

重イオン照射により人工ピンを導入した  
希土類系コート線材の縦磁界下における  
臨界電流特性

木内研究室

大隈 翔悟

平成 26 年 2 月 13 日

電子情報工学科

# 目次

<b>第 1 章 序章</b> .....	<b>1</b>
1.1 はじめに.....	1
1.2 第 1 種超伝導体と第 2 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 RE 系コート線材の作製方法.....	3
1.5.1 IBAD 法.....	3
1.5.2 RABiTS 法.....	3
1.6 PLD 法.....	3
1.7 磁束線の移動.....	4
1.8 磁束ピンニング.....	4
1.9 人工ピン.....	5
1.10 縦磁界.....	5
1.11 本研究の目的.....	6
<b>第 2 章 実験</b> .....	<b>7</b>
2.1 試料.....	7
2.2 試料加工.....	7
2.2.1 マイクロブリッジ加工.....	7
2.2.2 マイクロブリッジ加工手順.....	8
2.2.3 重イオン照射.....	8
2.3 測定方法.....	9
2.3.1 直流四端子法の概要.....	9
2.3.2 測定.....	11
<b>第 3 章 実験結果</b> .....	<b>14</b>
3.1 $J_c - B$ 特性.....	14
<b>第 4 章 まとめ</b> .....	<b>17</b>
謝辞.....	18
参考文献.....	19

# 目次

1.1	磁束線にはたらくローレンツ力とピンニング力.....	5
1.2	$B \parallel J$ の状態.....	6
2.1	イオン放射方向、電流の方向、外部磁界の方向の関係.....	9
2.2	四端子法の回路図.....	10
2.3	測定時の回路図.....	10
2.4	測定システム.....	11
2.5	サンプルホルダー.....	12
2.6	$\varphi = 0^\circ$ のときの概略図.....	13
2.7	$\varphi = 90^\circ$ のときの概略図.....	13
3.1	#1 の $J_c - B$ 特性.....	14
3.2	$\varphi = 90^\circ$ における#1~4 の $J_c - B$ 特性.....	15
3.3	$\varphi = 0^\circ$ における#1~4 の $J_c - B$ 特性.....	15
3.4	#5 および#6 の $J_c - B$ 特性.....	16
3.5	#5 および#6 の $J_c - B$ 特性(規格化).....	16

# 表目次

2.1 Superpowerの試料諸.....	7
2.2 住友電気工業株式会社の試料諸元.....	7

# 第 1 章 序章

## 1.1 はじめに

1911年にオランダのKamerlingh Onnesは液体ヘリウムを用いて水銀の抵抗が極低温下で突然ゼロになることを発見した。このような現象を起こす物質は超伝導体と呼ばれ、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。しかし、当初発見された超伝導体の多くが、わずかな磁界で電気抵抗ゼロの性質を失ってしまい応用は難しかった。このように超伝導体はある温度、磁界の範囲内でのみその特性を示し、これらの超伝導現象を示さなくなる磁界、温度をそれぞれ臨界磁界 $B_c$ 、臨界温度 $T_c$ と呼ぶ。その後、超伝導現象の発現機構や性質に関する研究が進められてきたが、大きな進展や具体的な理論は現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年にはJ.BardeenとL.N.CooperおよびJ.R.Shriefferらにより、BCS理論が提唱され超伝導発現機構における基本的な理解が与えられた。BCS理論によると $T_c$ は30Kを超えないと予想されていたが、1986年にJ.G.Bednorz,K.A.MüllerらによってLa-Ba-Cu-Oが発見され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年後には液体窒素の沸点である77.3 K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、これらの高温超伝導体も実用化に向けての課題が残っているために今日も研究が続けられている状態である。

## 1.2 第 1 種超伝導体と第 2 種超伝導体

超伝導体は、磁界に対する反応の違いで第 1 種超伝導体と第 2 種超伝導体に分けられる。

第 1 種超伝導体の場合、磁界の強さ  $B$  が臨界磁界 $B_c$ 以下の時はマイスナー効果を示し、磁界の侵入を拒もうとふるまう。その後磁界の強さが $B_c$ より大きくなると磁界が超伝導体内部に侵入することでマイスナー効果が失われ、超伝導状態が壊れる。

第 2 種超伝導体の場合、下部臨界磁界 $B_{c1}$ と上部臨界磁界 $B_{c2}$ という 2 種類の臨界磁界が存在する。第 2 種超伝導体では、磁界の強さが $B_{c1}$ 以下の時はマイスナー効果を示し、 $B_{c1}$ より大きくなるとマイスナー効果を失う点は第 1 種超伝導体と同様である。しかし、マイスナー効果を失った後も超伝導体を保っているという点が第 1 種超伝導体と異なる。この時、第 2 種超伝導体の内部では磁界の侵入を許しつつ超伝導状態を保ち続けるという混合状態となっている。超伝導体内部に侵入した磁束は磁束量子と呼ばれる最小の単位で存在して

いる。磁束量子の単位で侵入した磁束を、磁束線と呼ぶ。その後、磁界の強さが $B_{c2}$ より大きくなった時、はじめて超伝導状態が壊れる。

つまり、第1種超伝導状態の場合は磁界が侵入すると同時に超伝導状態が壊れるが、第2種超伝導体の場合は磁束線の侵入後も超伝導状態を保つことができる。

### 1.3 銅酸化物超伝導体

超伝導体の結晶内に $\text{CuO}_2$ 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 $\text{CuO}_2$ 面とブロック層が交互に積み重なった形となっており、 $\text{CuO}_2$ 面に平行な方向には電流は流れやすいが、 $\text{CuO}_2$ 面に垂直な方向には電流が流れにくいという、電流についての異方性を持つ。そのため、優れた特性を得るためには $\text{CuO}_2$ 面を配向させる(向きを揃える)必要がある。銅酸化物超伝導体は金属超伝導体に高い $T_c$ を持つものが多く、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。銅酸化物超伝導体の中で、特に Bi(ビスマス)系超伝導線材と RE(希土類)系超伝導線材の応用が期待されている。

Bi系は、結晶が $ab$ 面に劈開しやすく高度な技術を必要としないという長所を持つ。そのため、銀の管の中にBi系超伝導体の原料となる粉末を詰め、圧延と熱処理を何度か繰り返すという方法で製造することができる。現在は、住友電気工業より臨界電流 $I_c$ が200 A、長さが最大1500 mのBi系超伝導線材が製品として販売されている。しかし、高磁界領域では臨界電流密度 $J_c$ が大きく下がってしまう。さらに、製造には貴金属である銀が大量に必要であることから、製造コストの多くを銀の価格が占めているという問題もある。そのためBi系超伝導線材の価格は実質的に銀の管の価格であり、技術の向上で改善できる問題ではないため大幅なコスト削減は望めないという短所もある。

RE系超伝導線材は、Bi系超伝導体と異なり機械的な圧延で配向させることができず、超伝導線材の製造に特殊な技術が必要となる。そのため以前は長尺化、高配向化が困難であったが、現在は製造技術の向上によって改善されつつある。高温、高磁界領域での $J_c$ はBi系より優れている。

### 1.4 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90 K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、これは制御困難である。そのため、置き換える元素は、希土類系元素の中で中程度のイオン半径のGdを

用いている。

## 1.5 RE系コート線材の作製方法

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殆ど配向しないため、結晶の向きを揃える為に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を含めた二軸配向を実現する必要がある。そのため、二軸配向した中間層の上に超伝導層を成膜し、二軸配向した超伝導層を得る。

### 1.5.1 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2の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そろった二軸配向の中間層をテープ線材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。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成膜が必要であり、コストと製造速度の2つ問題点が存在する。しかし近年では、配向性が悪くなるとされていた高速でのIBAD中間層でもその上にPLD法で高速にCeO<sub>2</sub>を成膜することで高配向の中間層が作成できる手法が発見されている。

### 1.5.2 RABiTS法による二軸配向

RABiTS(Rolling Assisted Biaxially Substrate)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。しかし、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ゆがみを与える可能性がある。そこで、現在では基板にWやCrを添加した合金や高強度基板とナノクラッド構造にする方法を用いている。RABiTS法は、IBAD法に比べて作製が容易であることが特徴である。一方で、IBAD法で作成された線材と比較すると $J_c$ が低下することや、超伝導層における面内の配向が低くなるという短所がある。

## 1.6 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就航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。超伝導層を作成する場合は超伝導体の塊をターゲットとした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。

## 1.7 磁束線の移動

実際に第2種超伝導体に電流を流すと、 $B_{c2}$ よりも低い磁界でも電気抵抗が発生する。この原因は、第2種超伝導体内部に侵入した磁束線によるものである。第2種超伝導体内部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( $\mathbf{F}_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B}$ )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し、結果的に抵抗の発生につながる。このことから、 $J_c$ 向上のためには磁束線の移動を防ぐ必要がある。

## 1.8 磁束ピンニング

第2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とを、ローレンツ力と反対の向き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ニングセンターまたは単にピンと呼び、このピンには超伝導体の製造過程で生じた欠陥である常伝導析出物、結晶粒界、格子欠陥等がある。ピンが磁束線の動きを妨げる力をピンニング力と呼ぶ。ピンニング力の大きさがローレンツ力の大きさ以下の時、図1.1のように、磁束線は移動することができず、その結果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2種超伝導体内部に大きさ  $B$  の磁束線が侵入している状態で、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  $F_L$  はつり合っており、

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

となる。(1.1)式を変形すると

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

となり、(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。



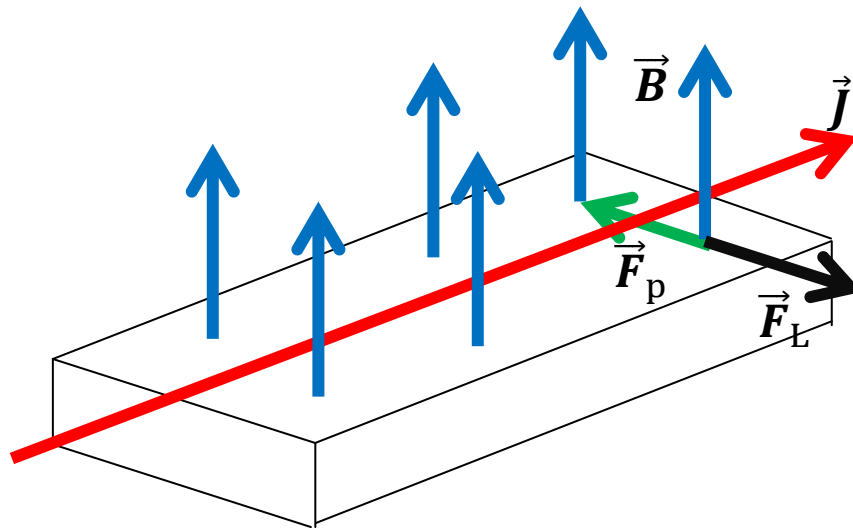


図 1.1: 磁束線にはたらくローレンツ力とピンニング力

## 1.9 人工ピン

人工ピンとは、超伝導体内に侵入した磁束線がローレンツ力によって動き出すことを止めるピンを、人工的に導入したピンのことである。人工ピンは、超伝導体の使用環境に適切な導入が必要である。

超伝導線材の  $F_p$  を増加させることで磁界中における  $J_c$  を高めることを目的として、人工的に導入されたピンニングセンターのことである。人工ピンの形状には点状、円柱状、面状等の形状がある。現在の人工ピン技術では、点状、円柱状が最も多用されており、本研究で用いる人工ピンの形状は円柱状である。

特に、一般に酸化物超伝導体の結晶構造は複雑で、 $ab$  平面に大きな電流が流れるが、 $c$  軸方向には絶縁層が含まれることから小さな電流しか流れない。したがって、現在開発されている超伝導コート線材は大きな異方性を持つ。このため、様々な人工ピンの導入が試みられている。

## 1.10 縦磁界

図 1.2 に示すように超伝導体を流れる電流と磁界が平行 ( $B \parallel I$  の状態で、このときを縦磁界と呼ぶ) なとき、以下の現象が起こる。

電流を流すと、縦方向の常磁性磁化が生じる。超伝導体を流れる電流と磁界が垂直

( $B \perp I$  ( $B \parallel ab$ ))の状態、このときを垂直磁界と呼ぶ)なときと比べて、 $J_c$ 特性が向上する。金属超伝導体では、図 1.4 のように $B$ の増加に伴い $J_c$ が向上することが知られている[1]。縦磁界を上昇させると、交流損失が減少する。磁束線の運動と電磁現象を結びつけるジョセフソンの関係式( $E = \mathbf{B} \times \mathbf{v}$ )が成り立たない。[4]

これらの現象を総称して縦磁界効果と呼ぶ。先行研究[5]において、RE系コート線材の、縦磁界下での $J_c$ 向上が報告されており、本研究では、 $J_c$ 特性の向上に着目している。

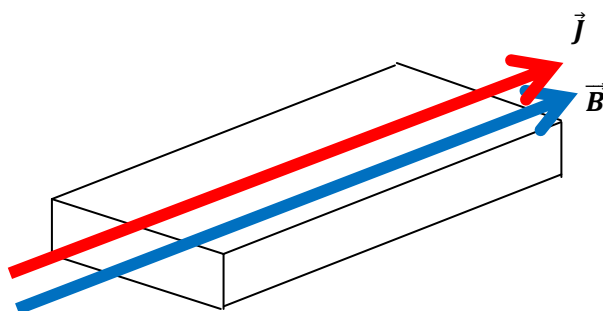


図 1.2:  $B \parallel J$ の状態

本来、人工ピンは磁束線がローレンツ力によって移動することを妨げるために導入されるものである。縦磁界下ではローレンツ力は働かないが、磁束線は縦磁界下でも何らかの運動をしていることが考えられている。磁束線の運動が起こっているのであれば磁束ピンニングが期待でき、本研究では人工ピンを導入した銅酸化物超伝導体の特性を縦磁界下で測定する。

## 1.11 本研究の目的

本研究では、重イオン照射により人工ピンを導入した RE 系コート線材の縦磁界下における $J_c$ 特性を測定することで重イオン照射が RE 系超伝導コート線材の $J_c$ 特性に与える影響を議論する。そして、縦磁界効果により $J_c$ を向上させるためにはどのような重イオンを照射すればよいかを考察することを目的とする。

## 第2章 実験

### 2.1 試料

本研究では、SuperPower社の市販コート線材と、住友電気工業株式会社のPLD法GdBCO超伝導コート線材を試料として用いた。SuperPowerの試料諸元を表2.1に、住友電気工業株式会社の試料諸元を表2.2に記す。

ここでは、重イオンの照射量はマッチング磁界 $B_\phi$ として表わす。用意した試料の $B_\phi$ は、0.5 T相当と、1.0 T相当で、それぞれのピン間隔は69 nmおよび49 nmである。 $d$ は超伝導層の膜厚、 $J_c$  (s.f.)は、自己磁界における $J_c$ 、 $r$ は柱状欠陥の半径を表わす。

表 2.1: Superpowerの試料諸元

試料名	照射イオン	$B_\phi$ [T]	$d$ [ $\mu\text{m}$ ]	$T_c$ [K]	$J_c$ (s.f.) [ $\text{GA}/\text{m}^2$ ]	$r$ [nm]
#1	no APC	-	1	88.7	32.0	-
#2	Au	0.5	1	-	22.5	5.00
#3	Au	1.0	1	88.3	22.3	5.00
#4	Xe	1.0	1	88.6	25.2	3.75

表 2.2: 住友電気工業株式会社の試料諸元

試料名	照射イオン	$B_\phi$ [T]	$d$ [ $\mu\text{m}$ ]	$T_c$ [K]	$J_c$ (s.f.) [ $\text{GA}/\text{m}^2$ ]	$r$ [nm]
-	no APC	-	2.1	93.2	10.1	-
#5	Au	1.0	2.1	90.4	1.23	5.00
#6	Xe	1.0	2.1	91.5	7.06	3.75

### 2.2 試料加工

試料は九州工業大学マイクロ化総合技術センターにてマイクロブリッジ加工を施した。また、日本原子力研究開発機構に、マイクロブリッジ加工を施した試料に対して重イオン照射を行って頂いた。

#### 2.2.1 マイクロブリッジ加工

本研究では、コート線材にマイクロブリッジ加工を施した。マイクロブリッジ加工とは、超伝導層の一部を除去することで超伝導状態になる部分を細くするよう加工することである。マイクロブリッジ加工を施すことで $I_c$ が下がり、小規模な電源装置での測定が可能になる。

## 2.2.2 マイクロブリッジ加工手順

ブリッジ幅 100  $\mu\text{m}$ 、長さ 1.00 mm のパターンを持つフォトマスクを用意し、ブリッジ幅 100  $\mu\text{m}$ 、電圧端子間 1.00 mm となる試料を作成した。マイクロブリッジの加工手順について以下に記す。

### 2.2.2.1 フォトレジスト塗布

フォトレジストには光に当たると溶解性が増すものを用いた。ガラス板上に固定された試料を十分洗浄した後、フォトレジストを塗布する。このときフォトレジストが均一に広がるよう、スピナーを用い高速回転を行う。フォトレジスト塗布の後、試料を乾燥させるため加熱処理を行う。

### 2.2.2.2 露光

露光装置に固定された試料に紫外線を照射し、マスクパターンを転写する。

### 2.2.2.3 現像

試料を現像液につけ、感光したフォトレジスト部分の除去を行う。現像後は純水により十分に洗浄を行い、乾燥させる。

### 2.2.2.4 エッチング

試料のブリッジ部分以外の超伝導層にエッチングを行う。用いた溶液は硝酸と純水を 1:500 の比で質量比により混合したものをを用いる。

### 2.2.2.5 フォトレジスト除去

ブリッジ部分に残ったフォトレジストをアセトンにより除去し、純水で洗浄した後にエアダスターで乾燥させる。

## 2.2.3 重イオン照射

本研究では、人工ピンとして重イオンを線材に対して照射した。照射は、日本原子力研究開発機構に行って頂いた。照射するイオンの種類は Au と Xe、照射エネルギーは 200 MeV である。照射量はマッチング磁界  $B_\phi$  を用いて、「 $B_\phi = 0$  T 相当の照射量」というように表す。マッチング磁界とは、ピンニングセンターの間隔と磁束線格子間隔が等しくなる時の磁界で、磁束密度がマッチング磁界と等しいときにピンニングセンターは最も効力を発揮する。 $B_\phi$  が大きいほど照射量が大きいことを意味する。図 2.1 に、線材への重イオン照射方向、電流を流す方向、外部磁界の方向の関係を示す。

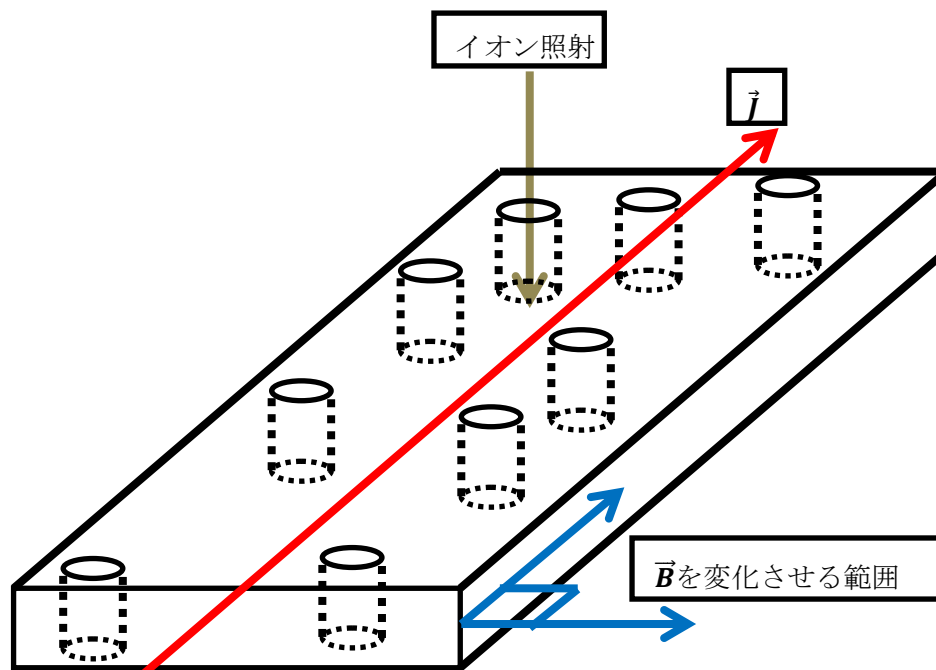


図 2.1:イオン放射方向、電流の方向、外部磁界の方向の関係

## 2.3 測定及び評価方法

### 2.3.1 直流四端子法の概要

超伝導体から生じる電気抵抗は非常に小さいため、試料と端子部の接触抵抗の影響を大きく受ける。よって、ここでは接触抵抗の影響を小さくできる直流四端子法を用いて測定する。ここでは、簡単に直流四端子法について説明する。

直流四端子法の回路図を図 2.2 に、実際に測定するときの回路図を図 2.3 に示す。試料の抵抗を  $R$ 、接触抵抗を  $r$  とする。試料に流れる電流を  $I_1$ 、電圧計に流れる電流を  $I_2$ 、回路全体に流れる電流を  $I$  とする。試料の抵抗が非常に小さいことから  $R \approx r$  である。この場合、試料と接触抵抗の合成抵抗の電圧を測定すると、 $r$  の影響で正しく電圧を測ることができない。よって、接触抵抗を含めず試料のみを電圧計に並列接続させる必要がある。図 2.2 のように、直流四端子法は電流端子と電圧端子が分かれているため、電流端子の接触抵抗を避けることができる。電圧端子にも接触抵抗が存在するが、電圧端子の接触抵抗と電圧計が直列につながっており、電圧計の内部抵抗は非常に大きいため  $I_2 \approx 0$  である。このように、直流 4 端子法を用いることで接触抵抗を無視することができる。以上の理由から直列四端子法を用いた。

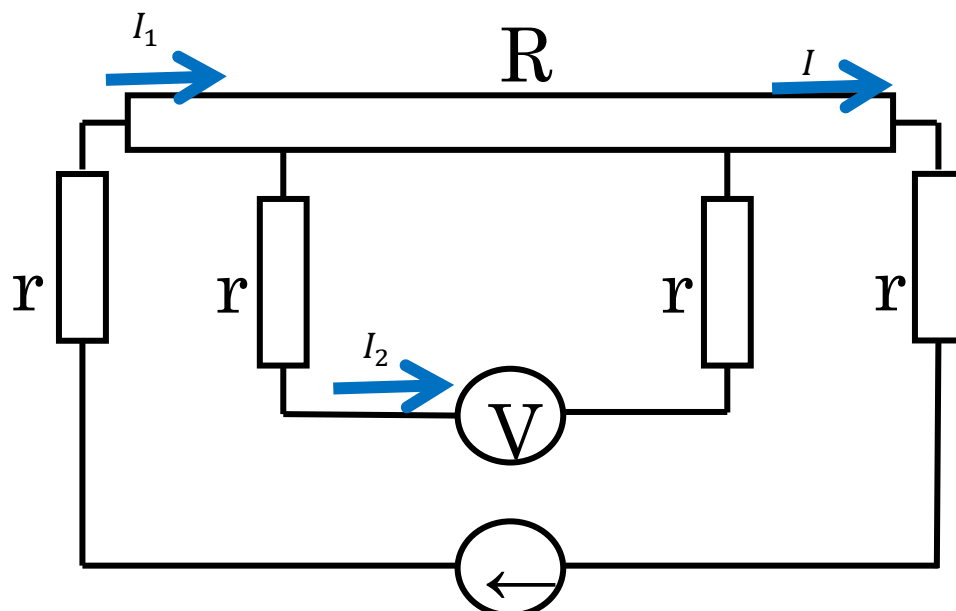


図 2.2:四端子法の回路図

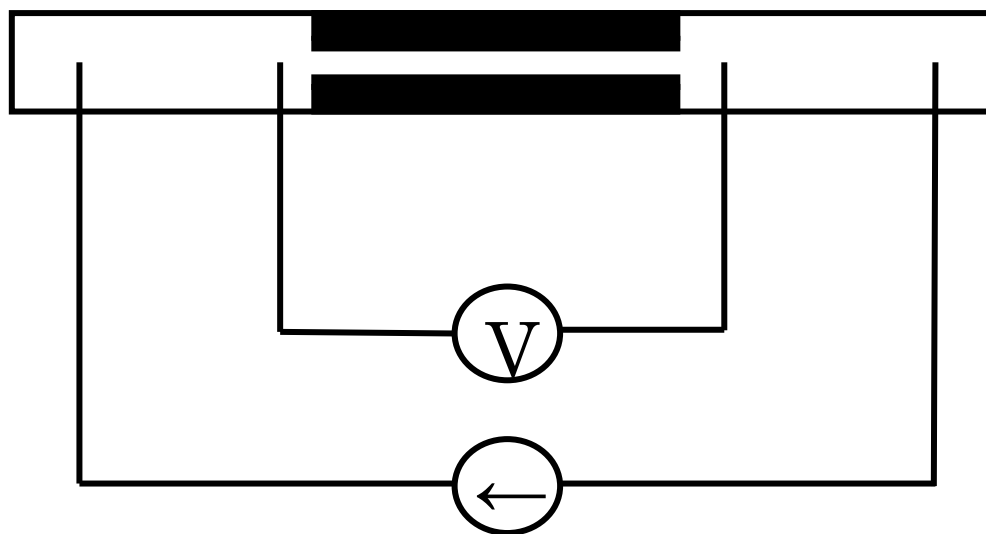


図 2.3:測定時の回路図

### 2.3.2 測定

フォトレジストとエッチングにより作成したマイクロブリッジの  $I$ - $V$  特性を四端子法で測定する。端子部にはインジウムの圧着を用いて取り付けられた。ブリッジに通電する電流量は  $20\ \mu\text{A}$  程度と予想されることから、電流リード部のジュール発熱を抑えるために、 $1\ \text{mm}$  の銅線を約  $20$  本より合わせることで電流リード線とした。実際の測定システムを、図 2.4 に示す。

測定システムには、 $50\ \text{A}$  電源と試料をつなぐ回路と、 $200\ \text{A}$  電源と超電導コイルをつなぐ回路の 2 種類の回路をから構成される。試料に対して前述した直流四端子法を用いる。 $50\ \text{A}$  電源と試料の間には、シャント抵抗があるが、これは  $50\ \text{A}$  電源が命令通りの電流を流しているかどうかを確認するためである。確認方法は、シャント抵抗に発生した電圧を電圧計で測定し、その電圧値とシャント抵抗の抵抗値からオームの法則を用いて流れている電流を求めるといものである。外部磁界  $B$  は超電導コイルによって印加し、 $200\ \text{A}$  電源が流す電流の大きさを制御することで  $B$  の大きさを変更する。 $50\ \text{A}$  電源の電流値、シャント抵抗の電圧値、試料の電圧値を、接続されている PC に転送し、測定データを収集する。

実際に実験に用いたサンプルホルダーを図 2.5 に示す。中心の台に試料を載せる。細い銅線が電圧端子で、太い銅線が電流端子である。電流端子には金属板が接続されているが、これは電流端子と試料の接着面積を増やすためである。

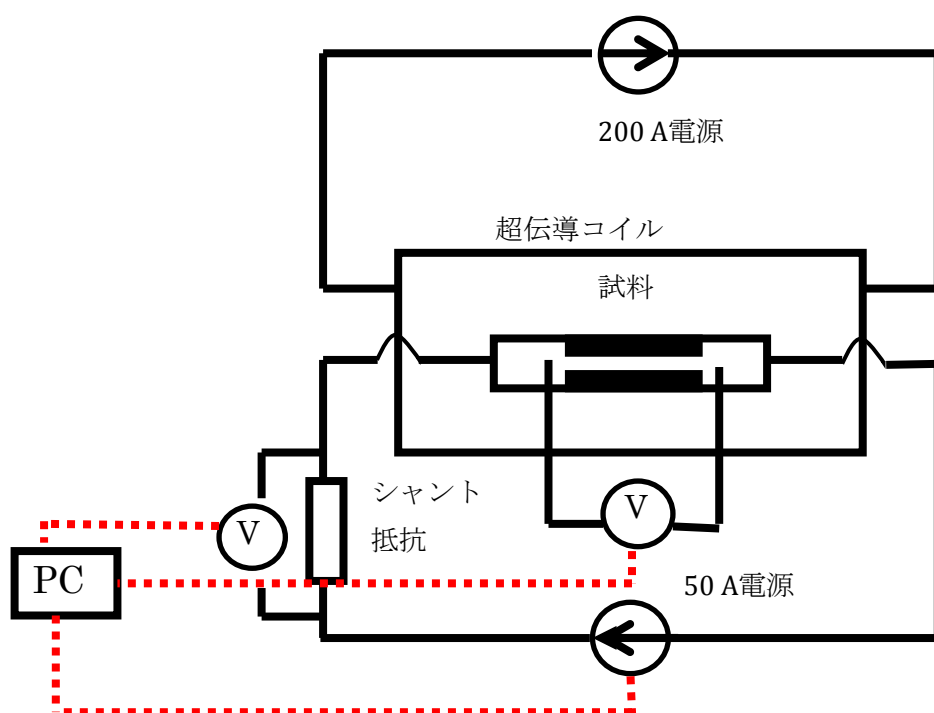


図 2.4:測定システム

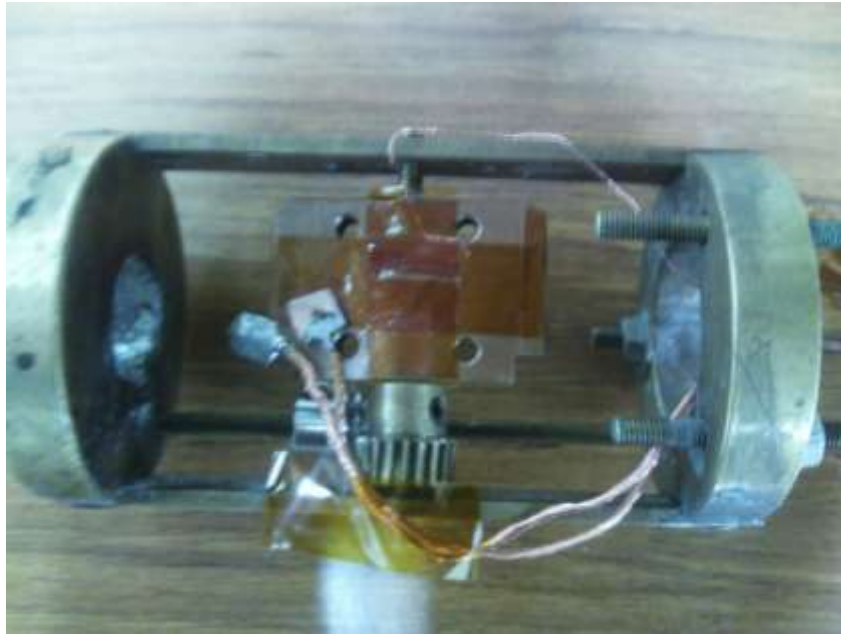


図 2.5: サンプルホルダー

外部磁界と電流の方向の関係を図 2.6 および図 2.7 に示す。試料の長さ方向に電流を流し、 $ab$  面に平行に磁界をかけた時の角度を $\varphi$ で表わした。 $ab$  面に平行かつ電流に垂直な方向を $\varphi = 0^\circ$  とし、 $ab$  面にも電流にも平行な方向を $\varphi = 90^\circ$  とした。

直流四端子法を用いて  $V - I$  特性を測定し、試料の長さと同断面積によって、 $E - J$  特性へ変換した。次に、 $E = 2.0 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-3} \text{ V/m}$  の範囲内にプロットされた 5 点について最小二乗法を用いて近似直線を求めた。最後に、電界基準として  $E = 1.0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$  を用い、近似曲線と電界基準の交点を  $J_c$  と決めた。

外部磁界は液体窒素温度での使用が可能な 1.0 T Bi-2223 超伝導マグネットを用いて加え、印加磁界の範囲は 0~1 T の範囲であった。測定温度は液体窒素中の 77.3 K であった。

試料の  $J_c - B$  特性を測定した。 $J_c - B$  特性は、それぞれ  $\varphi = 90^\circ$   $\varphi = 0^\circ$  の角度で  $B$  を 0~1.0 T の範囲で変化させることで測定した。



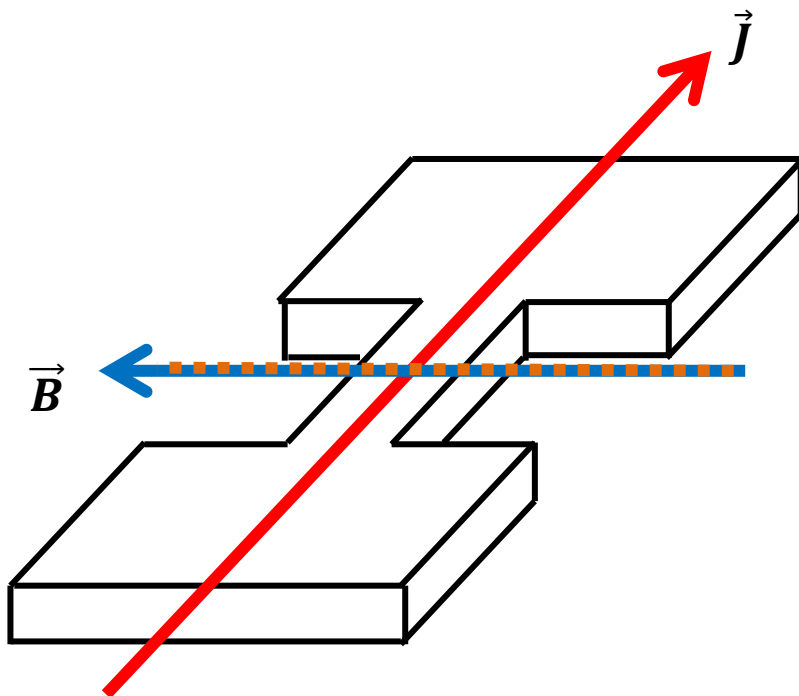


図 2.6:  $\varphi = 0^\circ$  のときの概略図

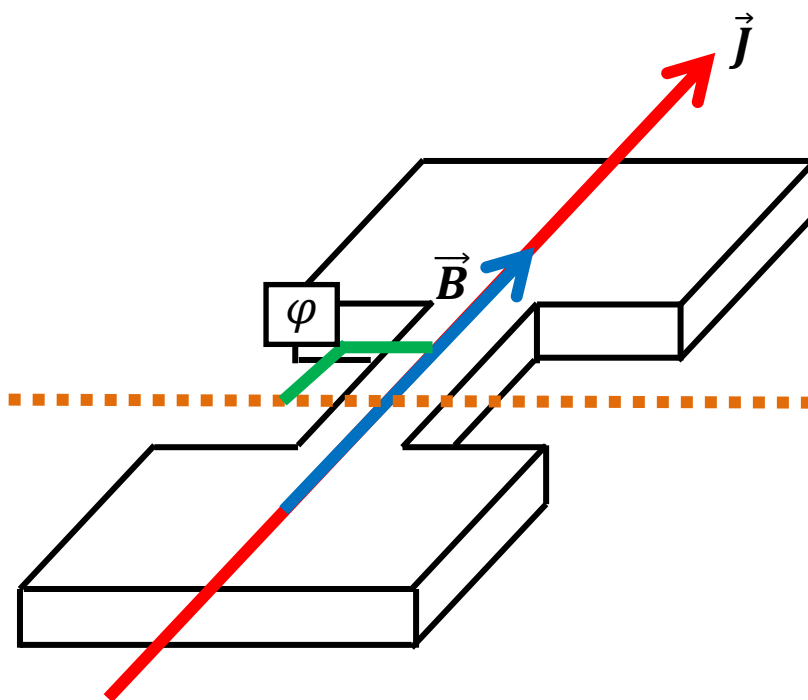


図 2.7:  $\varphi = 90^\circ$  のときの概略図

## 第3章 結果

### 3.1 $J_c - B$ 特性

図 3.1、図 3.2、図 3.3 に、SuperPowerの $J_c - B$  特性を示す。それぞれ、比較のために人工ピン導入前と導入後の両方を載せている。

#0 について、 $\varphi = 0^\circ$  のときの $J_c - B$ 特性と $\varphi = 90^\circ$  のときの $J_c - B$ 特性の違いについて議論する。#0 の $J_c - B$ 特性を、図 3.1 に示す。 $\varphi = 0^\circ$  の場合、 $B = 0.05$  T以降から明らかに $J_c$ が低下する。その後、 $B = 0.5$  T付近からは緩やかに減少するようになる。 $\varphi = 90^\circ$  の場合も同様に、 $B = 0.05$  Tから減少が始まるが、 $\varphi = 0^\circ$  の場合のような急激な減少はない。また、金属超伝導体にみられるような、 $B$ の増加に伴う $J_c$ の上昇は無かった。

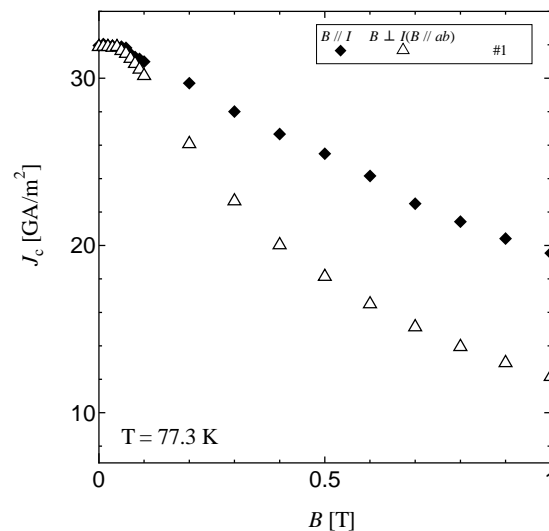


図 3.1: #1 の $J_c - B$ 特性

次に、人工ピンとして重イオンを照射したとき、これがどのように変化するかを見る。 $\varphi = 90^\circ$  と $\varphi = 0^\circ$  について、照射前と照射後の $J_c - B$ 特性の違いについて議論する。図 3.1 に、 $\varphi = 90^\circ$  における#1~4 の $J_c - B$ 特性、図 3.2 に $\varphi = 0^\circ$  における#1~4 の $J_c - B$ 特性を示す。重イオン照射によって試料が損傷を受けているので、全ての照射後の試料で $J_c$ の最大値は減少している。しかし、#2 と#4 の $J_c - B$  特性は向上している。 $B$ をさらに大きくした場合、ある大ききで#2 と#4 の $J_c$ は#1 を超えると考えられる。しかし、照射後の場合も金属超伝導体にみられるような、縦磁界下における $J_c$ の向上は見られなかった。 $B = 0.05$  T以下における $J_c$ を比較すると、照射前の#1 よりも照射後の#2 や#4 の方が $J_c$ の減少が大きく、縦磁界効果が弱まったことを意味する。#3 のみ、他の照射試料と比べ $J_c$ の減少が大きく、照射前の試料と比べても $J_c - B$  特性に変化がない。

また、垂直磁界の場合、全ての照射試料で $B$ が増加するほど $J_c$ の値の差が縮まり、 $B = 1.0$  T

では殆ど差が無い。それに対し縦磁界の場合、#2 と#4 はほぼ同じ減少量で減少を続け、#3 は他の照射試料よりも大きく減少を続けている。このことから、縦磁界のときと垂直磁界のときでは、人工ピンが $J_c$ に与える影響は異なると考えられる。

Xe イオンを照射した#4 よりも Au イオンを照射した#2 や#3 の方が $J_c$ が小さい。また、同じ Au イオンを照射した#2 と#3 を比べると、照射量の多い#3 の方が $J_c$ が小さい。このことから、大きな半径を持つ重イオンの照射や照射量を増やすことで、縦磁界効果が阻害されと考えられる。これは、重イオン照射によって超伝導体内の電子の運動が均一でない部分が生じ、縦磁界の条件となる $B \parallel I$ が満たされにくくなったことが原因であると考えられる。

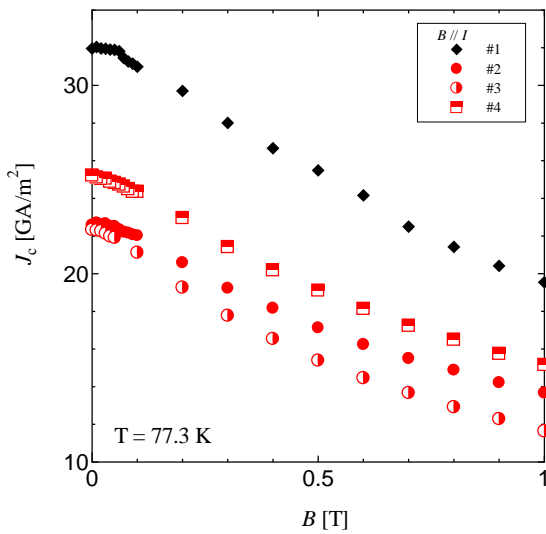


図 3.2:  $\varphi = 90^\circ$  における#1~4 の $J_c - B$ 特性

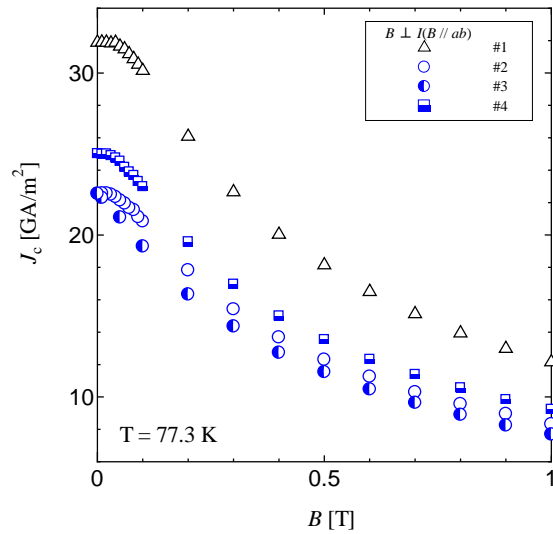


図 3.3:  $\varphi = 0^\circ$  における#1~4 の $J_c - B$ 特性

次に、図 3.4 に Ni-clad の $J_c - B$  特性を示し、図 3.5 にその $J_c - B$  特性を $J_c(\text{s.f.})$ で規格化した図を示す。Xe イオンを照射した#6 は、 $B = 0 \sim 0.1$  T の範囲で明らかな増加を示しているが、Au イオンを照射した#5 は僅かな増加しか示していない。SuperPower の場合と同様、Au イオンを照射すると線材の損傷が大きいため、 $J_c$ の低下が大きいと考えられる。また、Au イオンが大きいことから人工ピンの半径が大きく、電子の運動が散乱されやすくなり、 $B$ の増加に伴う $J_c$ の向上が阻害されることも同様であると考えられる。

しかし、本研究で用いた Ni-clad の、重イオンを照射していない線材は現存せず、 $B \parallel I$  における測定ができなかった。よって、SuperPower と同様に重イオン照射によって $J_c$ 向上が弱められたのか、重イオン照射によってはじめて $J_c$ 向上表れたのかは不明なままである。よって、今後の課題として、本研究で用いた Ni-clad と類似した線材を用いて $J_c - B$ 特性を測定する必要がある。

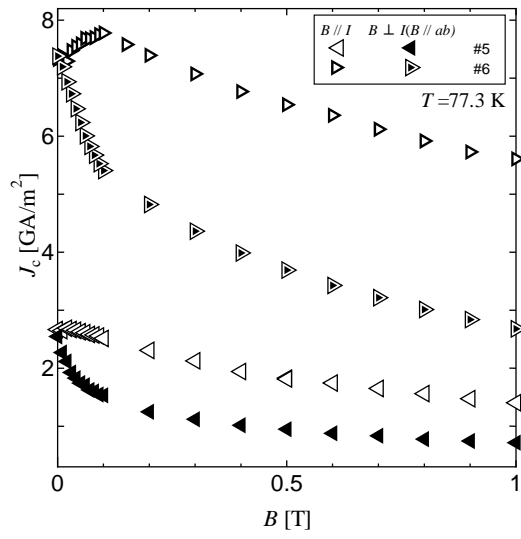


図 3.4: #5 および #6 の  $J_c - B$  特性

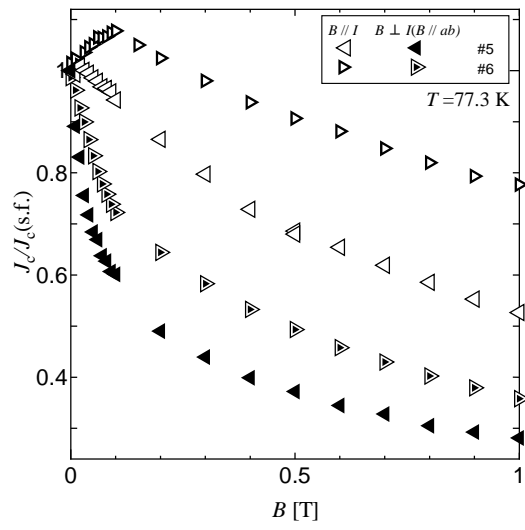


図 3.5: #5 および #6 の  $J_c - B$  特性(規格化)

## 第4章 まとめ

本研究では、縦磁界下における、重イオンを照射した RE 系コート線材の臨界電流密度特性を測定し、重イオン照射の前後や照射する線材の種類による特性の違い、照射する重イオンの種類が線材の $J_c$ に与える影響について議論した。

$J_c - B$ 特性を測定した結果、SuperPower では人工ピンの照射に伴い、 $J_c - B$  特性の向上にはつながったが、縦磁界効果は弱まった。Ni-clad では、Xe イオンを照射した試料でのみ $J_c$ が向上した。

2 種類の線材において、Au イオン照射と Xe イオン照射を比較すると、Xe イオン照射の方が $J_c$ が高かった。Xe イオンは Au イオンよりも小さいために線材への損傷が小さく、かつピンが小さいために電子の運動を散乱させにくい。よって、Xe イオン照射の方が全体的に $J_c$ が高く、縦磁界効果が表れたと考えられる。

SuperPower の垂直磁界下と縦磁界下における $J_c - B$  特性に違いがあり、垂直磁界下と縦磁界下では、重イオン照射人工ピンが線材の $J_c$ へ与える影響が異なる。

以上のことから、縦磁界下における $J_c$ 向上に人工ピンを利用するときは、小さなピンを少量導入し、線材の損傷を抑える必要がある。

## 謝辞

本研究を行うにあたり、様々な助言、ご指導をいただいた小田部荘司教授、木内勝准教授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深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Yu. F. Bychkov *et al.*, JETP Lett. 9 (1969) 404.
- [2] 松下照男 磁束ピンニングと電磁現象(産業図書)
- [3] 大橋愛一郎:若手セミナー(2013)「REBCOコート線材の縦磁界下における臨界電流に人工ピンが与える影響」