

酸化物超伝導体を用いた
単層縦磁界直流模擬ケーブルの臨界電流特性に
関する研究

木内研究室
11232067
兵藤綾馬

電子情報工学科

目次

第1章 序論.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 第一種超伝導体と第二種超伝導体.....	1
1.3 銅酸化物超伝導体.....	2
1.4 ビスマス系超伝導体.....	2
1.5 RE系超伝導体.....	2
1.5.1 IBAD法による基板の作製.....	3
1.5.2 PLD法による超伝導層の作製.....	3
1.6 磁束ピンニング.....	3
1.7 縦磁界効果.....	4
1.8 酸化物超伝導体の応用.....	6
1.8.1 交流・直流超伝導ケーブル.....	6
1.8.2 縦磁界効果を用いた直流超伝導電力ケーブル.....	6
1.9 本研究の目的.....	8
第2章 実験.....	9
2.1 試料.....	9
2.2 測定及び評価方法.....	9
2.2.1 短尺模擬ケーブルの作製方法.....	10
2.2.2 直流四端子法.....	11
2.2.3 実験手順.....	12
第3章 実験結果及び考察.....	13
3.1 $E-I$ 特性.....	13
3.2 I_c-B_{ext} 特性.....	15
第4章 総括.....	21
4.1 総括.....	21
4.2 I_c-B_{ext} 特性.....	21
4.3 今後の課題.....	21
第5章 参考文献.....	22

第 1 章 序論

1.1 はじめに

1908 年、オランダの物理学者 Heike Kamerlingh Onnes がヘリウムの液化に成功した。さらに、1911 年に液化したヘリウムによる極低温化における水銀の電気抵抗を調べたところ、4.2 K 以下で電気抵抗がゼロになると発見された。この現象を超伝導現象といい、ある温度以下で超伝導現象を示す物質を超伝導体と呼ぶ。その後多くの元素、合金、化合物でその現象が起こることが確認されている。超伝導現象とは、物質の抵抗が温度の低下によりゼロになることである。しかし、その性質は、わずかな磁界や温度によって失われ常伝導状態となる。このときの磁界と温度を、臨界磁場 B_c 、臨界温度 T_c と呼ぶ。1933 年にドイツの物理学者 Fritz Walther Meißner と Robert Ochsenfeld によって、超伝導体の完全反磁性が発見され(マイスナー効果)、さらに 1957 年に John Bardeen、Leon Neil Cooper、John Robert Schrieffer によって BCS 理論で超伝導現象を微視的に解明した。しかし、BCS 理論では、超伝導体の T_c は 30 K を超えないとされていたが、1986 年にドイツの物理学者 Johannes Georg Bednorz とスイスの物理学者 Karl Alexander Müller らによって La-Ba-Cu-O 系超伝導体が発見され、30 K を超える温度での超伝導状態発現の可能性が見出された。この発見以降、世界中で高温超電導体の研究が進められ、それから 1 年後には液体窒素の 77.3 K を超える T_c の物質が発見された。高い T_c を持つ超伝導体を高温超電導体と呼び、その中でも銅酸化物のものを銅酸化物超伝導体と呼ぶ。この超伝導体は液体ヘリウムに比べ安価な液体窒素を用いることで超伝導状態となるため、様々な機器への応用が期待され大いに注目された。しかし、これらの高温超電導体は実用化するにあたって様々な課題が残されているため、現在も研究が進められている。

1.2 第一種超伝導体と第二種超伝導体

超伝導体は、磁界に対する反応の違いにより、第一種超伝導体と第二種超伝導体に区別される。

第一種超伝導体は、磁界の強さ B が臨界磁界 B_c 以下の場合に完全反磁性を示し、磁界の侵入を拒む。そして磁界の強さが B_c を超えると磁界が超伝導体内部に侵入し完全反磁性が失われ、超伝導状態が破壊される。

第二種超伝導体は、第一種超伝導体と同じようにある磁界までは完全反磁性を示す。その磁界を超えた場合、第一種超伝導体とは異なり、内部に磁界の侵入を許しつつ超伝導状態を保つ混合状態になる。さらに磁界を加えると最終的に超伝導状態は破壊される。第二種超伝導体が完全反磁性を示さなくなる転移磁界を下部臨界磁界 B_{c1} 、超伝導状態が破壊される転移磁界を上部臨界磁界 B_{c2} と呼ぶ。

1.3 銅酸化物超伝導体

超伝導体の結晶内に CuO_2 面を持つものを銅酸化物超伝導体と呼ぶ。銅酸化物超伝導体の結晶構造は、超伝導層の CuO_2 面とブロック層が交互に積み重なった形になっているため、 CuO_2 面に平行な方向には電流が流れやすく、垂直な方向には電流が流れにくいという電流について異方性がある。そのため、優れた特性を得るためには CuO_2 面の向きをそろえる必要がある。銅酸化物超伝導体は T_c が高いものが多く、液体ヘリウムに比べ安価な液体窒素を冷媒として用いることができる。その中で、特に Bi(ビスマス)系超伝導線材や RE(希土類)系超伝導線材の応用が期待されている。

1.4 ビスマス系超伝導体

銅酸化物超伝導体において、ビスマス系超伝導体は、Bi、Sr、Ca、Cu、Oの5つの元素が複雑な構成をなすセラミックである。銅酸化物超伝導体は脆いセラミックであるため、線材に加工することが容易ではない。また、 CuO_2 面を揃えるように結晶構造の配向を行うことも容易ではない。しかし、Bi系超伝導体はc軸方向に比べab面に広がった結晶を容易に得られる。 CuO_2 面に劈開しやすいため、圧延などの機械的な加工により容易に配向が得られる。このような特徴があり、PIT法と呼ばれる手法により結晶構造の配向がそろった状態で、比較的柔軟性があるテープ線材に加工することができる。

Bi系超伝導体はその特徴として、比較的ピン力が弱い。そのため外部磁場の影響を受けやすい。特に高温、高磁界ではその影響は大きく、抵抗無しに流すことができる臨界電流密度 J_c は自己磁界中に比べ大きく低下する。

以上より、Bi系超伝導体は銅酸化物超伝導体の中でも柔軟性の高い線材に加工しやすく、臨界電流密度と臨界温度が高いという特徴がある。しかし、外部磁場の影響を受けやすいため超伝導体としての特性を大きく損なう欠点がある。

1.5 RE系超伝導体

RE系超伝導体の中で、最も研究が進められているのはY-Ba-Cu-O(YBCO)系超伝導体である。YBCOの T_c は約90Kで、液体窒素を冷媒として用いることができる。YBCOのYを他の希土類元素に置き換えた物質も超伝導状態を示すことが知られている。一般に、置き換える希土類元素のイオン半径が大きいほど T_c は高くなる。しかし、置き換える元素のイオン半径が大きいと、超伝導層の製膜過程で別の物質が作られやすくなり、これは制御困難となる。そのため、置き換える元素は希土類元素の中で中程度のイオン半径のGdをもちいている。

1.5.1 IBAD 法による基板の作製

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の上に成長させることができる。IBAD 基板を用いて作成された RE 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、再現性にも優れているため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、高配向を得るには長時間の製膜が必要であることなどの問題もある。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 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 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て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 磁束ピンニング

第二種超伝導体に電流を流すと、 B_{c2} よりも低い磁界においても電気抵抗が発生する。この原因は、侵入した磁束線によるものである。第二種超伝導体内に磁束線が侵入した状態で電流を流すと、磁束線はローレンツ力 ($F_L = J \times B$) を受ける。磁束線がローレンツ力によって動き出すと、電流の向きと同じ方向に電界が発生するため、抵抗の発生に繋がる。

第二種超伝導体に侵入した磁束線がローレンツ力を受けて動き出す。これを反対方向の力で止めようとする機構を磁束ピンニングと呼ぶ。磁束ピンニングを起こすものをピン、ピンニングセンターと呼び、このピンには超伝導体の製造過程で生じた血管である状態析出物、結晶粒界、格子欠陥などがある。ピンニング力の大きさがローレンツ力の大きさ以下である場合、磁束線は移動することができず、抵抗が発生しないため電気抵抗無しに電流を流すことができる。

第二種超伝導体内部に大きさ B の磁束線が侵入した状態で、大きさ $J = J_c$ の電流密度の電流を流したとき、磁束線に働くピンニング力 F_p とローレンツ力 F_L はつり合い、

$$F_p = J_c B \quad (1)$$

となる。(1)式を変形すると、

$$J_c = \frac{F_p}{B} \quad (2)$$

となり、(2)式より F_p を向上させることで J_c の向上させることができる。

1.7 縦磁界効果

図 1.1 に示すように、超伝導体に流れる電流に対して平行に磁界を与えた場合(縦磁界)と、電流に対して垂直に磁界を与えた場合(横磁界)とは異なる以下のような現象が観測される。

1. 電流によって磁界と同方向の磁化が正となる。これを常磁性効果と呼ぶ。
2. 外部磁界(縦磁界)を増加させると交流電流による損失が減少する。
3. 縦磁界の場合は磁束線にたいして Lorentz 力が働かないため、臨界電流密度 J_c が横磁界に比べて大きく増加する。
4. 磁束線の運動と電磁減少を結びつける Josephson の関係式($\mathbf{E} = \mathbf{B} \times \mathbf{v}$)は、磁束線の運動と異なると考えられるため成り立たない。
5. 電流の臨界値を超えた抵抗状態において、負の電界領域を含む表面電界構造が観測される。

これらを縦磁界効果と呼ぶ。

図 1.2 に Ti-Nb の円柱型超伝導体の臨界電流密度の磁界依存性の特性を示す。下の線が横磁界の場合で、上の線が縦磁界の状態を示す。図 1.2 より、縦磁界は横磁界と比べ臨界電流密度の増加が観測されている。

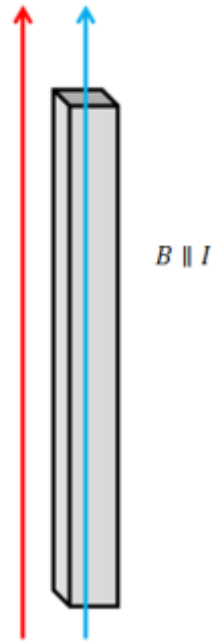


図 1.1 : 超伝導体に流れる電流に対し磁界を平行に与えた状態

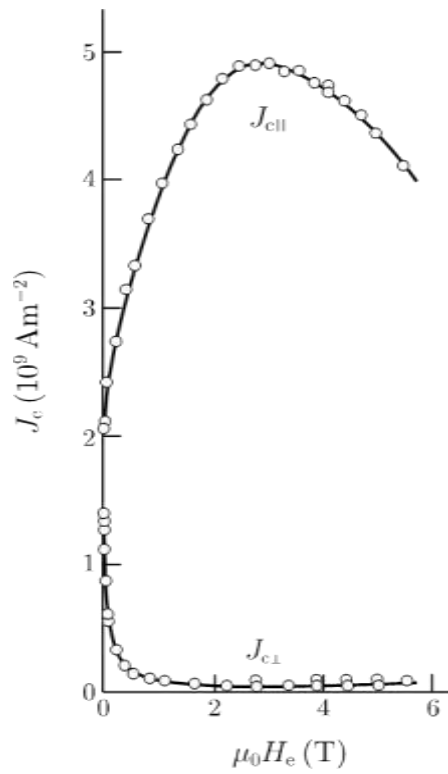


図 1.2 : Ti-Nb 円柱型超伝導体の J_c -B 特性[2]

1.8 酸化物超伝導体の応用

1.8.1 交流・直流超伝導ケーブル

超電導電力ケーブルには、交流電流を扱う交流超伝導電力ケーブルと直流電流を扱う直流超伝導電力ケーブルが開発されている。交流超伝導電力ケーブルは、交流の送電に扱われるため、その際の変圧が容易である。火力や原子力によって発電された交流電流を送電する場合用いることが可能だが、交流超伝導電力ケーブルにおいて超伝導体特有の交流損失が発生する。したがって、超伝導体を用いるにも関わらず送電時の損失が生じる。一方で、直流超伝導電力ケーブルは、送電時の損失がなく、超伝導体の特徴を最大限利用することができる。しかし、現在の主流な送電方法は交流である。直流超伝導電力ケーブルを用いる場合、交流電流を直流電流に整流する必要がある。直流で発電される太陽光発電や、風力発電の送電に用いる場合は整流する必要がないため、その分のコストが不要である。

1.8.2 縦磁界効果を用いた直流超伝導電力ケーブル

超伝導電力ケーブルの輸送電流容量は、それを構成する超伝導線材の臨界電流密度特性によって決まる。そのため、超電導電力ケーブルの輸送電流容量の改善には超伝導線材の臨界電流密度特性を改善によるものである。しかし、縦磁界下における超伝導体は横磁界下に比べ、臨界電流密度が大幅に増加することが知られている。これを利用することで超伝導線材の特性を改善することなく超電導電力ケーブルを改善することができると期待される。図 1.2 に縦磁界効果を用いた超伝導ケーブルの図を示す。

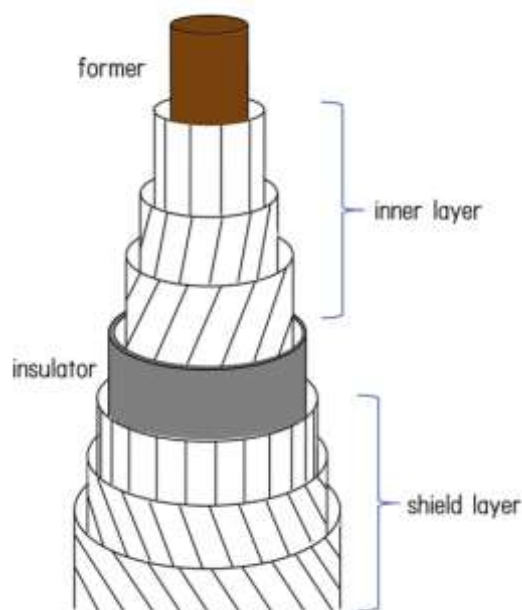


図1.2：縦磁界を用いた直流超伝導ケーブルの構造

ケーブルの構造において重要なことは、ケーブルの内側導体に縦磁界を与えることだ。図 1.2 のように、内側の導体に外側のシールド導体を流れる電流によって縦磁界 B_{ext} が与えられるように、シールド導体をツイストする。こうすることで内側導体に縦磁界を与えることができる。内側導体に縦磁界を与えると、ローレンツ力 F_L は、

$$\begin{aligned} F_L &= J \times B \\ &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

となり、これはフォース・フリー状態である。この状態を利用した超伝導電力ケーブルをフォース・フリー・ケーブルという。

B_{ext} はツイストしたシールド導体の超伝導線材によって内側導体に与えられると記したが、実際には内側導体を流れる電流による自己磁界の影響も考慮する必要があるので、最終的には全ての量が矛盾なく決定されなければならない。内側導体領域には厚さが 0.1 または 0.2mm 程度の高温超伝導線材を数層から 10 層程度巻くのだが、全体での渥美が半径よりも十分に小さいので、平板近似が可能となる。線材を巻きつけるフォーマーの半径を R 、線材の厚さを t 、層数を n とすると、線材の超伝導部分の厚さは $d = nt$ であり $d \ll R$ である。また、1 枚の線材の超伝導体の厚さを s とすると、工業的臨界電流密度は (4) 式で与えられる。

$$J_e = \frac{s}{t} J_c \quad (4)$$

超伝導部分を一様に J_e が流れているものとする。

超伝導部分を $y-z$ 平面に平行な平板とし、もっとも内側の表面を $x = R$ 、最も外側の表面を $x = R + d$ とする。 z 軸からの角度を $\theta(x)$ とすると、 $\theta(R) = 0$ である。縦磁界下では、Lorentz 力が 0 となるので、磁界 B は x によらず一定でなくてはならない。よって、超伝導部分の磁束密度は式 (5) と表すことができる。

$$\begin{aligned} B &= (B_x, B_y, B_z) \\ &= (0, B \sin(x), B \cos(x)) \end{aligned} \quad (5)$$

式 (5) より、(6) 式が満たされれば式 (7) の電流分布となる。

$$\theta(x) = \frac{\mu_0 J_e}{B} (x - R) \quad (6)$$

$$J = (0, J_e \sin \theta(x), J_e \cos \theta(x)) \quad (7)$$

最も外側の表面における磁界の角度 θ_{max} は式 (8) と表すことができ

$$\theta_{\text{max}} = \frac{\mu_0 J_c d}{B} \quad (8)$$

かつ、 $x = R + d$ における電流の自己磁界 B_1 は式 (9) を満たさなければならない。

$$\tan \theta_{\text{max}} = \frac{B_1}{B_e} \quad (9)$$

この条件は単独で決めることができないため、式(7)の電流分布を用いて得られる B_1 と矛盾なく求める必要がある。

ここで、超伝導層の厚み s を $1.0\mu\text{m}$ 、線材の厚さ t を $100\mu\text{m}$ のコート線材を想定する。その縦磁界下および、横磁界下での J_c をそれぞれ

$$J_{c\parallel} = (5.0 + 6.0B) \times 10^{10} \text{ A/m}^2 \quad (10)$$

$$J_{c\perp} = (5.0 - 4.0B) \times 10^{10} \text{ A/m}^2 \quad (11)$$

であると仮定した。また、フォース・フリー・ケーブルの電流容量 I_t と従来型のケーブルの電流容量 I_0 を用い、次式のケーブル効率を

$$\eta = \frac{I_t}{I_0} \quad (12)$$

と定義する。そして $\theta_{\text{max}} = 60^\circ$ 、フォーマー半径を $a = 30\text{mm}$ とした場合に、総数 n を4~10まで変えたときのケーブルの電流容量を求めた結果を表1.1に示す。これにより、フォース・フリー・ケーブル特性のほうがすぐれていることが分かる。とくに、超伝導層が増え、 I_t が大きくなるにつれて優位性が発揮されている。このことは、縦磁界が増えることにより J_c が増加するからである[3]。

1.9 本研究の目的

以上述べた通り、通常の超伝導電力ケーブルと比べ、高い電力輸送能力を持つ縦磁界効果を利用した超伝導直流ケーブルは実用化が重要視されている。このケーブルでは、図 1.2 のような構造で、外側のシールド層の自己磁界が、内側の超電導線材に縦磁界が加わるように工夫されている。昨年は Bi-2223 ケーブルの実験を行った[4]。本研究では、縦磁界効果 (J_c の増加) が大きい RE コート線材を用いて単層ケーブルを作製し、特性評価を行い、この縦磁界ケーブルの有効性を調べた。

第2章 実験

2.1 試料

本研究では、Superpower 社の市販コート線材 (SCS4050) を用いた。表 2.1 に諸元を示す。図 2.1 に試料の構造を示す。20 μm 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 μm の REBCO の超伝導層を作り、保護膜として 2 μm の Ag を製膜し、最後に 20 μm の銅安定化層で覆うことでコート線材を作製している。また、この線材の単線の評価を行った。(この測定試料を 0degree-1tape とする)。

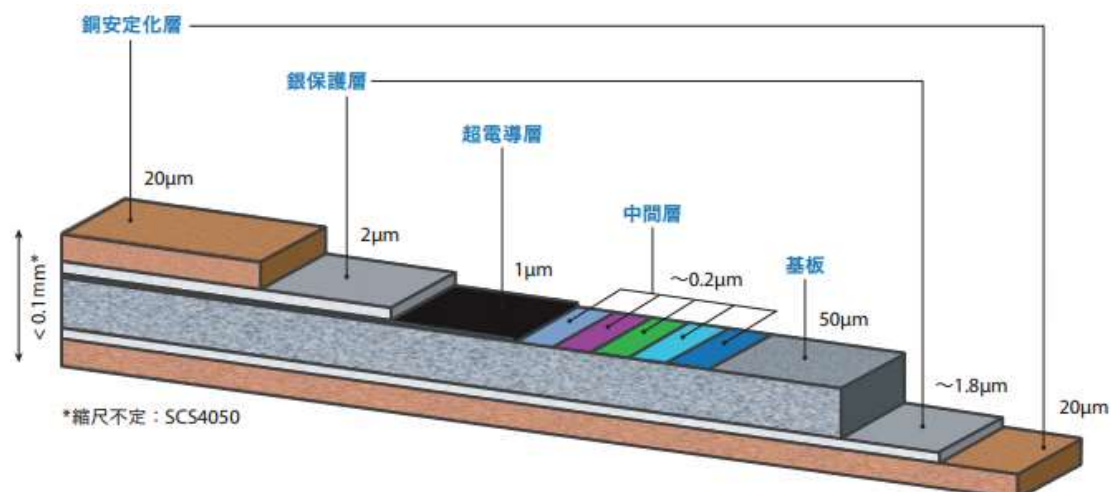


図 2.1 : Superpower-SCS4050 コート線材の構造[5]

表 2.1 : テープ線材の諸元

試料	幅[mm]	厚さ[mm]	I_c [A](77K 自己磁場)
Superpower 社製	4.04	0.093	141

2.2 測定及び評価方法

本研究では単層縦磁界模擬ケーブルを作製し、そのケーブルの特性評価を行う。ケーブルに用いる超伝導線材は市販されている RE 系コート線材である。このコート線材を直径 20 mm のフォーマーに 14 枚巻きつけた。巻きつけ角度は、軸に対して平行の $\theta = 0^\circ$ と下記に示す自己磁界における影響を考慮した角度 $\theta = 19^\circ$ の 2 つである。(この模擬ケーブルの名称をそれぞれ、0degree-14tapes, 19degree-14tapes とする)。

$\theta = 19^\circ$ は、電流通電における垂直磁界 (自己磁界) B_{\perp} と、軸方向に加える平行磁界 (縦磁界) B_{\parallel} から、アンペールの法則を用いて下記のように算出した。なお、今回の通電電流

は $I = 1650 \text{ A}$ で、ケーブル半径は $r = 10 \times 10^{-3} \text{ m}$ として計算を行った。

$$\begin{aligned} B_{\perp} &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 1650}{2\pi \times 10 \times 10^{-3}} = 0.033 \\ B_{\parallel} &= 0.04 \\ \tan\varphi &= \frac{B_{\perp}}{B_{\parallel}} = \frac{0.033}{0.04} \\ \varphi &= 38 \\ \theta &= \frac{\varphi}{2} = 19 \end{aligned} \tag{13}$$

2.2.1 短尺模擬ケーブルの作製方法

本実験で使用する短尺模擬ケーブルの作製手順を示す。また、その作業概略を図 2.2 に示す。ここで、Superpower 社製のテープ線材を 14 枚使用する。

1. 巻きつけるためのベークライト製フォーマーを用意する。このフォーマーの半径 r は、テープ線材の幅を a とすると、

$$r = \frac{14a}{2\pi\cos\theta} \tag{14}$$

であたえられる。

2. テープ線材をフォーマーに必要な角度で 14 枚巻きつける。
3. 2 の両端に、定電流源に接続するための電極を設置する。これは半田で溶接した。
4. 3 に、電圧計に接続するための銅線を設置する。2 同様に半田で溶接した。

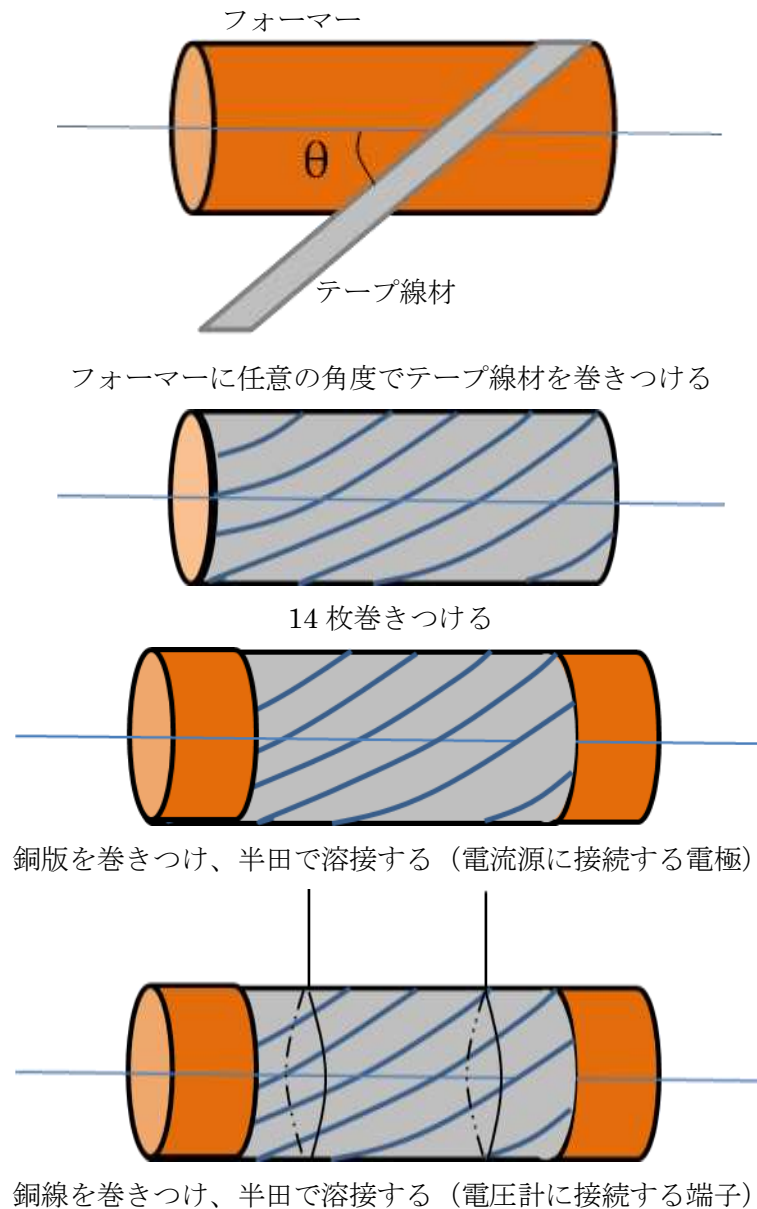


図2.2：直流超伝導短尺模擬ケーブルの作製の概略

2.2.2 直流四端子法

直流四端子法は、超伝導体などの電気抵抗が小さい試料の V - I 特性を測定するとき用いられる手法である。図2.3に概略図を示す。図2.3において、 R_m は測定試料の抵抗、 R_0 は回路の接触抵抗、 R_1 は電圧の内部抵抗とする。回路に電流 I を与えたとき、 R_m に I_1 [A]、 R_1 に I_2 [A] が流れたとすると、Kirchhoffの第一法則より、

$$I = I_1 + I_2 \quad (15)$$

測定される電圧 V は、

$$V = R_m I_1 + (2R_0 + R_1) I_2 \quad (16)$$

$R_m \ll R_1$ とすると、 $I_1 \rightarrow 1$ 、 $I_2 \rightarrow 0$ なので、

$$V = R_m I_1 \quad (17)$$

となる。したがって、測定試料が電圧計の内部抵抗と比較して十分小さければ、直流四端子法により十分に精度の高い測定が可能となる。本実験における測定は、超伝導体の I_c 近傍のため、 $R_m \ll R_1$ を満たす。

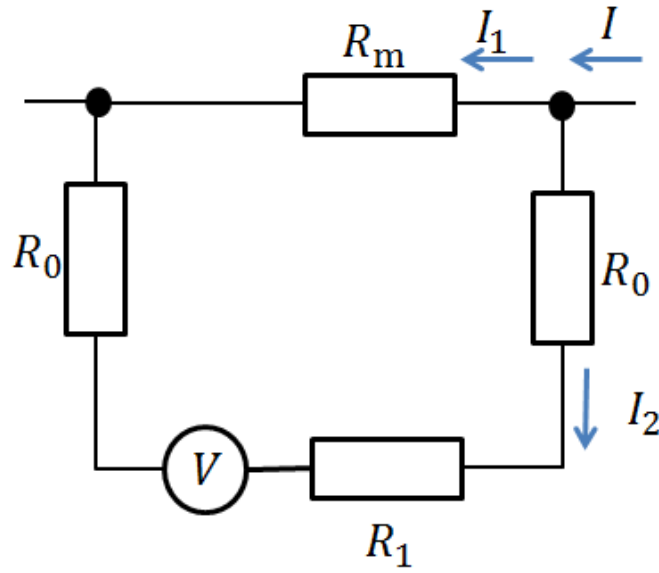


図2.3：直流四端子法の概略図

2.2.3 実験手順

2.2.1節のように作製した短尺模擬ケーブルに対し、以下の手順で実験を行った。

1. 短尺模擬ケーブルに対し、縦方向に任意の大きさの外部磁界を与えるためのパンケーキコイル(~ 1.0 T)を用意し、その内部の中心に短尺模擬ケーブルを設置する。
2. 1.全体を液体窒素で満たすことができる容器を用意し、その容器の中に 1.を設置する。
3. 定電流源と電圧計に接続し、1.全体を液体窒素で満たす。
4. パンケーキコイルによって、短尺模擬ケーブルに $0 \sim 0.9$ Tの間で任意の外部磁界 B_{ext} を与える。与える電流 I を PC で制御し、1 秒当たり 5 Aずつ増加させる。ただし、初期電流は 0 Aである。また、 0.5 秒置き I 、 V を PC に記録する。このとき、PC によって V と電圧計に接続した端子間の距離[m]から電界 E [V/m]を以下の式の関係から逐次評価し、PC により記録する。電圧端子間の距離は、 $\theta = 0^\circ$ 、 $\theta = 19^\circ$ 共に 36 mm である。

$$E = \frac{V}{\text{電圧端子間の距離}} \quad (18)$$

5. E が 1.0×10^{-2} V/mに達したとき、その測定を終了する。
6. 4.、5.を異なる任意の B_{ext} で繰り返し実行する。本実験では、この繰り返しが 30 回程度行う。

第3章 実験結果及び考察

3.1 E-I特性

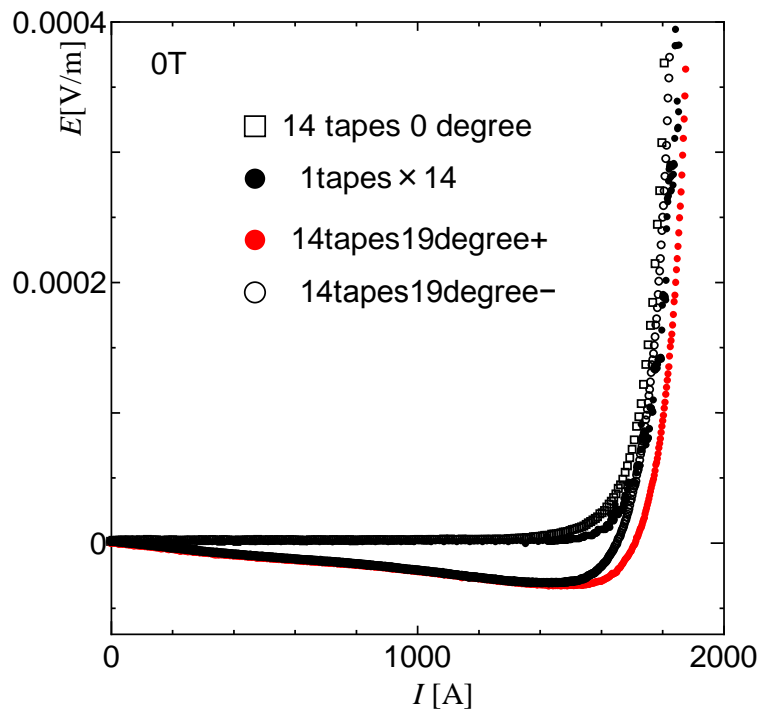


図 3.1.1 : 0 T のときのそれぞれの E - I 特性

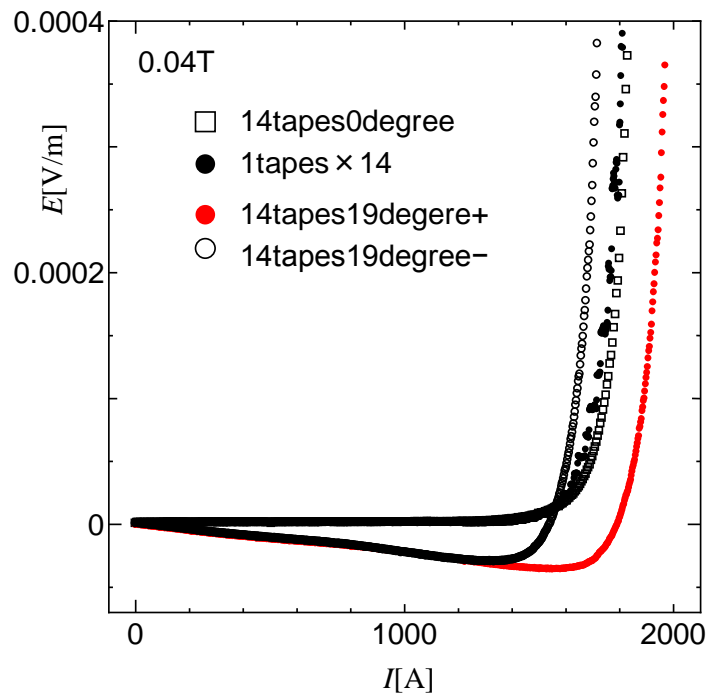


図 3.1.2 : 0.04 T のときのそれぞれの E - I 特性

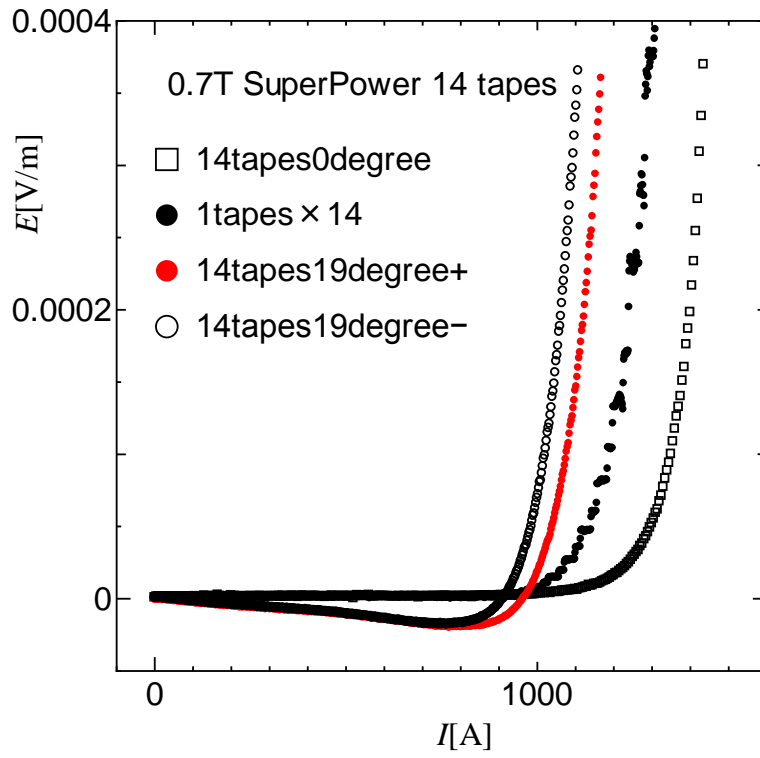


図 3.1.3 : 0.7 T のときのそれぞれの E - I 特性

図 3.1.1~3.1.3 に 0 T、0.04 T、0.7 T のときの E - I 特性を示す。この E - I 特性から 3.2 の I_c - B_{ext} 特性が決まる。以下にその結果と考察を示す。

3.2 I_c - B_{ext} 特性

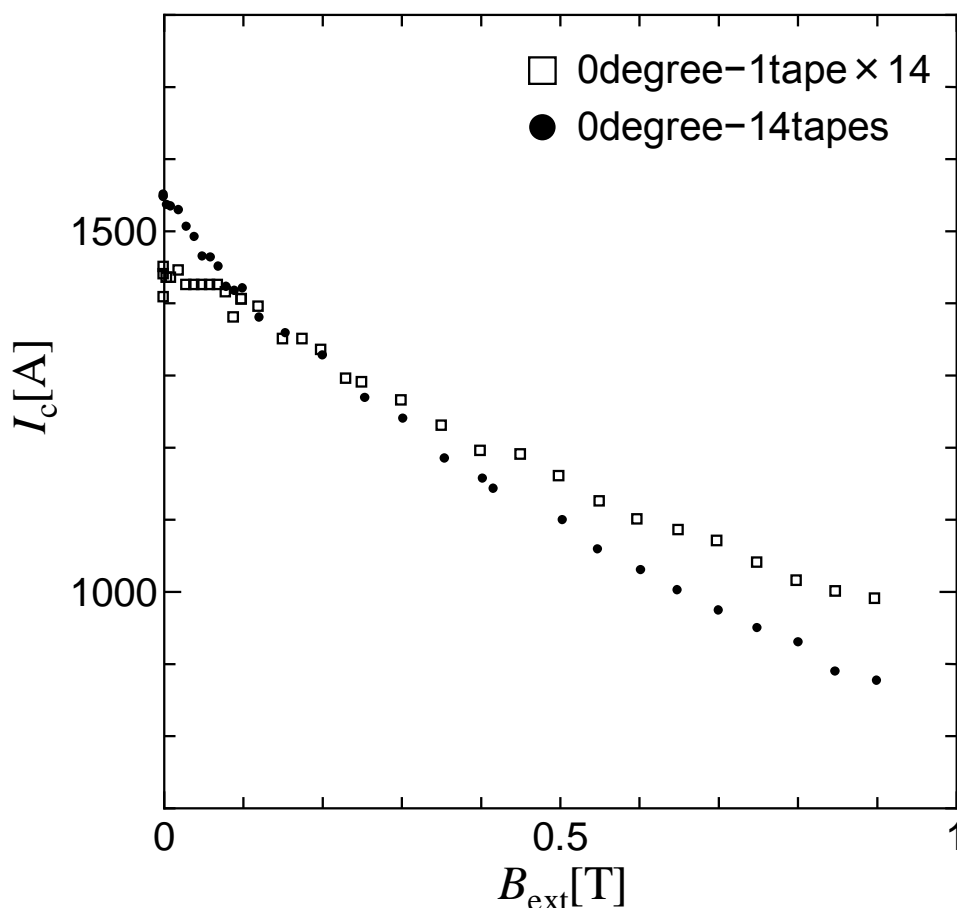


図 3.2.1 : テープ線材 1 枚の 14 倍と 0degree14tapes の I_c - B_{ext} 特性

図 3.2.1 にテープ線材 1 枚の 14 倍と 0degree-14tapes の I_c - B_{ext} 特性を示す。図 3.2.1 より、0 T において 0degree14tapes の I_c がテープ線材の 14 倍 (0degree1tape × 14) の I_c に比べて 10% 程高い結果が得られた。これは、図 3.2.2 に示すように、テープ線材 1 枚の端部に発生する自己磁界をケーブル状に配置することで打ち消すことができたためと考えられる。また 0degree1tape × 14 は低磁界では磁界依存性が緩やかになる領域があるが、磁界を加えると、0.1 T で I_c は減少している。

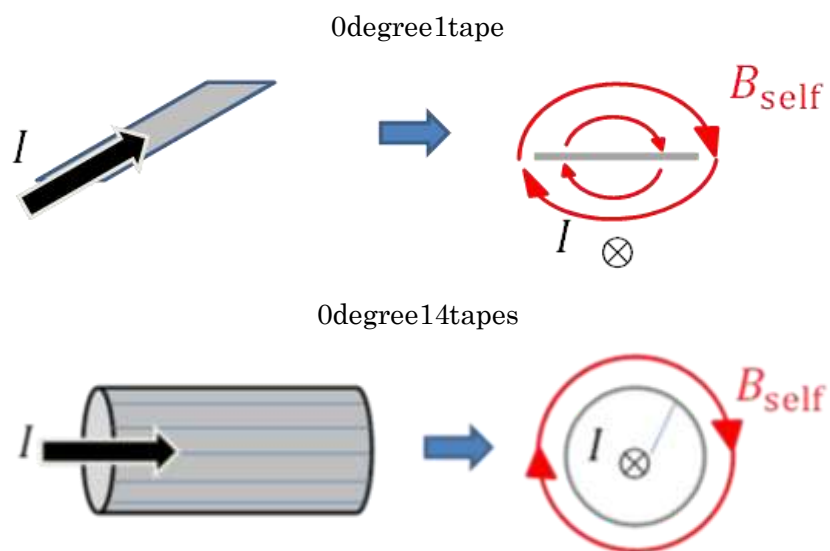


図 3.2.2 : 0degree1tape と 0degree14tapes の自己磁界 B_{self}

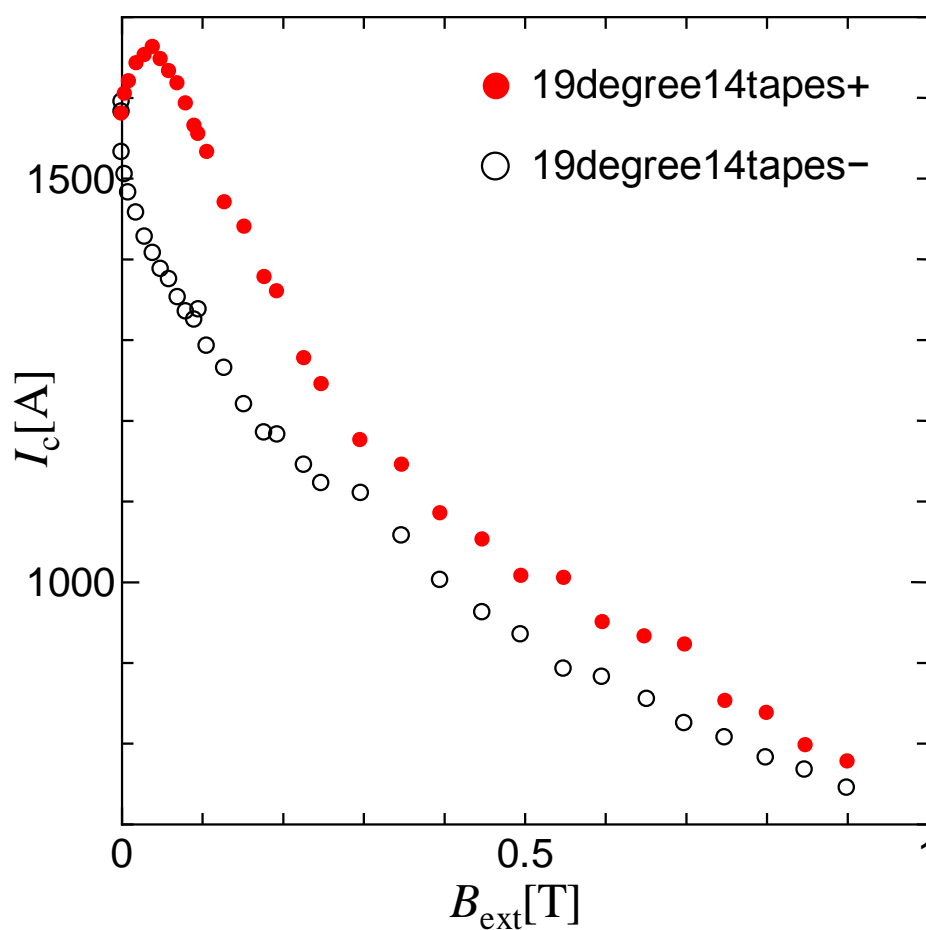


図 3.2.3 : 19degree-14tapes の I_c - B_{ext} 特性

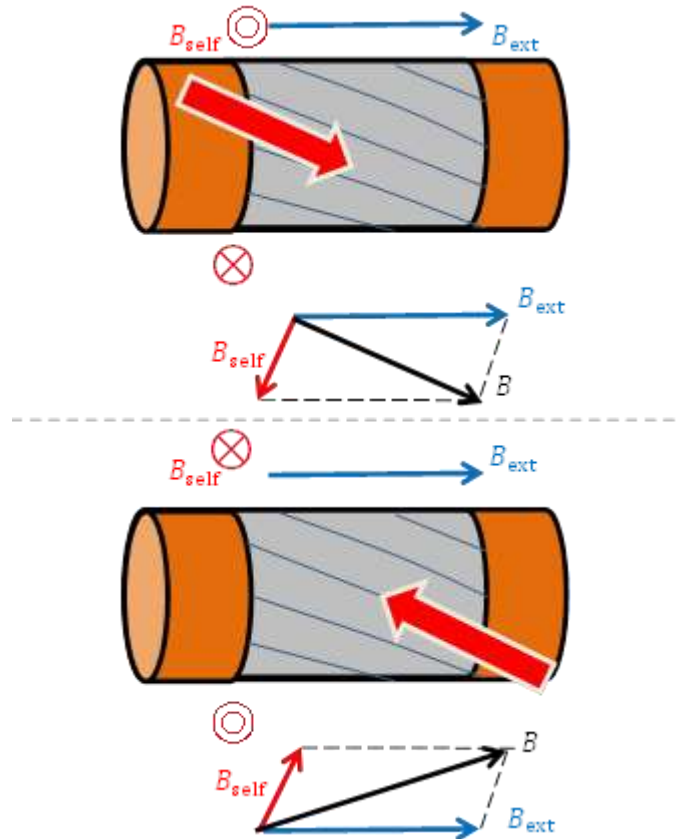


図 3.2.4：自己磁界と与える磁場の関係

図 3.2.3 に 19degree-14tapes の I_c - B_{ext} 特性を示す。図 3.2.4 に電流通電したときのテープ線材による自己磁界と与える外部磁場の関係を示す。図 3.2.4 に示すように、自己磁界 B_{self} と与える磁界 B_{ext} の関係から、テープ線材に縦磁界が加わるような電流の方向（上図）を正とする。

図 3.2.3 の 19degree14tapes+（赤シンボル）は、自己磁界と与える磁界の関係から、テープ線材に縦磁界が加わるように電流を流した場合（正方向）の結果である。0~0.1 T の間で臨界電流 I_c が増加している。また 19degree14tapes-（負の方向）と比べると 0.1~0.9 T まで I_c が大きくなっている。これは、図 3.2.4 のように、低磁界下では自己磁界によって全体の磁界がテープ線材に対し平行を保ち、縦磁界効果をより大きく得ることができたため、図 3.2.3 のように I_c が上昇したと考えられる。また、負の方向では全体の磁界がテープ線材に対し非平行に加わるため、磁界の増加に対し I_c が単調に減少する。

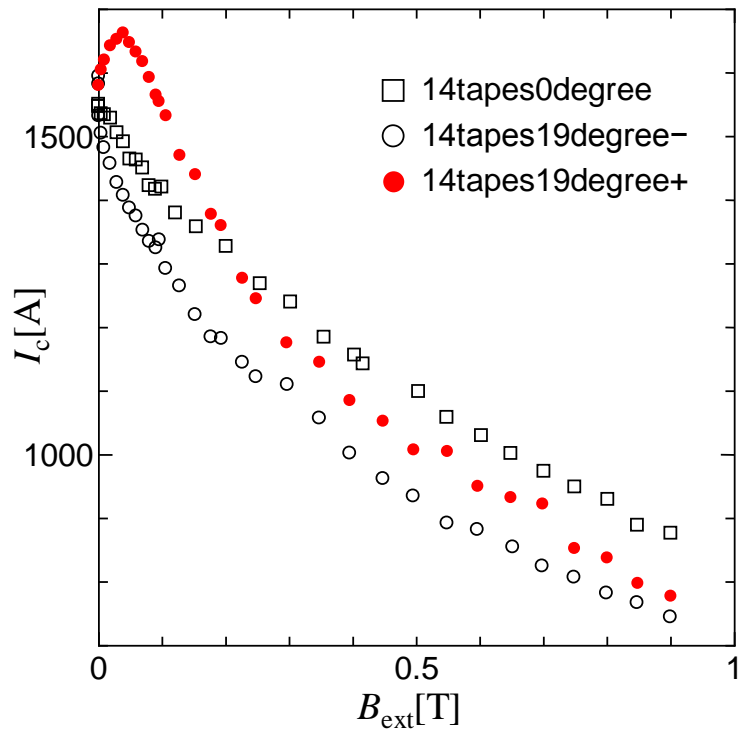


図 3.2.5 : 0degree14tapes と 19degree14tapes の I_c - B_{ext} 特性

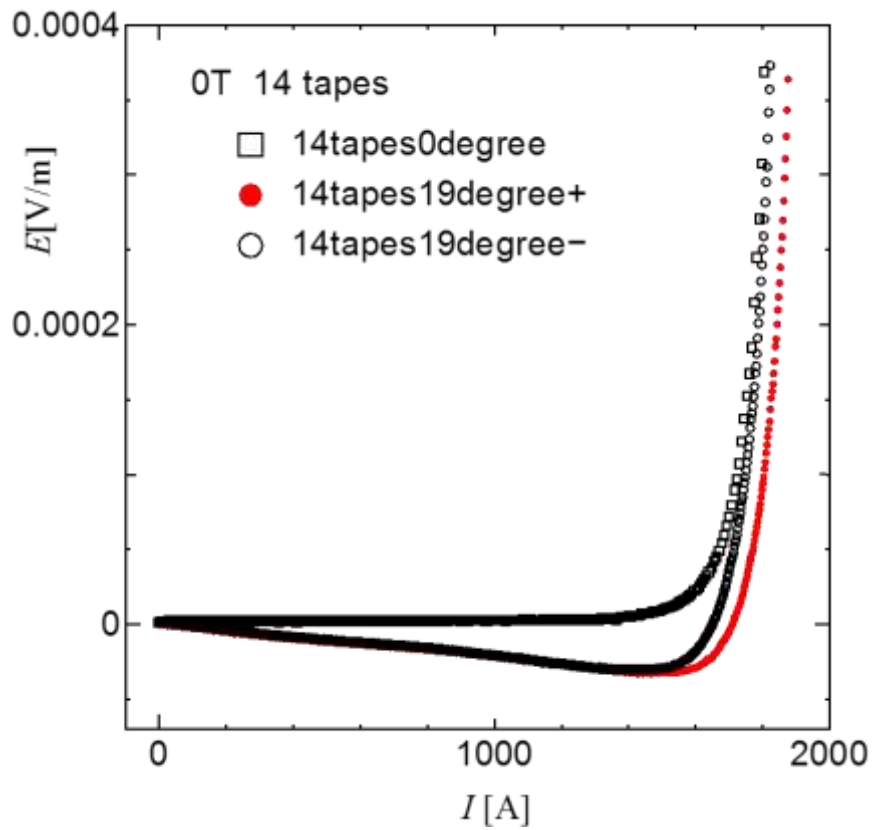


図 3.2.6 : 0 T のときの E - I 特性

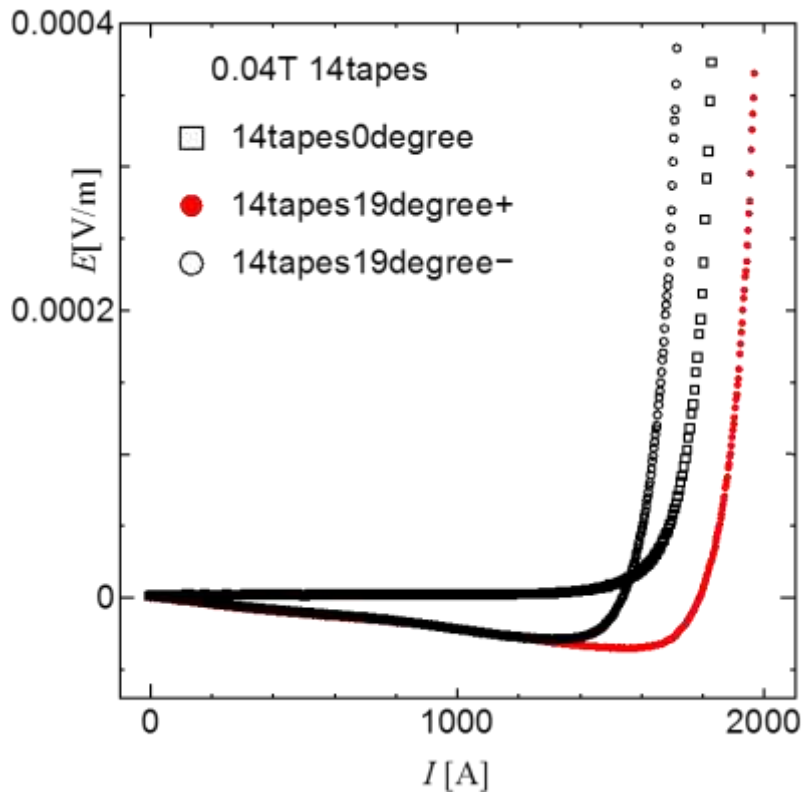


図 3.2.7 : 0.04 T のときの E - I 特性

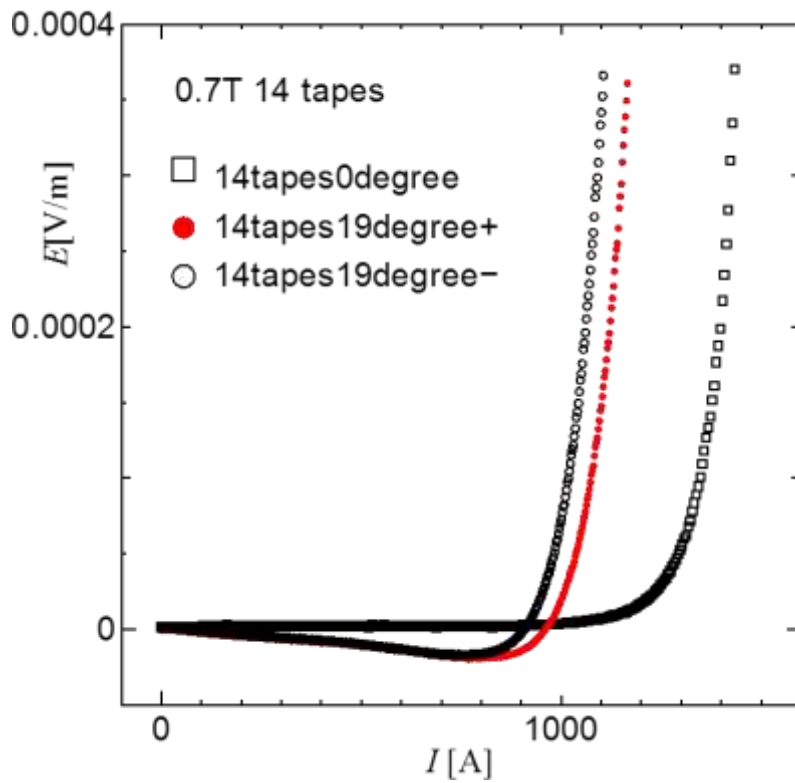


図 3.2.8 : 0.7 T のときの E - I 特性

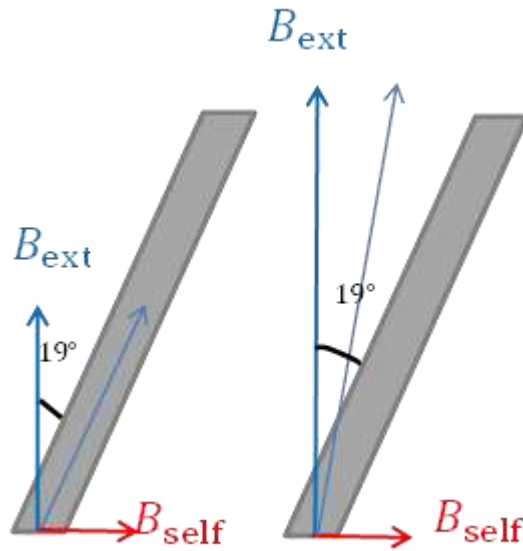


図 3.2.9 : 与える磁界 B_{ext} と自己磁界 B_{self} とテープ線材の関係

図 3.2.5 に 0degree14tapes と 19degree14tapes の I_c - B_{ext} 特性を示す。図 3.2.6 に 0 T のときの、図 3.2.7 に 0.04 T のときの、図 3.2.8 に 0.7 T のときの E - I 特性を示す。図 3.2.9 に与える磁界 B_{ext} と自己磁界 B_{self} とテープ線材の関係を示す。

図 3.2.5 を見ると、磁界を加え、0.2 T を超えると 0degree14tapes が 19degree14tapes より大きくなっている。また、図 3.2.6~3.2.8 を見ると、与える磁界の変化に対して、それぞれ曲線に変化は見られない。よって、テープ線材の超伝導層に何らかの欠陥が生じたわけではないと考える。図 3.2.9 に示すように、低磁界下では与える磁界と自己磁界により、テープ線材と磁界が平行になり縦磁界効果を得ることができたため I_c が増加した。しかし、与える磁界を大きくすると図 3.2.9 の右図のように、テープ線材と磁界が非平行になり I_c の減少につながると考えられる。また、テープ線材に流れる電流が減少すると自己磁界も減少していくため、与える磁界を大きくすればするほどテープ線材と磁界の角度が大きくなり、 I_c はより減少すると考えられる。

0.04 T で 14tapes19degree+が最大値を示す。14tapes19degree+と 14tapes0degree の I_c を比べると、最大で約 13%大きくなっている。昨年の Bi-2223 を用いた場合[4]では、 I_c の増加は 3%程だった。このことから、Bi-2223 テープ線材よりも縦磁界効果 (I_c の増加) が大きい RE コート線材を用いることが有用だと言える。

第4章 総括

4.1 総括

本研究では、Superpower社製のREコート線材を用いて、線材に生じる自己磁界の影響を考慮した短尺模擬ケーブルを制作し、縦磁界下での特性評価を行い、このような配置が有効であるか調査した。

4.2 I_c - B_{ext} 特性

ケーブルの軸に対して平行なケーブル ($\theta=0^\circ$) と自己磁界の影響を考慮したケーブル ($\theta=19^\circ$) の2つで行った。 $\theta=19^\circ$ のケーブルは、自己磁界と与える磁界の関係からテープ線材に縦磁界が加わる方向に電流を流した場合 (正方向)、0~0.1 Tの間で増加し、0.9 Tまで負の方向よりも臨界電流 I_c が大きくなった。しかし、 $\theta=0^\circ$ の場合のケーブルと比較すると、自己磁界の影響を考慮していない $\theta=0^\circ$ のほうが磁界を加えていくと電流容量が大きくなった。与える磁界の変化が、テープ線材に加わる磁界に影響し、非平行な磁界を与えていた。したがって、縦磁界効果による電流容量の増加を得るためには、自己磁界の影響をきちんと考慮することも必要であり、このような配置が有効であることが確認できた。

4.3 今後の課題

本実験では、自己磁界を考慮した単層短尺模擬ケーブルの特性評価を行った。したがって、複層のフォース・フリー・ケーブルの場合には多層からの自己磁界による縦磁界を得られないために、パンケーキコイルを用いて外部磁界を与える必要があった。また、フォース・フリー・ケーブルは多層構造で、各層の自己磁界によって縦磁界効果を得るため、より高度な計算から各層の角度を求める必要がある。今後の課題として、自己磁界を考慮した複層短尺模擬ケーブルの作製と特性評価を行い、外部磁界を与えずにこのケーブルの形状がどれほど輸送電流の増加に有効であるかを調査する必要がある。

第5章 参考文献

- [1] 松下照男 磁束ピンニングと電磁現象 産業図書株式会社
- [2] Yu. F. Bychkov, V. G. Vereshchagin, M. T. Zuev, V. R. Karasik, G. B. Kurganow and V. A. Mal'tsev: JETP Lett. 9 (1969) 404.
- [3] T.Matsushita, M.Kiuchi, E.S.Otabe, and V.S.Vyatkin Appl.Supercond.Conf.-13-02.
- [4] V.S.Vyatkin, M Kiuchi, E.S. Otabe, M Ohya, and T Matsushita Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 015011 (3pp)
- [5] Superpower.inc

謝辞

本研究を行うにあたり、様々な助言、ご指導をして頂きました小田部荘司教授、木内勝准教授、ビャトキン・ウラジミール博士に深く感謝申し上げます。また、公私共々御世話になりました小田部・木内研究室の皆様にも心より感謝致します。ありがとうございました。