した。この図の試料 2 が測定する superpower SCS4050 コート線材であり、試料 2 の端部の垂直な自己磁界を打ち消すために同一平面上の左右に同じコート線材の T2、T3 を配置した。T2、T3 の幅は試料 2 と同程度である。

さらに、図 2.6 では、平行及び垂直成分を打ち消すために測定試料の周囲に同様な線材を配置した。この図の試料 3 が測定するフジクラ-GdBCO コート線材であり、配置 1 と配置 2 を組み合わせるような形で試料 3 の端部の自己磁界を打ち消すために同じコート線材の T4、T5、T6、T7、T8、T9 を配置した。T4、

T5、T6、T7、T8、T9の幅は試料3と同程度である。この配置3で全ての線材に通電させると、それぞれの自己磁界が相互に干渉してしまうため、上下のT4、T5、T8、T9には直接電流は通電せずに、遮蔽電流のみにした。

なお、各々の線材の間隔は、絶縁のためにコート線材に貼り付けたカプトンテープの厚さ0.1mm程度である。

配置1と配置2は0T~0.09T、配置3は0T~0.9Tの範囲で磁界の通電方向の磁界を変化させながら測定を行った。

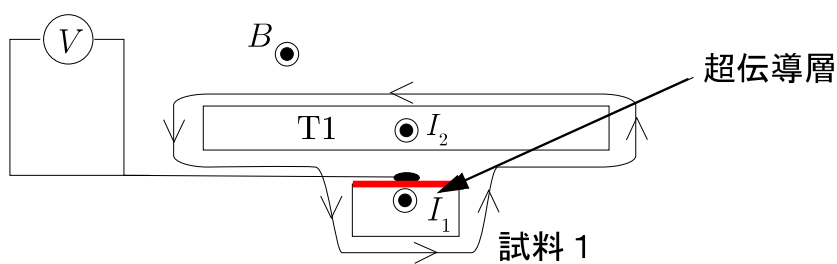


図 2.4: 配置 1

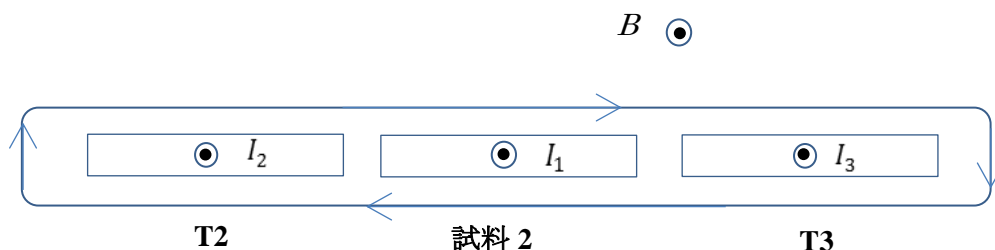


図 2.5: 配置 2

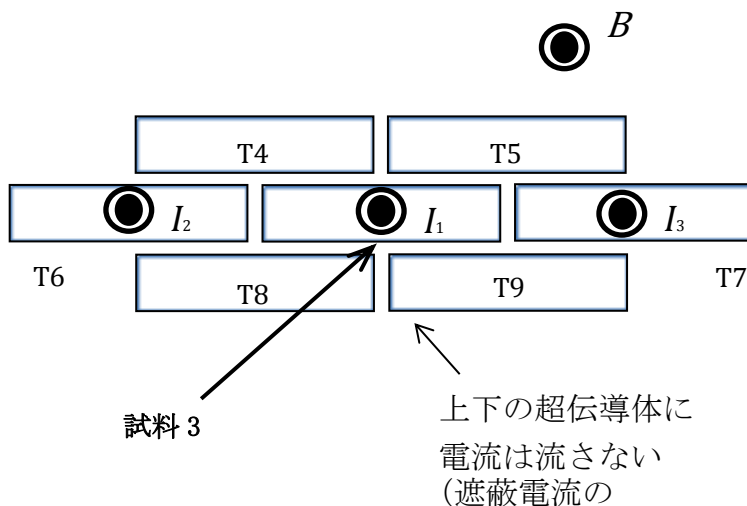


図 2.6: 配置 3

## 第3章 実験結果

### 3.1 電流量の調査

図2.3の配置1の場合、試料1とT1は異なる線材を用いたため電流密度が異なる。そのため自己磁界の打消しによって最も臨界電流密度が高くなる電流量を知る必要がある。このことから、適切な電流量を知るために外部磁界をゼロにし、T1の電流量を変化させT1による自己磁界の打消しが最大となる、すなわち最大の臨界電流密度が得られるT1値を評価した。その結果を図3.1に示す。ここで、 $I_1$ が試料1に流れる電流、 $I_2$ がT1に流れる電流である。この図より、測定試料の $I_1$ の3.5倍の電流をT1に流すと、 $J_c$ が最大となることが分かった。したがって、配置1においては、電流比は $I_1 : I_2 = 1 : 3.5$ で通電する。

また、配置2、及び3に関しては同様な形状のコート線材を用いたので、測定試料と同じ電流量で測定を行った。

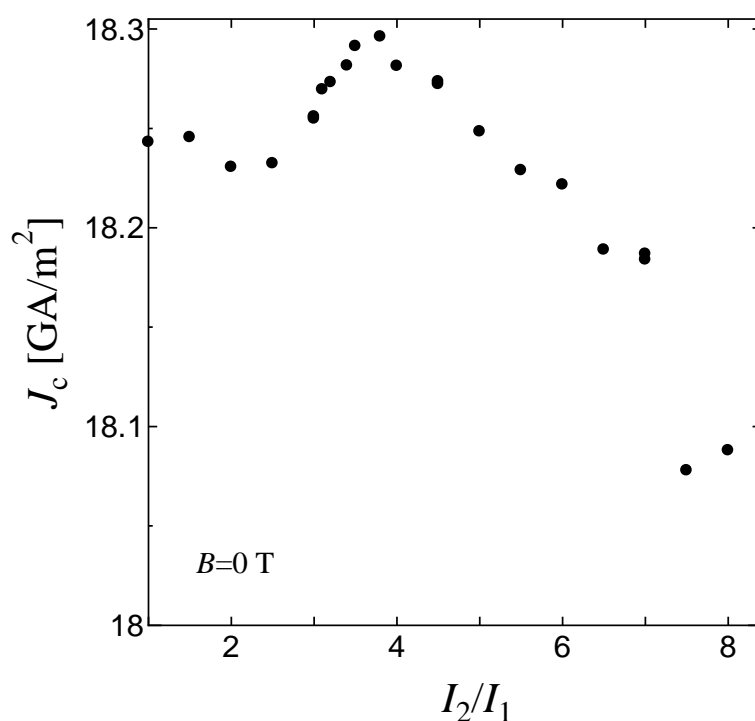


図 3.1 : 配置 1 における電流量を変化した場合の臨界電流密度



## 3.2 $J_c - B$ 特性

3.1の調査から配置1について試料1の3.5倍の電流をT1に流して、通電電流と同方向に磁界を0~0.09Tまで加えた場合の $J_c - B$ 特性を図3.2に示す。配置なしで測定した $J_c - B$ 特性も示すが、コート線材の広い面に対して平行成分を打ち消すことにより、 $J_c$ は増加しており、0.03Tのときに最大の $J_c$ 値が得られた。これ以降は、配置2について、配置3についてそれぞれの特徴を記述する。

配置2について線材は同様で幅も同じであるため、T2とT3に試料2と同じ電流量を流し、通電電流と同方向に磁界を0~0.09Tまで加えた場合の $J_c - B$ 特性を図3.3に示す。配置なしで測定した $J_c - B$ 特性も示すが、コート線材の垂直成分を打ち消すことにより、 $J_c$ は増加しており、0Tのときに最大の $J_c$ 値が得られた。

配置3について線材は同様で幅も同じであるため、T6とT7に試料3と同じ電流量を流し、T4、T5、T8、T9には直接電流は通電せずに、遮蔽電流のみにし、通電電流と同方向に磁界を0~0.9Tまで加えた場合の $J_c - B$ 特性を図3.4に示す。配置なしで測定した $J_c - B$ 特性も示すが、コート線材の平行及び垂直成分を打ち消すことにより、 $J_c$ は増加しており、測定範囲0.01Tにおいて最大の $J_c$ 値が得られた。

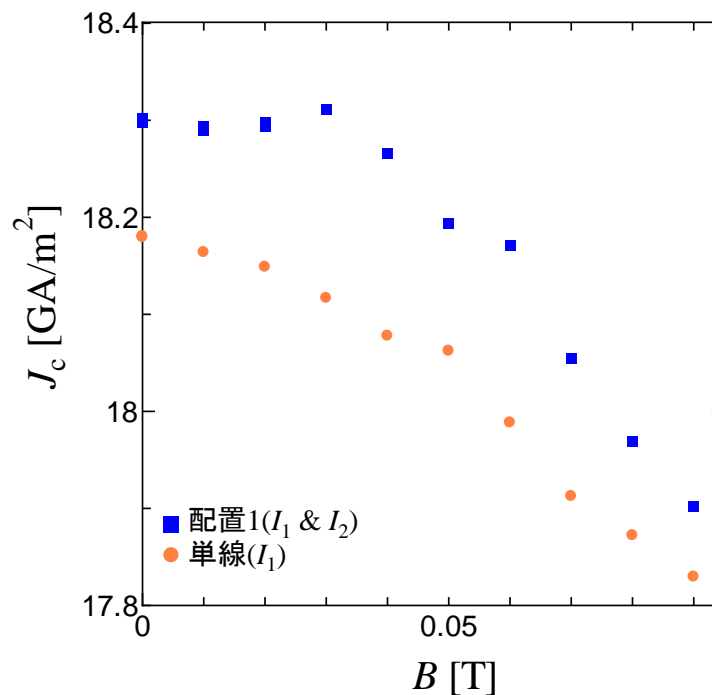


図 3.2 : 配置 1 における $J_c - B$ 特性

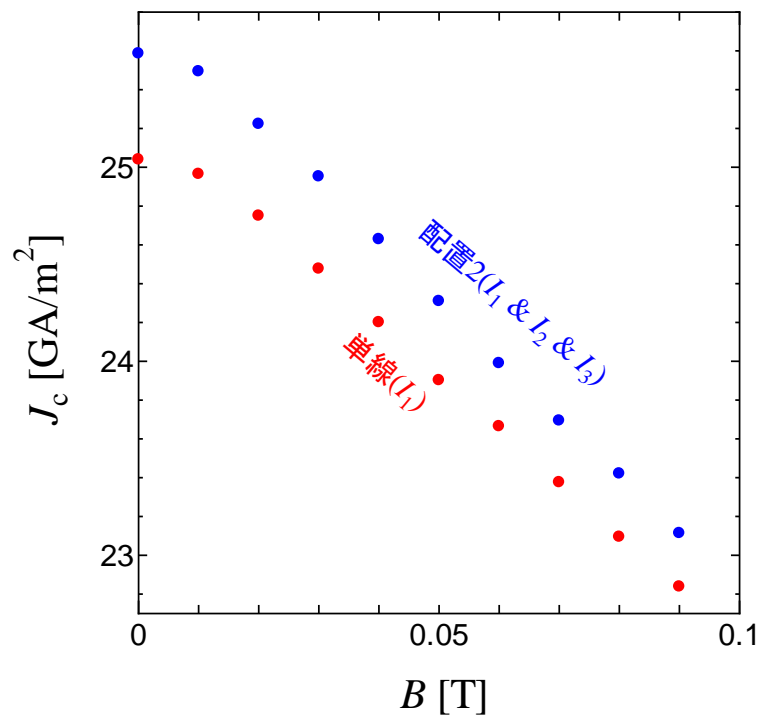


図 3.3 : 配置 2 における  $J_c - B$  特性

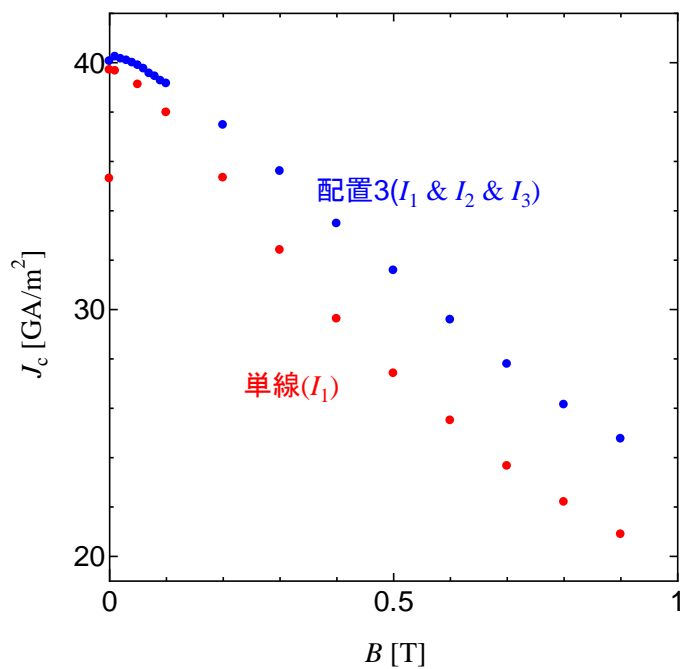


図 3.4 : 配置 3 における  $J_c - B$  特性

## 第4章 考察

### 増加率

コート線材の平行成分の自己磁界の影響を打ち消すように配置した図 3.2 の結果から、配置 1 によって単身  $J_c$  からどの程度臨界電流が増加したか調べるために、その増加率の磁界依存性を調べた。増加率の定義は単身  $J_c$  の値を 0% とし、配置によって  $J_c$  が何パーセント増加したのかを示すこととする。よって 0% 以上のパーセントでは増加したことを表す。その  $J_c$  の増加率の磁界依存性をグラフにまとめたものが図 4.1 である。この図から増加率が最大になったのは 0.03T の時であり、0.04T と 0.06T でも単身  $J_c$  から約 1% 増加する増加率を示している。しかし、高い増加率を示す 0.04T と 0.06T の間の 0.05T では 0.73% と増加率が急に下がっている。図 3.2 の 0.05T の配置なしの  $J_c$  を見てみると、この時の外部磁界の印加による  $J_c$  の低下の傾きは緩やかになっている。これは縦磁界効果による  $J_c$  効果の影響であると考えられる。このことから 0.05T で増加率が下がった理由として 0T 時に臨界電流密度が最大になる 3.5 倍の電流量の  $I_2$  が適切ではなく自己磁界の打消しが上手く行えなかったのではないかと考えられる。これは他の外部磁界のときにもいえることで、外部磁界の増大と共に  $I_1 : I_2$  の電流の最適な比率は変動していると考えられる。さらに、その増加率も磁界の増加と共に減少していることが分かる。

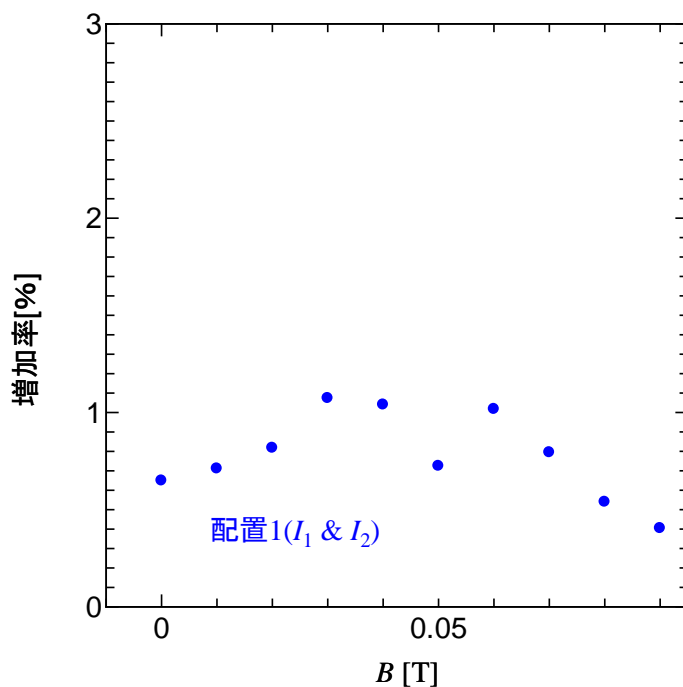


図 4.1 : 配置 1 における増加率

コート線材の平行成分及び垂直成分の自己磁界の影響を共に打ち消すように配置した図 3.3 の結果から配置 2 によって単身 $J_c$ からどの程度臨界電流が増加したか調べ、 $I_c$ の増加率の磁界依存性をグラフにまとめたものが図 4.2 である。この図から増加率が最大になったのは 0T の 2.18%でその後多少の増減があるが全体として増加率も磁界の増加と共に減少していることが分かる。

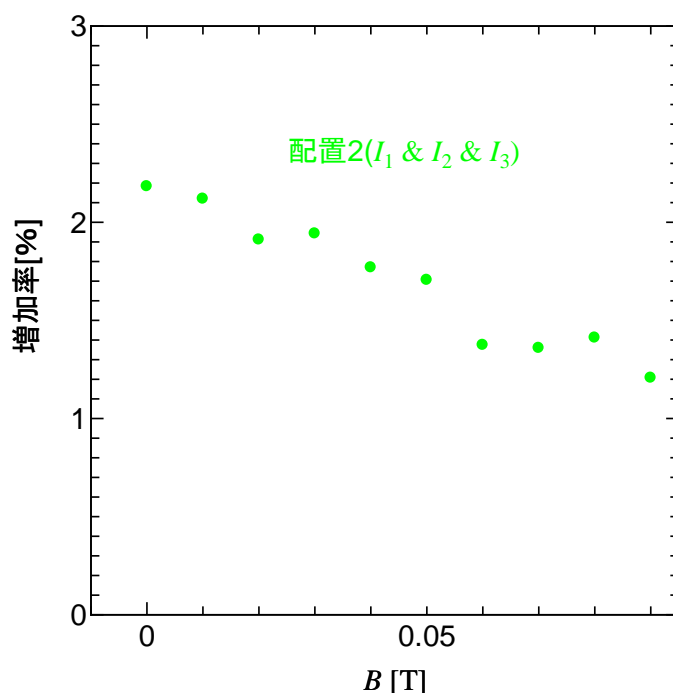


図 4.2 : 配置 2 における増加率

コート線材の平行成分及び垂直成分の自己磁界の影響を共に打ち消すように配置した図 3.4 の結果から配置 3 によって単身 $J_c$ からどの程度臨界電流が増加したか調べ、 $I_c$ の増加率の磁界依存性をグラフにまとめたものが図 4.2 である。この図から外部磁界が増えるにつれて臨界電流密度が上がる割合が大きくなっていき、今回の測定範囲 0.9T において最大の増加率 19%が得られた。

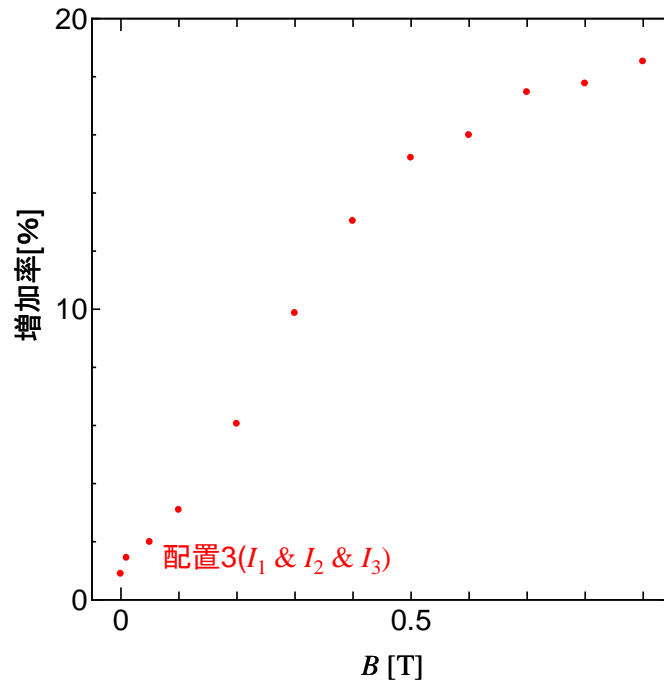


図 4.3 : 配置 3 における増加率

今回測定に用いた試料は配置ごとに大きさや線材が異なり単純に比較することは難しいが、低磁界においては各々の増加率は単身 $J_c$ から約 3%以内と小さく線材の違いによる配置をしたときの臨界電流密度の変化の動きは大きく変わらないと考える。このことから図 4.1、4.2、4.3 の増加率を  $B=0\sim 0.1\text{T}$  の範囲でまとめたものを図 4.4 に示す。この図から平面上に線材を 3 枚並べたものは 2 枚を積層したものに比べ増加率が高いことが分かる。このことから平行自己磁界成分に比べて、垂直成分の打消しの方が  $I_c$  の増加率は大きく、コート線材端部による自己磁界の方が、縦磁界下での  $J_c$  効果に大きく影響を与えることがわかる。試料の平行成分を打ち消して自己磁界を弱めるより垂直成分同士を打ち消すようにして試料の自己磁界の垂直成分をより小さくできる配置が良いと考えられる。また、増加率も磁界の増加と共に減少し、いずれは自己磁界の影響を打ち消しきれなくなることが予想される。一方で、平行及び垂直の両方の自己磁界の影響を打消した場合増加率は磁界の増加と共に増加した。このことから同時に両自己磁界の影響を削除する方が、force-free の状態に近づくことができると考えられる。

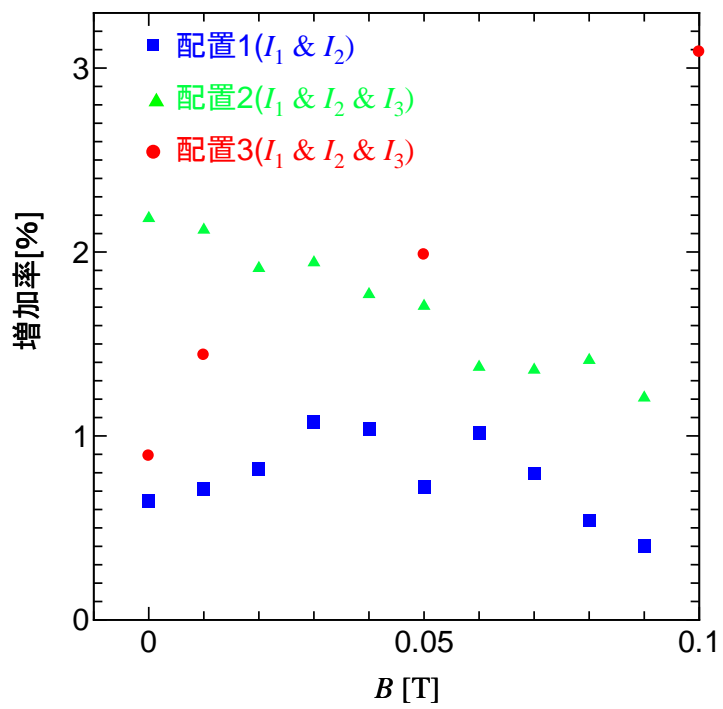


図 4.4 : 配置 1、2、3 における増加率 (0~0.1T)

## 第5章 まとめ

本研究では REBCO コート線材の自己磁界を試料周りの線材の配置によって打ち消し、配置が縦磁界下の臨界電流にどのような影響を与えるかを調査した。

自己磁界の平行成分を打ち消すために配置した場合と、垂直成分を打ち消すように配置した場合の縦磁界効果による臨界電流密度 $J_c$ の増加率は、平行自己磁界成分に比べて、垂直成分の打消の方が増加率は大きく、コート線材端部による自己磁界の方が、縦磁界下での $J_c$ 効果に大きく影響を与えることがわかる。試料の周りを囲むように線材を配置した場合、自己磁界の平行成分及び垂直成分両方を打ち消すことができ force-free の状態に近づける有効な手段であり、逆にただ単に電流通電方向に平行に磁界を加えるだけでは理想的な縦磁界にならないことが明らかとなった。このことから自己磁界の影響を削除することにより、より force-free の状態に近づけることができると考えられる。但し、線材内の特性によりこの縦磁界効果は大きく変化することから、その線材に適した配置を明らかにする必要がある。

## 第6章 今後の課題

今回の実験では各々異なる線材を用いて実験を行ったことで単純な比較はできなかった。同様な線材を用いて配置を変えながら実験を行えばそれぞれの配置による影響を明確にすることができ、より配置の影響についての考察ができると思われる。また、配置による臨界電流密度の変化が測定する線材の種類によってどのように変化するあるいは変化に共通点があるのかどうか調べる必要がある。本実験で用いた配置で完全に試料への自己磁場の垂直磁界を取り除けたわけではないことから、異なる線材どうしの配置の組み合わせ、今回とは別の配置による臨界電流密度の変化を調べるなど更なる実験を行い自己磁場の影響をなくしていく必要である。



# 第7章

## 謝辞

本研究を行うにあたり多大の助言を頂いた松下照男名誉教授に深く感謝いたします。また、実験や論文の作成にあたって多くのご指導、助言を頂いた小田部荘司教授、木内勝准教授に深く感謝いたします。最後に実験を含め様々な面で協力・助力をして頂いた田邊賢次郎さん、小松伸二郎さんをはじめとした小田部・木内研究室の皆様に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 松下照男 著：磁束ピンニングと電磁現象（産業図書）
- [2] フジクラ技報 No.107(2004)68-72