

Y₂O₃を添加したYBa₂Cu₃O_{7- δ} 超伝導薄膜の
縦磁界下での臨界電流密度特性

木内研究室

行本 孝

平成 28 年 2 月 18 日

電子情報工学科

目次

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 RE系超伝導体	.....	2
1.5 単結晶基板と金属基板	.....	2
1.6 超伝導層の成膜法	.....	3
1.7 磁束ピンニング	.....	3
1.8 人工ピン	.....	3
1.9 縦磁界効果	.....	4
1.9.1 Force-Free トルク	.....	5
1.9 縦界下におけるピンの役割	.....	5
1.10 本研究の目的	.....	6
第2章 実験	.....	7
2.1 試料諸元	.....	7
2.1.1 ターゲット表面修飾法による人工ピンの導入	.....	7
2.2 紙料加工	.....	8
2.2.1 マイクロブリッジ加工	.....	8
2.3 測定方法	.....	8
2.3.1 直流四端子法	.....	8
2.3.2 端子接続	.....	8
2.3.3 測定回路	.....	9
第3章 結果・考察	.....	12
3.1 $I_c - B$ 特性	.....	12
3.2 n 値の磁界依存性	.....	15
3.3 J_c の増加量	.....	16

<u>第4章</u>	<u>まとめ</u>	17
	<u>謝辞</u>	18
	<u>参考文献</u>	19

表目次

<u>2-1</u>	<u>試料諸元</u>	7
<u>2-2</u>	<u>人工ピンの形状および粒径</u>	7

目次

1-1	銅酸化物超伝導体の結晶構造.....	2
1-2	銅酸化物超伝導体の縦磁界下における $J_c - B$ 特性	5
1-3	縦磁界下での磁束線の剪断歪みと Force-Free トルクによる磁束線の動き.....	5
1-4	人工ピンの導入量の異なる YBCO 薄膜の縦磁界下での J_c の磁界依存性	6
2-1	直流二端子法の回路図.....	9
2-2	直流四端子法の回路図.....	10
2-3	測定回路の全体図.....	10
3-1	厚さの異なる YBCO 薄膜の J_c の磁界依存性	13
3-2	先行研究を含めた厚さの異なる YBCO 薄膜の J_c の磁界依存性	13
3-3	厚さの異なる YBCO 薄膜 J_c の磁界依存性の規格化	14
3-4	先行研究を含めた厚さの異なる YBCO 薄膜の J_c の磁界依存性の規格化.....	14
3-5	厚さの異なる YBCO 薄膜の縦磁界下での n 値.....	15
3-6	$J_c(B = 0.2 \text{ T})/J_c(\text{s.f.})$ の Y_2O_3 添加量依存性.....	16

第 1 章 序論

1.1 はじめに

オランダのKamerlingh Onnesは、1908年にヘリウムの液化を世界で初めて成功させた。そして、1911年に液体ヘリウムを用いて水銀を極低温に冷却すると、抵抗値がゼロになることを発見した。このような現象を超伝導現象と名づけ、電気抵抗がゼロの状態を超伝導状態とし、それに対応して電気抵抗がゼロではない状態を常伝導状態とした。電気抵抗ゼロの性質を利用して、送電などの様々な機器への工学的な応用が期待されていた。期待の一方、当初発見されていた超伝導体の多くはわずかな磁界によって超伝導状態が壊されてしまい、工学的な応用は困難であると考えられた。このように超伝導体はある温度や磁界の範囲でのみ超伝導特性を示し、超伝導現象を示さなくなる温度や磁界をそれぞれ臨界温度 T_c 、臨界磁界 B_c と呼ぶ。それ以来、超伝導現象の発現機構や性質に関する研究がすすめられ、1933年にはW.MeissnerとR.Ochsenfeldによって超伝導体をもつ重要な特性の一つである完全反磁性(マイスナー効果)が明らかにされた。さらに1957年にはJ.BardeenとL.N.CooperおよびJ.R.Shriefferらにより、超伝導状態の微視的考察のBCS理論が提唱され、超伝導現象の発現機構が明らかにされた。ただし、BCS理論では、 T_c の最大値を30Kと予想した。さらに金属超伝導体の発見から75年後の1986年にJ.G.Bednorz,K.A.Müllerらによって酸化物であるLa-Ba-CuOで30Kを超える超伝導体が発見された。この後、高温超伝導の検索が続けられ、1年後には液体窒素の沸点である77.3Kを超える T_c を持つ物質が発見された。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、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。高温超伝導体は液体ヘリウムと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、電流輸送ケーブルなどの様々な機器への応用で大きな注目を浴びた。しかしながら、これらの高温超伝導体も超伝導体を冷やすためのコストを考えると、まだ電気抵抗なしで流せる最大の電流密度である臨界電流密度 J_c が低く、様々な応用機器への利用の障害となっている。そのため、今日も研究が続けられている状態である。

1.2 第一種超伝導体、第二種超伝導体

超伝導体は第一種超伝導体と第二種超伝導体に分けられる。どちらの超伝導体も臨界磁界 B_c まではマイスナー効果を示し、磁界の侵入を拒むように振舞う。どちらの超伝導体も B_c を超えるまでは電気抵抗0の性質を持つ。 B_c を超えた磁界を加えた際、第一種超伝導体は、磁界が超伝導の内部に侵入し、マイスナー効果が失われ、超伝導状態が失われる(電気抵抗0

の性質も失われる)。しかし、第二種超伝導体は、臨界磁界 B_c を超えた際、超伝導内に磁界の侵入を許し、マイスナー効果は失われるが、超伝導状態(電気抵抗0)を保つ混合状態になる。さらに磁界を加えると、超伝導状態が失われる。第二種超伝導体がマイスナー効果を示さなくなる際の転移磁界を下部臨界磁界 B_{c1} 、超伝導状態が失わ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

超伝導体の結晶構造の中に CuO_2 面を持つものを銅酸化物超伝導体と呼ぶ。銅酸化物超伝導体は T_c が高いものも多く、液体ヘリウムに比べ安価な液体窒素を冷媒として使用することができる。銅酸化物超伝導体の結晶構造は図1-1に示すように、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[1]。電流は CuO_2 面に流れていることが知られている。そのため、電流は CuO_2 面に平行な方向に流れやすく、垂直な方向には流れにくいという性質がある。以後、この性質を結晶構造に起因する異方性があると呼ぶ。

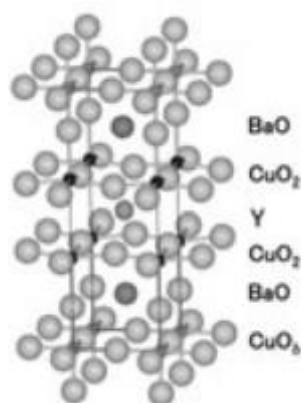


図 1-1 銅酸化物超伝導体の結晶構造[1]

1.4 RE 系超伝導体

酸化物超伝導体の1つとして、RE系超伝導体がある。RE系超伝導体は、金属超伝導体と比べて T_c が高い。組成式は、 RE-Ba-Cu-O と表記することができる。今回使用する試料はRE系超伝導体の中にあるY系超伝導体で、 T_c は92Kである。そのため、液体窒素を冷媒として使用することができる。YBCOのYを他の希土類元素に置換したものでも超伝導状態を示すことが知られている。また、置換する希土類金属のイオン半径が大きいほど T_c は高くなる。しかし、イオン半径の大きい元素を置換しようとするとき、超伝導層の製膜過程で別の物質が作られやすく、制御が困難なため、置き換える元素は、イオン半径が中程度のGdが多く

使用されている。

1.5 単結晶基板と金属基板

超伝導層を堆積させる基板は金属基板と単結晶基板がある。金属基板は基板の表面が均一でないという特性があり、一方単結晶基板は基板表面が均一であるという特性がある。1.3節で述べたように、Y系超伝導体は結晶軸に起因する異方性を持つため、金属基板で線材を製作した場合、高い J_c を得ることができない。単結晶基板を使用することにより、基板上の粒界などに起因する電流経路の直線性の低下を抑えることができる。しかし、酸化物超伝導体を応用利用するためには、長尺線材を作製する必要があり、単結晶基板を使用するのは不可である。したがって、まず単結晶基板を用いて酸化物超伝導体の基礎特性を解明し、線材化に役立てようとしている。

1.6 超伝導層の成膜方法

Y系超伝導体は結晶軸に起因する異方性をもつため、超伝導層の成膜方法も重要になる。成膜方法はPLD法(Pulsed Laser Deposition)、CVD法(Chemical Vapor Deposition)、MOD法(Metal Organic Deposition)などの手法がある。PLD法は他の製法と比べると、高配向の成膜が可能である。1.3節で述べたように、Y系超伝導体は結晶軸に起因する異方性を持つため、基板上に超伝導層を成膜する方法として、PLD法が採用されている。PLD法は、真空チャンバー内に作製する薄膜の原料バルクを配置し、その対角の位置に薄膜を作製する基板を配置する。外部からレーザー光の照射を受けた原料バルクの原子(分子)はプラズマ化してターゲットから剥離される。そして、プラズマ化した原子(分子)が対角の薄膜基板に堆積する。その後、酸素欠損量 δ を低くするために、アニールを行う。

1.7 磁束ピンニング

第二種超伝導体において、磁界中で超伝導体内に磁束線が侵入している状態の場合に超伝導体に電流を流すと、磁束線にローレンツ力が生じる。磁束線にローレンツ力が生じると、磁束線が動くため、誘導起電力が生じ、電気抵抗が発生する。従って、誘導起電力を発生させないために磁束線の動きを止める必要がある。この磁束線の動きを止める力をピンニング力と呼び、磁束の動きを止めるものをピンニングセンターあるいはピンと呼ぶ。このピンニングセンターには、超伝導体の生成過程で生じる常伝導析出物、結晶粒界、格子欠陥等がある。このように磁束線の動きをピン止めすること磁束ピンニング機構といい、この機構が電気抵抗ゼロの特性をもたらす。したがって、ピンニング力の大きさがローレンツ力以下の時には、磁束線が動かず、誘導起電力が生じないため、電気抵抗無しで電

流を流すことができる。したがって、

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

の関係があり。(1.1)式を変形すると

$$J_c = \frac{F_p}{B} \quad (1.2)$$

となる。したがって、(1.2)式より F_p を向上させることで J_c を向上させることができるとわかる。

1.8 人工ピン

人工ピンは、超伝導体内に析出物や格子欠陥を超伝導体作製時に人工的に導入するピンで、超伝導作製時に自然に導入されるピンは自然ピン、もしくはバックグラウンドピンと呼ばれる。人工ピンの形状は点状、円柱状、面上などがあり、超伝導体の使用環境に適した人工ピンの導入が有効である。点状や円柱状の人工ピンは、横磁界下において大きく効果を示すことが確認されている[2]。また、人工ピンの導入量は、人工ピンの導入量が少ないとピン力が低くなり、逆に多すぎると電流路の妨げとなってしまうため、人工ピンを適切な量導入する必要がある。特に、酸化物の超伝導体の人工ピン導入は、超伝導層の成膜過程で行い、サイズは点状も円柱状も直径数nm—数十nm程度となる。人工ピンの添加量は、体積当たり数%添加するのが一般的である。

1.9 縦磁界効果

超伝導体を流れる電流と磁界が平行の場合を縦磁界、電流に対して磁界が垂直かつ超伝導体の ab 面に対して磁界の向きが平行の場合を横磁界とする。縦磁界の場合に超伝導体に電流を流すと、磁束線に対してローレンツ力が働かない **Force-Free** 状態となり、図 1-2 のように、横磁界の場合と比較して臨界電流密度 J_c が大きく向上することが報告されている[3]。すなわち、 \mathbf{E} を誘導起電力、 \mathbf{B} を磁束密度、 \mathbf{v} を磁束線の運動速度としたとき、磁束線の運動と電磁現象を結びつける **Josephson** の関係式 $\mathbf{E} = \mathbf{B} \times \mathbf{v}$ は、成り立たない。以上のような現象を総称して縦磁界効果と呼ぶ。

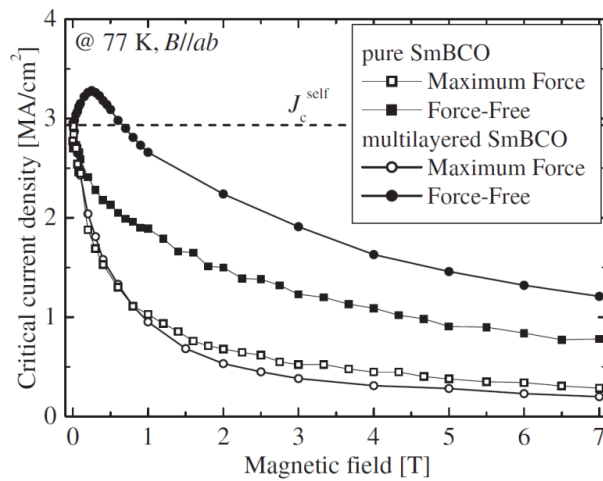


図 1-2 銅酸化物超伝導体の縦磁界下における $J_c - B$ 特性

1.9.1 Force-Free トルク

1.9 節で述べたように縦磁界下においては磁束線に対して Lorentz 力が働かない Force-Free 状態となり、磁束線の運動が生じないことから無限に電流を流すことができるのではないかと考えられる。しかし実際には J_c が存在しており、ローレンツ力とは別の機構で磁束線の運動が生じていると考えられる[4]。仮定として、図 1-2 に示すように、剪断歪みが生じ、磁束線が超伝導体に侵入する際に電流と平行にかけていた磁界が歪んで侵入し、超伝導体の中心に向うにしたがって磁界を電流と平行に戻そうとする Force-Free トルクが働いていると考えられ、Lorentz 力とは異なる力によって磁束線が運動を始めることから、縦磁界下においても J_c が存在していると考えられる[4]。横磁界下において Lorentz 力とピンニング力の釣り合いから J_c が存在していたように、縦磁界下においては Force-Free トルクとピンニングの釣り合いから J_c が存在するものと考えられる。

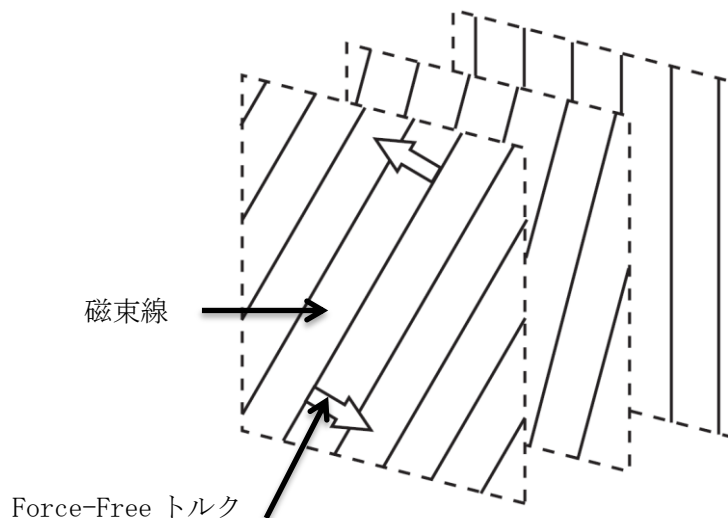


図 1-3 縦磁界下での磁束線の剪断歪みと Force-Free トルクによる磁束線の動き

1.10 縦界下におけるピンの役割

図 1-3 に異なる量のピンを導入したYBCO薄膜の縦磁界下および横磁界下における外部磁界と J_c の関係を示す[5]. 縦磁界下においては横磁界下と比較して外部磁界の増加に伴って J_c が増加するだけでなく、横磁界下の場合と同様にピンの導入量によって J_c が増加していることがわかる. 従って、縦磁界下においても適切なピンの導入によって J_c が増加するものと考えられる.

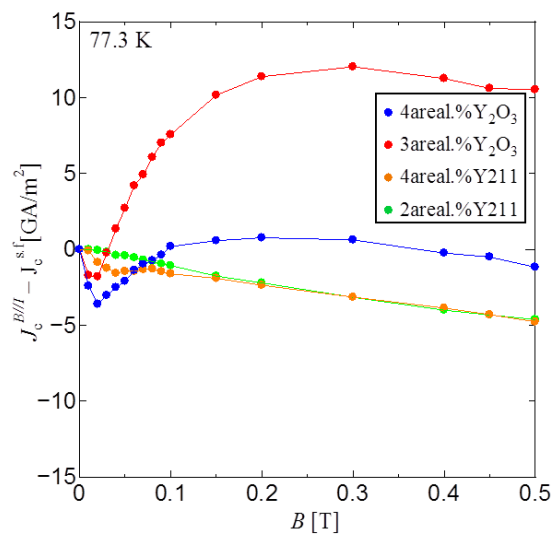


図 1-4 人工ピンの導入量の異なる YBCO 薄膜の縦磁界下での J_c の磁界依存性

1.11 本研究の目的

先行研究により、人工ピンの導入量を増加させると、縦磁界下において自己磁界 $J_c(s.f)$ を大きく超える J_c が得られることが確認された[5]. ただし、どこまでの添加量が縦磁界下の J_c 特性に有効かがまだ示されていない. そこで本研究では、人工ピンの添加量をさらに増加させた試料を準備し、直流四端子法を用いて縦磁界下での J_c 特性を測定した. その結果に基づき、人工ピンの導入量の最適について議論を行うことを目的とする.

第2章 実験

2.1 試料諸元

本研究に用いた試料は、SrTiO₃基板上にY₂O₃のピンを表面修飾したターゲットを用い、PLD法を用いてYBCO超伝導層を成膜した試料である。この試料は九州工業大学工学部松本要教授のグループによって作製された試料である。各試料のブリッジ幅およびブリッジ長、厚さ、77.3Kの自己磁場における J_c を表2-1に示す。また、各試料に導入したピンの種類はY₂O₃あり、形状は粒状で、粒径は5–10 nmである。

表 2-1 試料諸元

Specimen	Bridge width [μm]	Bridge length [mm]	Thickness [μm]	J_c^{sf} [GA/m ²] @77.3 K
YBCO+5.5area%Y ₂ O ₃	75	1.0	0.242	18.0
YBCO+5.5area%Y ₂ O ₃	59	1.0	0.211	23.4
YBCO+5.5area%Y ₂ O ₃	62.5	1.0	0.162	12.3
YBCO+5.5area%Y ₂ O ₃	81	1.0	0.158	21.2

表 2-2 人工ピンの形状および粒径

	Shape	size[nm]
Y ₂ O ₃	Particle	5–10

2.1.1 ターゲット表面修飾法による人工ピンの導入

人工ピンを超伝導体に導入する方法として、超伝導層を成膜する際に同時に人工ピンを導入する方法と、ピュアの超伝導層を成膜した後に人工ピンを打ち込む方法がある。前者には、ターゲット表面修飾法、ターゲット交換法、混合ターゲット法がある。後者には、重イオン照射と中性子照射がある。表面修飾法ではPLD法に用いる高温超伝導物質上に、人工ピンとして導入するY₂O₃の焼結体を配置し、これをターゲットとしてPLD法を用い、温度 800°、酸素圧 200 mTorr の条件で基板上に超伝導層を成膜する。

2.2 試料加工

2.2.1 マイクロブリッジ加工

今回は各試料の超伝導層に対して後述するマイクロブリッジ加工を行った。マイクロブリッジのブリッジ長は1 mmとした。

マイクロブリッジ加工も九州工業大学工学部松本要教授のグループに行っていた。マイクロブリッジ加工とは、超伝導層の一部を除去し、通電部分が小さな断面積となるように加工することである。通電部分を小さくする理由として、超伝導試料は抵抗無しに大電流を流すことができるが、それゆえに臨界電流の測定を行うには大規模な実験設備が必要となることがあげられる。小規模な実験設備での測定を可能にするためにマイクロブリッジ加工は必要とされる。

2.3 測定方法

2.3.1 直流四端子法

今回行った実験では、試料の $I-V$ 測定法として直流四端子法を用いた。直流四端子法の回路図を図 2-1 に示す。また、直流四端子法の他に代表的な $I-V$ 測定法である直流二端子法を図 2-2 に示す。いずれの図においても R_S を試料抵抗、 R_A および R_V を電流系および電圧計の内部抵抗とする。また、 R_1, R_2, R_3, R_4 は各端子の接触抵抗である。電圧を測定する際、直流二端子法の回路では、 R_A, R_1, R_2 の抵抗の和が試料抵抗 R_S よりも十分に小さい場合は試料の電圧の測定に影響することはないが、試料抵抗 R_S が非常に小さい値であることから、直流二端子法では試料の正確な電圧を測定することは困難である。

次に、直流四端子法の回路において、試料電圧の測定に影響を与える抵抗は R_V, R_3, R_4 だが、電圧計の内部抵抗 R_V が非常に大きいため、影響を無視することができる。従って、今回の実験では、直流四端子法を用いて測定を行った。

2.3.2 端子接続

四端子法で測定する際でも、試料と銅線の接触抵抗は小さくしなければならない。そのため、試料と電流、電圧端子の接続方法としてハンダ付けやインジウムを用いた圧着が一般的に行われている。しかし、今回の実験で使用する試料は熱や圧力への耐性が低く、ハンダやインジウムを用いた圧着では、試料が破損する恐れがあるため、銀ペーストを用いた接着で端子の接続を行った。電流リード線は0.8 mm 径の銅線を10本より合わせたものを用いた。

2.3.3 測定回路

今回測定に用いた回路の全体図を図2-3に示す。示した回路では前述した四端子法を用いて測定を行うことができる。外部磁界 B は超伝導コイルによって試料に印加され、超伝導コイル用の電源の電流値を制御することによって外部磁界 B の大きさを変更することができる。超伝導コイル用の電源および超伝導試料用電源の電流値を確認するため、各電源と超伝導コイルまたは超伝導試料間にはシャント抵抗を直列に接続した。シャント抵抗に発生した電圧を測定し、この電圧値とシャント抵抗の抵抗値を用いてオームの法則を利用してシャント抵抗に流れている電流値を求める。各電源装置および電圧計はGPIBを用いてPCと接続し、測定データを記録している。なお、本実験では直流四端子法を用いることで電流端子および電圧端子部の接触抵抗の影響を抑制しているが、超伝導試料の電圧を測定するナノボルトメーターには測定下限値が存在するため、下限値以下の値は正確に記録されずノイズとして記録される可能性はある。本実験で用いた測定用PCの場合、ノイズによって測定値の誤差が生じることを防ぐために電流通電前の電圧値を読み取り、その後電流通電時の電圧を読み取って差分を求め、この値を実際の電流通電時の電圧とした。

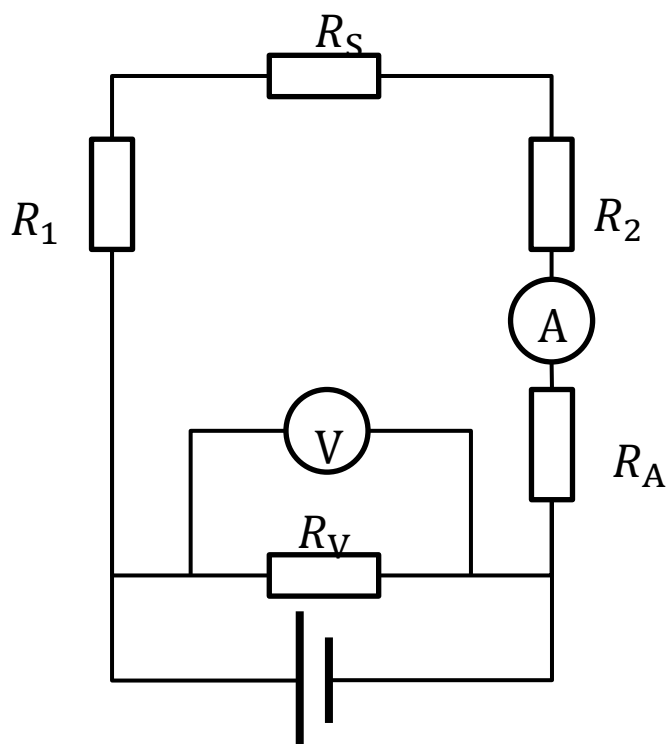


図 2-1 直流二端子法の回路図

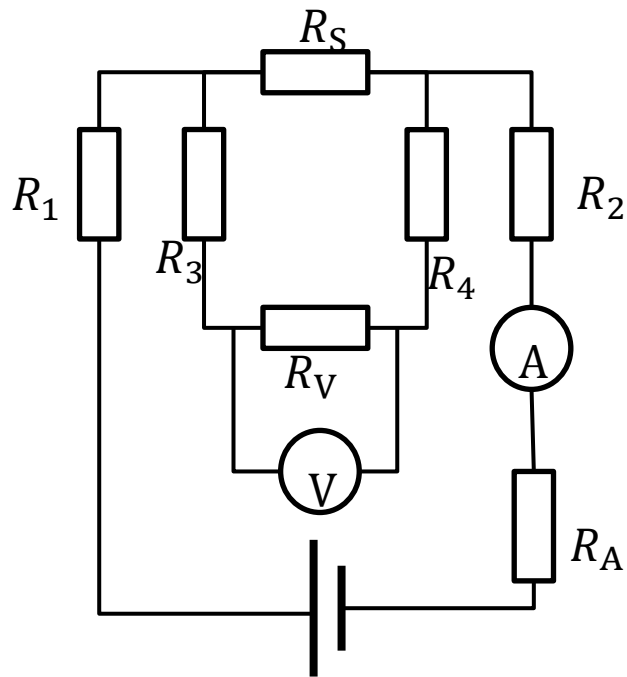


図 2-2 直流四端子法の回路図

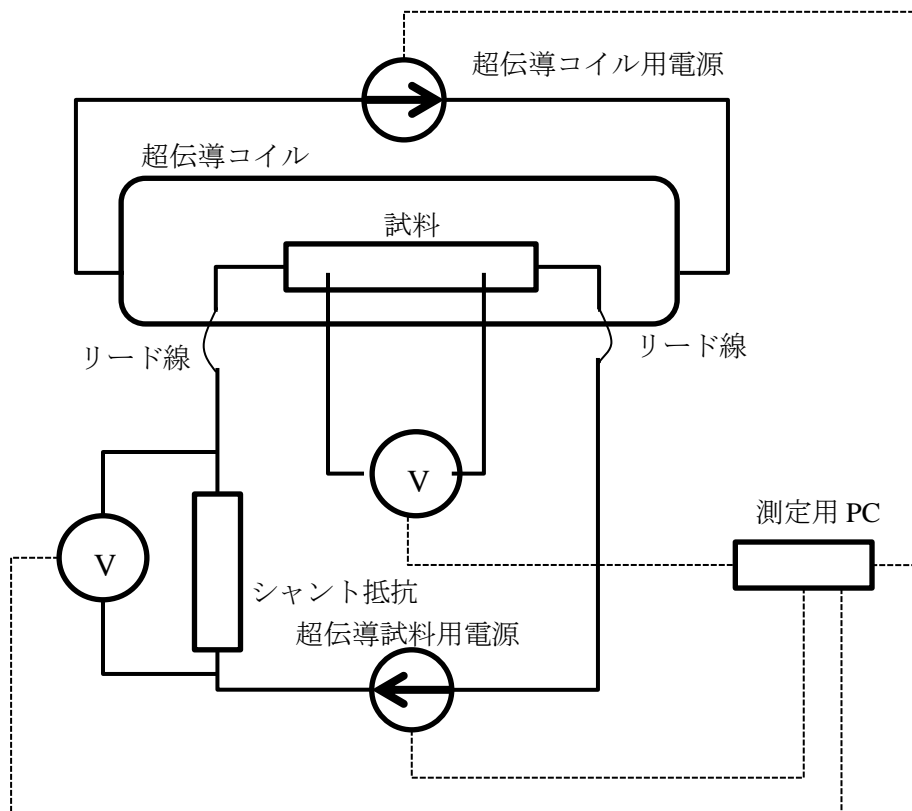


図 2-3 測定回路の全体図

測定準備

今回の測定では超伝導試料に対して縦磁界と横磁界の 2 方向に外部磁界を印加したが、それぞれの場合において磁界が正確に印加されているかどうかの確認を行った。 c 軸方向に超伝導試料の角度を変化させて角度依存性を測定し、この時得られた J_c の中で、一番 J_c の高い角度を外部磁界が ab 面に平行の状態として、縦磁界または横磁界と設定した。

第3章 実験結果・考察

3.1 $J_c - B$ 特性

今回測定した試料の $J_c - B$ 特性と先行研究の結果を含めた $J_c - B$ 特性を図 3-1, 図 3-2 に示す。また, 今回測定した試料の各磁界における J_c を自己磁界の J_c で規格化した図を図 3-3 に示し, 先行研究の結果を含めた各磁界における J_c を自己磁界の J_c で規格化した図を図 3-4 に示す。

図3-2は, すべての試料で縦磁界下での J_c が横磁界下での J_c を上回っていること示している。したがって, すべての試料で縦磁界効果を示したことがわかる。

また, 縦磁界下の外部磁界が0.2Tの時の J_c を見ると, 厚さが211 nm, 242 nmの試料で自己磁界の J_c を超えていることがわかる。厚さが158 nmでは自己磁界の J_c が上記の2つの試料の中間的な値になっているが, 自己磁界からの増加は少ないことが確認できる。ただし, 横磁界下での J_c の磁界依存性は3つの試料で一番良い特性になっている。一方で, 162 nmの試料は自己磁界からの J_c 増加はほとんどないが, 横磁界下の J_c の磁界依存性は一番よく, さらに158 nmに近い特性になっている。すなわち, 自己磁界からの縦磁界下での J_c 増加が大きい試料は, 横磁界の磁界依存性が悪く, 縦磁界での J_c 増加率が少ない試料は磁界依存性が優れる結果となり, 縦磁界と横磁界の J_c の決定機構が磁界の方向で異なっていることが示される。この決定機構解析のためには, 組織解析を行い, どのように Y_2O_3 が試料内で分散しているのかを調査する必要がある。さらに, 添加量を増加させると Y_2O_3 のサイズが変化することも報告されているので, 他の試料とのサイズの違いにも注目する必要がある。

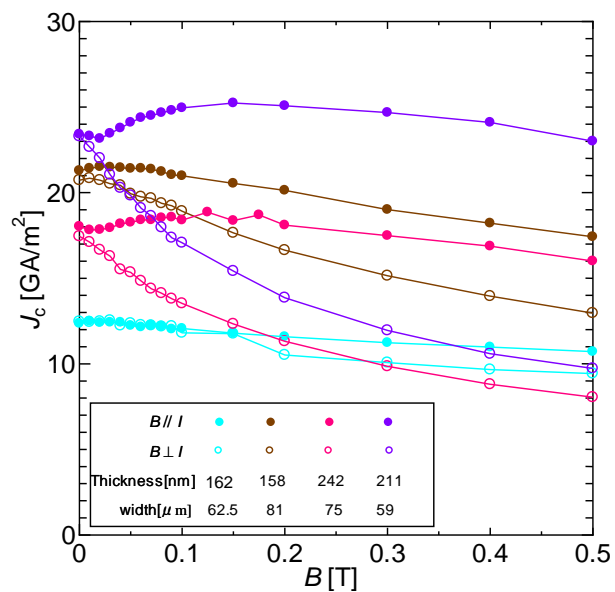
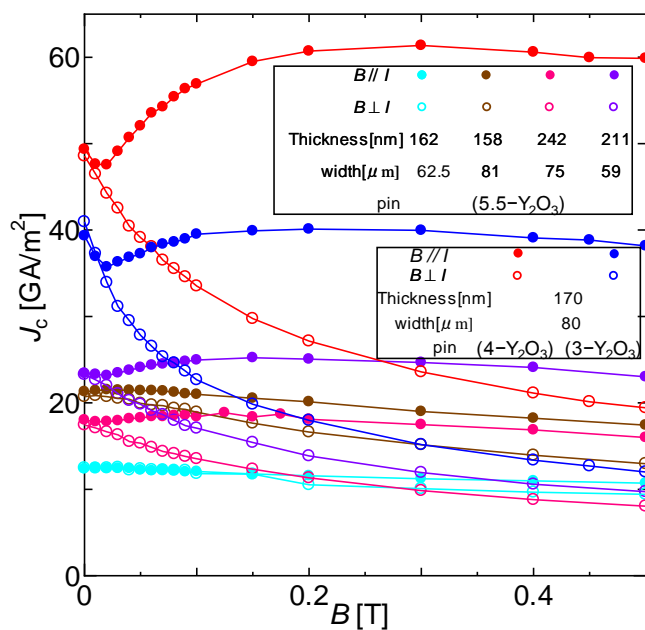


図 3-1 厚さの異なる YBCO 薄膜の J_c の磁界依存性



3-2 先行研究を含んだ厚さの異なる YBCO 薄膜の J_c の磁界依存性

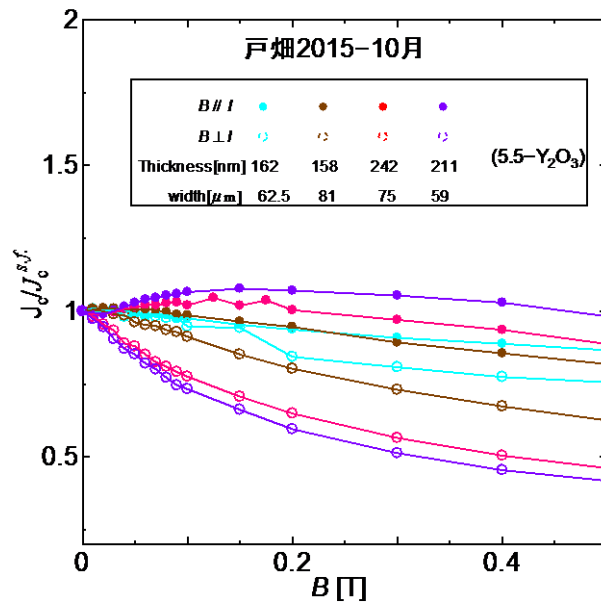


図 3-3 厚さの異なる YBCO 薄膜の J_c の磁界依存性の規格化

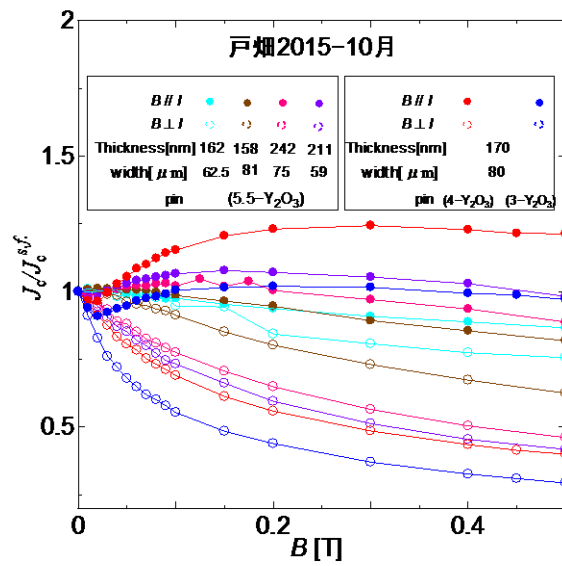


図3-4 先行研究を含んだ厚さの異なるYBCO薄膜の J_c の磁界依存性の規格化

3.2 n 値の磁界依存性

超伝導体の電流-電圧特性測定において、電流-電圧特性($I-V$ 特性)の非線形性を示すパラメータとして n 値が用いられる。 $I-V$ 特性から求められた $E-J$ 特性を

$$E \propto J^n$$

とした場合の指数 n を n 値とし、 n 値が大きいほど臨界電流 I_c 付近での電圧の変化が急激であり、流す電流を少し小さくするだけで発生する電圧を大きく下げることができるため、一般に実用超伝導線材では n 値が大きいほど優れているとされる。

図 3-5 に今回測定した試料の各磁界における n 値を示す。自己磁界での n 値を見ると、162 nm の試料だけ値が特に低くなっており、その他の試料は顕著な差は出ていない。自己磁界の n 値が低いということは、超伝導層内が不均一になっていることを示している。 n 値が低かった試料は厚さが 162 nm の試料で、厚さが 158 nm, 211 nm の試料では n 値は低くならなかった。そのため、 n 値が低かった理由として膜厚が原因ではないことがわかる。原因として、試料作製時に結晶軸が揃わなかったのではないかとということが考えられる。

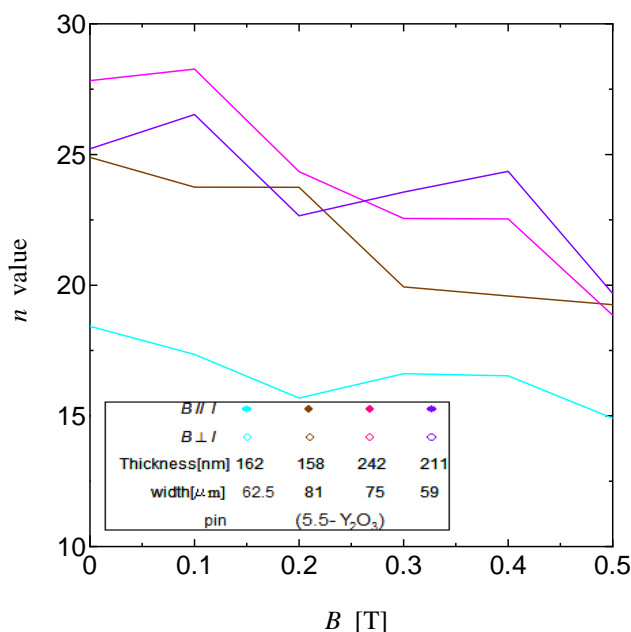


図3-5 厚さの異なるYBCO薄膜の縦磁界下での n 値

3.3 J_c の増加量

図3-6に自己磁界で規格化した縦磁界の $J_c(B = 0.2 \text{ T})/J_c(\text{s.f.})$ の Y_2O_3 添加量依存性を示す。

添加量が4%の試料と比べ、5.5パーセントの試料では、 J_c の増加量が低下していることを示している。5.5%は4%に比べて、増加量が低い値を示している。これは、人工ピンを5.5%導入することによって、人工ピンが電流路の妨げとなり、電流と磁界の平行度を低下に繋がったためであると考えられる。したがって、 Y_2O_3 添加に関しての最適添加量は4%近傍であると考えられる。

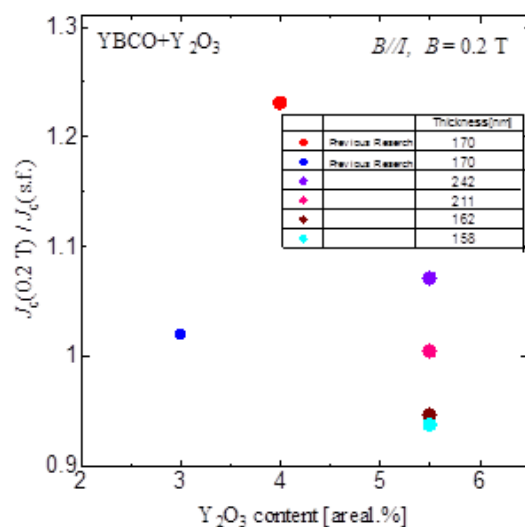


図3-6 $J_c(B = 0.2 \text{ T})/J_c(\text{s.f.})$ の Y_2O_3 添加量依存性

第4章 まとめ

どこまでの人工ピン添加量が縦磁界下の J_c 特性に有効かを調査するため、人工ピンの添加量5.5%の試料の測定を行い、先行研究で行われていた添加量3%と4%の試料との縦磁界0.2 T印加時の自己磁界 J_c からの増加率の比較を行ったところ、 Y_2O_3 添加に関しての最適添加量は4%近傍であるということが調査により確認できた。また、実験結果から、縦磁界と横磁界の J_c の決定機構が磁界の方向で異なっていることが観測された。今後は、人工ピンの導入量が4%の試料の組織観察を行い、縦磁界下において、どのような条件で自己磁界の J_c より J_c が増加するか調査する必要がある。また、158 nmの試料も同様に組織解析を行うことで、どのように Y_2O_3 が試料内で分散しているのかを調査する必要がある。

謝辞

本研究を行うにあたり，多大なご指導を頂いた九州工業大学情報工学部電子情報工学科 木内勝准教授，小田部教授に深く感謝いたします。また本研究に用いた超伝導試料を提供頂きました九州工業大学工学部マテリアル工学科 松本要教授，Dr.Alok に深く感謝いたします。最後に，公私共々お世話になりました小田部・木内研究室の伊原大輔氏，永田望氏に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 茂筑高士: RADIOISOTOPES, 59, 211-219 (2010)
- [2] K.Matsumoto, M Paolo. Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 014001 (12pp)
- [3] A.Tsuruta, S.Watanabe, Y.Ichino, and Y.Yoshida, Jpn. J. April. Phys. 53, 078003(2014)
- [4] 松下 照男:「磁束ピンニングと電磁現象」, 産業図書, 1994 年
- [5] 木戸竜馬:単結晶基板を用いたY系超伝導体の縦磁界下における臨界電流特性に関する研究
- [6] K.Sugihara, Y. Ichino, and Y.Yoshida, Superconductor Science and Technology 28 (2015) 104004
- [7] R.Kido, *et al.*: 応用物理学会春季学術講演会, 12a-P9-12(2015)