

BaHfO₃を添加したSmBa₂Cu₃O_y
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

12232011

伊原 大輔

平成 28 年 2 月 18 日

電子情報工学科

目次

第1章 序章	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 第一種超伝導体.....	2
1.3 銅酸化物超伝導体.....	3
1.4 SmBCO 薄膜.....	4
1.5 超伝導の製膜方法	5
1.6 単結晶基板.....	5
1.6.1 IBAD 法.....	5
1.7 磁束ピンニング	6
1.8 人工ピン.....	7
1.9 縦磁界効果.....	9
1.10 本研究の目的.....	11
第2章 実験	12
2.1 試料諸元.....	12
2.2 試料加工.....	12
2.2.1 マイクロブリッジ加工.....	12
2.3 測定方法.....	13
2.3.1 直流四端子法.....	13
2.3.2 端子の接続.....	15
2.3.3 測定回路.....	15
第3章 実験結果及び考察	17
第4章 まとめ	21
謝辞	22
参考文献	23

表目次

表 2.1 試料諸元	12
------------------	----

目次

図 1.1	超伝導状態の磁場、温度、電流密度の図	2
図 1.2	SmBCO の結晶構造	4
図 1.3	c 軸方向に磁界をかけた場合の磁束ピンニングの図	7
図 1.4	77 K での c 軸方向に磁界を加えた時の pure-SmBCO と BHO 添加 SmBCO と BSO 添加 SmBCO の $J_c - B$ 特性[1]	8
図 1.5	77 K での c 軸方向に磁界を加えた時の pure-SmBCO と BHO 添加 SmBCO と BSO 添加 SmBCO の $F_p - B$ 特性[1]	8
図 1.6	超伝導体に縦磁界と横磁界をかけた図	9
図 1.7	77 K での pure-SmBCO と多層膜 SmBCO それぞれに横磁界と縦磁界を加えた場合の $J_c - B$ 特性[2]	10
図 1.8	縦磁界下での磁束線の歪みと force-free トルクによる磁束線の動き	10
図 2.1	超伝導体のマイクロブリッジ加工図	13
図 2.2	直流二端子法の回路図	14
図 2.3	直流四端子法の回路図	14
図 2.4	測定回路図	16
図 3.1	各試料の $J_c - B$ 特性	17
図 3.2	各試料の自己磁界で規格化した縦磁界での J_c 上昇率	18
図 3.3	ハステロイ基盤を用いた異なる膜厚での $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ の横磁界下と縦磁界下での J_c 上昇率[4]	19
図 3.4	各試料の自己磁界の J_c と比較したときの角度依存性の J_c 上昇率	20

第 1 章 序章

1.1 はじめに

1908 年にオランダの Kamerlingh Onnes は初めてヘリウムの液化に成功した。さらに 1911 年には液化したヘリウムを用い極低温下での水銀の電気抵抗を調べる過程で、4.2 K 以下での水銀の電気抵抗がゼロになることを発見し、この現象を超伝導現象と名付けた。ある温度領域（通常は極低温）で超伝導性を示す物質を超伝導体といい、極低温領域以外の電気抵抗を持つ状態を常伝導状態という。電気抵抗ゼロの性質を持つことから様々な機器への応用が期待されたが、当初発見された超伝導体はわずかな磁界で超伝導状態ではなくなってしまう脆いものであった。その後、様々な超伝導体が発見されより強い磁界下でも超伝導状態を維持する物も発見され、また超伝導状態は磁界以外にも温度や電流でも壊れてしまうことが分かった。この超伝導状態を維持できる温度や磁場の限界値をそれぞれ臨界温度 T_c 、臨界磁場 B_c という。超伝導現象の発現機構に関する研究も進められてきたが、長い間解明されないままであった。しかし、1933 年に W. Meissner と R. Ochsenfeld によって、超伝導体は完全反磁性(マイスナー効果)を持つことが証明された。さらに 1957 年に、金属系超伝導体における超伝導の発現機構が Bardeen、Cooper、Schrieffer が発表した BCS 理論により説明された。BCS 理論では、超伝導状態から常伝導状態へと転移する温度 (T_c) が 40 K を超えることはないであろうと予想されていた。しかし、1986 年に J.G. Bednorz、K.A. Müller らが $\text{La}_2\text{BaCuO}_4$ を発見し、30 K を超える温度で超伝導が発現する可能性が示された。この発表以降、世界各国で高温超伝導の探索が続けられ、1 年後の 1987 年には液体窒素の沸点である 77.3 K を超える T_c を持つ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) が発見された。その後、より高い T_c を持ち、高温超伝導体と呼ばれ $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ (BiSrCaCuO) や $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ (TlBaCaCuO) などが確認されている。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んでいる。高温超伝導体は液体ヘリウムに比べて安価な液体窒素を用いた冷却で超伝導状態になるため、現在液体ヘリウムを用いている製品例えば、MRI や超伝導マグネット等の金属超伝導を用いた製品の冷却コストの削減が出来る可能性が出てきた。そのため T_c の高い超伝導体についての研究が進められている。

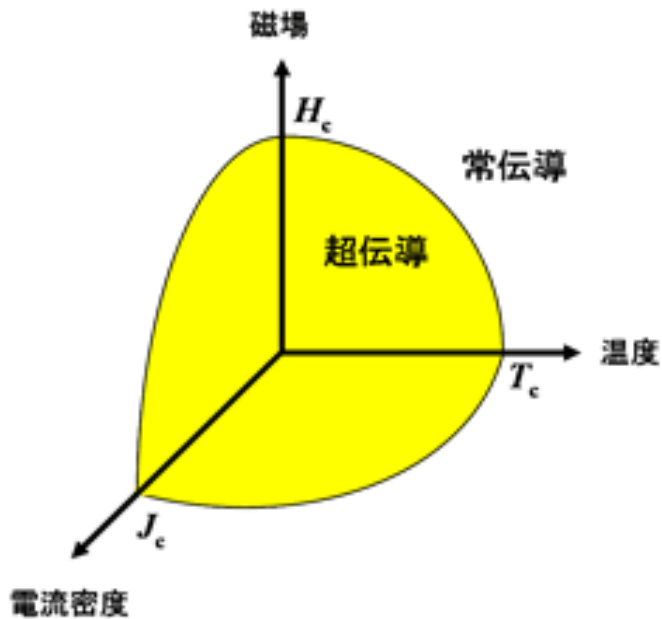


図 1.1 超伝導状態の磁場、温度、電流密度の図

1.2 第一種超伝導体と第二種超伝導体

超伝導体が超伝導状態を示すのは臨界温度 T_c と臨界磁界 B_c の範囲内の場合であるが、磁気的な特性で第一種超伝導体と第二種超伝導体に分けられる。第一種超伝導体では磁界の強さが B_c 以下の時はマイスナー効果を示すが、磁界の強さが B_c を超えると一気に超伝導状態が壊れてしまう。一方で第二種超伝導体では第一種超伝導体と異なり下部臨界磁界 B_{c1} と上部臨界磁界 B_{c2} の2種類の臨界磁界が存在する。磁界の強さが B_{c1} 以下の時は第一種超伝導体と同じマイスナー特性を示す。さらに磁界の強さが B_{c1} を超えると、磁束量子と呼ばれる最小単位で磁束が存在し、この量子磁束の中心は常伝導で、超伝導体と常伝導が混在する、混合状態となる。したがって、完全に超伝導状態から常伝導状態に移る磁界 B_{c2} は第一種超伝導体に比べてはるかに大きく、応用機器で用いられる主な超伝導体は第二種超伝導体である。

1.3 銅酸化物超伝導体

銅酸化物超伝導体とは、結晶構造に CuO_2 面を持つ超伝導体であり、 T_c が液体窒素の沸点 77.3 K を超えるようなものも存在する。その高い T_c のため高価な液体ヘリウムを用いることなく安価な液体窒素や冷凍機での運用が可能である。銅酸化物超伝導体の特徴の一つとして結晶構造に起因する大きな電流の流れやすさの異方性が挙げられる。 ab 面方向 (CuO_2 面に平行な向き) では電流が流れやすく優れた電流特性を示すが、 c 軸方向 (CuO_2 面に垂直な向き) では、半導体的または絶縁的な中間層 (ブロック層) の存在によって電流が流れにくく、電流特性が劣ることが原因である。このため、銅酸化物超伝導体では大きな電流路を確保するためには CuO_2 面を整える作業が必要になる。

1.4 REBa₂Cu₃O_y超伝導体

銅酸化物超伝導体の一つであるREBa₂Cu₃O_y (REBCO) 超伝導体は優れた磁界依存性を持ち、高温、高磁界下で高い J_c を得られる。REBCO 超伝導体の一つに、希土類として例えばサマリウム(Sm)を用いた場合の組成比はSmBa₂Cu₃O_yである。Sm はガドリニウム(Gd)系、イットリウム(Y)系と比較すると、イオン半径が大きく、比較的高い T_c を持つ。また、バリウム(Ba) との置換が起こりやすいという特徴がありその部分が超伝導物質ではなくなり、磁界の印加によりピンとして働く。このため、Sm 系は Gd 系、Y 系と比較して高い J_c を持つため従来の線材に代わるものとして期待されている。しかしながら、Sm は線材加工の困難さから実用化は進んでおらず、作製が容易な薄膜を用いて基礎研究が行われている段階にある。図 1.2 に SmBCO の結晶構造を示す。この構造をペロブスカイト構造という。この構造ではCuO₂ 準正方格子を重要な構造要素として含む。CuO₂ はピラミッド型であり、一つの構造単位中に含まれるCuO₂が多いほど T_c が高くなる傾向がある。また 1.3 節で述べたように SmBCO でも CuO₂ 面での異方性が存在し配向を整える作業が必要となる。

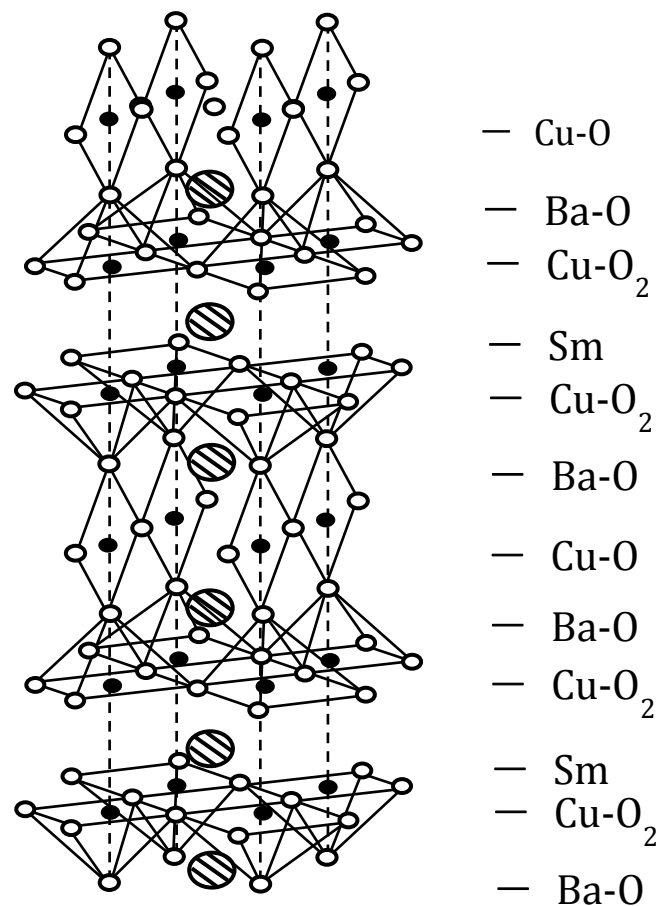


図 1.2 SmBCO の結晶構造

1.5 超伝導の製膜方法

今回名古屋大学から提供していただいた試料は PLD 法と呼ばれる製膜方法を用いている。PLD(Pulsed Laser Deposition)法は真空チャンバー内に作製する薄膜の原料(以下ターゲット)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。真空チャンバーの外よりレーザー光をターゲットに照射する。レーザー光はパルスレーザー(KrF エキシマ、波長 248nm)と呼ばれるエネルギーが $1.7 J/cm^2$ と高いものを用いている。照射されたターゲットの原子(分子)は強力なレーザー光によりプラズマ化してターゲットより瞬間的にターゲット表面より剥離され、そのまま対角の薄膜基板へと堆積する。真空蒸着法などの蒸着材料を抵抗に電流を流し発生した熱や、加速・収束した電子線を材料にあて電子線のエネルギーで発生した熱などを用いて材料を蒸発させ、その蒸気を堆積させて製膜を行う方法では材料内各成分の蒸発温度の違いなどから材料と同じ組成比での薄膜作製が難しい。しかし、PLD 法を用いると一瞬でプラズマ化して移動できるため、原料と同じ組成比の薄膜を作製できる。また用いるレーザー光のパルス比を変えることで薄膜の厚さを制御することもできる。

1.6 超伝導体基板

本研究では超伝導薄膜の基板として $LaAlO_3$ 単結晶基板と IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) 法を用いて作製された金属基板上に中間層として MgO 層を成膜した金属基板を用いた。RE 系超伝導体は結晶軸に起因する異方性を持つ。そのため結晶軸をそろえることでさらに高い臨界電流密度を得ることが可能となる縦磁界効果の測定では電流と同じ方向に磁界をかけることになる。この時電流と磁界の平行具合が重要となりそれによって臨界電流密度が上昇する。単結晶基板上に超伝導層を製膜することで、配向度が高くなり電流と磁界の平行率を高めることができる。金属基板では単結晶基板に比べ結晶粒の配向が悪い。そのために電流経路の直線性が低下してしまう。

1.6.1 IBAD (Ion Beam Assisted Deposition) 法

IBAD 法は基板に対しある角度からイオンビームを照射することにより、二軸配向の中間層を成膜する手法である。この手法は高い配向性を得ることができるが、長時間の成膜が必要である。この問題は IBAD 法中間層の上に CuO_2 を成膜することにより改善され、高配向での成膜速度の高速化が可能となった。これを自己配向現象という。

1.7 磁束ピンニング

I_c が大きければ、その超伝導体で扱える電流量が増え様々な装置への応用の幅が広がるため、線材の I_c を大きくすることは重要となる。ここで J_c は超伝導線材の評価する上で重要なパラメータの一つとなる、このパラメータを上げれば一般的には I_c も上昇するため、 J_c を上げていくことは超伝導体を応用をしていくためには必ず必要となる。この J_c の値を決定するものは基本的に磁束ピンニングと呼ばれる機構である。磁界中において超伝導体に電流を流すと内部の侵入している磁束に Lorentz 力が生じる。そして、磁束線がこの Lorentz 力によって運動してしまうと誘導起電力が生じ、結果として電気抵抗が発生する。この磁束線の運動を止めようとする力が磁束ピンニングと呼ばれる現象である。図 1.3 に電流と磁界、各力が働く磁束ピンニングの様子を示す。磁束ピンニングを引き起こすものは、超伝導体内部の螺旋転移、常伝導析出物、空隙などの様々な欠陥(超伝導状態にならない部分)であり、さらには人工的にそれらを作り出したものがあげられる。こうしたものはピンニング・センターと呼ばれ、Lorentz 力による磁束線の運動を臨界点まで妨げ続け、電気抵抗ゼロで臨界点まで電流を流すことが出来るようにする。このピンニング・センターが単位体積あたりに及ぼす力(ピン力密度)を F_p とすると、誘導起電力が発生し始める臨界電流密度 J_c の下では磁束線に単位体積当たり $J_c B$ の Lorentz 力が働いていて、これが F_p と釣り合いの関係にあることから

$$J_c = \frac{F_p}{B} \quad (1.1)$$

の関係で表される。ピン力密度はピンニング・センターを導入したり、改善することにより向上させることができる。したがって、式(1.1)から J_c は臨界温度 T_c や臨界磁界 B_c と違い材料固有の値ではなく、人口ピンを導入し、ピン力密度を向上させることにより、後天的に上昇させることの出来る数値であることがわかる。

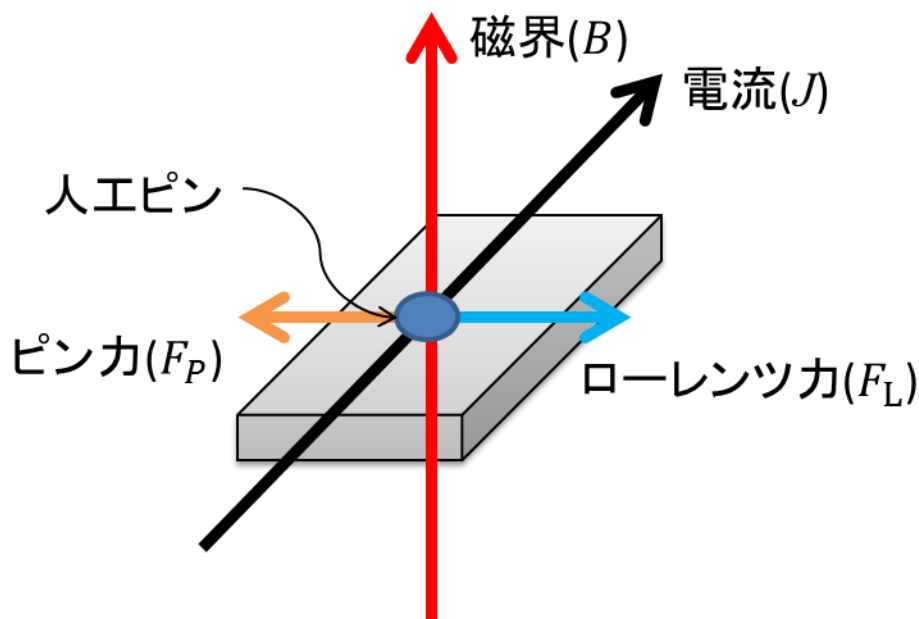


図 1.3 c 軸方向に磁界をかけた場合の磁束ピンニングの図

1.8 人工ピン

人工ピンとは超伝導体内部に人工的に作製された欠陥(超伝導状態にならない部分)のことである。欠陥が人工ピンとして機能するには、超伝導状態に転移せず、超伝導体の結晶を傷つけないという条件がある。条件を満たすものとして BaMO_x (BMO、M:金属)という化合物が用いられている。REBCO 超伝導体の人工ピンとしてはジルコニウム(Zr)を用いた BaZrO_3 (BZO)、スズ(Sn)を用いた BaSnO_3 (BSO) などがあり、これらを成膜過程で生成させることで人工ピンを導入する。また、ハフニウム(Hf)を用いた BaHfO_3 (BHO)は、BZO、BSO と比較して膜厚に対する J_c 特性が高く、従来の人工ピンに代わるものとして期待されている。また、図 1.4 と図 1.5 に人工ピンを導入した $J_c - B$ 特性および $F_p - B$ 特性を示す。この結果から分かるように磁場中での J_c 特性及びピン力が大きく改善されていることが分かる [1]。今回の試料は PLD (Pulsed Laser Deposition) 法で成膜されていることから、ピンが c 軸方向の棒状(ナノロッド)に成長する。この結果 c 軸方向のピン力が大幅に向上されることで、磁束をピン止めし超伝導線材の J_c の改善に寄与する。

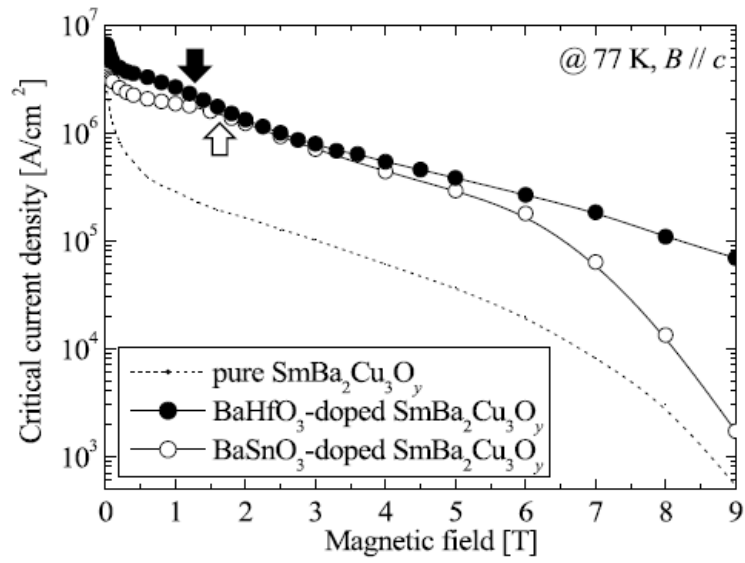


図 1.4 77 K での c 軸方向に磁界を加えた時の pure-SmBCO と BHO 添加 SmBCO と BSO 添加 SmBCO の $J_c - B$ 特性[1]

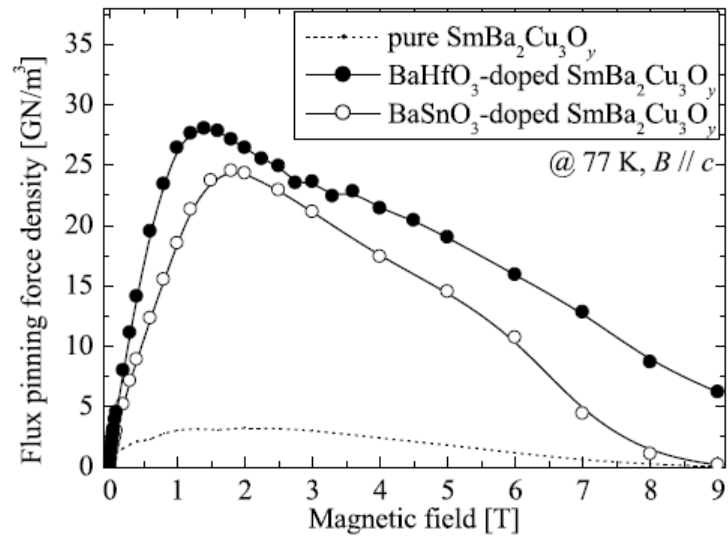


図 1.5 77 K での c 軸方向に磁界を加えた時の pure-SmBCO と BHO 添加 SmBCO と BSO 添加 SmBCO の $F_p - B$ 特性[1]

1.9 縦磁界効果

一般的な磁界は、自己磁界を含めて電流方向に対して垂直となる。これを垂直磁界もしくは横磁界と呼ぶが、この場合は臨界電流密度 J_c は磁界の増加とともに減少する。一方で、超伝導体を流れる電流と磁界が平行の場合を縦磁界と呼ぶが、この場合は、横磁界の場合と比べると J_c が上昇することが分かっている[2]。図 1.6 に超伝導体に電流と縦磁界、横磁界をそれぞれ加えた様子を示す。さらに横磁界での磁束線に働くローレンツ力も縦磁界下では、実質ゼロとなる。したがって、 \mathbf{E} を誘導起電力、 \mathbf{B} を磁束密度、 \mathbf{v} を磁束線の運動としたとき、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、磁束線の運動が異なると考えられるため成り立たない。これらの現象を総称して縦磁界効果と呼ぶ。図 1.7 に縦磁界と横磁界それぞれの $J_c - B$ 特性を示すが、横磁界に比べて縦磁界の臨界電流密度が大きく改善していることがわかる。さらにこの結果から人工ピンを添加することにより、縦磁界の J_c が大きく増加しており、人工ピンの有効性が示される[3]。

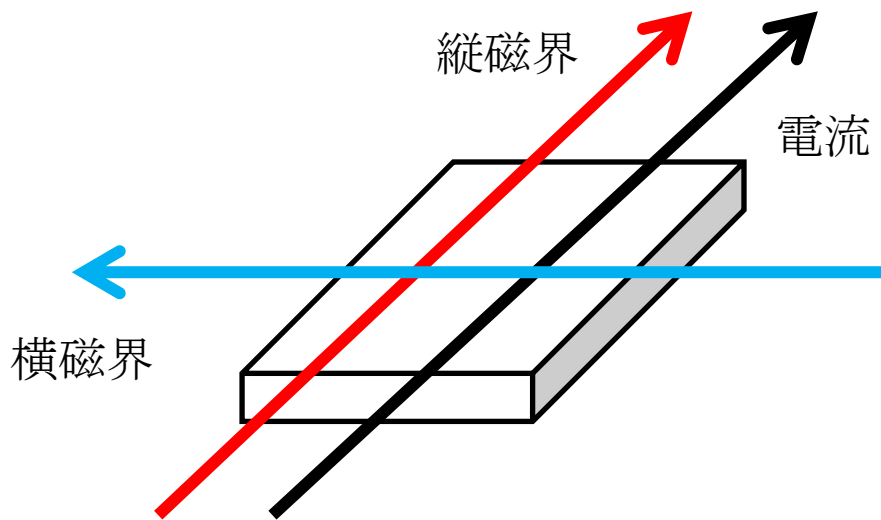


図 1.6 超伝導体に縦磁界と横磁界をかけた図

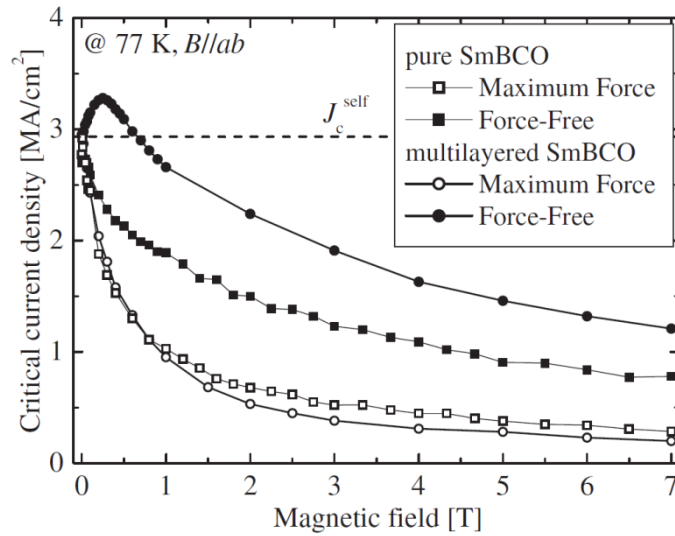


図 1.7 77 K での pure-SmBCO と多層膜 SmBCO それぞれに横磁界と縦磁界を加えた場合の $J_c - B$ 特性[3]

このように Lorentz 力が加わらない磁束線と人工ピンの相互作用についての明確な機構解明はまだ行われていないが、磁束線が超伝導体内を侵入するに回転トルクが働くという意見もある。図 1.8 に縦磁界下での磁束線の歪みと force-free トルクによる磁束線の動きを示す[4]。自己磁界の影響で、磁束線は斜め方向から超伝導体に侵入する。ただし、超伝導体中心部では磁束線は電流に対して平行になるため、斜めに侵入した磁束線は図 1.8 のように扇を閉じるような回転運動を起こすと予想されている。したがって、この回転運動を止めるために人工ピンが作用するものと考えられる。

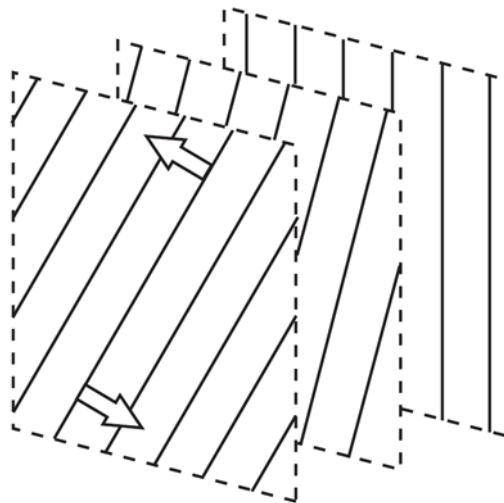


図 1.8 縦磁界下での磁束線の歪みと force-free トルクによる磁束線の動き[4]

1.10 本研究の目的

本研究では人工ピンの導入が比較的容易な Sm を用いた REBCO の多層膜構造試料に注目し、縦磁界下での臨界電流密度を直流四端子法を用いて評価した。これらの実験結果と金属基板を用いたコート線材の結果と比較し、縦磁界下での J_c 特性に有効な人工ピンの添加量と、多層膜構造との関係について調べた。

第2章 実験

2.1 試料諸元

本研究に用いた試料は超伝導薄膜の基板としてLaAlO₃単結晶基板とIBAD (Ion Beam Assisted Deposition)法を用いて作製された金属基板上に中間層としてMgO層を成膜した金属基板を用いた。中間層は基板と超伝導体が反応することを抑制し、絶縁を行うために必要となる。その基板上にPLD(Pulse Laser Deposition)法を用いSmBa₂Cu₃O_{7- δ} 超伝導を製膜した。基板の配向性では単結晶基板が優れているが金属基板の方が製品化する際の加工性に優れており、金属基板でも縦磁界効果が観測できた場合実用化が容易なため今回二種類の基板を用いた。ピンの導入としては、ピンはBaHfO₃でターゲット交換用としてピンを導入した。試料は全て多層膜構造である。各試料のブリッジ幅およびブリッジ長、厚さ、自己磁場における J_c を表にまとめた。本試料は名古屋大学大学院エネルギーデバイス工学研究グループの吉田隆教授らによって作製され、提供して頂いた。試料名称が長いので論文中では表 2.1の上から順に no1~no4 と試料番号を付けた。

表 2.1 試料諸元

Specimen	Bridge width [μm]	Bridge length [mm]	Thickness [μm]	Layer number	BHO [vol. %]
Smxo-bho-ml-45① (no1)	100	1.0	0.40	32	4.0
Smxo-bho-ml-45② (no2)	100	1.0	0.40	32	4.0
Smxo-bho-ml-48 (no3)	100	1.0	0.40	32	7.0
Multi-15 (no4)	100	1.0	0.30	48	4.4

2.2 試料加工

2.2.1 ブリッジ加工

試料は全てマイクロブリッジ加工を行っている。マイクロブリッジ加工を行うことで超伝導層の一部分の面積を小さくし、少しの電流で臨界電流の測定を可能としている。マイクロブリッジ加工を行わない場合には大電流を流すことができる設備が実験に必要となる。加工した超伝導体で臨界電流を測定し臨界電流密度に変換することで、大電流設備を使用

せずに実験を行うことができる。また、加工を行うことで電流端子部でのジュール発熱を抑えた。図 2.1 にブリッジ加工をした超伝導体を示す、ブリッジ長とブリッジ幅は今回用いた試料ではそれぞれ 1 mm と 100 μm となっている。

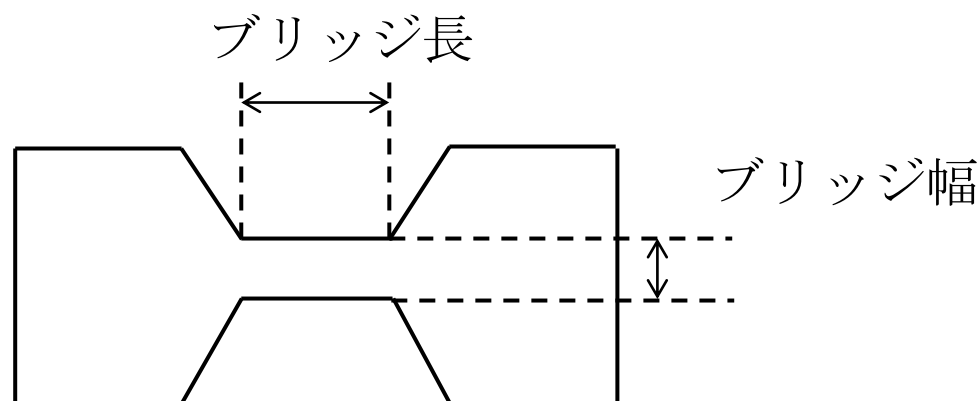


図 2.1 超伝導体のマイクロブリッジ加工図

2.3 測定方法

2.3.1 直流四端子法

今回の測定では $I-V$ 測定方法として直流四端子法を用いた。図 2.3 に直流四端子法の回路図を示す。 R_s を試料の抵抗、 R_A および R_V を電流計および電圧計の内部抵抗とする。 R_1, R_2, R_3, R_4 が各端子の接触抵抗である。また、直流四端子法に似た測定方法で直流二端子法というものがある。図 2.2 に直流二端子法の回路図を示す。こちらの測定方法では、電圧の測定に影響を与える抵抗は R_A, R_1, R_2 となる。これら 3 つの抵抗の和が試料抵抗 R_s よりも十分に小さい場合は電圧の測定に影響することはないが、 R_s は非常に小さい値であるので、直流二端子法による測定では試料電圧を測定することが困難である。また、直流四端子法の回路では、試料電圧に影響を与える抵抗は R_V, R_3, R_4 となるが、これらの値は試料抵抗と比較すると大きな値であり、影響を無視することができる。したがって、今回の実験では直流四端子法を用いて測定を行った。

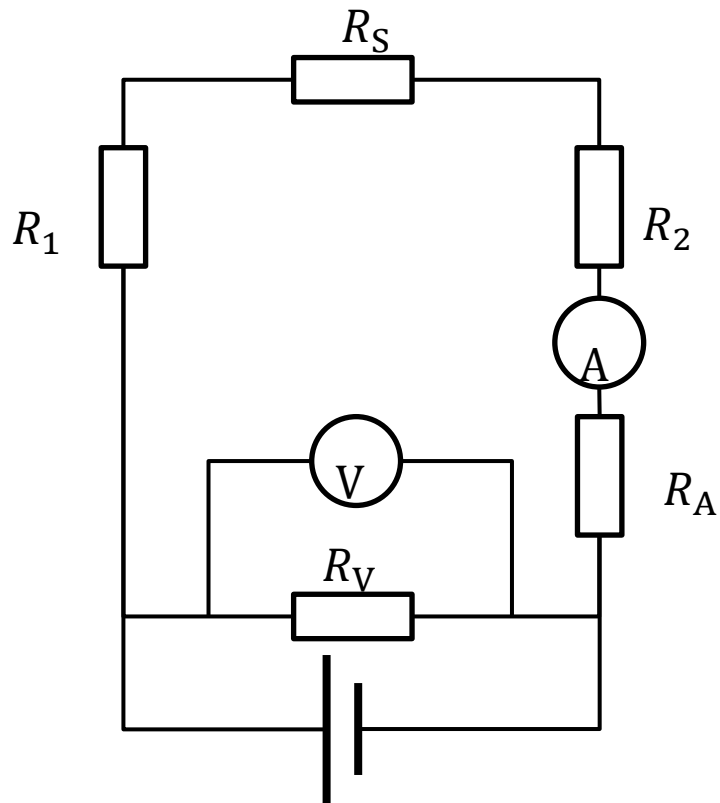


図 2.2 直流二端子法の回路図

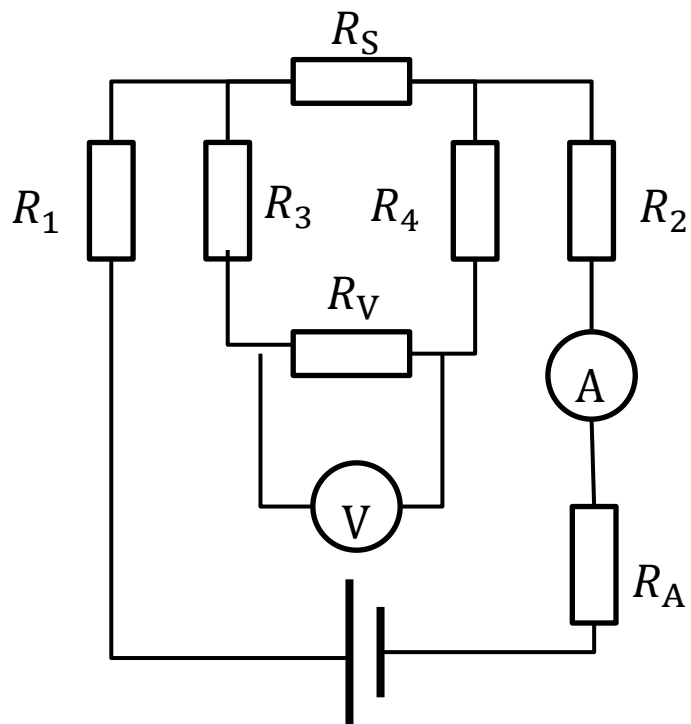


図 2.3 直流四端子法の回路図

2.3.2 端子の接続

各試料の $I-V$ 特性を四端子法で測定したが、端子の接続で試料の電流端子と電圧端子の取り付けには接触抵抗を抑えるために銀ペーストを用いた接触方法を採用した。他の接触方法としてはハンダ付けやインジウムなどを用いた接触方法がある。しかし、これらの方法では試料に接着する際、力を加え押し付けるので試料が圧力で壊れてしまう可能性がある。そこで今回は銀ペーストを用いた方法で接着を行った。銀ペーストによる接触方法のメリットとしては熱や圧力に弱い試料の接触も可能である点である。

2.3.3 測定回路

本実験の測定回路を図 2.4 に示す。この回路では先ほど説明を行った直流四端子法を用いて測定を行っている。外部磁界は超伝導コイルにより試料に加えられる。磁界の大きさは超伝導コイル用電源の電流値を変えることで変化させることができる。超伝導コイル電源と超伝導試料用電源の電流値を確認するために、各電源と超伝導コイル間と各電源と超伝導試料間にシャント抵抗を直列に接続している。接続したシャント抵抗に発生した電圧を測定することでシャント抵抗の抵抗値とオームの法則よりシャント抵抗に流れる電流値を求める。各電源装置と電圧計は GPIB を用い測定用 PC と接続され、測定データを記録する。また、今回の実験では直流四端子法で測定することで、電流端子と電圧端子の接触抵抗の影響を抑えている。しかし、超伝導試料の電圧の測定を行うナノボルトメーターには測定できるデータの下限值が存在する。下限値以下のデータは正確に記録されずノイズとして記録してしまう可能性がある。今回使用した測定用 PC ではノイズによる誤差を防ぐために電流を流す前の電圧値を読み取り、電流を流した後の電圧値との差を計算し、この値を電流が流れているときの電圧とした。

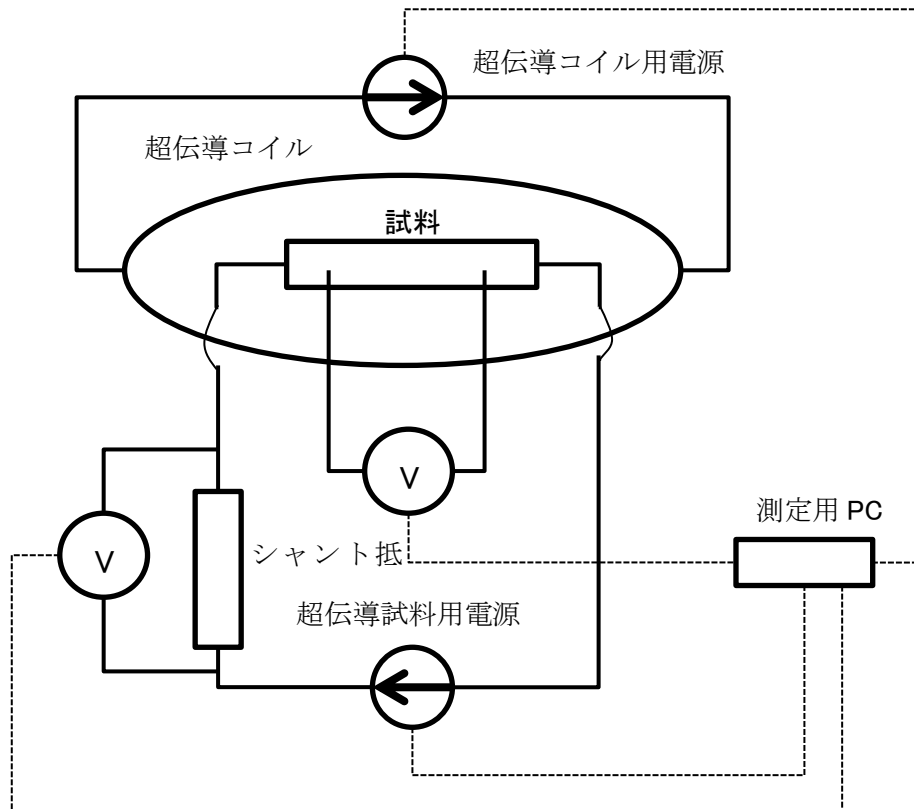


図 2.4 測定回路図

第3章 実験結果及び考察

各試料の $J_c - B$ 特性を図 3.1 に示す。なお、no4 の試料は、縦磁界測定後、室温までの昇温の際にの水分除去が不十分のために、試料が劣化し、横磁界の測定は不可となった。no4 を除く no1 と no3 の試料では縦磁界下において自己磁界での J_c を超える値が観測された。また、横磁界の J_c に比べると縦磁界の J_c は増加していることがわかる。一方で、no4 の試料では縦磁界下においては自己磁界での J_c を超える値(J_c ピーク)は観測されなかった。この原因は no4 の試料だけが金属基板が影響していると用考えられる。すなわち、準備した多層膜構造の試料では、基板の違いによる結晶の乱れの影響を顕著に受けた可能性がある。

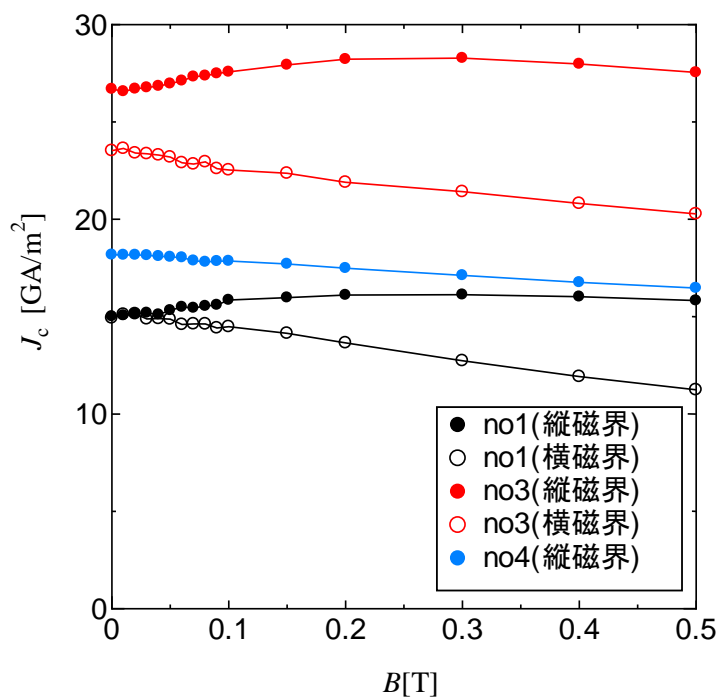


図 3.1 各試料の $J_c - B$ 特性

次に、自己磁界の J_c を超えた no1 と no2 の試料の縦磁界の J_c に注目する。図 3.2 に自己磁界で規格化した J_c の増加率を示す。この結果から BHO ピンの添加量が多いほど縦磁界下の J_c は大きくなっていることがわかる。したがって、今回添加した 4.0~7.0 vol.%の範囲内では、添加量を大きくするほど縦磁界下での J_c が大きくなっており、人工ピンがこの範囲内では有効に作用することがわかる。ただし、さらなる人工ピン添加が有効であるかは不明であることから、さらなる調査が必要である。

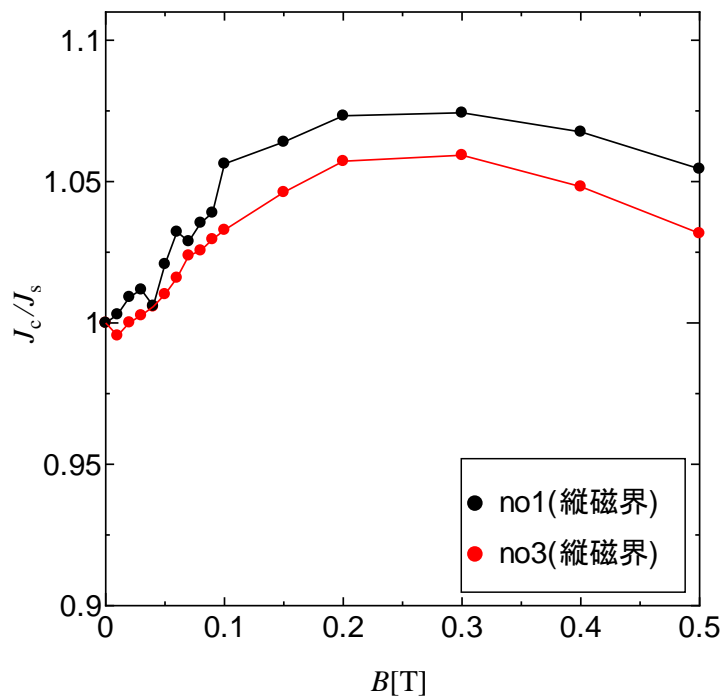


図 3.2 各試料の自己磁界で規格化した縦磁界での J_c 上昇率

一方で、自己磁界から磁界の増加とともに J_c が減少した金属基板の no4 についてここで考察する。市販されているコート線材は IBAD 基板が用いられているので、ここではその実験結果と比較を行う。図 3.3 に IBAD 基板上に中間層を介して $GdBa_2Cu_3O_y$ が作製されたコート線材の測定結果を示す。比較試料の超伝導層の膜厚が異なるが、基本的に磁界の増加とともに J_c が減少していることがわかる。したがって、no4 は多層膜構造で作製されているが、この金属基板の影響を受けたために、電流路の直線性が低下したものと考えられる。ただし、図 3.4 に異なる膜厚の $SmBa_2Cu_3O_y$ の縦磁界下での J_c 特性を示す[2]が、金属基板でも膜厚を変化させると、自己磁界を超える J_c が得られることも報告されており、今後この点に関して詳細に議論する必要がある[6]。

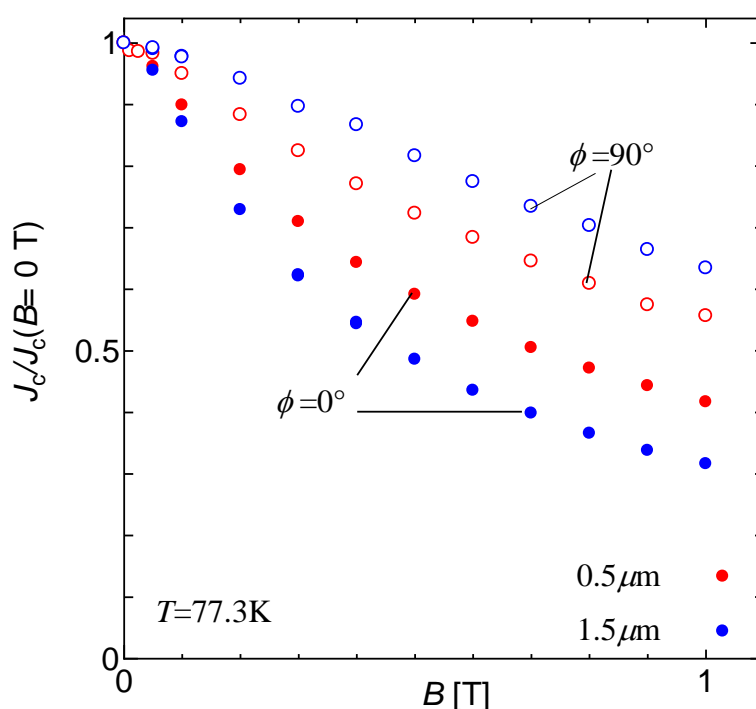


図 3.3 ハステロイ基盤を用いた異なる膜厚での $GdBa_2Cu_3O_y$ の横磁界下と縦磁界下での J_c 上昇率[5]

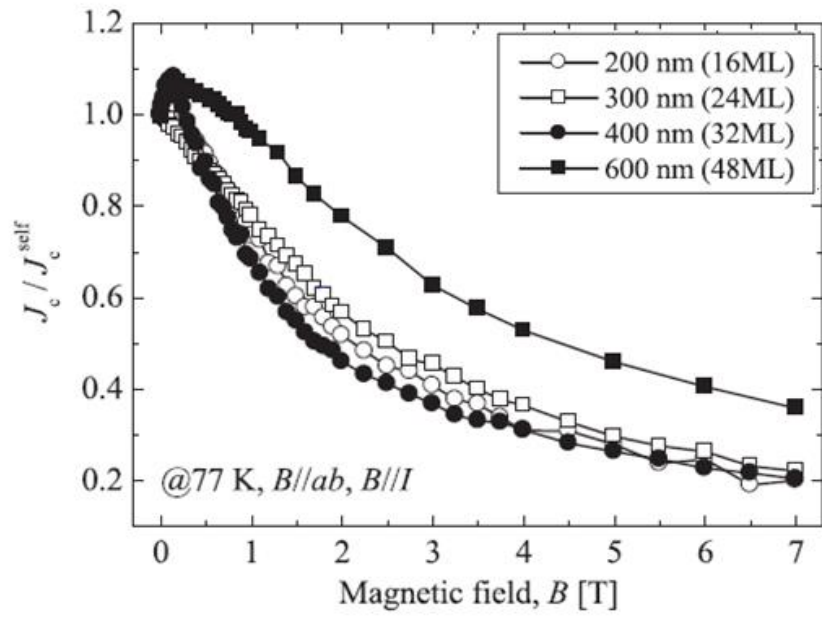


図 3.4 異なる膜厚のSmBa₂Cu₃O_yの縦磁界下での J_c 上昇率[2]

第4章 まとめ

本研究では BaHfO₃ を添加した多層膜構造 SmBa₂Cu₃O_y を用いた縦磁界下での臨界電流密度特を直流四端子法を用いて測定した。得られた結果から、今回添加した 4.0~7.0 vol.% の範囲内では縦磁界下での J_c は人工ピンの添加量の増加に伴い大きくなった。したがって、この添加量の範囲では、電流路の直進性は保たれ、高い値が得られることが分かった。ただし、最適添加量は明らかにされていない。また、金属基板を用いた多層膜コート線材においては、自己磁界を超える J_c は得られなかった。したがって、金属基板の例えば単結晶基板に比べて低い配向性、もしくは超伝導層の厚さ等が影響して、どの点が縦磁界下での高い J_c の抑制になっているのかを明確にする必要がある。

謝辞

本研究を行うに当たって多くのご指導をしていただいた九州工業大学情報工学部電子情報工学科の木内勝准教授，小田部荘司教授に深く感謝いたします。また、超伝導試料を提供していただいた名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻エネルギーデバイス工学研究グループの吉田隆教授に深く感謝いたします。最後に一年間共に研究を行ってきた木内研究室、小田部研究室の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] Tsuruta A, Yoshida Y, Ichino Y, Ichinose A, Matsumoto K and Awaji S 2014 Supercond. Sci. Technol. 27 065001
- [2] Sugihara A, Ichino Y, Yoshida Y, Superconductor Science and Technology 28 (2015) 104004
- [3] Tsuruta A, Watanabe S, Ichino Y and Yoshida Y 2014 JapanJ. Appl. Phys. 53 078003
- [4] 松下 照男:「磁束ピンニングと電磁現象」, 産業図書, 1994 年
- [5] 「RE 系コート線材の縦磁界下での臨界電流密度特性」 田辺健次郎
- [6] 島崎 直人, 杉原 和樹, 一野 裕亮, 吉田 隆 : 低温工学 Vol.92 (2015).