

**Gd 系超伝導線材の作製方法の違いが
縦磁界下での臨界電流密度へ与える影響に関する研究**

北島 工大

平成 25 年 2 月 25 日

電子情報工学科

第1章 序章

1.1 はじめに

超伝導は、1911年にオランダの K. Onnes によって発見された。彼は水銀の液体ヘリウムによる冷却実験中に、4.2 K で水銀の電気抵抗が突然測定不能になる程小さくなる現象を発見し、その現象を超伝導状態と名付けた。このように、ある極低温領域で超伝導状態を示す物質を超伝導体と呼び、極低温以外の電気抵抗を持つような状態を常伝導状態と言う。この特性から様々な電子機器への応用が検討されたが、自身の磁場で超伝導状態が壊れてしまうといった性質の為、応用が難しかった。1933年にはドイツの W. Meissner と R. Ochsenfeld らが、超伝導体に完全反磁性があることを明らかにした (マイスナー効果)。1957年にアメリカの J. Bardeen と L. N. Cooper と J. R. Shrieffer らによって BCS 理論が提唱され、理論的に超伝導の仕組みについて解明された。彼らの理論では、常伝導状態から超伝導状態に転移する時の温度 (臨界温度: T_c) は 30 K を超えないと考えられていた。しかし、1986年にドイツの J. G. Bednorz と K. A. Muller によって、銅を含む酸化物超伝導体 ($\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$) が 30 K を超える臨界温度を示すという報告がされ、それから世界各国で一斉に酸化物超伝導体の研究がなされるようになった。そしてわずか 10 カ月程で、液体窒素の温度 (77.3 K) を超えるイットリウム系の銅酸化物超伝導体の臨界温度が 92 K に達し、BCS 理論の枠組を超えた。他にも 1 年後にはビスマスやテルビウムを用いた、高い臨界温度を示す超伝導体が発見された。このような臨界温度が高い超伝導体のことを、高温超伝導体と呼ばれる。高温超伝導体は、臨界温度が液体窒素 (77.3 K) より高く、液体ヘリウム (4.2 K) と比べて安価で超伝導状態が作り出せる為、実用化に向けての可能性が高まった。今日でも高温超伝導体の研究は進められており、超伝導ケーブルやリニアモーターカー等の応用機器の実用化に向けた研究がなされている状態である [1]。

1.2 銅酸化物超伝導体

超伝導体の結晶内に CuO_2 面を持つ超伝導体を銅酸化物超伝導体と呼ぶ。銅酸化物超伝導体は臨界温度が高い為、工学的な応用に期待が寄せられている。銅酸化物超伝導体の中でも $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 超伝導体(RE: レアアース(希土類))やBi系超伝導体が注目を集めている。これらの超伝導体は超伝導電流が流れると考えられている CuO_2 面と CuO_2 面に超伝導電子を供給するブロック層から構成されている。そのため、銅酸化物超伝導体は CuO_2 面に平行な方向には、電流が流れやすいが、 CuO_2 面に垂直な方向には電流が流れにくいという構造上からなる異方性を持つ。すぐれた特性を得るためには CuO_2 面を綺麗にそろえるように配向しなければならない。綺麗な配向を得るために様々な作製法が研究されている。Bi系超伝導体は c 軸方向に比べて ab 面に広がった結晶が容易に得られることが知られている。また、 CuO_2 面に沿ってへき開しやすい為、圧延等の機械的な加工で容易に配向が得られる。しかし、超伝導相と正常相のエネルギー差である凝縮エネルギーが小さく、ローレンツ力による磁束の動きを止める力であるピンニング力が弱いという欠点を持つため、磁界の影響を受けやすい。高温、高磁界ではその影響が大きく、電気抵抗なしで流せる最大の電流密度 J_c (臨界電流密度)が自己磁界中と比べると大幅に低下してしまう。一方でRE系超伝導体はBi超伝導体と違い、機械的な加工では結晶配向しない。以前は作成コストが高く、長尺化が困難だったが、近年では作製技術も進化し、長尺化、低コスト化が進んでいる[2]。

1.3 RE系超伝導体

RE系超伝導体の研究は $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 超伝導体(YBCO)から始まった。YBCOは T_c が約90 Kと高く、液体窒素を冷媒に使用することができる。銅酸化物超伝導体であるBi系超伝導体と比べると、高磁界下で高い J_c を持つ為、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。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 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (GdBCO)超伝導体は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系超伝導線材の作製の際は、配向基盤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 合金の基盤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載せる。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。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んでおり、より精度の高い（配向が揃っている）コート線材の作製が可能となっている。しかし、作製コストがかかりすぎることや、銅酸化物超伝導体の特徴である大きな異方性を改善することが課題である[3]。

1.4 RABiTS 法による超伝導層の成膜

RABiTS(Rolling Assisted Biaxially Textured Substrates)法は Ni 基材を薄く圧延して配向を持たせた基板を作製し、その上に中間層を成長、超伝導層を成膜することで配向性の高い線材を作製する方法である。現在では基材に Ni だけでなく、W や Cr を添加した合金や、高強度基板とのクラッド構造にする方法を用いている。これは Ni のみを基板に用いた場合は、基板の強度が低く、超伝導層成膜時の膜面に歪みを与える可能性がある為である[3]。

1.5 IBAD 法による二軸配向

IBAD(Ion Beam Assisted Deposition)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板に特定方位から同時照射することにより、薄膜を成長させる方法である。この技術はフジクラで開発されたもので、成長途中の薄膜に対して特定方向からイオンビームを照射することで、薄膜を構成する結晶粒の結晶軸がそろった二軸配向の中間層膜を実現することができる。IBAD 基板を用いた 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することができ、再現性にも優れている為、近年よく研究が進められている方法の 1 つである。一方では、高コストであることや成膜に時間がかかるという問題も抱えている。近年では配向性が悪くなるとされていた高速で成膜された IBAD 中間層であっても、その上に PLD 法で高速に CeO_2 層を成膜することで、短時間で高配向の中間層が実現できる手法が発見された[4][5]。

1.6 PLD 法による超伝導層の成膜

PLD(Pulse Laser Deposition)法は真空チャンバ内の超伝導バルクターゲットにパルスレーザーを断続的に照射し、その表面を急激に加熱して光化学反応を起こさせることで、その成分を爆発的に気化させ、飛散した分子を超伝導バルクターゲットと対向して配置した基板の上に堆積させる方法である。配向基板を用いることで二軸配向超伝導膜を成膜する[4]。

1.7 磁束ピンニング

超伝導体には第一種超伝導体と第二種超伝導体がある。第一種超伝導体は、磁界をかけていくと、超伝導状態が壊れる磁界(臨界磁界: B_c)以下の時は、マイスナー効果により、完全反磁性を示す。しかし、磁界が B_c 以上になると、超伝導状態が壊れてすぐに常伝導状態に遷移する。第二種超伝導体は、磁界を B_{c1} 以上かけてもすぐには常伝導状態にはならず、超伝導状態と常伝導状態が混ざった混合状態となる。第二種超伝導体は、混合状態でさらに磁界をかけると、 B_{c2} 以上で常伝導状態になる。この時の混合状態になる時の磁界を下部臨界磁界 B_{c1} 、常伝導状態になる時の磁界を上部臨界磁界 B_{c2} と呼ぶ。第二種超伝導体の B_{c2} は第一種超伝導体の B_c よりもかなり大きいので、工学的にも第二種超伝導体が有用である。このように超伝導体は、磁界と温度によって抵抗がゼロになるが、流せる電流量は制限なしという訳ではない。ここで、電気抵抗なしで流せる最大の電流を I_c 、電気抵抗なしで流せる最大の電流密度を J_c と呼ぶ。超伝導体は、超伝導状態でも過剰な電流を流すと電気抵抗が発生する。 J_c は超伝導線材を評価するに当たって重要なパラメータであり、これを決定しているのが磁束ピンニングである。超伝導体内に流れる電流を J 、超伝導体内に侵入している磁束密度を B とすると、磁束線には単位面積当たり、 $F_L = J \times B$ でローレンツ力が働いている。ローレンツ力により磁束が動くと、誘導起電力により抵抗が発生するので、磁束線が動かないようにローレンツ力と逆方向に磁束を止めようとするピン力密度 (F_p) が働く。この作用を磁束ピンニングと呼ぶ。よって、 $J = J_c$ の場合、ローレンツ力とピン力密度は釣り合うので、

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

と表せる。 J_c を増加させるには、 F_p を増加させればよい[6]。

1.8 縦磁界効果

図 1.1 に示すように超伝導体に電流を磁界に対して平行に流すと、磁界と垂直にして電流を流した場合と比べて、様々な奇異な現象が起こることが知られている。これらの現象を縦磁界効果という。また、これに対して通常の電流と磁界が垂直な場合を横磁界という。

まず、臨界電流密度が通常の横磁界下と比べて大幅に増加する。図 1.2 に Ti-Nb 超伝導合金の臨界電流密度特性を示す[7]。下が通常の横磁界の場合で、上が縦磁界の状態を表す。このように縦磁界は、通常の横磁界と比べて大幅な臨界電流密度の増加が観測されている。また、図 1.3 は Nb_3Sn 薄膜試料に中性子をピンとして照射させた時の臨界電流特性を示す[8]。白丸の部分が通常の横磁界の場合で黒丸の部分が縦磁界の状態を表す。中性子の照射量を増加させると、横磁界と縦磁界の両方の場合において臨界電流が増加しているため、臨界電流はピンニングの強さに依存していることがわかる。また、電流によって縦方向の磁化が正になる。この効果を常磁性効果という。横磁界は、1.7 節で述べたように $\mathbf{J} = \mathbf{J}_c$ の時に磁束線に働くローレンツ力とピン力密度が釣り合うことで磁束ピンニングが行われる。しかし、縦磁界は磁束線に対してローレンツ力が働かないので、大電流を流すことができる。電界は磁束密度にほぼ平行なので、磁束線の運動と電磁現象を結び付ける $\mathbf{E} = \mathbf{B} \times \mathbf{v}$ 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[6]。

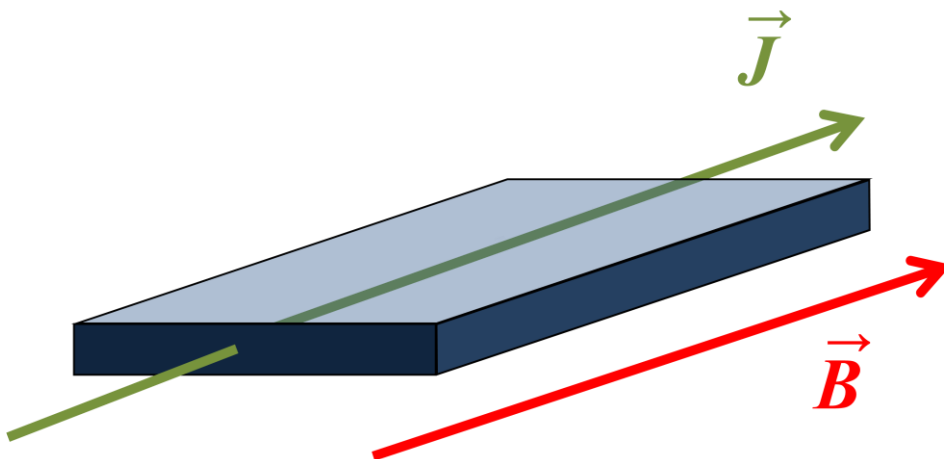


図 1.1: 超伝導体に磁界に対して電流を平行に流した状態

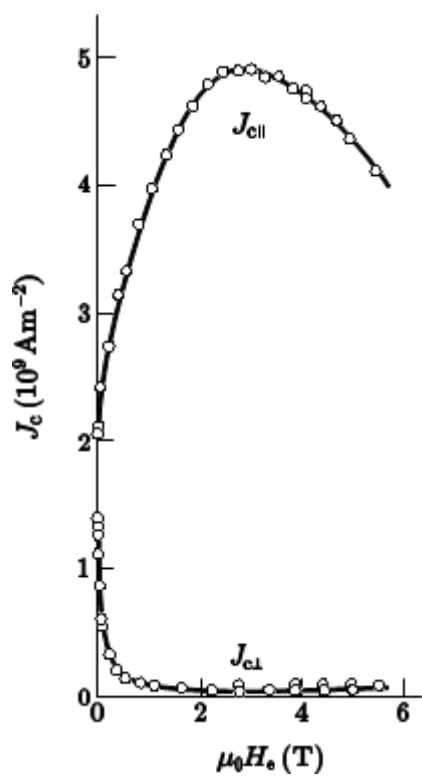


図 1.2:Ti-Nb 超伝導合金の臨界電流密度の磁化依存性[7]

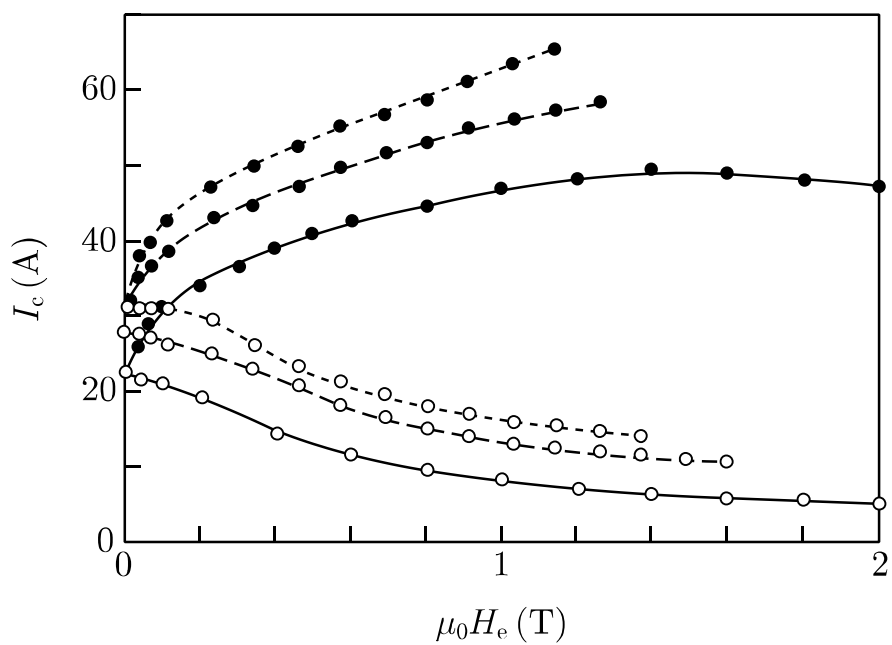


図 1.3: Nb_3Sn 薄膜試料に中性子を照射した時の臨界電流特性[8]

1.9 本研究の目的

前述した通り、RE系コート線材の J_c の向上のためには高い精度の2軸配向を得る必要がある。その為、コート線材の作製方法に関する様々な研究が行われてきた。現在のコート線材の作製方法の研究も進み、Pulse Laser Deposition(PLD)法や、Ion Beam Assisted Deposition (IBAD)法などの技術により、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、面内の電流方向はほぼ均一化されていると考えられる。このことから、RE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。

今回、2つの作製法で作られた線材を様々な角度から磁界を印加することで、直流四端子法による臨界電流密度特性を測定し、作製法の違いが縦磁界下における臨界電流密度へ与える影響を調べ、議論する。

第2章 実験

2.1 試料

本研究で用いた試料は住友電気工業株式会社(住友)から提供して頂いた Ni クラッド基板 PLD(Pulse Laser Deposition)法 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (GdBCO) コート線材および、株式会社フジクラ (フジクラ) から購入した Hastelloy 基板 PLD 法 GdBCO コート線材である。試料諸元は後述する。

2.1.1 試料の作製方法

RE 系超伝導体は結晶構造が 3 次元的であり、機械的な応力ではほとんど配向しないため、本来の高い特性を得るには、結晶の向きをそろえる結晶粒配向制御が必要となる。それも、一軸配向では不十分で面内配向までを含めた二軸配向を実現する必要がある。その為、二軸配向した中間層の上に超伝導層を成膜することで、二軸配向した超伝導層を得る。住友電気工業株式会社から提供して頂いた試料は、二軸配向させた Ni クラッド基板上に PLD 法により中間層として Y_2O_3 、YSZ、 CeO_2 の順に積層し、その上に PLD 法によって GdBCO を超伝導層として成膜した。この作製法を総称して RABiTS(Rolling Assisted Biaxially Textured Substrates)法という。

また、フジクラ株式会社から提供して頂いた試料は、Hastelloy 基板に IBAD 法により中間層として Al_2O_3 、 Y_2O_3 、MGO、 CeO_2 の順に積層し、その上に PLD 法によって GdBCO を超伝導として成膜した。超伝導層の厚さは住友の試料は $1.56 \mu\text{m}$ 、フジクラの試料は $1.50 \mu\text{m}$ である。それぞれの試料の緒元を表 2.1 に、概略図を図 2.1、図 2.2 に示す。なお、住友電気工業株式会社から提供して頂いた試料は Sumitomo、フジクラ株式会社から提供して頂いた試料は Fujikura とする。

表 2.1: 試料緒元

Sample	Thickness d (μm)	T_c (K)
Sumitomo	1.56	91.3
Fujikura	1.50	92.4

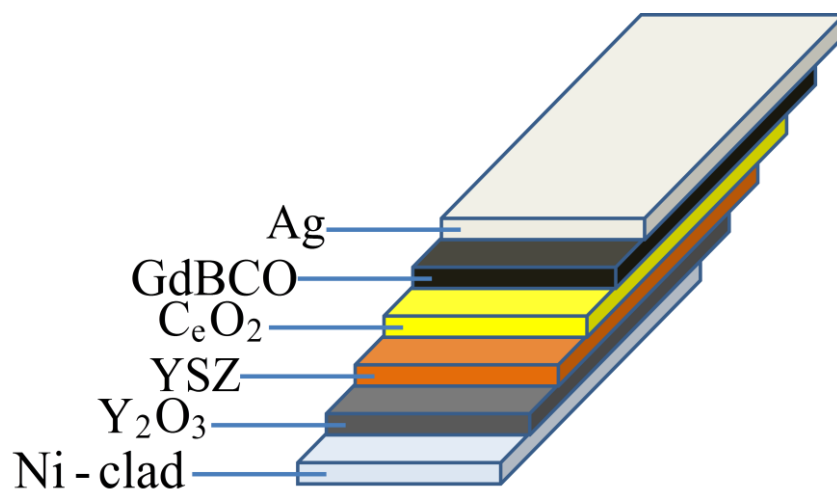


図 2.1:GdBCO コート線材の構造 (住友電機工業株式会社)

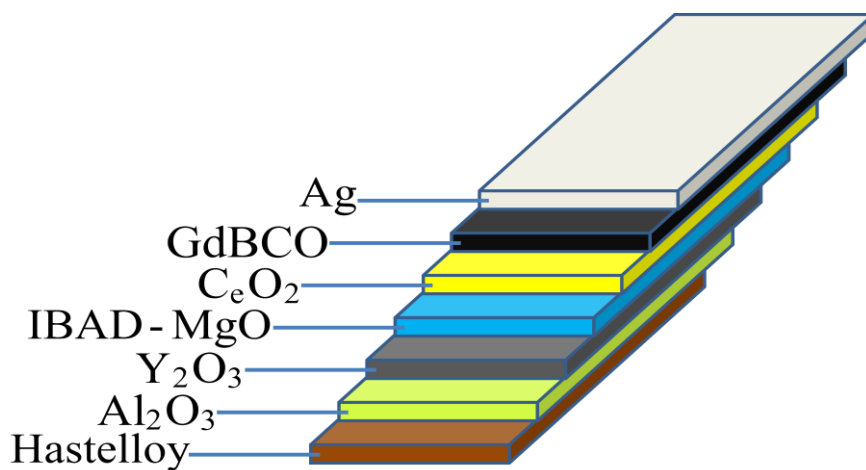


図 2.2:GdBCO コート線材の構造 (株式会社フジクラ)

2.2 測定および評価方法

オフセット法

V - I 特性曲線のある部分から接線を引き、これが電圧がゼロとなる点の電流値をもって臨界電流密度を求める方法である。図 2.3 にオフセット法の概要を示す。

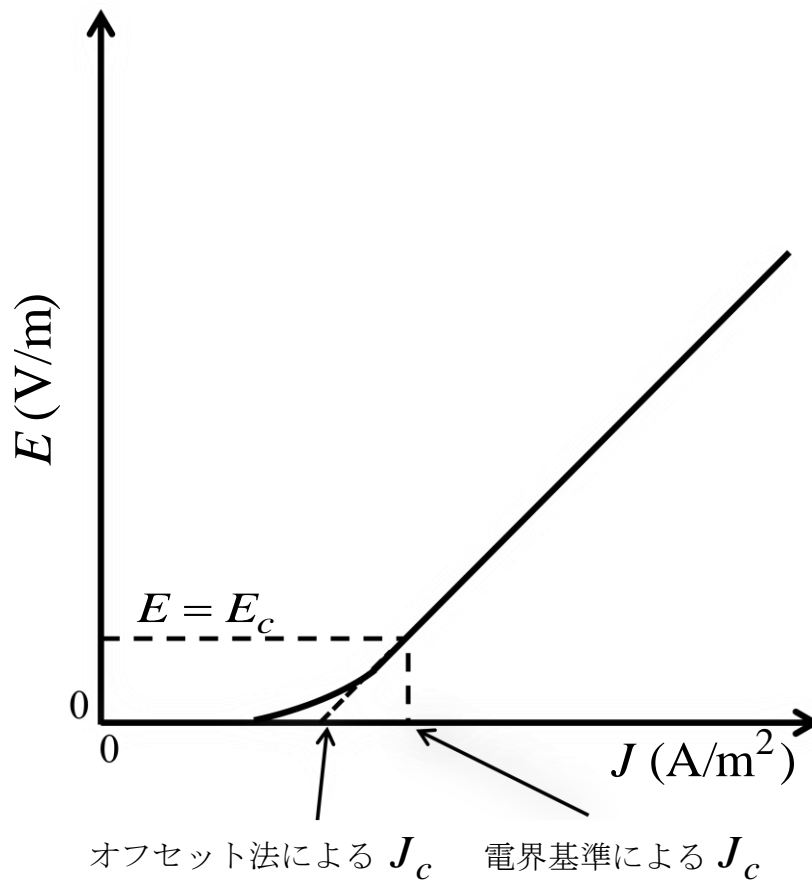


図 2.3: V - I 特性と各種基準による臨界電流の決定法

n 値の測定方法

ゼロでない値の電流密度から急速に V - I 特性曲線が立ち上がるような強い非線形性がある場合、その V - I 特性を

$$V \propto I^n \quad (2.1)$$

と表し、この指数 n を n 値と呼ぶ。 n 値が大きい方が、電流を少し小さくすることによって発生電圧を急激にさげることができるため、工学的に優れていると

される。電界基準による臨界電流密度を J_0 として $V-I$ 特性曲線に接線を引いた時の、オフセット法による臨界電流密度 J'_c は

$$J'_c = \left(1 - \frac{1}{n}\right) J_0 \quad (2.2)$$

で与えられる。この式を変形すると

$$n = \frac{J_0}{J_0 - J'_c} \quad (2.3)$$

と表せる。

本研究では PLD 法で作製された GdBCO コート線材に対し、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 の評価を行った。 J'_c は、 $E = 1.0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$ の電界基準を用いて、 n 値は $E_c = 2.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-3} \text{ V/m}$ の範囲で決定した。印加磁界は $0 \sim 1 \text{ T}$ の範囲で、測定は液体窒素中で行われた。なお、試料はマイクロブリッジ形状に加工することにより、少ない電流量と線材全体に対して均一な印加磁界の下で測定することを可能にした。少ない電流量にしなければならない理由は、電気抵抗なしで流せる最大の電流(臨界電流: I_c)が高い試料において、装置の制約等により $V-I$ 特性の測定が非常に困難になるためである。実際の概略図を図 2.4、図 2.5 に、加工した試料のスケールを図 2.6 に示す。図 2.4 と図 2.5 において、電流は試料の長さ方向に流している。図 2.4 は、磁場の角度を電流方向に対して垂直である c 軸からの角度を θ と置く。 $\theta = 0^\circ$ の時は電流に対して垂直な c 軸に磁界がかかり、 $\theta = 90^\circ$ の時は、試料の広い面内(ab 面内)でかつ電流に対して垂直に磁界がかかる。図 2.5 では、 ab 面内で電流に対して垂直な方向からの角度を φ とした。 $\varphi = 0^\circ$ の時は、 ab 面内で電流と垂直に磁界がかかり(縦磁界状態)、 $\varphi = 90^\circ$ の時は、電流と磁界が平行になるように磁界をかける。実際は自己磁界により、電流と磁界は平行にならない。ブリッジ加工や直流四端子法による測定の方法については以下に示す。

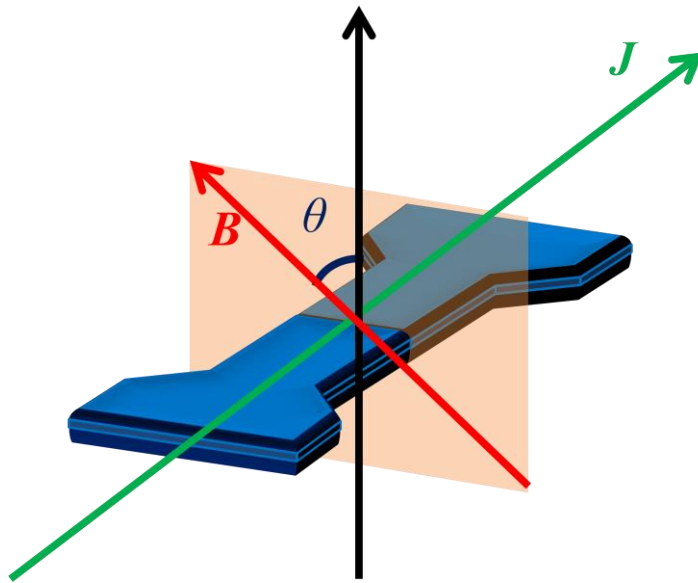


図 2.4:c 軸方向から磁界をかける時の概略図

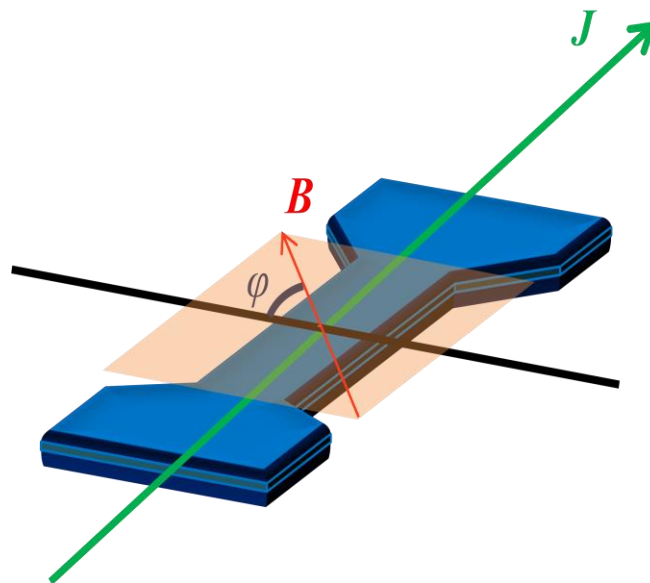


図 2.5:ab 面において電流に対して垂直な方向から磁界をかける時の概略図

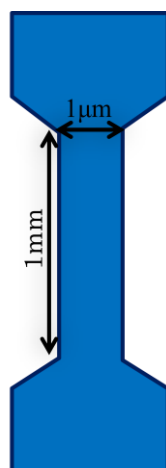


図 2.6:加工した試料のスケール

2.2.1 ブリッジ加工

まず、直流四端子法によって、 $V-I$ 特性の測定を行う為に、試料にブリッジ加工を施した。

ハンダの除去(フジクラ製のコート線材のみ)

フジクラ製のコート線材は、Ag 膜の上にハンダでコーティングされているので除去をする必要がある。ハンダの除去は、純水:硝酸=1:1 で行う。反応の終了は目視で確認する。

Ag 膜の除去

コート線材は保護膜として Ag 膜が塗布されている。電圧端子を取り付ける部分の銀を残して一部の Ag 膜を除去し、その部分にマイクロブリッジ加工を行った。Ag 膜の除去には質量比でアンモニア：過酸化水素水：純水=1:6:20 の割合の水溶液でエッチングを行う。反応の終了は目視により確認する。

フォトレジスト塗布

フォトレジストには光を当てると、現像液によって溶解性が増大する posi 型を用いる。塗布前にブローを行い、ゴミ等の除去を行う。フォトレジスト液を一定量垂らし、レジストを均一に塗布する為にスピナーを用いて 4000 rpm で 30 秒程回転させ、さらに 6000 rpm で 10 秒程回転させる。

プリベーク

レジスト中の水分を蒸発させ、レジストを安定化させる為に、ホットプレートを用いて約 90℃で 2 分間ベークする。

露光

試料を露光機の試料台に乗せ、フォトマスクとウェハのパターンを決定させる。ブローを行い、ゴミ等の除去を行う。露光位置は目視によって決定する為、ピントを合わせ、光源の位置を調整する。そして、紫外線を約 60 秒間照射する。

現像

感光したレジストを現像液(MF319 30cc)につけて除去する。試料は、現像液に 1 分間つけて、純水によって洗浄を行う。長く現像液につけすぎるとレジストが薄くなるので、目視で確認をしながら行う。

ポストベーク

現像液につけた後、水分を蒸発させるのと同時に、レジストと基板の密着性を高めるために、再度ホットプレートにて 90℃で 3 分間加熱を行う。

エッチング

マスクのブリッジ以外の部分の超伝導体をエッチングで除去する。エッチング液は質量比で硝酸:純水=1:500 で混合したものをを用いる。エッチング時間が長すぎると、レジストの裏にエッチング液が回り込み、レジストの下の超伝導体を溶かしてしまう可能性があるため、必ず目視で随時確認をしながらエッチングをする必要がある。

レジスト除去

レジストの除去をアセトンにより行う。

2.2.2 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。具体的には、試料の両端に電流を流し、電圧端子間の電圧を測定する方法である。図 2.7 に直流四端子法の簡略図を示す。 R_m を試料の抵抗、 R_0 を接触抵抗とする。この時の全電流は $I = I_1 + I_2$ となる。この回路で $R_0 \gg R_m$ となる時、 $I_2 = 0$ となり、測定する電圧は $V = RI_1$ となる。よって、 R_m が R_0 と比べて限りなく小さくなる時、 R_m の両端の電圧を正確に測定することができる。また、回路における試料と電圧端子の接続はハンダによる圧着で行った。

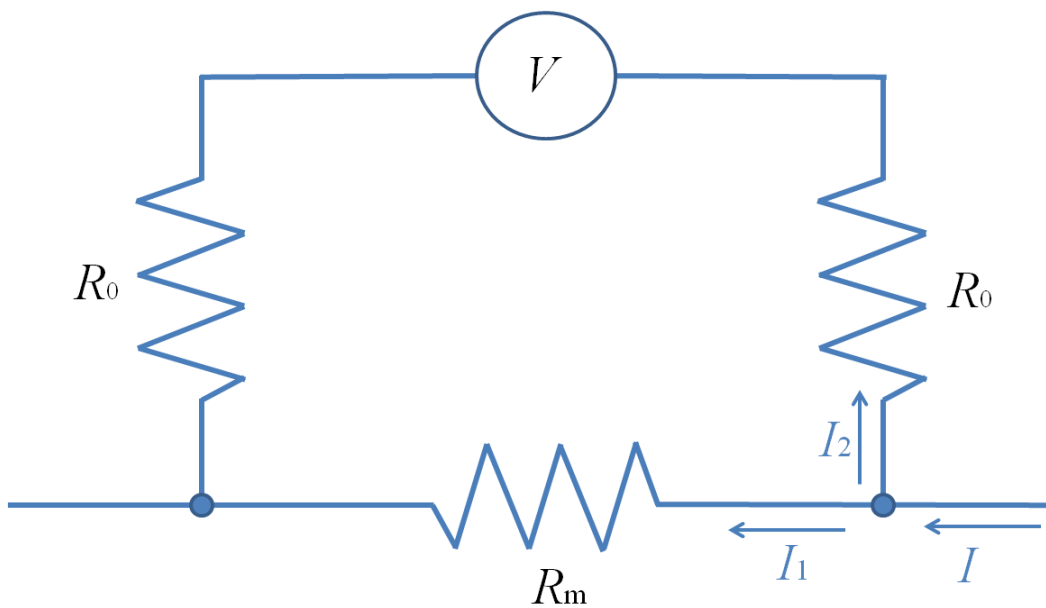


図 2.7:直流四端子法の簡略図

第3章 結果

3.1.1 $J_c - B$ 特性

図 3.1、図 3.2 に四端子法によって得られた液体窒素中(77.3 K)における各試料の $\phi = 90^\circ$ 、 $\phi = 0^\circ$ 、 $\theta = 0^\circ$ における $J_c - B$ 特性を示す。図 3.1、3.2 を見ると、各試料とも縦磁界下($\phi = 90^\circ$)での臨界電流密度の増加がわかる。また、2 つの試料において、0.1 T 付近で磁場依存性が異なることがわかる。

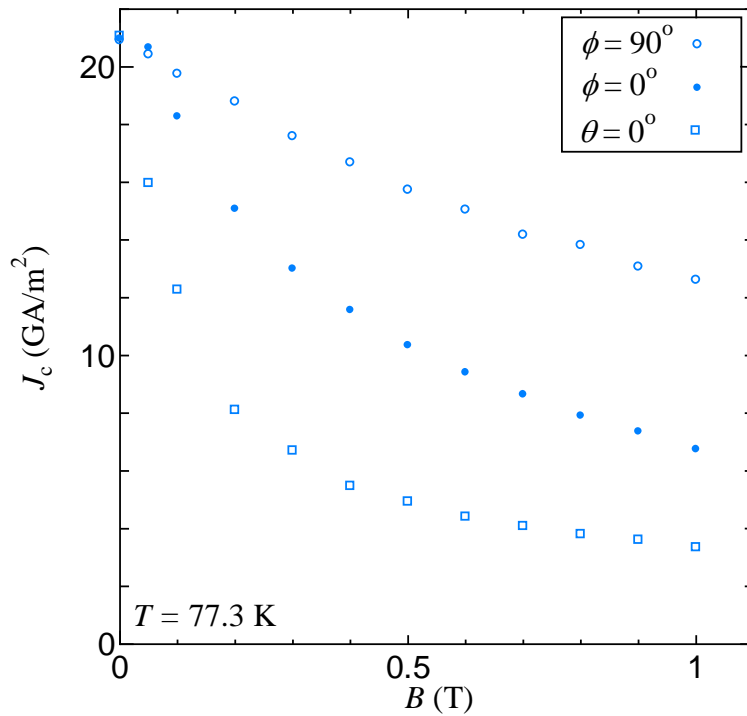


図 3.1: Sumitomo の液体窒素中における磁界依存性

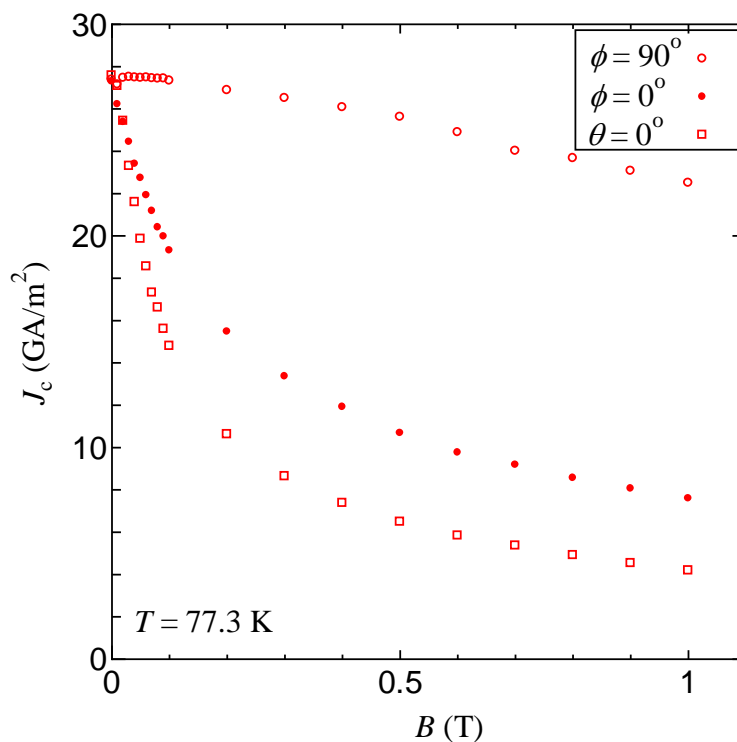


図 3.2: Fujikura の液体窒素中における磁界依存性

次に各試料の $\phi = 90^\circ$ での臨界電流密度の比較を図 3.3 に示す。図 3.3 を見ると、Fujikura が Sumitomo より縦磁界下での臨界電流密度が高く、磁界依存性が良いことがわかる。また、Fujikura は、磁界が 0.1T 付近でも臨界電流密度はほとんど下がらなかった。ここで、図 3.2 の Fujikura において、磁界を 0~0.1T まで 0.01T 間隔で測定した時の磁界依存性を図 3.4 に示す。図 3.4 を見ると 0.03T で明確な違いが表れる。これは低磁界をかけた時に、角度によって磁界依存性が変化することを意味する。よって $\phi = 90^\circ$ （縦磁界下）においては、低磁界での磁界依存性と、それ以上磁界をかけた時の磁界依存性が存在すると考えられる。

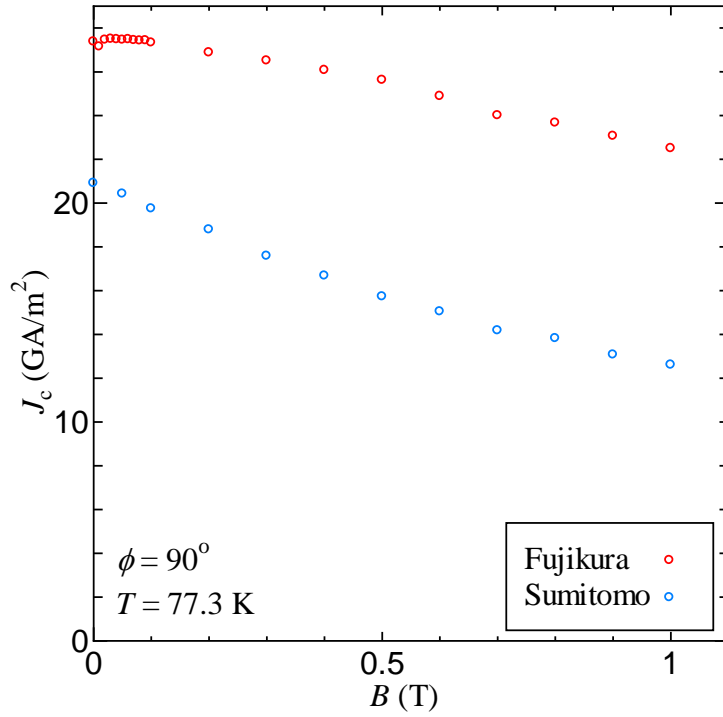


図 3.3:各試料の縦磁界下での磁界依存性

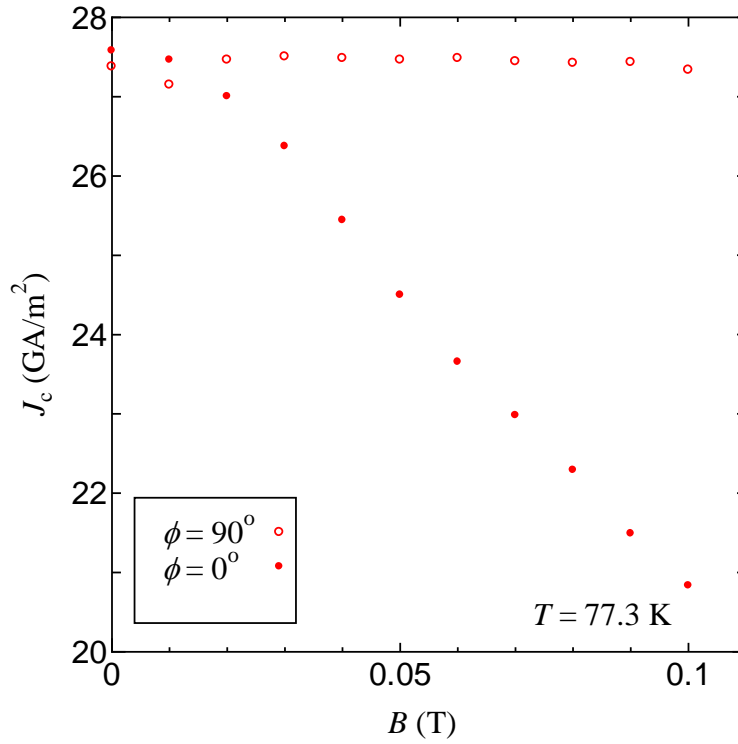


図 3.4:Fujikura において磁界を 0~0.1T でかけた時の磁界依存性

次に各試料の臨界電流密度特性（比率）を図 3.5 に示す。比率は、試料にかけた磁界の臨界電流密度を 0 T での臨界電流密度で割ったものである。図 3.5 を見ると、 $\theta = 0^\circ$ の時は、低磁界での臨界電流密度が Sumitomo が Fujikura より高くなっている。しかし、Sumitomo は J_c の減少率が Fujikura と比べて高くなっている。また、 $\phi = 0^\circ$ において、Sumitomo が Fujikura より臨界電流密度が高くなっている。 $\phi = 90^\circ$ において、各試料ともに縦磁界での臨界電流密度の向上が確認できる。臨界電流密度及び磁界依存性は Fujikura が良い。よって IBAD 法は縦方向の面内配向が良いと考えられる。

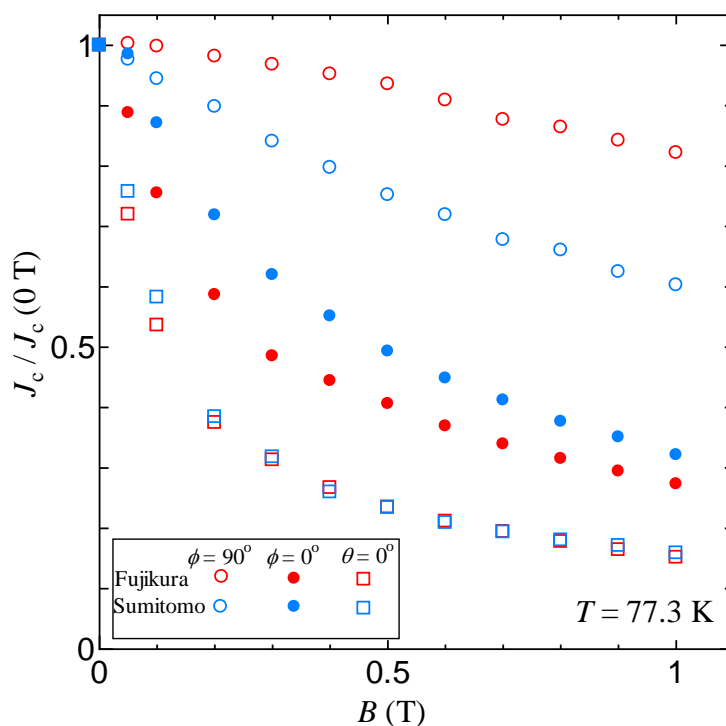


図 3.5:各試料の磁界依存性($J_c / J_c (0T)$)

3.1.2 $J_c - \phi$ 特性

図 3.6 に磁界を 0.5T で固定した時の角度依存性(ab 面)を示す。各試料ともに $\phi = 50^\circ$ 付近から臨界電流密度の増加が確認できる。これは縦磁界効果によるものである。Fujikura は $\phi = 90^\circ$ 付近まで臨界電流密度は増加したが、Sumitomo は $\phi = 70^\circ$ 付近で臨界電流密度の増加は止まった。このことから Fujikura の方が面内配向が良く、縦方向にまっすぐ電流を流すことができていると考える。

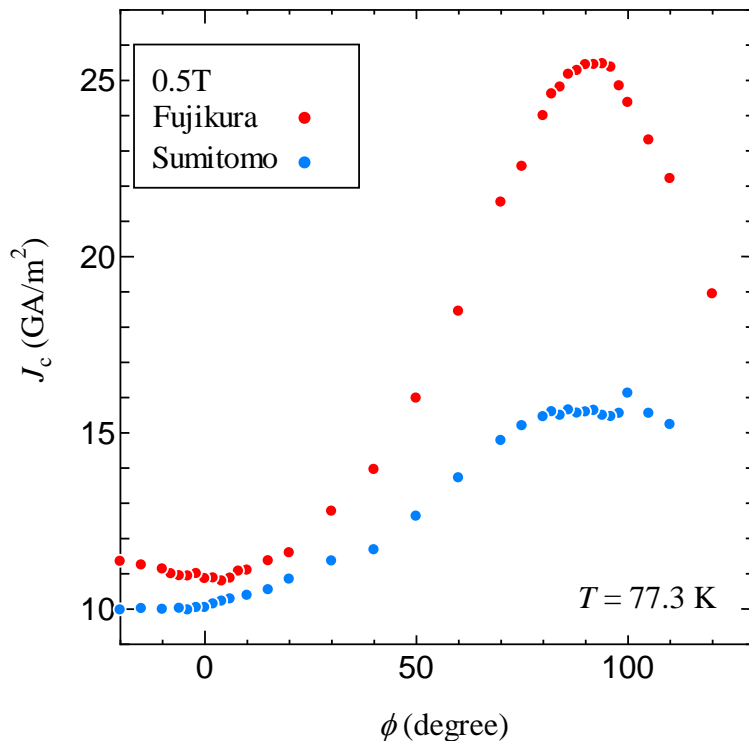


図 3.6:各試料における角度依存性(ab 面)

第4章 まとめ

本実験では2つの作製法で作られた超伝導コート線材を、様々な角度から磁界を印加することで、直流四端子法による臨界電流密度特性を測定し、作製法の違いが縦磁界下における臨界電流密度へ与える影響を調べた。

・ $J_c - B$ 特性を測定した結果、各試料とも縦磁界下で臨界電流密度特性が高くなっていることがわかった。磁界依存性は Fujikura の方が良いことがわかった。Fujikura の試料において、縦磁界下において低磁界での磁界依存性とそれ以上磁界をかけた時の磁界依存性が変化する。

・ $J_c - \phi$ 特性を測定した結果、各試料ともに $\phi = 50^\circ$ あたりから縦磁界効果による臨界電流密度の増加が確認された。 $\phi = 90^\circ$ で Fujikura が Sumitomo の試料の約2倍の臨界電流密度を示した。臨界電流密度はどの角度も Fujikura の方が高かった。

以上のことから配向基板よりも IBAD 法が、磁界依存性、臨界電流密度特性ともに優れている。

謝辞

本研究を行うにあたり、多大なご指導、助言を頂いた小田部荘司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、助言を頂いた木内勝准教授、松下照男名誉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して頂いた小田部・木内研究室の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 村上 雅人 超伝導 Web21 やさしい超伝導のおはなし
<http://www.istec.or.jp/web21/series/2003-murakami.pdf>
- [2] 小池 洋二 高温超電導の理解はどこまで進んだか？
<http://www.apph.tohoku.ac.jp/low-temp-lab/materia.pdf>
- [3] フジクラ技法 No.115(2008)46-54
- [4] フジクラ技法 No.107(2004)68-72
- [5] フジクラ技法 No.110(2006)26-31
- [6] 松下 照男 磁束ピンニングと電磁現象(産業図書)
- [7] Yu. F. Bychkov et al. JETP Left.9(1969)404.
- [8] G. W. Cullen and R.L. Novak, Appl. Phys. Left.4(1964)147.