

平成 28 年度  
修士学位論文

RE 系超伝導線材を用いた  
縦磁界直流超伝導ケーブルに関する研究

木戸 竜馬

学籍番号：15676109

九州工業大学大学院 情報工学府  
先端情報工学専攻 電子情報工学分野

指導教員：木内 勝 准教授

平成 29 年 2 月 10 日

# 目次

第1章 序論.....	1
1.1 緒言.....	1
1.2 超伝導体の諸現象.....	3
1.2.1 完全導電性.....	3
1.2.2 Meissner 効果.....	3
1.2.3 第一種超伝導体と第二種超伝導体.....	5
1.2.4 $n$ 値.....	6
1.3 磁束ピンニング.....	7
1.4 人工ピン.....	9
1.4.1 人工ピンの種類.....	9
1.5 縦磁界効果.....	10
1.5.1 縦磁界中の諸現象.....	10
1.5.2 人工ピンの導入と縦磁界中での臨界電流密度.....	11
1.6 高温超伝導体.....	12
1.6.1 銅酸化物伝導体.....	12
1.7 RE 系超伝導体.....	13
1.7.1 RE 系超伝導体の作製方法.....	13
1.7.2 PLD 法における人工ピンの導入方法.....	15
1.7.3 RE 系超伝導線材に用いる基板.....	16
1.8 RE 系超伝導線材における縦磁界効果.....	17
1.9 超伝導応用.....	18
1.9.1 交流送電と直流送電.....	18
1.9.2 超伝導送電ケーブル.....	19
1.10 縦磁界効果を利用した直流超伝導ケーブル.....	21
1.10.1 概要.....	21
1.10.2 計算モデル.....	22
1.11 本研究の目的.....	27
第2章 RE 系超伝導線材の 縦磁界中での臨界電流特性の評価.....	28
2.1 概要.....	28
2.2 試料諸元.....	28
2.3 実験方法.....	31
2.3.1 直流四端子法.....	31
2.3.2 測定プローブの取り付け.....	31

2.3.3	測定回路.....	32
2.3.4	測定プログラム.....	34
2.3.5	測定条件.....	34
2.4	実験結果及び検討.....	36
2.4.1	$E$ - $J$ 特性.....	36
2.4.2	$J_c$ - $B$ 特性.....	38
2.4.3	$n$ - $B$ 特性.....	40
2.5	小括.....	41
第3章	RE系超伝導線材を用いた縦磁界直流超伝導ケーブルの設計.....	42
3.1	概要.....	42
3.2	計算方法.....	43
3.3	計算結果及び検討.....	45
3.3.1	MOCVD線材を用いたケーブルの $It$ - $B$ 特性.....	45
3.3.2	PLD線材を用いたケーブルの $It$ - $B$ 特性.....	46
3.3.3	MOD線材を用いたケーブルの $It$ - $B$ 特性.....	46
3.3.4	各ケーブルの $It$ - $\theta$ 特性.....	47
3.3.5	巻き角度を最適化した場合の $It$ - $B$ 特性.....	47
3.4	小括.....	49
第4章	MOCVD線材を用いた3層縦磁界直流超伝導ケーブルの特性評価.....	50
4.1	概要.....	50
4.2	試料諸元.....	50
4.2.1	ケーブル諸元.....	50
4.2.2	線材諸元.....	52
4.3	実験方法.....	53
4.3.1	測定回路.....	53
4.3.2	測定プログラム.....	54
4.3.3	測定条件.....	55
4.4	実験結果及び検討.....	57
4.4.1	$V$ - $I$ 特性.....	57
4.4.2	$It$ - $B$ 特性.....	60
4.5	今後の課題点.....	62
4.6	小括.....	63
第5章	総括.....	64
	謝辞.....	66
	参考文献.....	67
	研究業績.....	69

# 表目次

表 1.1: 主な第二種超伝導体の臨界磁界[7]。 .....	6
表 2.1: 測定に用いた RE 系超伝導試料の諸元。 .....	28
表 2.2: 測定時の条件。 .....	35
表 3.1: 計算に用いた値。 .....	43
表 3.2: CVD 線材の $J_c$ - $B$ 特性の近似式中における展開係数 $K_{  }$ 、 $K_{\perp}$ 。 .....	43
表 3.3: PLD 線材の $J_c$ - $B$ 特性の近似式中における展開係数 $K_{  }$ 、 $K_{\perp}$ 。 .....	44
表 3.4: MOD 線材の $J_c$ - $B$ 特性の近似式中における展開係数 $K_{  }$ 、 $K_{\perp}$ 。 .....	44
表 4.1: 3 層縦磁界直流超伝導ケーブルの諸元。 .....	51
表 4.2: SCS2050-CF 線材の諸元。 .....	52
表 4.3: ケーブル測定時の条件。 .....	55
表 4.4: 1 層ずつ通電した場合の $I_t$ 。 .....	61

# 目次

図 1.1:超伝導体の臨界面。 .....	1
図 1.2:主な超伝導体の $T_c$ とその発見年。 .....	2
図 1.3:完全反磁性を持った超伝導体に対し(a)外部磁界を加えたまま冷却し、その後外部磁界を取り去った場合(b)冷却した後に外部磁界を加え、その後取り去った場合の内部の磁束分布。 .....	4
図 1.4:完全導電性だけを持った材料に対し(a)冷却した後に外部磁界を加え、その後取り去った場合(b)外部磁界を加えたまま冷却し、その後外部磁界を取り去った場合の内部の磁束分布。 .....	5
図 1.5:第二種超伝導体内部で磁束線に働くFP、FLとピンニングセンター。 .....	8
図 1.6:Ti-36%Nb 円柱試料の縦磁界中および横磁界中での $J_c$ - $B$ 特性[12]。 .....	10
図 1.7:中性子照射を行ったNb3Sn薄膜の縦磁界中と横磁界中での臨界電流特性[13]。 .....	11
図 1.8:YBCO 超伝導体の結晶構造。 .....	13
図 1.9:PLD 装置の構造図。 .....	14
図 1.10:MOD 法による作製プロセスの概略図。 .....	15
図 1.11:人工ピンを導入した SmBCO 薄膜の縦磁界中での臨界電流特性[20]。 .....	17
図 1.12:超伝導電力ケーブルの側面および断面[25]。 .....	20
図 1.13:縦磁界効果を利用した直流超伝導ケーブルの構造図[26]。 .....	21
図 1.14:超伝導テープ線材の面内における電流と磁界の関係図。 .....	22
図 1.15:フォーマーに線材を巻き付ける際の角度 $\theta_i$ 。 .....	24
図 1.16:1 層目と $i$ 層目の超伝導層での幅、長さ、電流の向きとの関係図。 .....	24
図 2.1:MOCVD 試料内の構造図[28]。 .....	29
図 2.2:MOD 試料内の構造図。 .....	30
図 2.3:超伝導層内部の構造図。 .....	30
図 2.4:直流二端子法の回路図。 .....	31
図 2.5:直流四端子法の回路図。 .....	31
図 2.6:超伝導試料測定回路の全体図。 .....	33
図 2.7:Bi-2223 超伝導マグネットの外観。 .....	33
図 2.8:試料測定プログラムのフローチャート。 .....	34
図 2.9:超伝導試料に対して(a)縦磁界および(b)横磁界を印加した状態での電流通電方向と磁界印加方向の関係。 .....	35
図 2.10:CVD 線材の(a)縦磁界中および(b)横磁界中での $E$ - $J$ 特性。 .....	36
図 2.11:PLD 線材の(a)縦磁界中および(b)横磁界中での $E$ - $J$ 特性。 .....	37
図 2.12:MOD 線材の(a)縦磁界中および(b)横磁界中での $E$ - $J$ 特性。 .....	37

図 2.13:縦磁界および横磁界中での各線材の $J_c$ の磁界依存性。 .....	39
図 2.14:各線材の横磁界中 $J_c$ に対する縦磁界中 $J_c$ の増加率。 .....	39
図 2.15:各試料の縦磁界中および横磁界中での $n$ 値。 .....	40
図 3.1:内側 3 層の縦磁界直流超伝導ケーブルの構造図。 .....	42
図 3.2:MOCVD 線材を用いたケーブルの $I_t$ - $B$ 特性の(a)全体図および(b) $I_t$ の最大値付 近。 .....	45
図 3.3:PLD 線材を用いたケーブルの $I_t$ - $B$ 特性の(a)全体図および(b) $I_t$ の最大値付近。 .....	46
図 3.4:MOD 線材を用いたケーブルの $I_t$ - $B$ 特性の(a)全体図および(b) $I_t$ の最大値付近。 .....	46
図 3.5:各ケーブルの $I_t/I_t(5 \text{ degree})$ - $\theta$ 特性。 .....	47
図 3.6:各ケーブルの縦磁界中と横磁界中での $I_t$ - $B$ 特性。 .....	47
図 3.7 自己磁界での $I_t$ で規格化した各ケーブルの縦磁界中での $I_t$ - $B$ 特性。 .....	47
図 4.1:3 層縦磁界直流超伝導ケーブルの断面図。 .....	51
図 4.2:3 層縦磁界直流超伝導ケーブルの外観。 .....	51
図 4.3:3 層縦磁界直流超伝導ケーブルの構造図。 .....	52
図 4.4:SCS2050-CF 線材の縦磁界中および横磁界中での $I_c$ - $B$ 特性。 .....	52
図 4.5:ケーブルの測定回路の全体図。 .....	54
図 4.6:Bi-2223超伝導マグネットの外観。 .....	54
図 4.7:ケーブル測定プログラムのフローチャート。 .....	55
図 4.8:超伝導線材に(a)縦磁界および(b)非縦磁界を印加した状態での電流通電方向と 磁界印加方向の関係。 .....	56
図 4.9:自己磁界での $V$ - $I$ 特性。 .....	57
図 4.10:(a) $B = 0.1 \text{ T}$ 、(b) $B = 0.3 \text{ T}$ 、(c) $B = 0.5 \text{ T}$ の縦磁界中での $V$ - $I$ 特性。 .....	58
図 4.11:(a) $B = 0.1 \text{ T}$ 、(b) $B = 0.3 \text{ T}$ 、(c) $B = 0.5 \text{ T}$ の非縦磁界中での $V$ - $I$ 特性。 ....	59
図 4.12: $I_t$ - $B$ 特性の計算値と測定値の比較。 .....	60
図 4.13:自己磁界での値で規格化した $I_t$ - $B$ 特性の計算値と測定値の比較。 .....	60

# 第1章

## 序論

### 1.1 緒言

1908年にオランダ・ライデン大学の Kamerlingh Onnes はヘリウムの液化に成功し、1911年に液体ヘリウムを用いて水銀を極低温まで冷却したところ、4.2 Kで電気抵抗が突然ゼロになることを発見した。その後、水銀と同様に極低温下で電気抵抗ゼロを示す物質が数多く発見された。このようにある一定の条件下で電気抵抗ゼロを示すような現象は超伝導と呼ばれ、この特性を示す物質は超伝導体と呼ばれる。超伝導体は超伝導現象を示す状態は超伝導状態、それ以外の状態は常伝導状態として区別される。また、超伝導体は超伝導状態に遷移する温度は臨界温度 $T_c$ と呼ばれる。さらに Onnes の実験では、超伝導状態にある超伝導体に一定以上の電流を流した際に超伝導状態が失われることや、一定以上の磁界中でも超伝導状態が失われることが発見された[1,2]。これらの値はそれぞれ臨界電流密度 $J_c$ 、臨界磁界 $B_c$ と呼ばれ、超伝導体は図 1.1 に示すように $J_c$ 、 $B_c$ 、 $T_c$ がそれぞれ一定の値以下の領域で超伝導状態に遷移する。

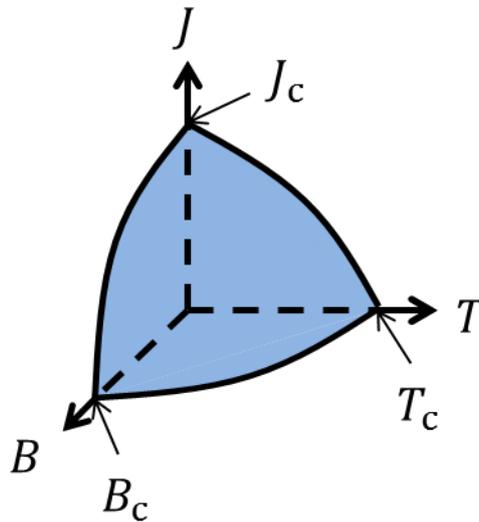


図 1.1:超伝導体の臨界面。

超伝導現象は電気抵抗ゼロ特性だけではなく、どのような過程においても超伝導体から磁界を排除する完全反磁性を持つことが、1933年に Meissner と Ochsenfeld によって発見された。特にこの現象を Meissner 効果と呼ぶ。電気抵抗ゼロや完全反磁性などの超伝導現象の発現を説明する理論として、1957年に Bardeen、Cooper、Schriffer によって BCS 理論が提案された。この理論では 2 個の電子がクーパー対と呼ばれる対となり、クーパー対

の振る舞いによって超伝導の諸特性を説明可能であるとされた。BCS 理論では超伝導体の臨界温度 $T_c$ は30 - 40 K程度が最大であると予想されたが、1986年に Bednorz と Muller は $\text{LaBaCuO}_4$ が30 K程度で超伝導特性を示すことを発見し、翌年1987年に Chu は $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ が90 K程度で超伝導特性を示すことを発見した[3,4]。その後もより高い臨界温度 $T_c$ を示す物質が発見され続け、現在のところ大気圧下で最も高い $T_c$ を持つ超伝導体は1993年に Schilling らによって発見された $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ であり、 $T_c$ は135 Kである[5]。これまでに発見された主な超伝導体の $T_c$ とその発見年を図 1.2 に示す。

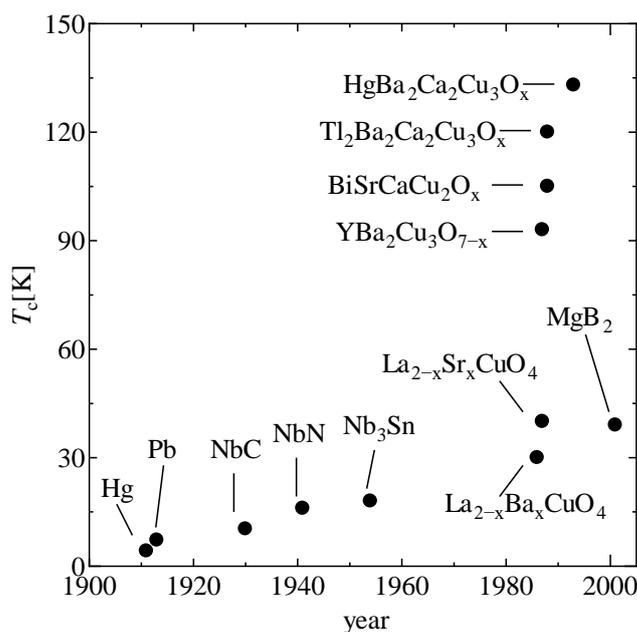


図 1.2: 主な超伝導体の $T_c$ とその発見年。

このようにより高い $T_c$ を示す超伝導体が次々と発見されているが、特に BCS 理論で予測された30 - 40 K程度の $T_c$ を大きく超えるような $T_c$ を持つ YBCO などの超伝導体は高温超伝導体と呼ばれる。高温超伝導体には $T_c$ が液体窒素の沸点である 77.3 K を上回るような物質が多く存在するため、様々な用途への応用にあたっては冷却のための冷媒として安価で入手性に優れた液体窒素を用いることができる。従って、高温超伝導の発見以前には超伝導体の利用に不可欠であった高価な液体ヘリウムを用いる必要がなく、機器の運用コストを大きく抑えることができるため、様々な用途への応用が期待されている。今日ではさらに高い $T_c$ を示す超伝導体の研究だけでなく、既存の高温超伝導体の特性向上や応用機器の開発などに向けて活発な研究が多く行われている。

## 1.2 超伝導体の諸現象

### 1.2.1 完全導電性

完全導電性とは超伝導体を $T_c$ 以下まで冷却した場合に、電気抵抗がゼロになる現象を指す。Onnes の実験では、水銀の電気抵抗が当時用いられた測定機器では測定不能な程に小さいことがわかったが、これは現在においても同様である。一例として、後述する直流四端子法を用いて超伝導体の抵抗率を直接測定した場合は、 $10^{-14} \Omega\text{m}$ 程度が測定限界となる。さらに小さな抵抗値を測定するために、超伝導体を用いて閉ループを形成し、永久電流と呼ばれるループに流れる電流の減衰時定数を測定する方法を考える。超伝導体を用いた閉ループ内で電磁誘導による誘導電流を発生させた場合、ループに流れる電流 $i$ はループの抵抗値を  $R$ 、自己インダクタンスを  $L$  として

$$i \propto \exp\left(-\frac{Rt}{L}\right) \quad (1.1)$$

と示される。この電流 $i$ の減衰を測定することで超伝導体の抵抗率を求めることができ、この値は $10^{-26} \Omega\text{m}$ 以下であることが予想される[6]。純銅を4.2 Kまで冷却した場合でも抵抗率は $10^{-11} \Omega\text{m}$ 程度であるため、超伝導体の抵抗値は非常に小さく、ゼロとみなすことができる。したがって、超伝導体の特性評価を行う場合にはある一定の抵抗率や電界などを基準として設け、その基準を以って抵抗値がゼロかどうかの判断が行われている。工学応用においては電気抵抗がゼロとして扱うことができるので、発電所から需要家までの長距離でも非常に高い効率で送電が可能な電力輸送や、発熱などの問題からこれまで実現できなかった高磁界を発生させる超伝導マグネットなど、様々な応用が考えられる。ただし、この特性は直流に関する特性であり、交流においては損失を生じる。また、電気抵抗ゼロの状態でも電流を流すにも限界があり最大の電流値を臨界電流 $I_c$ 、電流密度を臨界電流密度 $J_c$ と呼ぶ。前述のように超伝導体を応用した機器では損失無しに大電流を流すことを利用した機器が多いため、高い $J_c$ を持つ超伝導体を用いるほど高性能な応用機器を実現できる。従って $J_c$ 特性の向上は工学的に非常に重要であり、 $J_c$ 特性の向上を目的とした多くの研究が行われている。

### 1.2.2 Meissner 効果

電気抵抗ゼロと並ぶ超伝導体の大きな特徴として完全反磁性がある。超伝導体は常伝導状態で外部磁界を加えてから超伝導状態に遷移させた場合と、超伝導状態に遷移させた後に外部磁界を加えた場合のいずれにおいても内部の磁束密度 $B$ がゼロになる性質を持ち、このような完全反磁性の現象は Meissner 効果と呼ばれる。なお、前述の完全導電性と完全反磁性は互いに独立した特性であることに注意する必要がある。図 1.3、図 1.4 に示すよう

に完全反磁性を持った材料と完全導電性だけを持った材料について考える。完全反磁性の場合は過程によらず、常に材料内の磁界は排除されることになる。一方で、完全導電性だけを持った材料では、外部磁界を加えた場合、電磁誘導によりその磁界を侵入させないように材料表面に電流が誘導される。当然、電気抵抗がないためにこの誘導電流は減衰することなく、材料内に磁界が侵入することはできず、磁束密度はゼロに保たれる。しかし、完全導電性が生じる前に外部磁界を加え、その後完全導電性を持った場合は磁束の変化を伴わず、内部の磁束はその状態が保たれたままになる。これは完全反磁性の性質と矛盾するため、完全導電性の性質だけでは完全反磁性を説明出来ない。従って、完全反磁性の性質は完全導電性とは独立した、超伝導体の本質的な現象と言える。

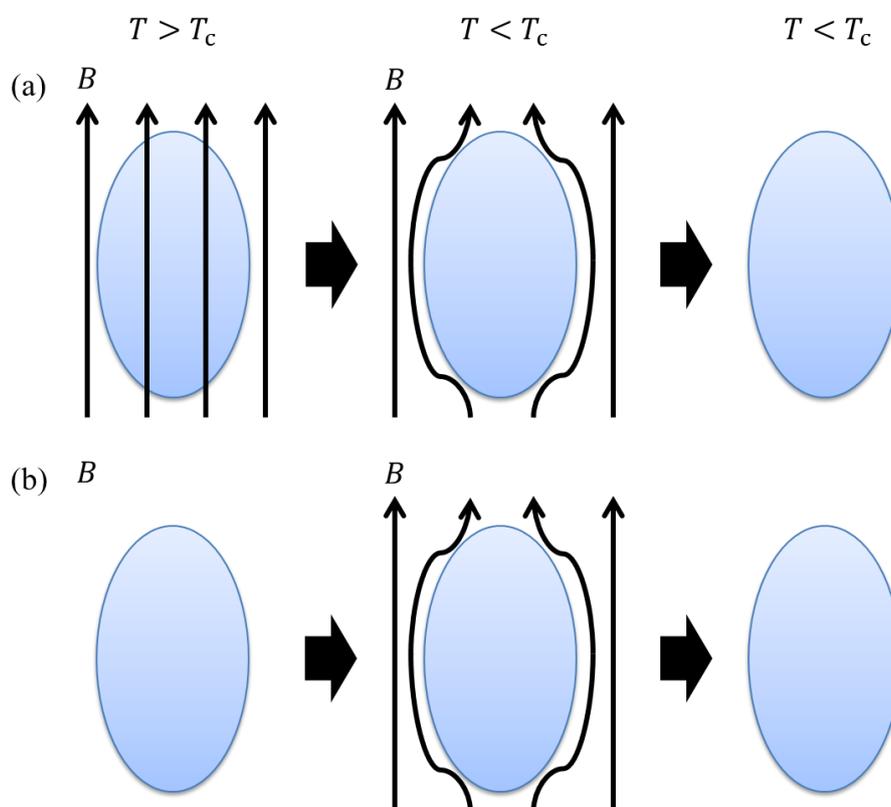


図 1.3:完全反磁性を持った超伝導体に対し(a)外部磁界を加えたまま冷却し、その後外部磁界を取り去った場合(b)冷却した後に外部磁界を加え、その後取り去った場合の内部の磁束分布。

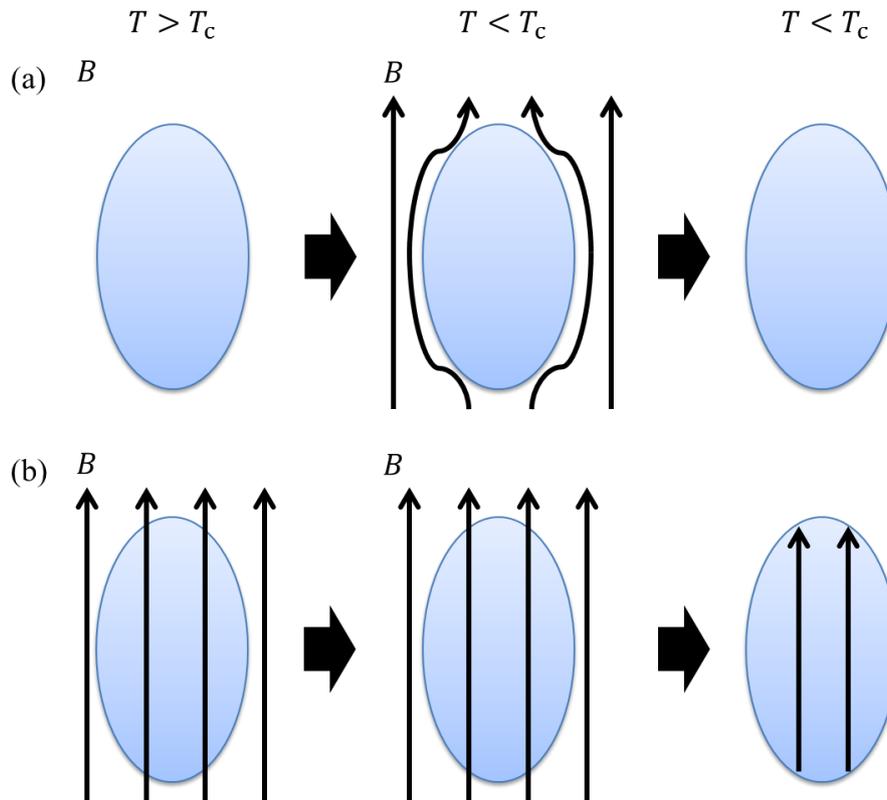


図 1.4:完全導電性だけを持った材料に対し(a)冷却した後に外部磁界を加え、その後取り去った場合(b)外部磁界を加えたまま冷却し、その後外部磁界を取り去った場合の内部の磁束分布。

### 1.2.3 第一種超伝導体と第二種超伝導体

超伝導体は外部磁界に対する振る舞いの違いによって第一種超伝導体と第二種超伝導体の 2 種類に分類される。前述のように超伝導体に外部磁界を印加した場合はマイスナー効果によって内部の磁束密度  $B$  がゼロとなる。ここから外部磁界を強めた場合に、 $30 - 80 \text{ mT}$  程度の小さな磁界で超伝導状態が壊れてしまう。この最大の磁界を臨界磁界  $B_c$  と呼び、このような超伝導体を第一種超伝導体と呼ぶ。典型的な第一種超伝導体は  $\text{Hg}$  や  $\text{Ta}$  などである。一方で下部臨界磁界  $B_{c1}$  と上部臨界磁界  $B_{c2}$  を境目として外部磁界に対する振る舞いに変化する超伝導体は、第二種超伝導体と呼ばれる。第二種超伝導体は外部磁界の大きさが  $B_{c1}$  以下の状態では第一種超伝導体と同じくマイスナー効果によって内部の磁束密度はゼロとなるが、外部磁界の大きさが  $B_{c1}$  以上  $B_{c2}$  以下の領域では量子化された磁束を内部に侵入させつつも超伝導状態を保つ混合状態となり、 $B_{c2}$  で超伝導状態が壊れる。第二種超伝導体には  $\text{Nb}$  や  $\text{V}$  のほか合金超伝導体や化合物超伝導体の多くが該当し、表 1.1 に示すように  $B_{c2}$  は  $B_{c1}$  と

比較して非常に大きく、強い磁界中でも超伝導状態を保つことが可能なために様々な機器への応用が期待されている。

表 1.1: 主な第二種超伝導体の臨界磁界[7]。

物質名	$B_{c1}$ [T]	$B_{c2}$ [T]
Nb	0.174	0.404
Nb <sub>3</sub> Sn	0.09	29
V <sub>3</sub> Ga		27
V <sub>3</sub> Si		25
YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub>	0.085( $B//c$ )	72( $B//c$ )
	0.25( $B \perp c$ )	350( $B \perp c$ )
(Bi - Pb) <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub>	0.042	60( $B//c$ )
		850( $B \perp c$ )
Tl <sub>2</sub> Ba <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>x</sub>		42( $B//c$ )
		1400( $B \perp c$ )

#### 1.2.4 $n$ 値

超伝導体に電流を通電した際の電流-電圧( $I$ - $V$ )特性は、電流値が $I_c$ 付近となった場合に急激に電圧が増加するような非線形的な振る舞いを示すことがわかっている。このとき $I$ - $V$ 特性を

$$V \propto I^n \quad (1.2)$$

のように表した際の指数 $n$ を超伝導体の $n$ 値として扱う。 $n$ 値が高いほど電流値を変化させた際の電圧の変化が大きいため、実用線材においては優れているとされる。常伝導状態では電圧は電流に対して線形的すなわちオーミックな振る舞いを示すため、 $n = 1$ となる。

## 1.3 磁束ピンニング

多くの超伝導応用機器には、超伝導体内部に磁束線の侵入を許した混合状態で超伝導状態を保つ第二種超伝導体が利用されている。第二種超伝導体に磁界 $B$ を加えた状態で電流密度 $J$ の電流を流すと、磁束線は Lorentz 力 $F_L$

$$F_L = J \times B \quad (1.3)$$

を受ける。この Lorentz 力によって磁束線が速度 $v$ で運動を始めると、Josephson の関係式

$$E = B \times v \quad (1.4)$$

で表される電界が生じ、損失無しに電流を流すことが出来なくなる。従って、損失無しに電流を流すためにはこの Lorentz 力による磁束線の運動を妨げる必要がある。実際の超伝導体内部においては、超伝導体中に存在するピンニングセンターまたは単にピンとよばれる微細な非超伝導物質によって磁束線がトラップされる。この Lorentz 力と反対方向に働く力をピンニング力 $F_P$ といい、このような力により電界の発生が抑えられる機構を磁束ピンニング機構と呼ぶ。したがって、磁束線はピンニング力の最大力までは動くことができず、この時の最大電流を $J = J_c$ とすると、ピンニング力 $F_P$ と Lorentz 力 $F_L$ のつり合いから

$$F_P = J_c B \quad (1.5)$$

となる。磁束線が止められた状態、すなわち電気抵抗ゼロで流すことのできる電流密度の最大値は

$$J_c = \frac{F_P}{B} \quad (1.6)$$

となり、この電流密度を臨界電流密度と呼ぶ。したがって、この $J_c$ を増加させるためには、 $F_P$ を増加させればよいことがわかる。

超伝導体の材質や組成によって先天的に決定される $B_c$ や $T_c$ などと異なり、次節で述べる人工ピンの導入によって $F_P$ は後天的に増加させることが可能なため、適切な人工ピンの導入によって $J_c$ は増加可能である。

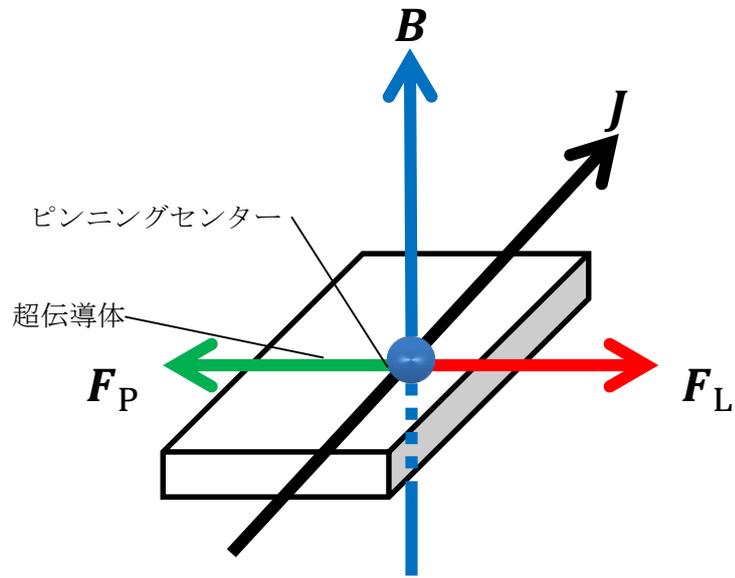


図 1.5: 第二種超伝導体内部で磁束線に働く  $F_P$ 、 $F_L$  とピンニングセンター。

## 1.4 人工ピン

前節で述べたように超伝導体の $J_c$ を増加させるためには磁束線をピン止めするピンニングセンター(Artificial Pinning Center)の導入が有効である。このピンは作製過程で導入される欠陥や不純物などの自然ピンや、人為的に導入される人工ピンなどがある。人工ピンには数種類の形状があり、超伝導体の使用環境により適切なピン形状を選択する必要がある。本節では、代表的な人工ピンの種類とその特徴について述べる。

### 1.4.1 人工ピンの種類

#### (i)線状ピン

線状ピンは 1 次元ピンに分類され、外部から重イオン照射を行った際に生成される線状欠陥や、 $\text{BaZnO}_3$ や $\text{BaHfO}_3$ などを超伝導成膜原料に導入した薄膜の作製過程で生成されるナノロッド欠陥がこのピンに該当する。線状ピンの中でも、超伝導薄膜の $c$ 軸方向に平行なピンは $c$ 軸相関ピンと呼ばれ、このピンの導入によって $c$ 軸に平行に磁界が加わった場合には $J_c$ を増加させることができる。

#### (ii)面状ピン

面状ピンは 2 次元ピンに分類され、超伝導層の作製過程で生成される結晶粒界や積層欠陥のほか、超伝導層と非超伝導層による $a$ 軸配向多層膜がある[8]。また、後に述べるように $\text{CuO}_2$ 面の層状構造において、この面間がピンとなる intrinsic ピンも典型的な面状ピンである[9]。この面状ピンは面として磁束線をピン止めすることができ、線状ピンよりも高効率で磁束線を止めることができる。ただし、面状ピンの面方向と磁界が垂直で、面方向と磁束線が受けるローレンツ力が平行な場合には、面状ピン内で磁束線が運動してしまうために、ピン止めができないことが知られている。従って、図 1.5 に示すような超伝導体に面状ピンを導入する場合は、電流 $J$ と磁界 $B$ がなす面と面状ピンの面方向が平行となるように導入する必要がある。

#### (iii)粒状ピン

粒状ピンは 3 次元ピンに分類され、超伝導層の作製過程で生成される常伝導析出物や、外部から導入された $\text{Y}_2\text{O}_3$ などが該当する。粒状ピンを導入することで様々な方向からの磁束線をピン止めすることが出来るため、複数方向からの磁界中で使用される超伝導マグネットに用いる線材などへの応用が期待されている。さらに、粒状ピンと線状ピンを組み合わせ、単一種類の人工ピンを導入した場合よりも $J_c$ の磁界角度依存性を改善させる研究も行われている[10]。

## 1.5 縦磁界効果

### 1.5.1 縦磁界中の諸現象

超伝導体に電流を流しているとき、一般的に磁界の向きは電流による自己磁界を含めて電流と垂直( $B \perp I$ )であるが、磁界の向きを電流と平行( $B // I$ )な縦磁界状態にした場合には以下に示す特徴的な現象が観測される。

- (i) 垂直磁界状態と比較して、 $J_c$ が大きく増加する。
- (ii) 磁束構造は局所的に電流（電流密度  $J$ ）と磁束密度  $B$  が平行で、磁束線に Lorentz 力が働かない Force-Free 状態

$$J \times B = 0 \quad (1.7)$$

になっていることが知られており、Force-Free モデルなどが提案されている[11]。

- (iii) 交流電流による損失が縦磁界の増加に減少する。
- (iv) 磁束線の運動による誘導電界を与える Josephson の関係式  $E = B \times v$  が成立せず

$$E \neq B \times v \quad (1.8)$$

となる。

- (v)  $J_c$  を超えた抵抗状態において、らせん状の表面電界構造をもつ。

縦磁界状態では上記のような現象が観測されるが、特に(i)の $J_c$ 増加については図 1.6 に示すように金属超伝導体において最大で 100 倍ほどの増加量となることが報告されている。

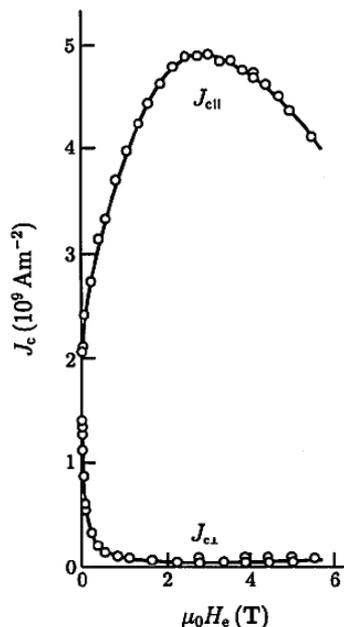


図 1.6: Ti-36%Nb 円柱試料の縦磁界中および横磁界中での  $J_c$ - $B$  特性[12]。

## 1.5.2 人工ピンの導入と縦磁界中での臨界電流密度

縦磁界中では前節で述べたように電流 $J$ と磁界 $B$ による Lorentz 力が働かない Force-Free 状態となることから、 $J_c$ は $F_p$ に依存せず、無限に電流を流せると考えられる。しかし、実際には縦磁界中でも $J_c$ が存在し、さらに $J_c$ は人工ピンの導入によって増加することが報告されている[13]。図 1.7 に中性子照射により人工ピンを導入した $Nb_3Sn$ 薄膜の、縦磁界中および横磁界中での臨界電流特性を示す。図より、縦磁界を印加することで自己磁界や横磁界中よりも高い $J_c$ が得られ、さらに人工ピンの導入によって $J_c$ が増加していることがわかる。

縦磁界中では通常の横磁界中とは異なり、 $J_c$ がどのような機構で決定されるかについては解明されていないが、上記のように縦磁界中でも $J_c$ は $F_p$ に依存し、適切な人工ピンの導入によって増加させることができる。従って、さまざまな人工ピンを導入した場合の縦磁界中での $J_c$ 特性を評価し、その関係性を解明することが、縦磁界効果を理解する上で重要である。

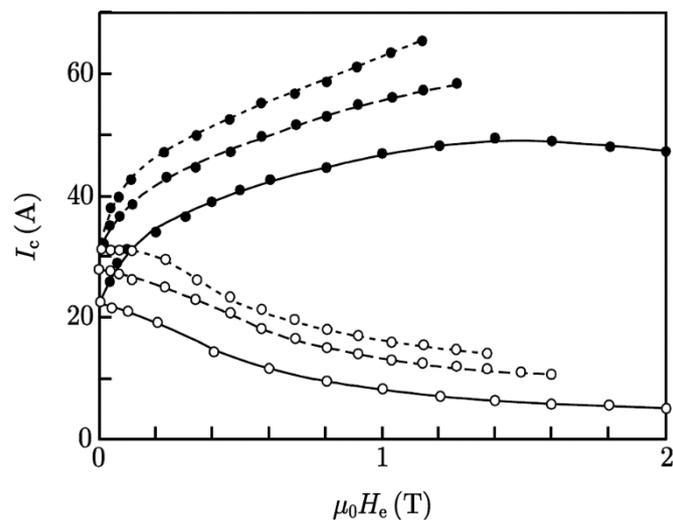


図 1.7: 中性子照射を行った $Nb_3Sn$ 薄膜の縦磁界中と横磁界中での臨界電流特性[13]。

## 1.6 高温超伝導体

前述のように第二種超伝導体は数十 T 程度の強い磁界中においても超伝導状態を維持し、損失無しに電流を流すことができるために様々な応用が期待されている。さらに、第二種超伝導体の中でも特に活発な研究が行われている超伝導体として、高温超伝導体が挙げられる。日本工業規格(JISh7005)によると、25 K以上の $T_c$ を持つ超伝導体は高温超伝導体(High-Temperature Superconductor:HTS)として定義されており、 $MgB_2$ や鉄系超伝導体の他、本研究で扱う銅酸化物超伝導体が該当する。ここでは、銅酸化物超伝導体について詳しく説明する。

### 1.6.1 銅酸化物伝導体

超伝導体の結晶中に $CuO_2$ 面を持つものを総称して銅酸化物超伝導体と呼ぶ。銅酸化物超伝導体は電気伝導性を示す $CuO_2$ 面と、 $CuO_2$ 面に超伝導電子を供給する絶縁面によって構成されており、 $CuO_2$ 面に平行な方向には電流が流れやすいが、垂直な方向には電流が流れにくい性質を持つ。よって、銅酸化物超伝導体を線材などへ応用する際には、 $CuO_2$ 面を揃えるように結晶を配向させ、この面と平行に電流が流れるようにする必要がある。また、銅酸化物超伝導体の中には液体窒素の沸点である 77.3 K を超える高い $T_c$ を持つものも多く存在する。従って、これらの超伝導体を各種装置に応用した場合には安価な液体窒素での運用が可能なことから、次世代を担う超伝導体として注目されており、特に応用が期待されるものとしてビスマス(Bi)系超伝導体と希土類(RE: Rare-Earth)系超伝導体が挙げられる。Bi系超伝導体は $ab$ 軸方向への結晶の成長が速く、圧延によって電流通電方向に $CuO_2$ 面を揃えた線材の作製が可能である。従って長尺の線材を作製可能であり、近年では km オーダーの線材も開発されている。Bi系超伝導線材の実用化に向けた課題点としては、さらなる高 $J_c$ 化や、線材コストのほとんどを占めている外装部の Ag の使用量削減などが挙げられる。一方で RE系超伝導体は $CuO_2$ 面を機械的に揃えることが難しいために、作製過程において Pulse Laser Deposition(PLD)法、Chemical Vapor Deposition(CVD)法、Metal Organic Decomposition(MOD)法などの特殊なプロセスが必要であり、Bi系のように容易に長尺線材を作製することは難しい。しかし、RE系超伝導体は高温・高磁界中で高い $J_c$ が得られることから、次世代の超伝導体として注目されており、高特性化や長尺化、低コスト化に向けた研究が活発に行われている。

## 1.7 RE 系超伝導体

銅酸化物超伝導体の一種で  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  の化学式で示される構造を持ち、組成比  $\text{RE}:\text{Ba}:\text{Cu} = 1:2:3$  となる超伝導体を Rare Earth(RE)系超伝導体と呼ぶ。RE 系超伝導体は電気伝導性を示す  $\text{CuO}_2$  面と絶縁性を示す  $\text{BaO}$  面から構成されるペロブスカイト構造と呼ばれる結晶構造を持ち、前節で述べたような電気伝導性の異方性を示す。RE 系超伝導体の一種である YBCO 超伝導体の結晶構造を図 1.8 に示す。RE には Y のほか La、Sm、Eu、Gd、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu などが該当し、RE のイオン半径の違いによって超伝導特性に差が生じる。RE に Gd を置換した GdBCO 超伝導体では、PLD 法を用いて超伝導層を成膜した際に  $c$  軸方向に相関があるピンが自然に導入されやすいことが報告されており [14]、磁界中で高い  $J_c$  を示す。また、イオン半径が大きいほど高い  $T_c$  を示すことが分かっていることも、高い  $J_c$  の要因として挙げられる [15—18]。

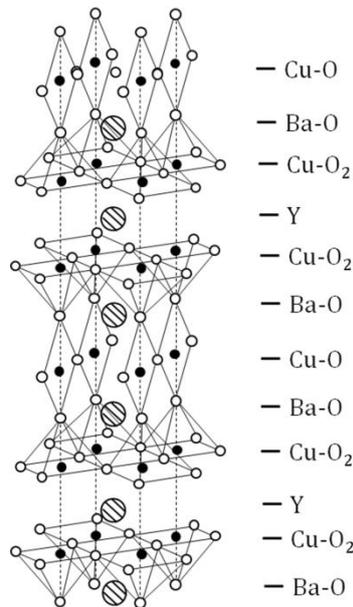


図 1.8:YBCO 超伝導体の結晶構造。

### 1.7.1 RE 系超伝導体の作製方法

RE 系超伝導体は気相法や液相法などを用いて、基板上に薄膜として作製される。本節では本研究に用いた線材の作製方法である PLD 法、MOD 法、CVD 法と、PLD 法における人工ピンの導入方法、RE 系超伝導線材に用いられる基板について述べる。

#### ● Pulse Laser Deposition(PLD)法

PLD 法は気相蒸着法の一つであり、原料の組成に近い薄膜が作製できる点や、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など様々な条件で成膜できる点などから、超伝導薄膜のほか様々な薄膜の作製に用いられている。図 1.9 に PLD 装置の構造図を

示す。PLD 装置は真空チャンバーで覆われており、外部からレーザー光を照射する照射窓や、ターゲットを取り付ける回転テーブル、基板取り付け部などによって構成される。照射窓から高エネルギーのパルスレーザー光を入射させ、ターゲット表面に打ち付けると、照射された部分が瞬時に昇華され、PLD 装置内を進んだ後にターゲットの対角に配置された基板上に堆積される。基板はヒーターによって一定温度に加熱されており、堆積された超伝導粒子は基板上で成長し、薄膜が形成される。

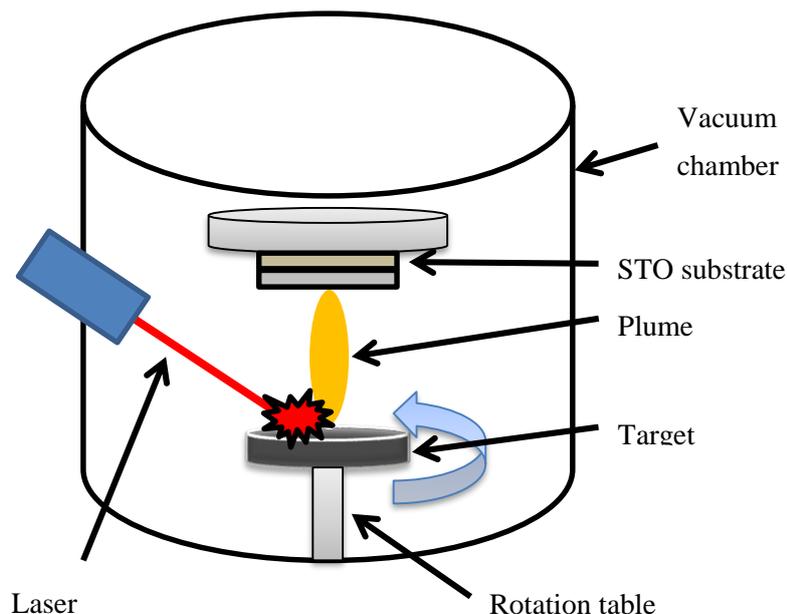


図 1.9:PLD 装置の構造図。

### ● Metal Organic Decomposition(MOD)法

MOD 法は液相法の一つであり、高速かつ安価に薄膜を作製できる方法である。MOD 法では有機酸溶液中に作製する薄膜の原材料を溶かし、基板上に塗布した後に仮焼、本焼、酸素アニールを行うことで薄膜が完成する。他の方法と比較した場合、プロセス中で高真空設備を必要としないために、作製に必要な設備費用が安価である。また、溶液の塗布と熱処理を連続的に行うことで、長尺の線材を高速に作製する方法も開発されており、実用線材の作製方法として研究が進められている。本研究で測定に用いた MOD 線材では、溶液にトリフルオロ酢酸(Trifluoro Acetate)を用いた TFA-MOD 法で薄膜が作製されている。図 1.10 に MOD 法による作製プロセスの概略図を示す。

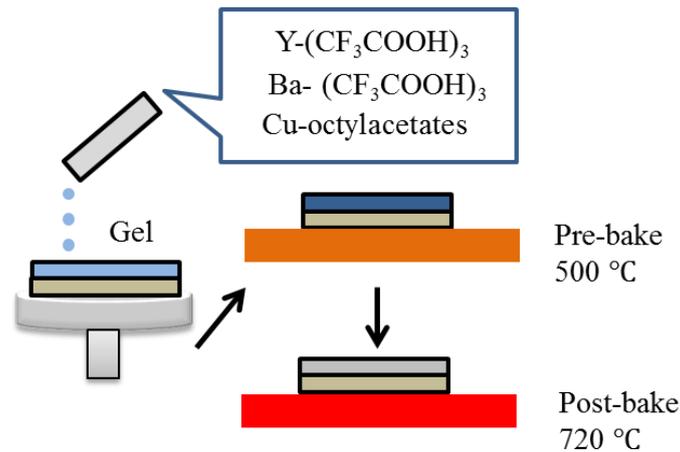


図 1.10:MOD 法による作製プロセスの概略図。

- **Chemical Vapor Deposition(CVD)法**

CVD 法は気相法による薄膜作製プロセスの一つであり、加熱した基板に作製する薄膜の原材料を含むガスを供給し、基板表面で起こる化学反応によって基板上に薄膜を成膜する。ガスの流量や組成、温度を制御することで成膜条件をコントロールでき、基板形状によらず均一な薄膜を作製できるために、量産性に優れた作製方法である。

### 1.7.2 PLD 法における人工ピンの導入方法

- **混合ターゲット法**

混合ターゲット法では超伝導物質の母体と人工ピンの母体を混合させたものを加圧焼結し、PLD 法におけるターゲットとして使用する方法である。この方法では人工ピンを導入しない Pure 試料を作製する場合と同じ作製プロセスであるため、人工ピンの導入・非導入によって成膜プロセスの変更を行う必要がないという特徴がある。一方で、導入する人工ピンの種類や量を変更する場合は、長時間のプロセスが必要なターゲットの作製からやり直す必要がある。また、ターゲット中において人工ピンはランダムに分布し、作製された薄膜中においても同様に分布するため、薄膜中における人工ピンの分布の制御が不可能である。

- **ターゲット交換法**

ターゲット交換法は PLD 装置内に超伝導体のターゲットと人工ピンのターゲットを設置し、交互にレーザー光を照射することで人工ピンを導入した超伝導薄膜を作製する方法である。人工ピンの導入のために混合ターゲットを準備する必要がなく、レーザー光の照射頻度を変更するだけで人工ピンの導入量を制御することが可能なため、特性の異なる複数の試料を作製する場合に特に有利である。さらに、レーザー光の制御によって人工ピンを導入した超伝導層と導入していない超伝導層を積層した構造の薄膜なども作製可能である。

一方で、薄膜作製プロセスにおいてレーザー光を照射する位置を変更する過程に時間を要することから、他の方法と比較して薄膜の作製に時間がかかる。

#### ● 表面修飾ターゲット法

表面修飾ターゲット法ではPureの超伝導体のターゲット上に人工ピンのターゲットを小片にしたものを貼付し、PLD法に用いる。薄膜作製のために混合ターゲットを準備する必要がなく、作製過程でターゲットの交換も不要である。さらに、超伝導体のターゲット上に貼付する人工ピンのターゲットの大きさを変化させることによって、人工ピンの導入量を制御できる特徴を持つ。一方で、超伝導体のターゲットと人工ピンのターゲットの境界にレーザー光が照射された場合、プラズマ化した粒子の進む方向がずれてしまい、基板上に堆積されない場合がある。

### 1.7.3 RE系超伝導線材に用いる基板

REBCO超伝導体は結晶構造に起因する電流通電方向の異方性を持つために、薄膜を作製する際にはCuO面を揃えて成膜する必要がある。従って、超伝導線材を作製する際には基板表面の凹凸によって超伝導層の配向が乱れないように、表面の均一度が高い基板が必要となる。さらに、超伝導線材はケーブルやマグネットなどに用いられることから、ある程度の形状変化が可能な材質であることが求められる。以上の理由により、現在市販の超伝導線材ではハステロイなどの合金に表面の均一度を向上させるための中間層を成膜したものが多く用いられており、半値幅 $\Delta\phi$ は $5^\circ$ 以下程度である[19]。本研究で用いたPLD試料には、超伝導層の配向度を高め、縦磁界下での均一な電流経路を確保するために、 $\text{SrTiO}_3$ 単結晶基板を用いた。現在市販されている $\text{SrTiO}_3$ 単結晶では、半値幅 $\Delta\phi$ は $3^\circ$ 程度である。

## 1.8 RE系超伝導線材における縦磁界効果

金属系超伝導体においては図 1.6 や図 1.7 に示すように、縦磁界中での $J_c$ の増加が多く報告されていたが、近年では RE 系超伝導体においても同様な報告がなされている[20]。図 1.11 に人工ピンとしてBaHfO<sub>3</sub>(BHO)を導入したSmBCO薄膜と、BHO を導入していない薄膜の縦磁界中での臨界電流特性を示す。図より、RE 系超伝導線材においても縦磁界を印加することで $J_c$ が増加し、さらに $J_c$ は人工ピンの導入に依存していることがわかる。

一方で、RE 系超伝導体の縦磁界中での $J_c$ 特性は、図 1.6 のような金属超伝導体の場合と比較して $J_c$ の増加率が低く、金属超伝導体のように数百倍ほどの差は見られていない。この理由として、線材の形状に起因する自己磁界の影響と、超伝導体内の結晶構造の不均一さによる影響が挙げられる。

はじめに、自己磁界の影響について説明する。円柱状に作製された金属超伝導体は電流を通電した際に生じる自己磁界の影響をほとんど受けず、縦磁界中で $J_c$ を大きく増加できるが、RE 系超伝導線材は結晶を積み重ねた構造となっているために円柱状に成膜することが難しく、薄膜状の線材構造となる。この場合は自己磁界によって超伝導薄膜端部に薄膜と垂直な磁界が生じ、縦磁界が崩れてしまうために、顕著な $J_c$ の増加が得られていないと考えられる。従って、この点を克服するためには線材を円形に配置したり、線材の近傍に磁界を吸収させるための強磁性体を配置したりするなど、薄膜に垂直な磁界を低減する工夫が必要である。

次に、RE 系超伝導体内の結晶構造による影響について説明する。RE 系超伝導体は 1.7 節で述べるように、内部に電気伝導層と絶縁層を持つ構造となっているため、電流の流れ方に不均一さが生じてしまう。また、RE 系線材は基板上に結晶を堆積させて作製されるため、基板表面の不均一さなどから生じる結晶の配向具合の低下も、電流経路の不均一さに影響を与える。近年では、RE 系超伝導線材の薄膜作製技術や、線材に用いる基板の作製技術が向上し、図 1.11 に示すように縦磁界中で優れた $J_c$ 特性を示す線材も開発されている。

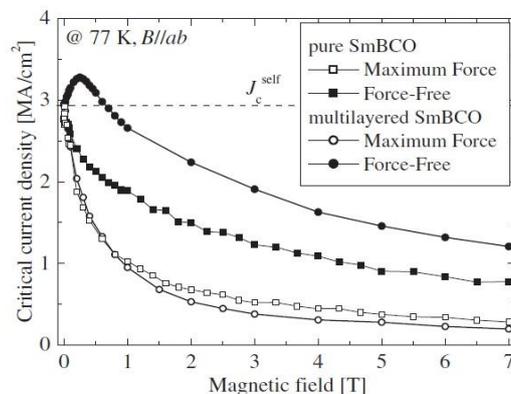


図 1.11:人工ピンを導入した SmBCO 薄膜の縦磁界中での臨界電流特性[20]。

## 1.9 超伝導応用

超伝導体の電気抵抗無しに大電流を流すことができる特徴を利用して、大電流輸送や高磁界マグネットなどの様々な機器への応用に向けた研究が進められている。高磁界を利用する機器の例として、MRI やリニアモーターカーが挙げられ、大電流を用いる機器の例として、電力の送電系統が挙げられる。本節では、送電系統と超伝導ケーブルによる送電について述べる。

### 1.9.1 交流送電と直流送電

日本国内では、電気事業者の発電所から家庭や事業所などの需要地への電力供給には交流送電が用いられている。交流送電の利点として、主要な発電方法である火力発電所や原子力発電所から供給される交流電力をそのまま輸送できる点と、送電途中での変圧が容易であるという点が挙げられる。現在の発電方法の大半を占める火力発電所や原子力発電所では、燃料から得られた熱エネルギーを運動エネルギーに変換し、タービンを介して同期式発電機を駆動する。また、風力・水力発電においても同様に同期式発電機が用いられる。同期式発電機からは構造上、交流電力が出力されるため、変換無しに送電が可能な交流送電が適している。交流送電の欠点としては、送電に用いるケーブルの利用効率が低い点が挙げられる。交流電圧には実効値と最大値が存在するため、最大電圧に耐えうるようなケーブルの設計が必要となる。例として、一般家庭に供給される単相100Vの場合、最大値は約141Vとなるため、ケーブルの耐圧は100Vではなく141V以上が必要となる。さらに、交流電源は力率を考慮する必要もある。電動機などの誘導性負荷は有効電力のみを消費するが、電力を供給するケーブルは皮相電力に耐えうる必要があるため、その点を考慮した設計が必要となる。

一方で直流送電の利点は、クリーンエネルギー源や情報機器との親和性の高さが挙げられる。近年では発電に伴う二酸化炭素排出の抑制や原発事故への懸念などから、太陽光発電や燃料電池などの代替手段による電力供給が注目されており、特に太陽光発電には様々な企業が参入し、メガソーラー発電所の建設が活発に進められている。これらの方法で発電される電力は直流であるため、直流送電を用いると変換による損失無しに送電が可能である。また、情報化社会の発展に伴い、様々なサービスを支えるサーバーを格納したデータセンターなどの情報機器の稼働台数が急増しているが、情報機器の多くは入力された交流電源を内部で直流に変換して使用している。したがって、このような機器に対しては直流で電源を供給した方が、変換による損失の削減や機器の簡便化の点で有利である。直流送電の欠点としては、送電網内での変圧設備にかかるコストが、交流送電よりも高い点が挙げられる。交流送電ではトランスを用いて容易に変圧が可能であるが、直流送電の場合はサイリスタをはじめとした複雑な変圧設備が必要となるため、複数の異なる電圧が必要

な大規模送電網の場合は交流送電よりもコストが高くなってしまう場合もある。よって、現在の交流送電を全て直流送電へと置き換えることは現実的ではない。しかし、前述のデータセンターなどのように、単一電圧の直流電力を大量に消費するような施設などでは直流化による利点が多く見込まれるために、直流送電の実現に向けた研究が進められている。

## 1.9.2 超伝導送電ケーブル

現在、発電所で作られた電力は Aluminium Conductors Steel Reinforced(ACSR)と呼ばれる銅とアルミニウムによって構成された送電線を用いて需要地へ供給されているが、この途中に電気抵抗に起因する損失によって約5%が失われている。同様の規模の ACSR ケーブルと超伝導ケーブルを用いて直流送電を行った場合を仮定すると、この損失を2%程度まで低減できるという報告もある[21]。前述のように超伝導体に交流を通電した場合には損失が発生してしまうため、超伝導ケーブルによる送電は直流による送電が重要となる。

また、超伝導体には銅と比較して1000倍以上の電流を損失無しに流すことができるため、送電による損失を削減しつつも小スペース・大容量の送電ケーブルを実現することも可能である。超伝導送電ケーブルの一例を、図 1.12 に示す。このケーブルは最内部に冷媒を流す空間を備えており、液体窒素などを流すことで超伝導体を電気抵抗ゼロの状態にしている。

国内においては、2012年に中部大学のグループが200 m級の Bi-2223 超伝導ケーブルの制作を行い、損失無しでの直流送電に成功した[22]。さらに2015年には中部大学、住友電工、さくらインターネットらの研究グループによって500 m、2000 kW級の Bi-2223 超伝導ケーブルを用いた、太陽光発電所と大規模データセンター間の直流超伝導試験が行われ、安定稼働が確認されている[23]。現在では大電流の直流を必要とするデータセンターにおける電力消費の効率化のため、高圧直流供給(HVDC)などの方法が注目され開発が進められているが[24]、超伝導ケーブルによる送電は HVDC との親和性が高く、より一層の効率化が期待される。

国際的には大陸間を超伝導ケーブルで接続し、世界中で電力を融通し合う構想も存在する。例として、太陽光や水力などを利用した発電は環境負荷の低いクリーンエネルギーであるが、設置場所の地形や気象条件などに強く依存し、発電に適した地域と電力需要の大きい都市部とは距離が離れている場合が多く、この点が課題となっていた。超伝導ケーブルによる送電では、このような距離による損失を抑制できる。従って、砂漠地域で発電した電力を都市部で利用したり、昼間の地域で消費しきれない電力を夜間の地域へ融通したりするなど、電力消費を最大限に効率化することが可能である。

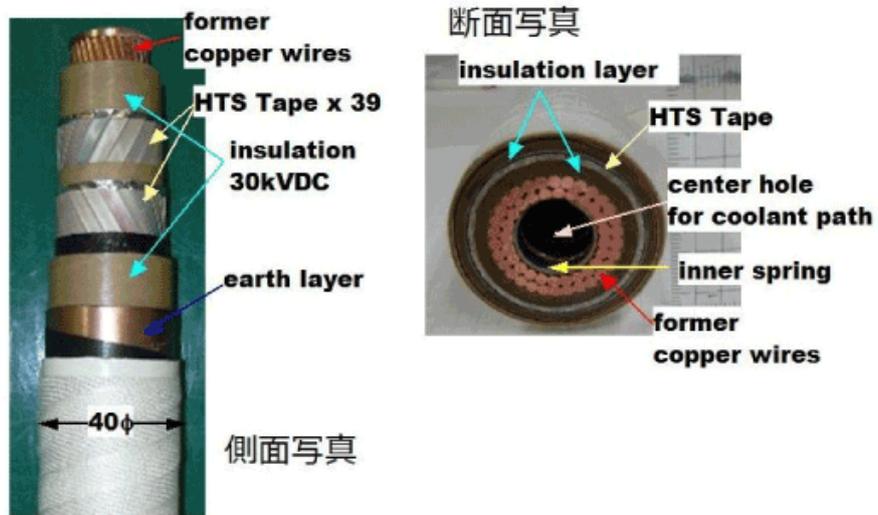


図 1.12:超伝導電力ケーブルの側面および断面[25]。

## 1.10 縦磁界効果を利用した直流超伝導ケーブル

### 1.10.1 概要

超伝導線材の $J_c$ を増加させるために縦磁界効果を利用する利点として、線材の作製段階での材料改善ではなく、利用環境を工夫することで $J_c$ を増加できる点が挙げられる。すなわち、線材の特性向上を目的とした既存の技術に加え、 $J_c$ を増加させる新たな方法として利用するため、 $J_c$ の増加が必要とされる超伝導ケーブルへの利用が期待される。図 1.13 に松下らによって提案されている縦磁界効果を利用した直流超伝導ケーブルの構造図を示す。本ケーブルは通電電流を利用して内部で縦磁界を発生し、この縦磁界によって $J_c$ を増加させる[26]。従って外部からの縦磁界の印加が不要であり、従来のケーブルと同様の方法で利用できる。

ケーブルの内部は内側層(inner layer)と外側層(shield layer)の2つの絶縁された領域に分かれており、それぞれの領域に複数の超伝導層が設けられている。ケーブルの通電時には内側層に電源から負荷へ向かう行きの電流が、外側層には負荷から電源へ向かう戻りの電流が、それぞれ流れる。この通電時に各線材に生じる自己磁界は、一般のケーブルでは打ち消す方向に線材を巻き付けるが、縦磁界ケーブルの場合は内側の層の線材に縦磁界が加わるように設計を行う。内側層と外側層のそれぞれにおいて通電電流による自己磁界が発生すると、外側層に流れる電流によってケーブルの軸方向に磁界が発生する。内側層はこの縦磁界によって $J_c$ が増加し、ケーブル全体の臨界輸送電流 $I_t$ を増加させ、従来の超伝導ケーブルよりも効率的な送電を可能にする。

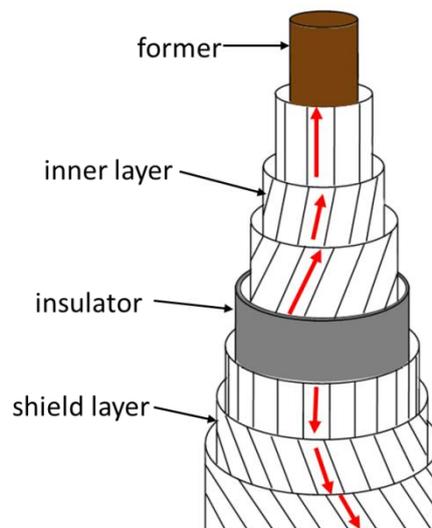


図 1.13:縦磁界効果を利用した直流超伝導ケーブルの構造図[26]。

## 1.10.2 計算モデル

1.10.1 節で述べた縦磁界効果を利用した直流超伝導ケーブルの輸送電流 $I_t$ は、以下のようにして導出できる[27]。

はじめにケーブルに用いる線材の $J_c$ の角度依存性のモデル化について説明する。ここでは厚さに対して幅が十分に大きな形状であるテープ状の線材を、フォーマーに対して巻き付けた超伝導ケーブルを仮定する。図 1.14 に示すように、テープ線材に電流を通电した場合には、電流による自己磁界 $B_{\text{self}}$ がテープの $ab$ 面に平行かつ電流と垂直な方向に発生する。さらに、線材に対して外部磁界 $B_{\text{ext}}$ を加えた場合には、線材に加わる磁界 $B$ は

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_{\text{self}} + \mathbf{B}_{\text{ext}} \quad (1.9)$$

と表せる。縦磁界中での $J_c$ 増加は超伝導体内の電流 $I$ と磁界 $B$ が平行な場合に最も大きくなるため、このケーブルを設計する際には電流 $I$ と(1.9)式の磁界 $B$ が平行となるように、フォーマーに対する線材の巻き付け角度 $\varphi$ の値を決定する必要がある。

ここでは、各線材の縦磁界中と横磁界中での $J_c$ - $B$ 特性から、 $J_c$ の磁界印加角度依存性である $J_c$ - $\varphi$ 特性へのモデル化について説明する。

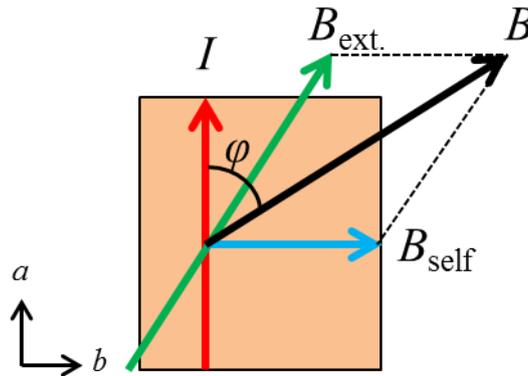


図 1.14:超伝導テープ線材の面内における電流と磁界の関係図。

線材の縦磁界中での $J_c$ - $B$ 特性を

$$J_{\parallel}(B) = J_c(B, \varphi = 0) \quad (1.10)$$

とおき、横磁界中での $J_c$ - $B$ 特性を

$$J_{\perp}(B) = J_c(B, \varphi = \pi/2) \quad (1.11)$$

とおく。また、これらの値を

$$J_{\parallel}(B) = \sum_{j=0}^5 K_{\parallel} B^j \quad (1.12)$$

$$J_{\perp}(B) = \sum_{j=0}^5 K_{\perp} B^j \quad (1.13)$$

の形に近似する。ここで $K_{\parallel}$ と $K_{\perp}$ は近似式での展開係数である。

(1.12)式と(1.13)式を用いて、 $J_c$ の磁界印加角度依存性は

$$J_c(\varphi) = \frac{1}{2}(J_{\parallel} + J_{\perp}) + \frac{1}{2}(J_{\parallel} - J_{\perp}) \cos 2\varphi \quad (1.14)$$

のように表すことができる。

次に、ケーブルに縦磁界を印加した場合の臨界輸送電流 $I_t$ を導出するために、ケーブルを構成する各線材に加わる磁界を求め、さらにその際の超伝導層の $J_c$ を求める。

はじめに、図 1.15 に示すように半径 $R$ のフォーマーに対して角度 $\theta(0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ)$ で $N$ 回らせんに巻かれた線材に電流 $I$ が流れるとする。図 1.16 は $\theta = 0$ (1層目)の場合と $\theta = \theta_i$ ( $i$ 層目)の場合を表しており、線材の幅を $w$ 、長さを $2\pi R$ とすると、 $\theta = 0$ のとき

$$N = \frac{2\pi R}{w} \quad (1.15)$$

となり、このとき線材 1 枚に流れる電流値を $I_1$ とすると、

$$I_1 = \frac{I}{N} = \frac{wI}{2\pi R} \quad (1.16)$$

と表すことができる。また、線材を角度 $\theta_i$ で巻き付けた場合の層数、線材 1 枚に流れる電流量をそれぞれ $N'$ 、 $I_i$ とすると、

$$N' = \frac{2\pi R}{w'} = \frac{2\pi R}{w} \cos \theta_i \quad (1.17)$$

$$I_i = \frac{I}{N'} = \frac{wI}{2\pi R \cos \theta_i} \quad (1.18)$$

となる。

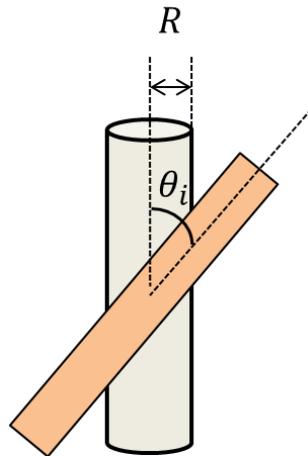


図 1.15:フォーマーに線材を巻き付ける際の角度 $\theta_i$ 。

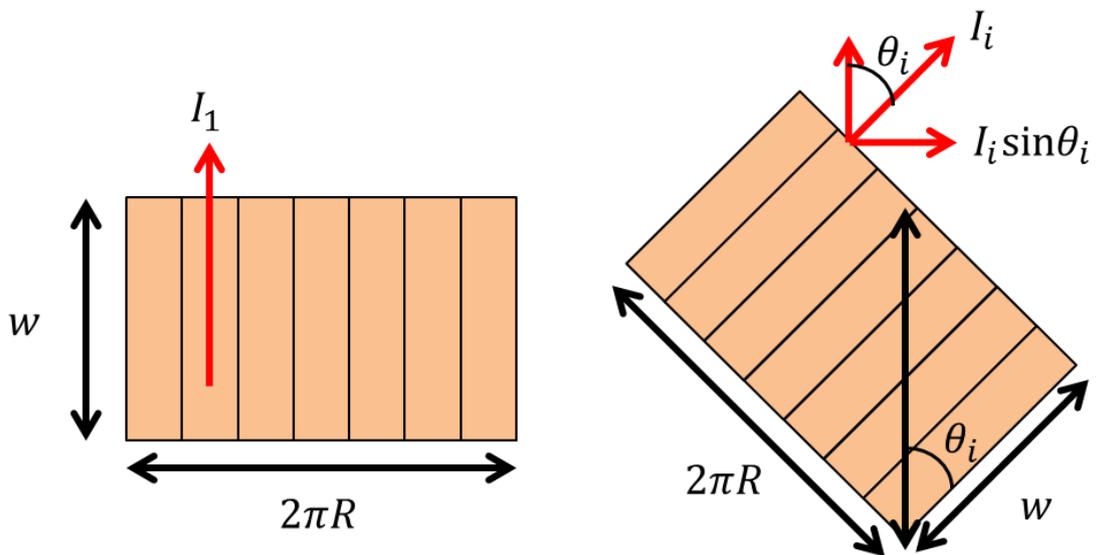


図 1.16:1層目と*i*層目の超伝導層での幅、長さ、電流の向きの関係図。

線材は螺旋状に巻き付けられているため、ケーブル全体をソレノイドコイルと見なすことができる。ソレノイドコイル内部での磁束密度は

$$B = \mu_0 n l \tag{1.19}$$

で表され、磁束密度はソレノイドコイル内部において一様に分布する。このとき単位長さ当たりの巻き数 $n = \frac{1}{w}$ とすると、式(1.19)と図より、 $\theta_i$ で巻き付けられた線材が内側に発生させる磁束密度 $B_i$ は

$$\begin{aligned}
B_i &= \mu_0 \frac{1}{w} I'_1 \sin \theta_i \\
&= \mu_0 \frac{1}{w} \frac{wI}{2\pi R \cos \theta_i} \sin \theta_i \\
&= \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \tan \theta_i
\end{aligned} \tag{1.20}$$

と表すことができる。

従って、ケーブル内において*i*番目の超伝導層に加わる縦磁界は

$$B_{i\parallel} = \sum_{k=i+1}^n \frac{\mu_0 I_k}{2\pi R_k} \tan \theta_k + B_{\text{ext}} \tag{1.21}$$

となる。

また、*i*番目の超伝導層に加わる横磁界は、 $\theta$ の角度で電流  $I$  を流した場合でも  $\theta = 0^\circ$  方向に流れる電流量は全体で  $I$  となることから、アンペールの法則より

$$B_{i\perp} = \sum_{k=1}^{i-1} \frac{\mu_0 I_k}{2\pi R_k} \tag{1.22}$$

と表すことができる。

また、*i*番目の超伝導層に加わる磁界の大きさと磁界の大きさと電流のなす角は

$$B_i = (B_{i\parallel}^2 + B_{i\perp}^2)^{1/2} \tag{1.23}$$

$$\varphi_i = \theta_i - \tan^{-1} \frac{B_{i\perp}}{B_{i\parallel}} \tag{1.24}$$

となる。

この2式より、*i*番目の層における臨界電流密度  $J_i$ 、臨界電流  $I_i$  を求めることができる。

$$I_i = 2\pi J_i R_i d \cos \theta_i \tag{1.25}$$

式(1.25)の  $I_i$  は  $B_i$ 、 $\varphi$  と一緒に式(1.13)によって決定される。また  $J_i$  は *i*番目の層の臨界電流  $I_{ci}$  のことなので、式(1.13)は

$$J_c(\varphi_i) = \frac{1}{2} (J_{\parallel}(B_i) + J_{\perp}(B_i)) + \frac{1}{2} (J_{\parallel}(B_i) - J_{\perp}(B_i)) \cos 2\varphi \tag{1.26}$$

とおける。 $N + 1$  個の方程式群は

$$J_{ci} = f(J_{c0}, \dots, J_{cN}) \tag{1.27}$$

によって繰り返し計算を用い数値的に計算することができる。初期条件として、各層での電流密度は

$$J_{c0}^{\{0\}} = J_{c1}^{\{0\}} = \dots = J_{cN}^{\{0\}} = J_{cM}(B = 0) \tag{1.28}$$

で示すように全ての同じ値をもつ。次の繰り返しで、新しい臨界電流密度の値は一つ前の値群を式(1.27)へ代入し得られ

$$J_{ci}^{\{1\}} = f(J_{c0}^{\{0\}}, \dots, J_{cN}^{\{0\}}) \tag{1.29}$$

となる。この方法を用いることによって、*k*番目の繰り返しでは

$$J_{ci}^{\{k\}} = f(J_{c0}^{\{k-1\}}, \dots, J_{cN}^{\{k-1\}}) \quad (1.30)$$

によって臨界電流密度が得られる。このようにして、全ての層における超伝導線材の臨界電流密度は繰り返し計算によって数値的に求めることができる。繰り返し計算の終了条件は回数が 100 回以下または、臨界電流密度の誤差は $10^{-6}$  A/m<sup>2</sup>以下となる[27].

ケーブルの電流容量は

$$I_t = \sum_{i=1}^n I_i \quad (1.31)$$

により求まる。

## 1.11 本研究の目的

超伝導体の持つ電気抵抗ゼロの性質を、様々な分野へ利用することが期待されている。中でも、省スペースで高効率な送電が可能である直流超伝導送電ケーブルが期待されており、実用化に向けた開発や試験が行われている。しかし、課題点としてケーブルの臨界輸送電流 $I_t$ の増加と、超伝導線材の利用効率の向上が挙げられ、そのためにはケーブル作製に用いる超伝導線材の臨界電流密度 $J_c$ の増加が必要である。一方で、超伝導体に電流通電方向と平行に磁界を印加する縦磁界下では、通常の垂直磁界下と比較して臨界電流密度 $J_c$ が増加することが報告されている。現在、この縦磁界効果を利用した直流超伝導ケーブルが提案されているが、このケーブルの実証やその有効性が十分に議論されていない。

以上の背景から、本研究では縦磁界直流超伝導ケーブルの開発を目的として、まず、実用超伝導線材として期待されている RE 系超伝導体の縦磁界下での臨界電流密度 $J_c$ 特性を評価した。次に得られた $J_c$ 特性から数値計算によって内側 3 層構造の直流超伝導ケーブルの設計を行った。更に、設計結果に従い、長尺線材が作製可能な MOCVD 線材を用いてケーブルを作製し、通電法で縦磁界下での臨界輸送電流 $I_t$ を評価した。以上の結果から縦磁界直流超伝導ケーブルの設計手法とケーブルの有効性を調査した。

# 第2章

## RE 系超伝導線材の 縦磁界中での臨界電流特性の評価

### 2.1 概要

ここでは、縦磁界を利用した直流電力ケーブルを設計する際に重要な特性である縦磁界中での臨界電流密度を評価する。第1章で述べたように、RE系超伝導体は優れた磁界、温度特性を有することから、将来、応用機器での利用が期待される線材であり、長尺化も精力的に進められている。ただし、作製方法の違いにより特性も複雑に変化することから、ここでは様々な手法で作製したRE系超伝導試料を準備し、縦磁界中および非縦磁界中での臨界電流密度特性を評価した。

### 2.2 試料諸元

本節では測定に用いたRE系超伝導試料について述べる。測定に用いた試料はMOCVD法で作製した金属基板試料、PLD法で作製した単結晶基板試料、TFA-MOD法で作製した金属基板試料の3種類である。表2.1に各試料の材質、人工ピンの種類と添加量、厚さ、線材幅、自己磁界(Self-Field)での $J_c$ を示す。

表 2.1:測定に用いたRE系超伝導試料の諸元。

線材名	材質	人工ピン	厚さ [nm]	線材幅 [ $\mu\text{m}$ ]	$J_c(\text{s.f.})@77\text{ K}$ [GA/m <sup>2</sup> ]
MOCVD	REBCO	導入済	1000	2000	35.9
PLD	YBCO	4 area% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	170	80	49.3
MOD	YGdBCO	6 wt.% BHO	200	23	65.4

次に、各試料の詳細について述べる。

- MOCVD 試料

MOCVD 試料には SuperPower 社製の超伝導ケーブル向け市販線材である SCS2050-CF を用いた。本試料はハステロイ C276 金属基板上に中間層を設け、その上から MOCVD 法を用いて RE 系超伝導層が成膜されている。また、一般的な垂直磁界中での $J_c$ を増加させるためのピンが人工的に導入されている。試料の両面には保護層

と安定化層として Ag 層と Cu 層がそれぞれ設けられている。また、線材は幅 2 mm の長尺線材として作製されており、測定の際には 50 mm の長さに切り出して使用し、中央に端子間距離が 10 mm の電圧端子を設けた。試料内の構造図を図 2.1 に示す。

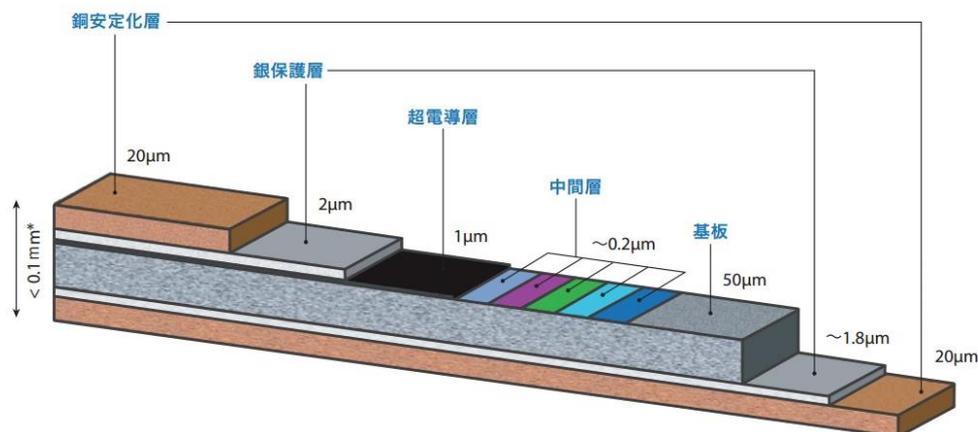


図 2.1:MOCVD 試料内の構造図[28]。

- PLD 試料

PLD 試料には九州工業大学工学部マテリアル工学科 松本研究室で作製して頂いた試料を用いた。本試料は $\text{SrTiO}_3$ (STO)単結晶基板の上に PLD 法を用いて YBCO 超伝導層を成膜し、人工ピンとして  $\text{Y}_2\text{O}_3$  を、表面修飾ターゲット法を用いて導入した試料である。また、超伝導層は薬液によるウェットエッチングにて、幅  $80 \mu\text{m}$ 、長さ  $1 \text{ mm}$  のマイクロブリッジ状に加工した。

- MOD 試料

MOD 試料には成蹊大学工学部システムデザイン学科 三浦研究室で作製して頂いた試料を用いた。本線材はハステロイ C276 基板の上に中間層を設け、その上から TFA-MOD 法を用いて YGdBCO 超伝導層を成膜した試料である。第 1 章で述べたように、縦磁界中での  $J_c$  の増加のためには電流と磁界の平行具合が重要となる。一方で、同じく  $J_c$  の増加のために導入される人工ピンは非超伝導物質であるため、均一な電流経路を確保する上では阻害要因となってしまう。これらの点を両立させるため、本試料では人工ピンを含む溶液から成膜した YGdBCO + BHO 層と、人工ピンを含まない溶液から成膜した YGdBCO 層を交互に積み重ねた構造とした。また、レーザー光によるエッチングにて、超伝導層を幅  $23 \mu\text{m}$ 、長さ  $500 \mu\text{m}$  のマイクロブリッジ状に加工した。MOD 試料内の構造図と超伝導層内部の構造図を図 2.2 および図 2.3 に示す。

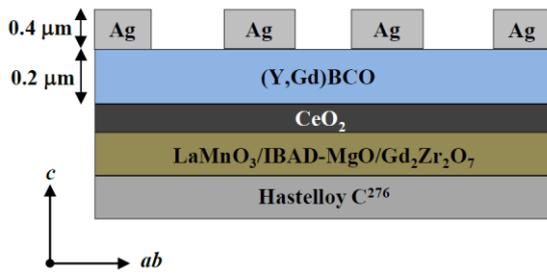


図 2.2:MOD 試料内の構造図。

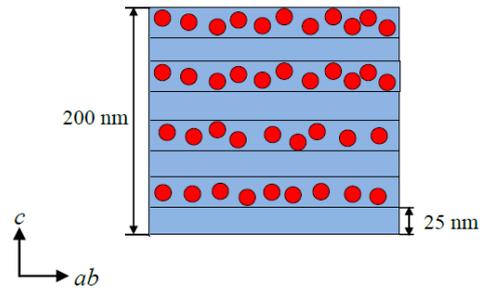


図 2.3:超伝導層内部の構造図。

## 2.3 実験方法

各試料の縦磁界中および非縦磁界中での $J_c$ を評価するために、通電法で $V$ - $I$ 特性を測定した。本節では、 $J_c$ を測定するための実験環境について述べる。

### 2.3.1 直流四端子法

超伝導体の $J_c$ を評価するためには非常に小さな抵抗値の有無を測定するため、高精度な測定方法が必要である。図 2.4 に代表的な電流-電圧測定法の一つである直流二端子法の回路図を示す。図中において $R_A$ 、 $R_V$ はそれぞれ電流計、電圧計の内部抵抗値を示し、 $R_S$ は超伝導試料の抵抗値を示す。また、 $R_1$ から $R_4$ は各部の接触抵抗値およびリード線の抵抗値を示す。直流二端子を用いて超伝導試料の電流-電圧特性を測定する場合、超伝導試料の抵抗値 $R_S$ は $R_A$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ の和と比較して非常に小さいために、これらの接触抵抗などによる電圧降下の影響を強く受け、正確な測定が困難である。一方で図 2.5 のように直流四端子法を用いて測定する場合、超伝導試料の電圧測定に影響を与えるのは図 2.5 の $R_V$ 、 $R_3$ 、 $R_4$ であるが、これらの和は $R_S$ と比較して非常に大きいために、電圧降下を無視することができ、超伝導試料の電圧のみを測定できる。

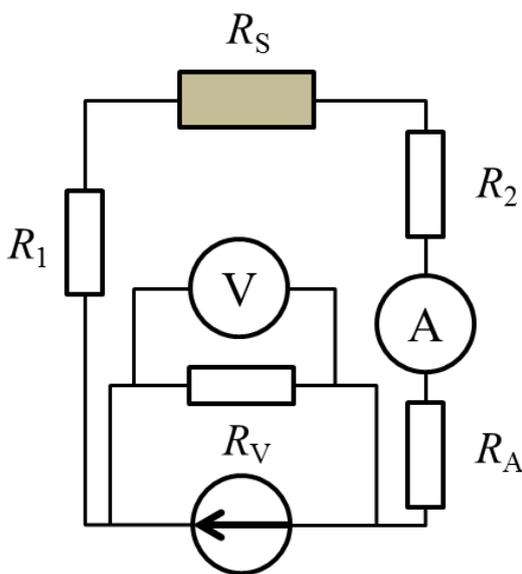


図 2.4:直流二端子法の回路図。

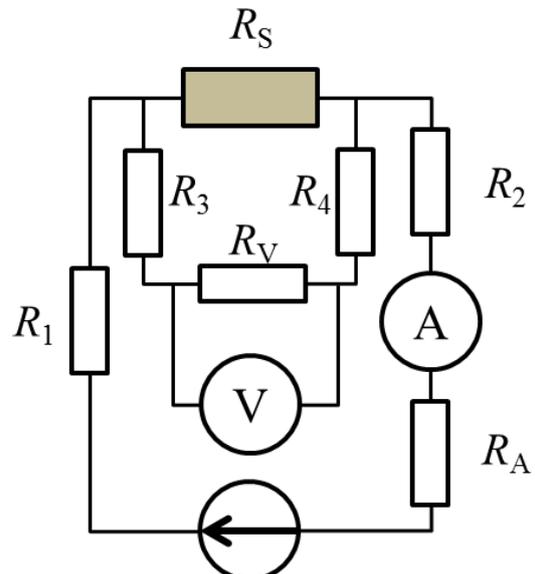


図 2.5:直流四端子法の回路図。

### 2.3.2 測定プローブの取り付け

直流四端子法による測定では超伝導線材に対して電流通電用と電圧測定用のプローブを取り付ける必要があり、これらの接触抵抗は低い方が望ましい。本実験ではプローブの接

触抵抗を低減するために、CVD 線材の測定でははんだを用いて取り付けた。MOD 線材では、はんだの熱による超伝導層の破損を防ぐために、インジウムによる圧着を用いた。PLD 線材では、熱や圧力に弱い単結晶基板を使用しているため、銀ペーストによる接着を行った。

電圧測定用プローブには全ての線材で0.8 mm径のポリウレタンめっき銅線を使用し、電流通電用プローブには CVD 線材が0.3 mm厚の銅板を、MOD 線材と PLD 線材が0.8 mm径のポリウレタンめっき銅線を 10 本束ねたものを使用した。

### 2.3.3 測定回路

直流四端子法を用いて各試料の $J_c$ を測定するために使用した測定回路と、回路中の各機器について説明する。測定回路の全体図を図 2.6 に示す。

#### (a)電流源

試料に通電するための電流を供給する。出力電流は後述の LabView プログラムによって制御用 PC から制御され、スタート電流値から一定のスweepレートで増加し、試料の電流または電圧値のいずれかが上限値に達すると停止する。このとき連続的に通電すると、接触抵抗などから生じるジュール熱が測定に影響を及ぼす可能性があるため、電流はパルス状とし、冷却のために各パルス間には数百ミリ秒のインターバルを設けた。装置には高砂製作所製 ZX-1600A 型または横河メータ&インスツルメンツ製 GS610 型を使用した。

#### (b)電圧計(1)

各試料のマイクロブリッジ両端または中央部に発生する電圧を測定する。得られた値は LabView プログラムを用いて制御用 PC に記録される。ここでは超伝導体に生じる非常に小さな電圧を測定するため、測定機器やその他の要因によって生じるノイズの影響を受け、電流通電によって発生した電圧のみを測定できない可能性がある。従って、電流通電前と通電中の 2 回のタイミングで電圧の測定を行い、その差分を試料に生じる電圧値として記録した。装置にはケースレーインスツルメンツ製 2182A 型を使用した。

#### (c)電圧計(2)

試料に流れる電流値を測定する。測定回路中では超伝導試料と直列にシャント抵抗が接続されており、このシャント抵抗に生じる電圧を測定することで、オームの法則から電流値を求める。電圧計(1)と同様にノイズの影響を排除するため、通電前後の 2 回のタイミングで測定を行い、その差分を記録する。装置にはケースレーインスツルメンツ製 2001 型を使用した。

#### (d)制御用 PC

電流源の制御と各電圧計から得られた値の記録を行う。制御にはナショナルインスツルメンツ製 LabView プログラムを使用した。プログラムの動作内容は次節で述べる。

#### (e)Bi-2223 超伝導マグネット

試料に対して外部磁界を印加する。Bi-2223 線材を用いて作製された超伝導マグネットであり、最大1 Tを発生させることができる。発生磁界の制御はマグネットに接続した電流源の出力値を調整することで行う。図 2.7 にマグネットの外観を示す。

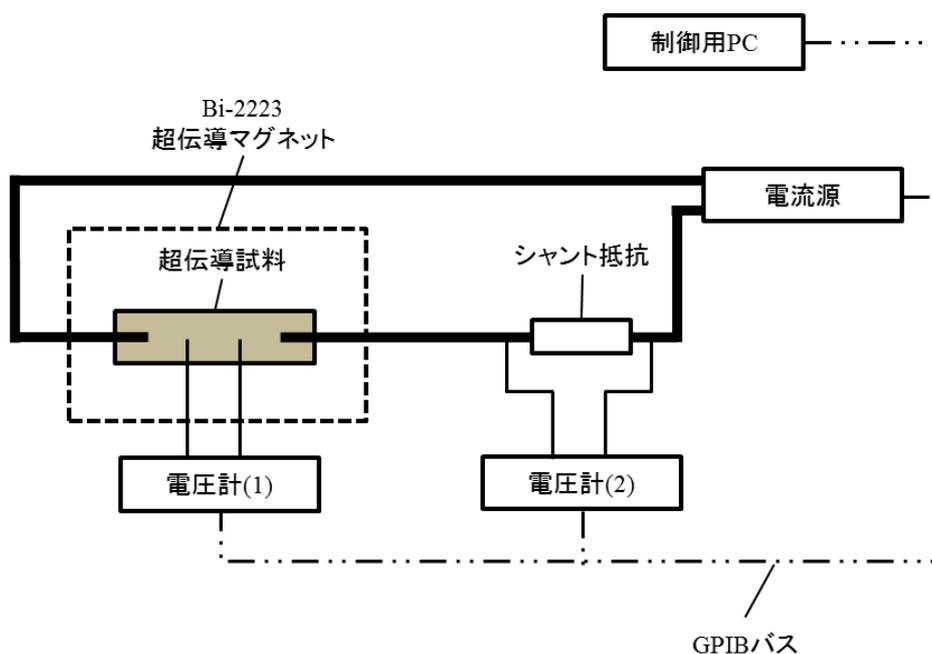


図 2.6:超伝導試料測定回路の全体図。

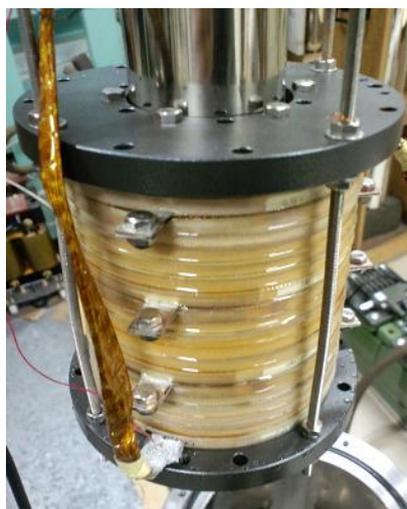


図 2.7:Bi-2223 超伝導マグネットの外観。

### 2.3.4 測定プログラム

試料の $J_c$ を測定するためのプログラムについて説明する。測定では設定されたスタート電流から一定のスweepレートに従って増加させたパルス状の電流を通电し、試料に生じる電圧が上限値に達するか、電流値がストップ電流値に達すると停止する。各パルス電流の通电前および通电中の2回のタイミングで試料の電流値、電圧値が測定され、制御用PCに記録される。図 2.8 に Labview プログラムの動作フローチャート図を示す。

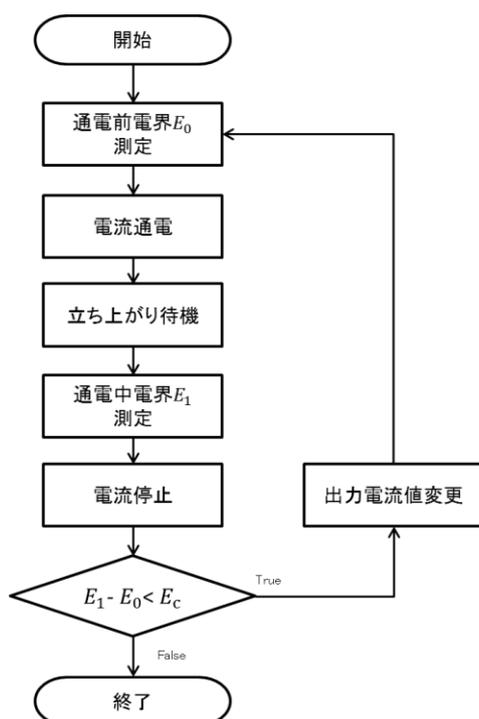


図 2.8: 試料測定プログラムのフローチャート。

### 2.3.5 測定条件

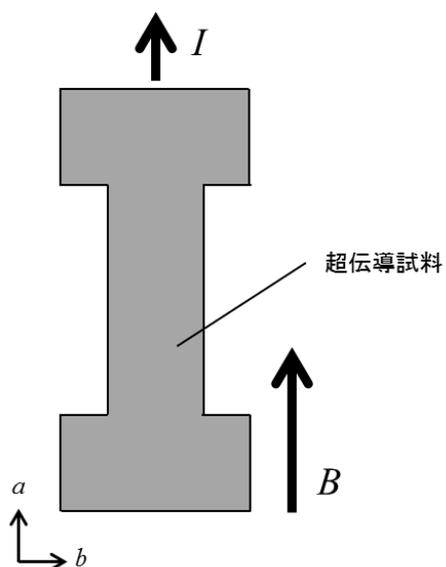
前節までの実験環境を用いて、磁界中での各試料の $V-I$ 特性を測定した。得られた $V-I$ 特性を、超伝導層の幅、厚さ、電圧端子間距離を用いて $E-J$ 特性に換算し、試料に発生した電界が電界基準 $E_c = 1.0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$ を超えた時点での電流密度値を臨界電流密度 $J_c$ とした。外部磁界は $0 - 0.5 \text{ T}$ の範囲で試料の $ab$ 面に対して平行で、試料の電流 $I$ と平行(縦磁界)、または垂直(横磁界)となるように印加した。また、全ての測定は液体窒素中で行った。

測定時の条件を表 2.2 に、試料に対する電流の通电方向と外部磁界の印加方向の関係を図 2.9 に示す。

表 2.2:測定時の条件。

電界基準 $E_c$	$1.0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$
外部磁界 $B$	0 - 0.5 T
測定温度	77 K
外部磁界の印加方向	縦磁界または横磁界

(a)



(b)

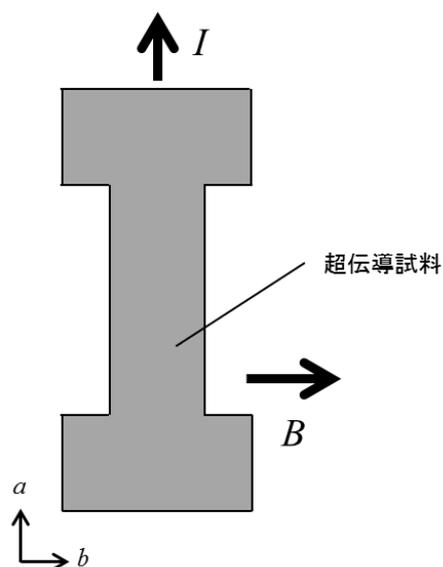


図 2.9:超伝導試料に対して(a)縦磁界および(b)横磁界を印加した状態での電流通電方向と磁界印加方向の関係。

## 2.4 実験結果及び検討

### 2.4.1 $E$ - $J$ 特性

各線材の磁界中での $E$ - $J$ 特性を示す。CVD 試料の縦磁界中と横磁界中での $E$ - $J$ 特性を図 2.10 に、PLD 試料の縦磁界中と横磁界中での $E$ - $J$ 特性を図 2.11 に、MOD 試料の縦磁界中と横磁界中での $E$ - $J$ 特性を図 2.12 に、それぞれ示す。各図中には $J_c$ を導出する際に用いた電界基準 $E_c$ を破線で示す。測定結果より、PLD 線材に縦磁界を印加した場合は、磁界の増加に伴って $E$ - $J$ 曲線が右側にシフトし、 $B = 0.3$  T でピークに達していることがわかる。また、PLD 線材と MOD 線材は各磁界中において、 $J_c$ よりも低い電流密度領域でノイズ状の電界の発生が見られるが、CVD 線材ではそのような傾向は見られなかった。

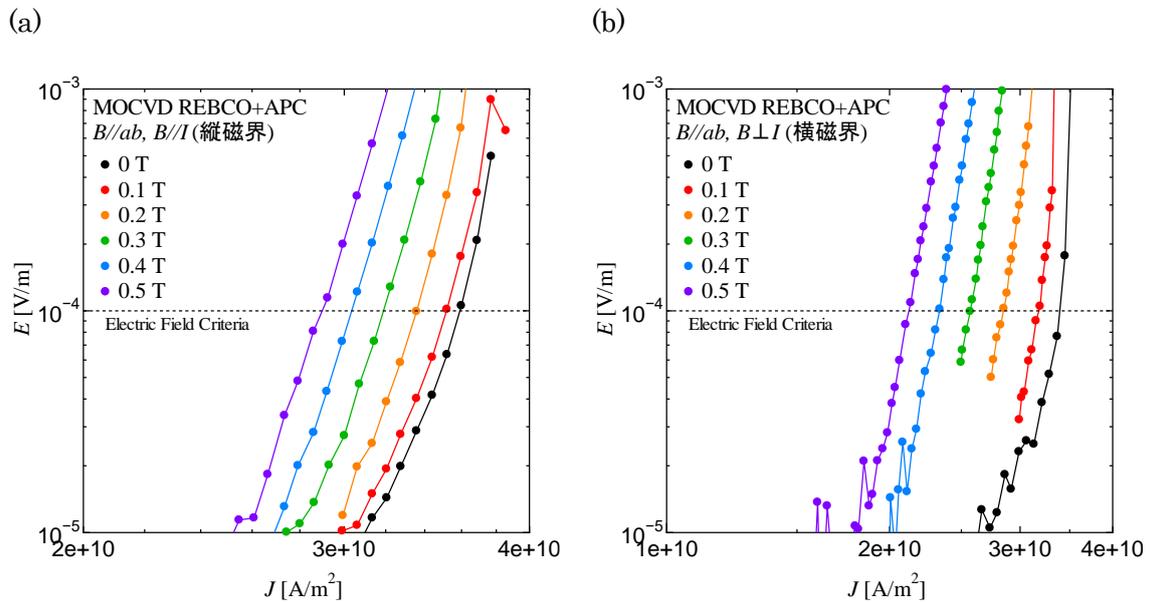


図 2.10: CVD 線材の(a)縦磁界中および(b)横磁界中での $E$ - $J$ 特性。

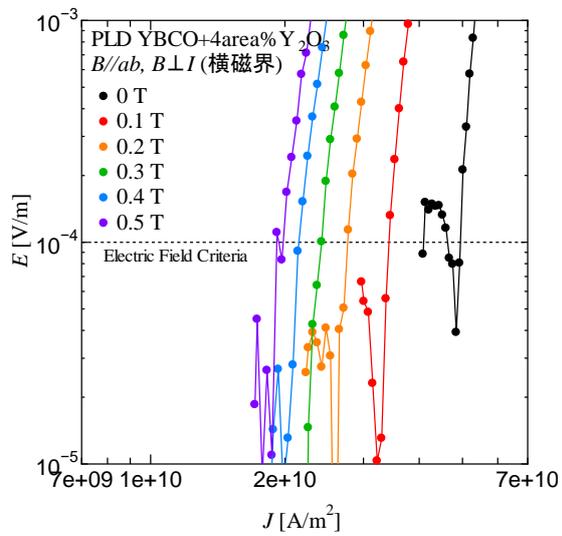
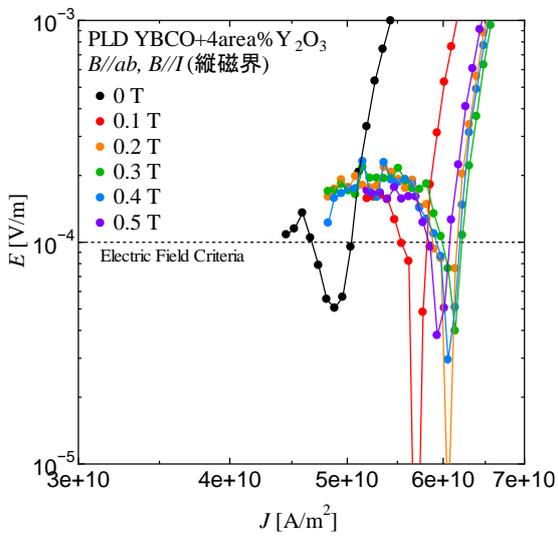


図 2.11:PLD 線材の(a)縦磁界中および(b)横磁界中でのE-J特性。

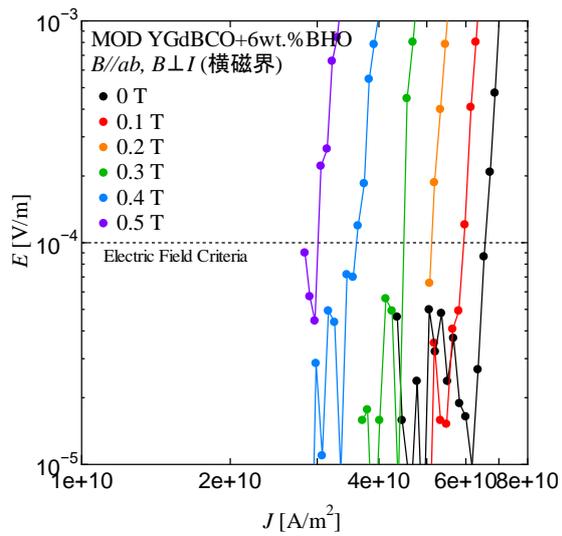
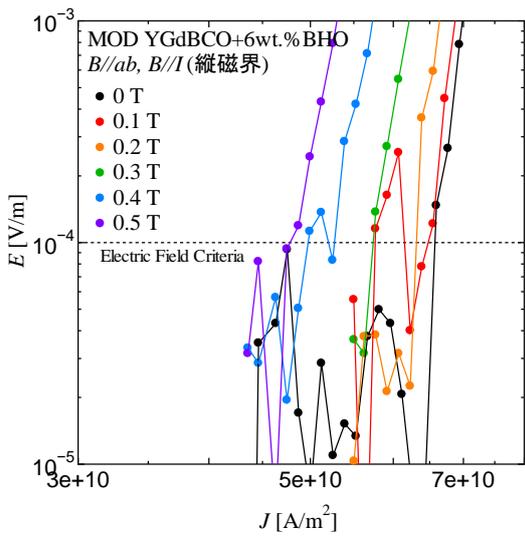


図 2.12:MOD 線材の(a)縦磁界中および(b)横磁界中でのE-J特性。

## 2.4.2 $J_c$ - $B$ 特性

各線材の $E$ - $J$ 特性から、電界基準 $E_c$ を用いて導出した $J_c$ の磁界依存性を示す。図 2.13 に各線材の $J_c$ - $B$ 特性を、図 2.14 に各線材の横磁界中 $J_c$ に対する縦磁界中 $J_c$ の増加率を、それぞれ示す。図 2.13 より、自己磁界での $J_c$ は MOD 線材が最も高く、縦磁界中での $J_c$ も  $B = 0.2$  T 以下の領域では最も高い。一方で PLD 線材は縦磁界の増加に伴って $J_c$ が自己磁界よりも高くなり、 $B = 0.3$  T 以上の領域では最も高くなった。

図 2.14 より、各線材の縦磁界中での横磁界中に対する $J_c$ の増加率は PLD 線材が最も高く、最大で 3 倍程度まで増加していることがわかる。MOD 線材の $J_c$ の増加率は PLD 線材よりも低いが、CVD 線材より高い値となっている。

このような結果の原因として PLD 試料は表面の均一度に優れる単結晶基板上に、高配向度での成膜が可能な PLD 法を用いて作製された試料であり、他の試料よりも結晶の配向度が高い薄膜である可能性がある。配向度が高い薄膜中では均一な電流経路が確保できるために、縦磁界中で重要となる磁界と電流の平行具合が高くなり、縦磁界の影響を顕著に受けたために、縦磁界の増加に伴って $J_c$ の増加率も大きくなったと考えられる。また、PLD 試料では縦磁界中での $J_c$ の増加傾向が他の試料とは異なっており、縦磁界の増加に伴って $J_c$ のピークが現れている。このような傾向は柱状ピンや面状ピンを導入した試料では見られていない。一方で柱状ピンを不連続に形成することで粒状ピンを導入した試料では同様な傾向が見られ、さらに粒状ピンの密度を変化させた場合には $J_c$ のピークの傾向も変化することが報告されている[20,29]。本研究で測定した試料に導入されている人工ピンは 10 nm 程度の粒状ピンであり[30]、参考文献[20,29]の先行研究で報告されている人工ピンのように粒状であるため、これによって $J_c$ がピーク状に増加した可能性がある。

MOD 試料は、他の試料と比較して自己磁界での $J_c$ が高く、縦磁界を印加した場合でも磁界の増加と共に $J_c$ が増加することはないが、 $B = 0.2$  T 程度までフラットな磁界依存性を示す。

このような特性が得られた理由として、縦磁界中で電流と磁界が平行になる積層膜構造で、さらに、ピンの粗大化を防ぐための低温成膜が挙げられる。このために超伝導層内部での欠陥の成長が抑制され、自己磁界で高い $J_c$ が得られたと考えられ、このような作製方法は自己磁界での $J_c$ 特性の増加のために有効であることが予想される。

以上の結果から、縦磁界効果を利用した超伝導ケーブルに PLD 試料のような縦磁界中で $J_c$ が大きく増加する試料を用いた場合には、従来の超伝導ケーブルと比較して非常に高い $J_c$ を実現できる可能性がある。また、ケーブル内部の超伝導線材に印加される縦磁界が  $B = 0.2$  T 以下となるような場合は、MOD 線材のように縦磁界領域で高い $J_c$ を持つ線材を用いた方が適切であると考えられる。

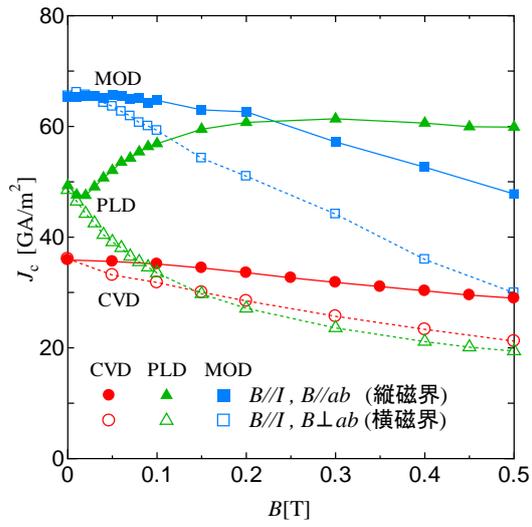


図 2.13:縦磁界および横磁界中での各線材の  $J_c$  の磁界依存性。

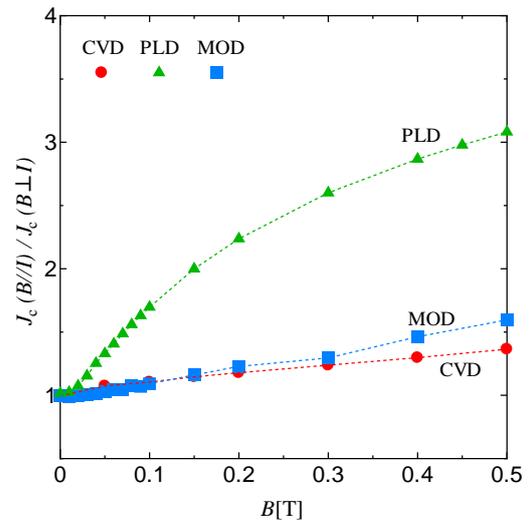


図 2.14:各線材の横磁界中  $J_c$  に対する縦磁界中  $J_c$  の増加率。

### 2.4.3 $n$ - $B$ 特性

前節で述べた $E$ - $J$ 特性より、 $E = 1.0 \times 10^{-4} - 1.0 \times 10^{-3}$  V/mの領域における各試料の $n$ 値を導出した。図 2.15 に各試料の縦磁界中および横磁界中での $n$ 値を示す。CVD 試料と MOD 試料は低磁界領域で $J_c$ が最大となったが、 $n$ 値においても同様に、磁界の増加に伴って減少していることがわかる。また、 $J_c$ は縦磁界と横磁界で異なるが、 $n$ 値はほとんど同じ値となる。一方で、高磁界領域で $J_c$ が最大となった PLD 試料は、縦磁界中での $J_c$ と同様に縦磁界中での $n$ 値も $B = 0.3$  T付近で最大となり、縦磁界と横磁界の $n$ 値の差が明確になっている。一般に、横磁界中での $n$ 値は超伝導体内でのピン力の強さの分布に依存していることが知られている[31]。縦磁界中では横磁界中と異なるピンニング機構が存在すると予想されるが、縦磁界と横磁界での $n$ 値が同程度になるのは、ばらついているピンが、両方の磁界で相互的に作用している可能性がある。一方で、PLD 試料は縦磁界と横磁界のピンニング機構が明確に分かれたために、縦磁界と横磁界での $n$ 値が大きく異なったものと考えられる。この件は今後の課題とする。

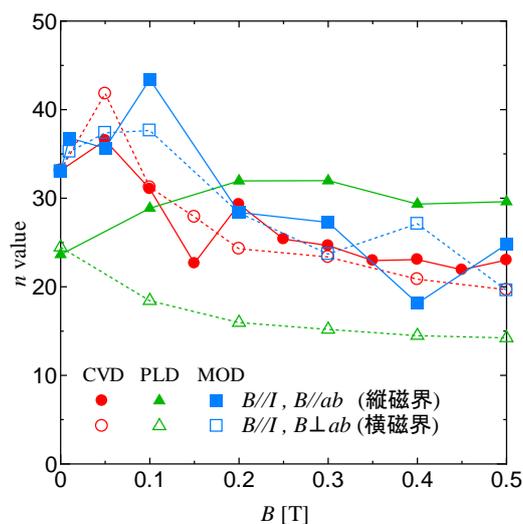


図 2.15:各試料の縦磁界中および横磁界中での $n$ 値。

## 2.5 小括

本章では、作製方法と内部の微細構造が異なる RE 系超伝導試料の縦磁界中および横磁界中における  $J_c$  特性に注目し、通電法で液体窒素中での  $J_c$  特性を評価した。

測定に用いた試料は金属基板上に MOCVD 法で作製した REBCO 試料、金属基板上に MOD 法で作製した YGdBCO 試料、単結晶基板上に PLD 法で作製した YBCO 試料の 3 種類で、MOCVD 試料には  $J_c$  を増加させるために人工ピンが導入されており、同様に MOD 試料には  $BH0$  が、PLD 試料には  $Y_2O_3$  が、それぞれ人工ピンとして導入されている。

測定結果から、CVD 試料と MOD 試料は縦磁界を印加した場合に低磁界領域で  $J_c$  が最も高くなり、磁界の増加に伴って減少することがわかった。一方で PLD 試料は低磁界領域では MOD 試料よりも  $J_c$  が低い、高磁界領域で  $J_c$  が増加し、 $B = 0.3$  T 付近でピークが見られた。

また、各試料の  $E$ - $J$  特性から、 $E = 1.0 \times 10^{-4} - 1.0 \times 10^{-3}$  V/m の領域における  $n$  値を求めた。CVD 試料と MOD 試料では縦磁界と横磁界のいずれにおいても磁界の増加と共に  $n$  値が減少する傾向が見られ、これは  $J_c$  特性と同様であった。一方で PLD 試料は横磁界中での  $n$  値は他の試料と同様であるが、縦磁界中では磁界と共に増加し、高磁界領域でピークが現れ、横磁界中とは異なる傾向となった。

# 第3章

## RE 系超伝導線材を用いた 縦磁界直流超伝導ケーブルの設計

### 3.1 概要

第2章ではRE系超伝導試料の縦磁界中と横磁界中での $J_c$ 特性を測定し、いずれの試料でも縦磁界中で $J_c$ が増加することや、作製方法の違いによって縦磁界中での $J_c$ の傾向に差が見られることがわかった。本節では、第2章で得られた $J_c$ 特性を用いて1.10節で述べた計算モデルに従い、内側3層の縦磁界ケーブルの臨界輸送電流 $I_c$ を数値計算で求めた。特に、ケーブルの基本構造は半径5mmのフォーマーを用いた3層構造で、比較的電流容量の小さいコンパクトなケーブルを設計する。

計算を行った3層直流超伝導ケーブルの構造図を、図3.1に示す。

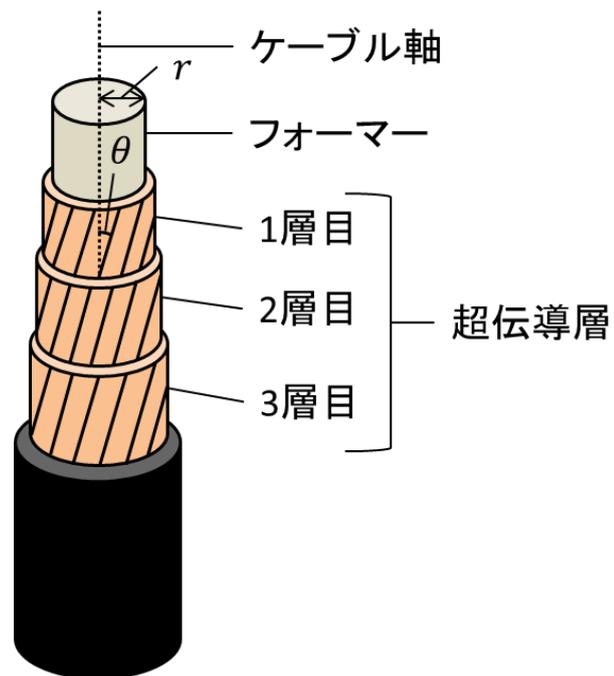


図 3.1:内側 3 層の縦磁界直流超伝導ケーブルの構造図。

## 3.2 計算方法

はじめに、各線材を使用したケーブルの線材巻き付け角度を変化させた場合の縦磁界中の $I_t$ - $B$ 特性を求め、 $I_t$ が最大となる巻き付け角度 $\theta_{\max}$ と外部磁界 $B$ を求める。次に $\theta = \theta_{\max}$ の際の縦磁界中と非縦磁界中での $I_t$ - $B$ 特性を求め、その増加率を求める。

1.10.2 項で示した計算モデルから、巻き付け角度 $\theta_i$ でフォーマーに巻き付けた線材が発生させる磁界 $B_i$ は(1.20)式で与えられ。更にケーブル内の $i$ 番目の層に加わる縦磁界は(1.21)式で与えられる。従って、今回は(1.20)式の $\theta_i$ を $5 - 15^\circ$ の範囲で変化させた場合の磁界 $B_i$ を求め、さらにそれぞれの角度において(1.21)式の $B_{\text{ext}}$ で示される線材に加わる磁界を $0 - 0.5 \text{ T}$ の範囲で変化させた場合の $B_{i\parallel}$ と(1.22)式で示される $B_{i\perp}$ を導出し、これらの磁界の角度と線材の $J_c$ の磁界角度依存性から $i$ 番目の層の $I_{ti}$ を導出した。さらに、以後の繰り返し近似計算を行い(1.31)式からケーブルの臨界輸送電流 $I_t$ を求めた。

計算に用いた各値を、表 3.1 に示す。また、各線材の $J_c$ - $B$ 特性は(1.12)式および(1.13)式で示される近似式の形で扱った。線材の縦磁界中および横磁界中での $J_c$ - $B$ 特性の近似式における展開係数 $K_{\parallel}$ 、 $K_{\perp}$ を表 3.2、表 3.3、表 3.4 に示す。

表 3.1:計算に用いた値。

層数	3
フォーマー半径[mm]	5
巻き付け角度[degree]	5 - 15
外部磁界 $B$ [T]	0 - 0.5

表 3.2:CVD 線材の $J_c$ - $B$ 特性の近似式中における展開係数 $K_{\parallel}$ 、 $K_{\perp}$ 。

展開係数	$j$					
	0	1	2	3	4	5
$K_{\parallel}[\times 10^{10} \text{ A/T}^j]$	3.59 $\times 10^{10}$	-4.11 $\times 10^8$	-8.63 $\times 10^{10}$	1.81 $\times 10^{11}$	-1.27 $\times 10^{11}$	7.81 $\times 10^9$
$K_{\perp}[\times 10^{10} \text{ A/T}^j]$	3.60 $\times 10^{10}$	-7.00 $\times 10^{10}$	4.03 $\times 10^{11}$	-1.86 $\times 10^{12}$	3.93 $\times 10^{12}$	-3.00 $\times 10^{12}$

表 3.3:PLD 線材の $J_c$ - $B$ 特性の近似式中における展開係数 $K_{\parallel}$ 、 $K_{\perp}$ 。

展開係数	$j$					
	0	1	2	3	4	5
$K_{\parallel}[\times 10^{10}A/T^j]$	4.75 $\times 10^{10}$	7.04 $\times 10^{10}$	5.99 $\times 10^{11}$	-5.02 $\times 10^{12}$	1.19 $\times 10^{13}$	-9.32 $\times 10^{12}$
$K_{\perp}[\times 10^{10}A/T^j]$	4.86 $\times 10^{10}$	-2.35 $\times 10^{11}$	1.12 $\times 10^{12}$	-3.26 $\times 10^{12}$	4.94 $\times 10^{12}$	-2.96 $\times 10^{12}$

表 3.4: MOD 線材の $J_c$ - $B$ 特性の近似式中における展開係数 $K_{\parallel}$ 、 $K_{\perp}$ 。

展開係数	$j$					
	0	1	2	3	4	5
$K_{\parallel}[\times 10^{10}A/T^j]$	6.55 $\times 10^{10}$	-1.19 $\times 10^9$	-4.63 $\times 10^{10}$	-3.45 $\times 10^{11}$	9.09 $\times 10^{11}$	-6.17 $\times 10^{11}$
$K_{\perp}[\times 10^{10}A/T^j]$	6.60 $\times 10^{10}$	1.87 $\times 10^9$	-1.28 $\times 10^{12}$	7.23 $\times 10^{12}$	-1.67 $\times 10^{13}$	1.35 $\times 10^{13}$

### 3.3 計算結果及び検討

#### 3.3.1 MOCVD 線材を用いたケーブルの $I_t$ - $B$ 特性

図 3.2 に MOCVD 線材を用いたケーブルの $I_t$ - $B$ 特性の計算結果の全体図と $I_t$ の最大値付近の拡大図を示す。図より、全ての巻き付け角度の場合において $B = 0.1$  Tで $I_t$ が最大となっており、 $B = 0.1$  Tでは巻き付け角度が6°の際に $I_t$ が最大となっていることがわかる。

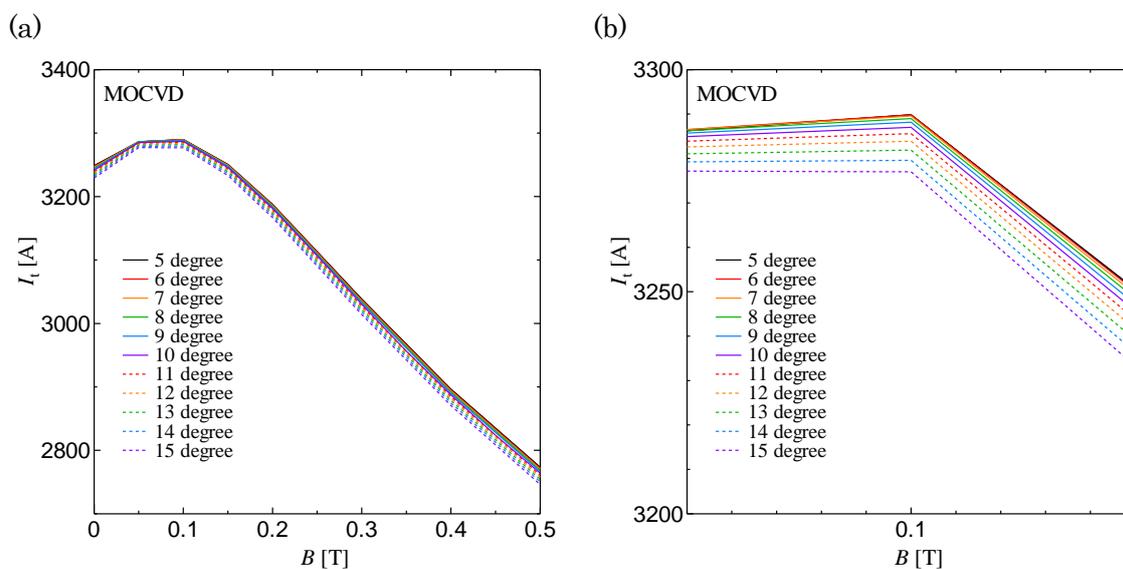


図 3.2:MOCVD 線材を用いたケーブルの $I_t$ - $B$ 特性の(a)全体図および(b)  $I_t$ の最大値付近。

### 3.3.2 PLD 線材を用いたケーブルの $I_t$ - $B$ 特性

図 3.3 に PLD 線材を用いたケーブルの $I_t$ - $B$ 特性の計算結果の全体図と $I_t$ の最大値付近の拡大図を示す。図より、全ての巻き付け角度の場合において $B = 0.4$  Tで $I_c$ が最大となり、 $B = 0.4$  Tでは巻き付け角度が $12^\circ$ の際に $I_t$ が最大となっていることがわかる。

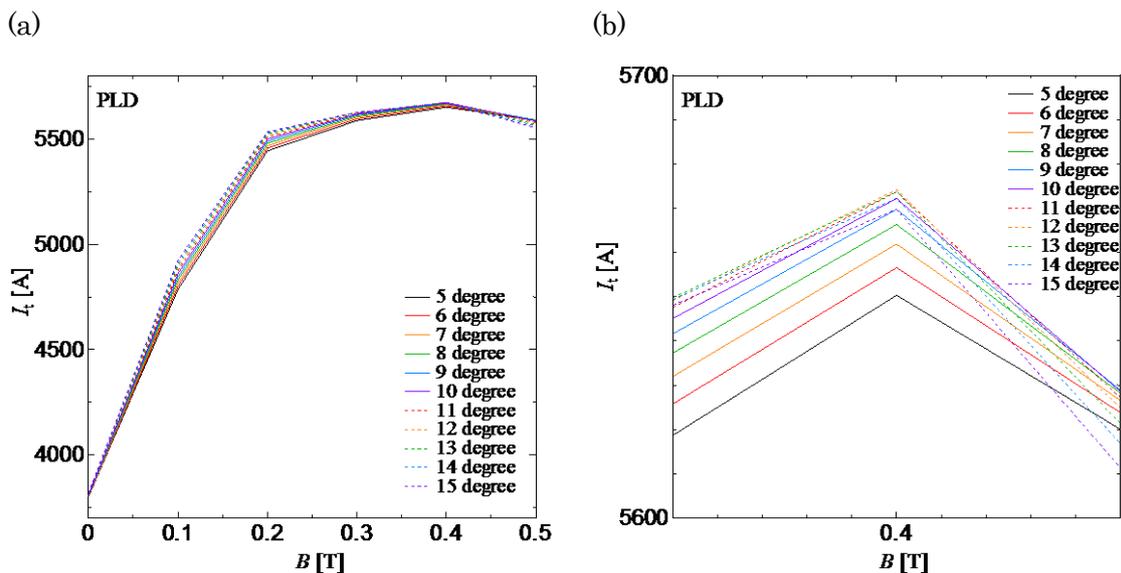


図 3.3:PLD 線材を用いたケーブルの $I_t$ - $B$ 特性の(a)全体図および(b) $I_t$ の最大値付近。

### 3.3.3 MOD 線材を用いたケーブルの $I_t$ - $B$ 特性

図 3.4 に MOD 線材を用いたケーブルの $I_t$ - $B$ 特性の計算結果の全体図と $I_t$ の最大値付近の拡大図を示す。図より、全ての巻き付け角度の場合において $B = 0.1$  Tで $I_t$ が最大となり、 $B = 0.1$  Tでは巻き付け角度が $10^\circ$ の際に $I_t$ が最大となっていることがわかる。

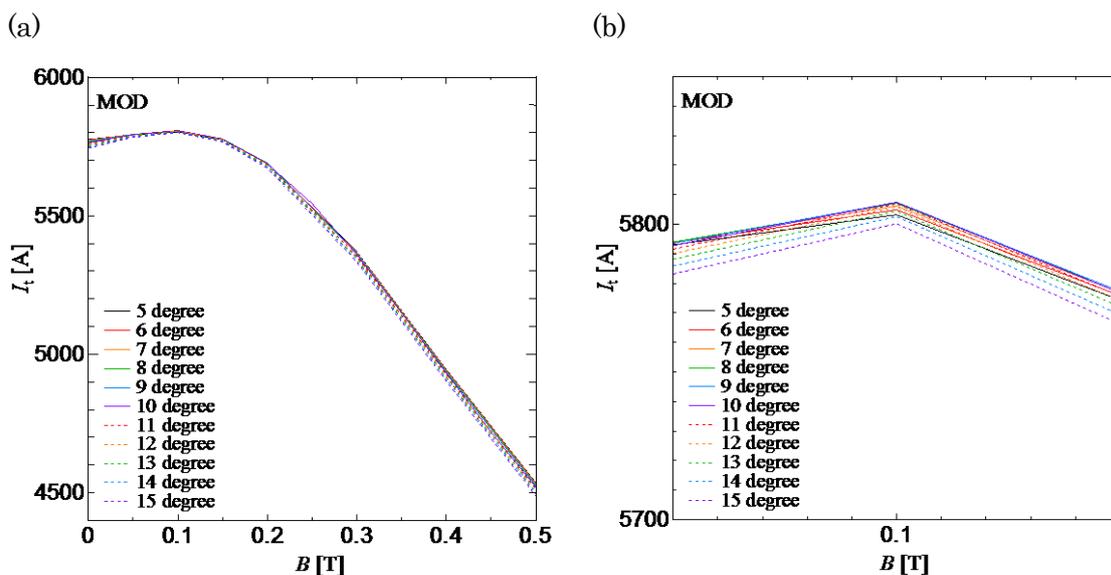


図 3.4:MOD 線材を用いたケーブルの $I_t$ - $B$ 特性の(a)全体図および(b) $I_t$ の最大値付近。

### 3.3.4 各ケーブルの $I_t$ - $\theta$ 特性

図 3.5 に各ケーブルの $I_t$ が最大となる縦磁界中で、巻き付け角度を変化させた場合の $I_t$ を、 $\theta = 5^\circ$ の場合の $I_t$ で規格化した値を示す。

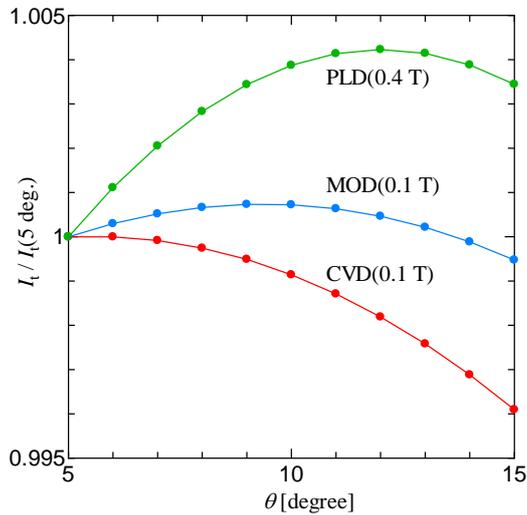


図 3.5:各ケーブルの $I_t/I_t(5 \text{ degree})$ - $\theta$ 特性。

### 3.3.5 巻き角度を最適化した場合の $I_t$ - $B$ 特性

前節までの計算結果から、ケーブルの $I_t$ が最大となる各線材の巻き付け角度がわかった。次に、これらの値を用いて各線材を最適角度で巻き付けたケーブルの縦磁界中と非縦磁界中での $I_t$ - $B$ 特性を求める。図 3.6 に各ケーブルの縦磁界中と横磁界中での $I_t$ - $B$ 特性を示し、図 3.7 に縦磁界中での $I_t$ を自己磁界での $I_t$ で規格化した値の磁界依存性を示す。

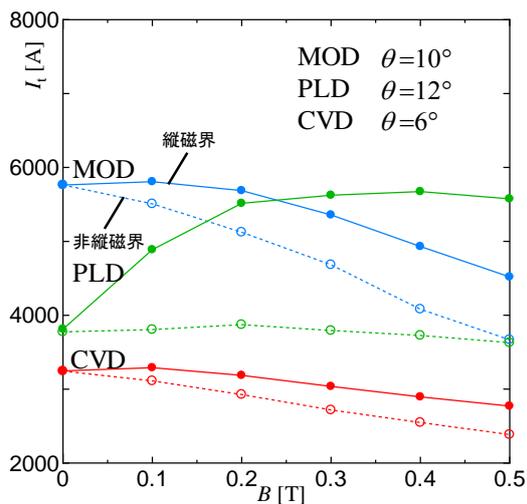


図 3.6:各ケーブルの縦磁界中と横磁界中での $I_t$ - $B$ 特性。

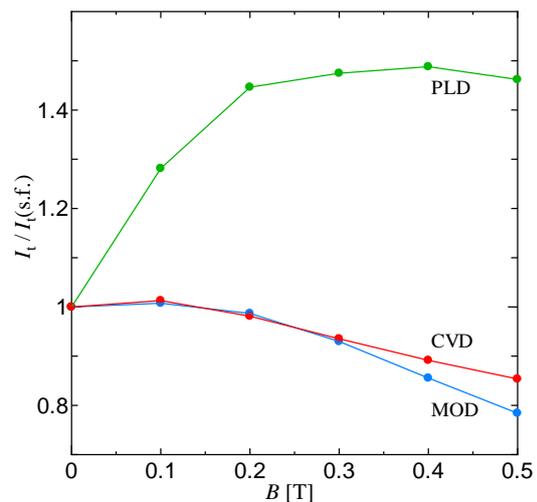


図 3.7 自己磁界での $I_t$ で規格化した各ケーブルの縦磁界中での $I_t$ - $B$ 特性。

これらの計算結果から、第 2 章で得られた測定結果を用いてケーブルを作製した場合に最適な巻き角度と、 $I_t$ が最大となるために必要な縦磁界 $B$ の値がわかった。

CVD 線材と MOD 線材を用いた場合は、 $B = 0.1$  Tにおいて自己磁界での $I_t$ よりも高い値が見られている。また、MOD 線材を用いたケーブルは $B = 0.2$  Tまでの領域においては全てのケーブルの中で最も高い $I_t$ を示しており、 $I_t$ の増加率は CVD 線材を用いた場合と同様な傾向となっている。従って、MOD 線材を用いたケーブルは、CVD 線材を用いたケーブルと同じ環境で 1.8 倍程度の $I_t$ を得られると考えられる。

PLD 線材を用いたケーブルは、 $B = 0.2$  Tまでの領域では MOD 線材を用いたケーブルよりも $I_t$ が低い、以降の領域では全てのケーブルの中で最も高くなっている。また、 $I_t$ の増加率は全てのケーブルの中で最も高く、 $I_t$ が最大となる巻き角度も大きい。

これらの結果から、線材の縦磁界中での $J_c$ 特性の違いによって、最適なケーブルの設計がそれぞれ異なるということがわかる。ケーブル内の線材に加わる縦磁界が $B = 0.2$  Tまでとなる場合は MOD 線材のように低磁界領域で高い $J_c$ を示す線材が適していると考えられる。一方でケーブルの規模がさらに大きくなった場合など、線材に高磁界が加わる場合は、PLD 線材のように $J_c$ の増加率が高く、高磁界領域で $J_c$ が最大となる線材が適していると考えられる。ただし、PLD 線材を用いたケーブルは $I_t$ の増加率は最も高いが、そのために必要な巻き角度も最も大きい。巻き角度が大きい場合は、ケーブルの単位長さ当たりに必要な線材の量が大きくなり、コストや重量の面で問題となる。よってケーブルの設計を進める上では、 $I_t$ 特性だけでなく、コスト等との兼ね合いも考慮し、最適化する必要がある。

## 3.4 小括

本章では、第2章で測定したRE系超伝導試料を用いて縦磁界直流超伝導ケーブルを作製した場合の臨界輸送電流 $I_t$ 特性を、数値計算によって求めた。

計算を行ったケーブルは半径5 mmのフォーマーに線材を角度 $\theta$ で巻き付けた超伝導層を、3層作製したケーブルである。このケーブルに $B = 0.1 - 0.5$  Tの磁界を印加した場合と、線材巻き付け角度 $\theta$ を5-10°で変化させた場合の $I_t$ 特性を計算し、 $I_t$ が最大となる巻き付け角度 $\theta$ および磁界 $B$ を求めた。

計算結果から、CVD線材を用いた場合は $\theta = 6^\circ$ 、 $B = 0.1$  Tで $I_t$ が最大となり、PLD線材の場合は $\theta = 12^\circ$ 、 $B = 0.3$  T、MOD線材の場合は $\theta = 10^\circ$ 、 $B = 0.1$  Tで $I_t$ が最大となった。第2章での測定結果では縦磁界中での $J_c$ 特性は各試料の作製方法などによって大きく変化することがわかったが、ケーブルに利用した場合でもその特性が影響し、各ケーブルによって最適な磁界や巻き角度が異なることがわかる。ただし、ケーブルの設計を進める上ではコストやその他の理由から、線材に印加できる磁界や巻き角度には制約が生じる可能性があるため、これらの点を含めて最適化を行う必要がある。

# 第4章

## MOCVD 線材を用いた 3 層縦磁界 直流超伝導ケーブルの特性評価

### 4.1 概要

第 2 章で RE 系超伝導試料の縦磁界中と非縦磁界中での  $J_c$  特性を評価し、第 3 章ではその特性を用いて、3 層の縦磁界直流超伝導ケーブルの設計を行った。特に縦磁界中で優れた  $J_c$  を示す単結晶基板上に作製された PLD 薄膜超伝導体は、ケーブル設計時においても  $I_t$  の大きな増加率を確認することができた。ただし、現時点では単結晶基板試料と同様な特性を持った長尺線材の作製は、十分な技術がまだ無い。

そこで、本章では縦磁界中での  $J_c$  の増加は単結晶基板試料に比べると小さいが、長尺線材が作製可能で市販されている MOCVD 線材に注目し、第 3 章の 3 層縦磁界直流超伝導ケーブルを作製し、液体窒素中での通電特性を評価し、このケーブルの有効性について議論する。

### 4.2 試料諸元

#### 4.2.1 ケーブル諸元

ケーブルに用いた超伝導線材は、市販されている SuperPower 社製の SCS2050-CF 線材である。第 3 章ではこの線材で 3 層構造の超伝導ケーブルを作製した場合、ケーブルの軸に対して  $6^\circ$  の角度でフォーマーに巻き付けることにより最大の電流容量が得られることを確認している。ただし、今回は製作時の都合上、 $10^\circ$  の角度でフォーマーに巻き付けた。なお、第 3 章での計算結果より、 $6^\circ$  で巻いた場合と  $10^\circ$  で巻いた場合の  $I_t$  の差は  $0.09\%$  程度である。線材を巻き付けるフォーマーは、実際の送電に用いられているコルゲートチューブの寸法などを考慮し、 $10\text{ mm}$  径とした。

ケーブルは上記のフォーマーに対して線材を  $10^\circ$  の角度で巻き付けた超伝導層の上に絶縁層を設け、更に超伝導層と絶縁層をそれぞれ積み重ね、合計で 3 層構造となっており、各層は電氣的に独立している。各線材を巻き付ける際には、線材端部に生じる自己磁界の垂直成分 ( $B//c$ ) による  $I_t$  の低下を抑えるため、図 4.1 に示すように各層の線材が俵積みとなるように工夫して巻き付けた。

ケーブルの両端には電流リード線を接続する電流端子を設け、3 層目の中央  $100\text{ mm}$  部分にはケーブルの発生電圧を測定する電圧リード線を取り付けた。また、各層に流れる電流をモニターするために、各層の両端部に電圧リード線を取り付けた。さらに、今回は内側

層ケーブルのみのため、外側層が作る縦磁界に相当する磁界を外部から補助的に加える必要がある。従って、今回は液体窒素中で利用できる Bi-2223 超伝導コイルを用いた。このために、縦磁界ケーブル部の長さはコイルの長さの 300 mm とした。表 4.1 にケーブルの諸元を、図 4.2 にケーブルの外観を、図 4.3 にケーブルの模式図を、それぞれ示す。

表 4.1:3 層縦磁界直流超伝導ケーブルの諸元。

使用線材	SuperPower SCS2050CF
総線材数[枚]	41(1層目:13、2層目:14、3層目:14)
層数[layers]	3
線材巻き角度[degree]	1層目:10、2層目:10、3層目:10
Min. $I_t@77\text{ K}$ [A]	2870 (1層目:910、2層目:980、3層目:980)
電圧端子間距離[mm]	100
フォーマー半径[mm]	5

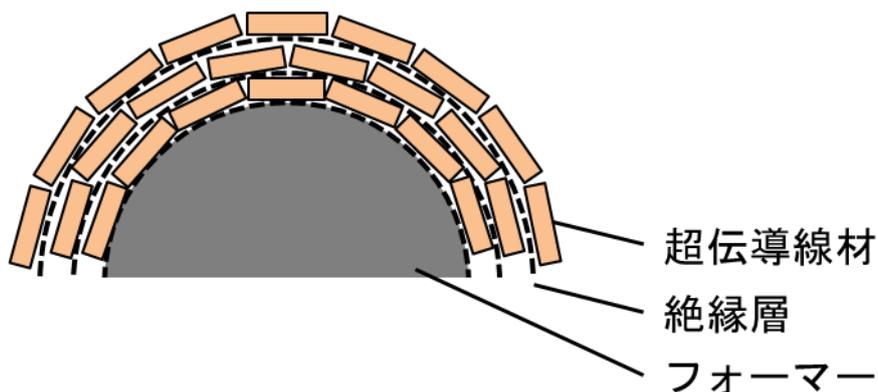


図 4.1:3 層縦磁界直流超伝導ケーブルの断面図。



図 4.2:3 層縦磁界直流超伝導ケーブルの外観。

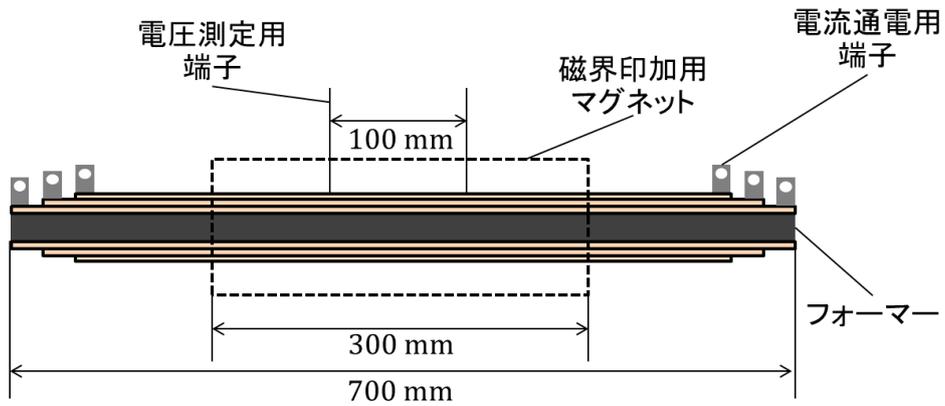


図 4.3:3層縦磁界直流超伝導ケーブルの構造図。

## 4.2.2 線材諸元

ケーブルに使用した SuperPower 社製 SCS2050-CF 線材の諸元を表 4.2 に示す。また、直流四端子法を用いて液体窒素中で測定した、縦磁界中および横磁界中での線材単体の  $I_c$ - $B$  特性を図 4.4 に示す。

表 4.2:SCS2050-CF 線材の諸元。

Min. $I_c@77\text{ K}$ [A]	70
線材幅[mm]	2
線材厚さ[mm]	0.1
超伝導層厚さ[ $\mu\text{m}$ ]	1

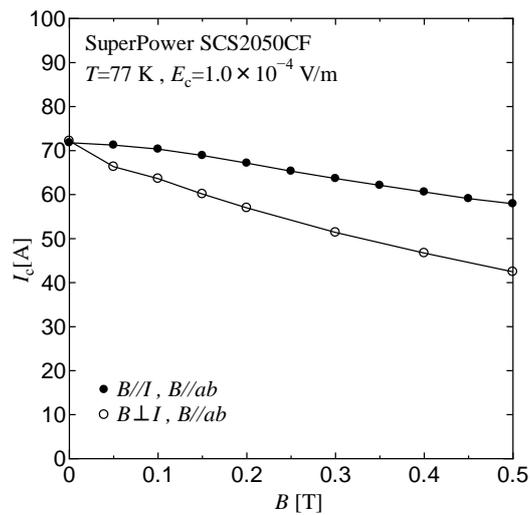


図 4.4:SCS2050-CF 線材の縦磁界中および横磁界中での  $I_c$ - $B$  特性。

## 4.3 実験方法

### 4.3.1 測定回路

直流四端子法を用いてケーブルの $I_t$ を測定するために使用した測定回路と、回路中の各機器について説明する。測定回路の全体図を図 4.5 に示す。

#### (a)電流源

ケーブルに通電するための電流を供給する。出力電流は後述の LabView プログラムによって制御用 PC から制御され、指定したスワイプレート(A/s)にしたがって段階的に増減する。用いた電流源は高砂製作所製 HX010-6000 型で、最大で 6000 A までの直流電流を通電することができる。

#### (b)電圧計(1)、電圧計(2)、電圧計(3)

各超伝導層の両端に発生する電圧を測定する。得られた値は LabView プログラムを用いて制御用 PC に記録される。装置には電圧計(1)と(2)がケースレーインストルメンツ製 2000 型を、電圧計(3)が同社製 2001 型を使用した。

#### (c)電圧計(4)

3 層目の超伝導層の中央部 100 mm の位置に発生する電圧を測定する。得られた値は LabView プログラムを用いて制御用 PC に記録される。装置にはケースレーインストルメンツ製 2182A 型を使用した。

#### (d)制御用 PC

電流源の制御と各電圧計から得られた値の記録を行う。制御にはナショナルインストルメンツ製 LabView プログラムを使用した。プログラムの動作内容は次節で述べる。

#### (e)Bi-2223 超伝導マグネット

ケーブルに対して縦磁界を印加する。Bi-2223線材を用いて作製された超伝導マグネットであり、最大0.9 Tを発生できる。発生磁界の制御はマグネットに接続した直流電流源の出力値を調整することで行う。図 4.6 にマグネットの外観を示す。

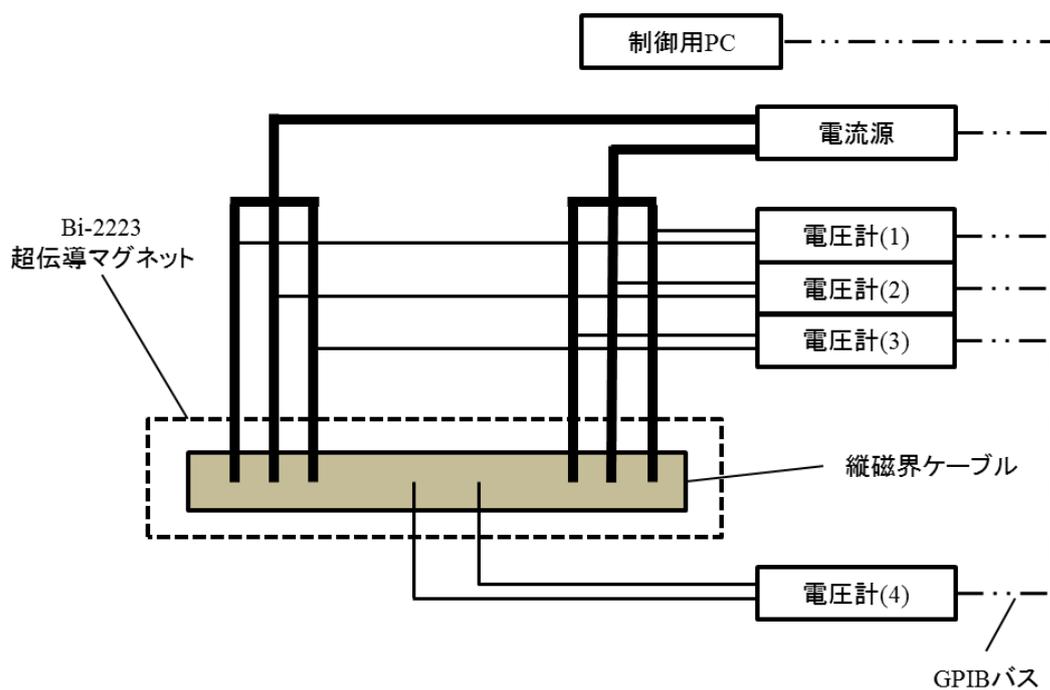


図 4.5:ケーブルの測定回路の全体図。

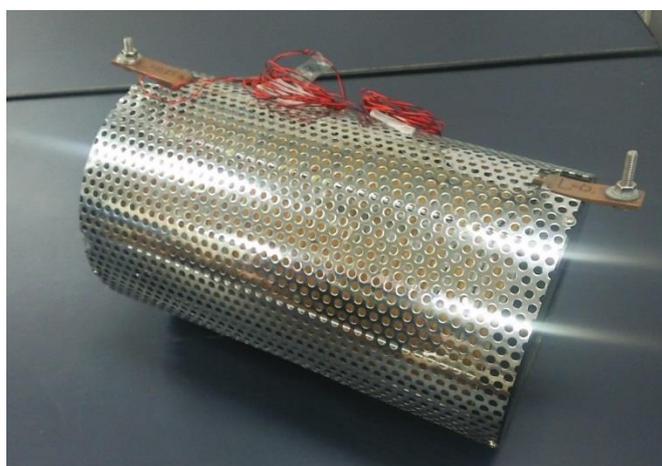


図 4.6:Bi-2223超伝導マグネットの外観。

### 4.3.2 測定プログラム

各装置類の制御を行うプログラムについて説明する。測定では電流出力値が0 Aの状態から開始し、設定したスイープレートに従って段階的に電流出力値を増加させ、電流出力値を変更するごとにケーブル中央部の電圧を記録する。電流出力値またはケーブル中央部の電圧があらかじめ設定された上限値に達した場合、電流出力を停止する。なお、前節で述

べた電圧計(1)、(2)、(3)から得られる各超伝導層の電圧値は、ケーブルへの通電状態に関わらず常に記録される。図 4.7 に Labview プログラムの動作フローチャート図を示す。

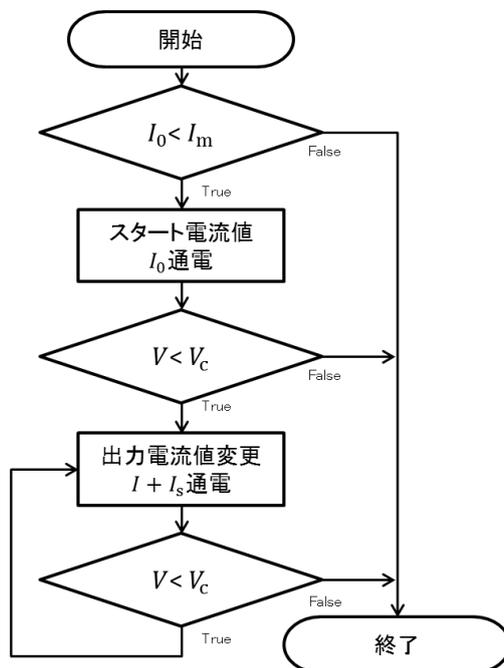


図 4.7:ケーブル測定プログラムのフローチャート。

### 4.3.3 測定条件

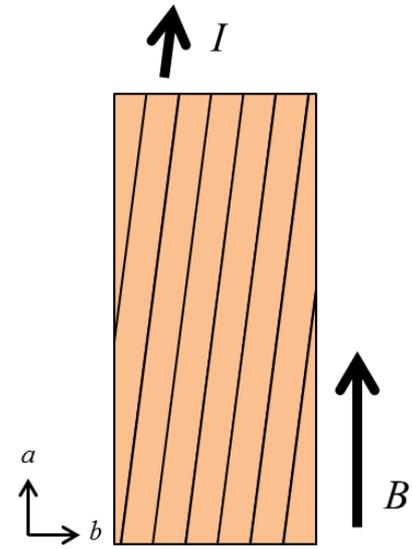
前節までの実験環境を用いて、磁界中でのケーブルの $V$ - $I$ 特性を測定した。ケーブルに通電する電流のスweepレートは $V$ - $I$ 特性の傾向に応じて、 $3 - 5 \text{ A/s}$ の範囲で調整した。ケーブルの冷却と超伝導マグネットの磁界を安定させるため、測定と測定の間には最大で40分程度のインターバルを設けた。得られた $V$ - $I$ 特性から、ケーブルの中央部 $100 \text{ mm}$ に発生した電界が電界基準 $E_c = 1.0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$ を超えた時点でのケーブル全体に流れる電流値を臨界輸送電流 $I_t$ とした。外部磁界は $0 - 0.5 \text{ T}$ の範囲でケーブルに巻かれた線材の $ab$ 面に対して平行かつ線材の自己磁界と外部磁界による合成磁界 $B$ が電流 $I$ と平行になるように印加した。また、全ての測定は液体窒素中で行った。

測定時の条件を表 4.3 に、ケーブルに対する電流の通電方向と外部磁界の印加方向の関係を図 4.8 に示す。

表 4.3:ケーブル測定時の条件。

電流スweepレート	$3 - 5 \text{ A/s}$
電界基準 $E_c$	$1.0 \times 10^{-4} \text{ V/m}$
外部磁界 $B$	$0 - 0.5 \text{ T}$
測定温度	$77 \text{ K}$
外部磁界の印加方向	縦磁界または非縦磁界

(a)



(b)

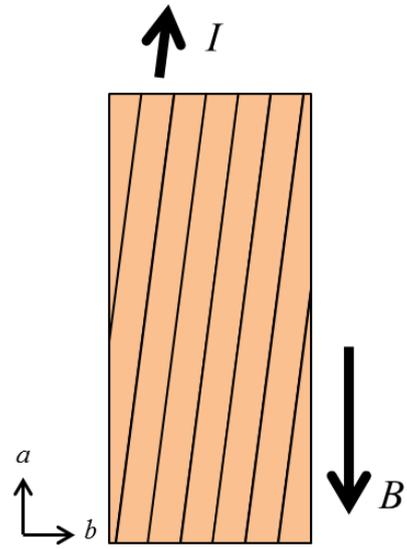


図 4.8:超伝導線材に(a)縦磁界および(b)非縦磁界を印加した状態での電流通電方向と磁界印加方向の関係。

## 4.4 実験結果及び検討

### 4.4.1 $V$ - $I$ 特性

ケーブルの自己磁界での $V$ - $I$ 特性を図 4.9 に、縦磁界中での $V$ - $I$ 特性を図 4.10 に、非縦磁界中での $V$ - $I$ 特性を図 4.11 に示す。各図中には $I_t$ を導出する際に用いる電界基準 $E_c$ に相当する電圧基準を破線で示した。測定結果より、縦磁界を印加した場合は $B = 0.1$  Tで電圧の立ち上がりが右側にシフトし、 $I_t$ が増加していることがわかる。一方で非縦磁界を印加した場合は $I_t$ の増加は見られず、磁界の増加につれて減少していることがわかる。

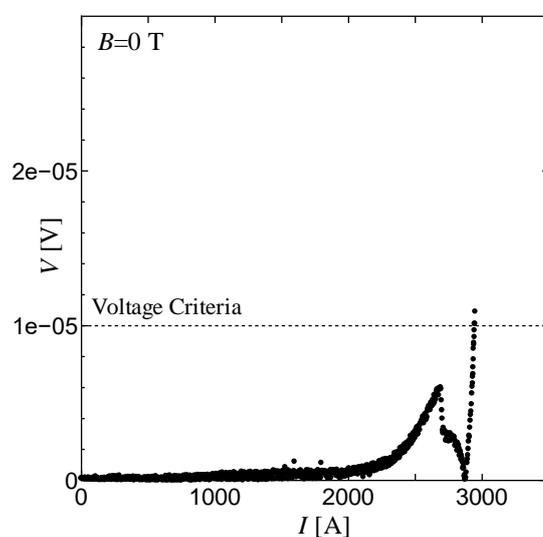


図 4.9: 自己磁界での $V$ - $I$ 特性。

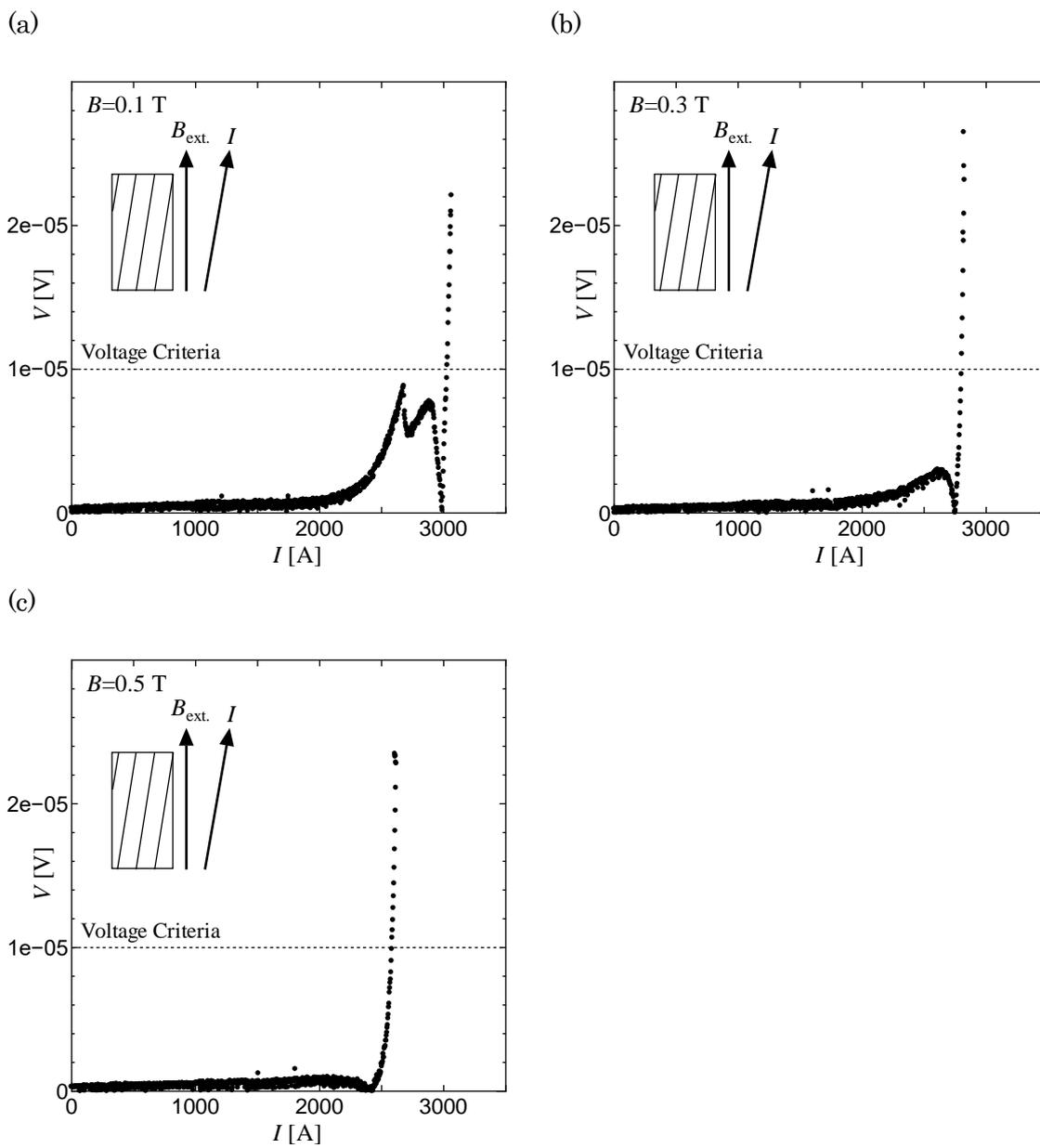
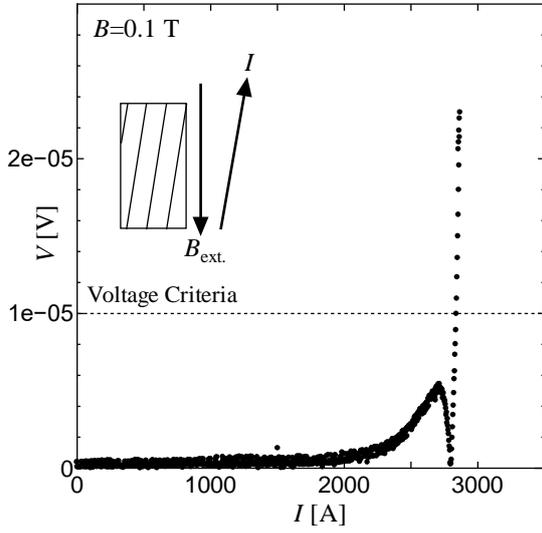
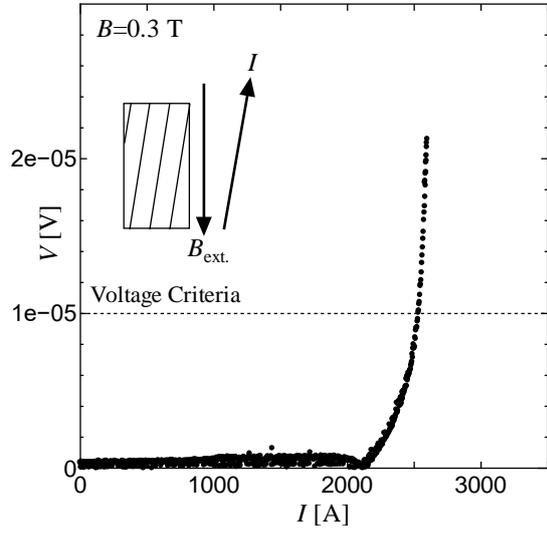


図 4.10: (a)  $B = 0.1$  T、(b)  $B = 0.3$  T、(c)  $B = 0.5$  T の縦磁界中での  $V$ - $I$  特性。

(a)



(b)



(c)

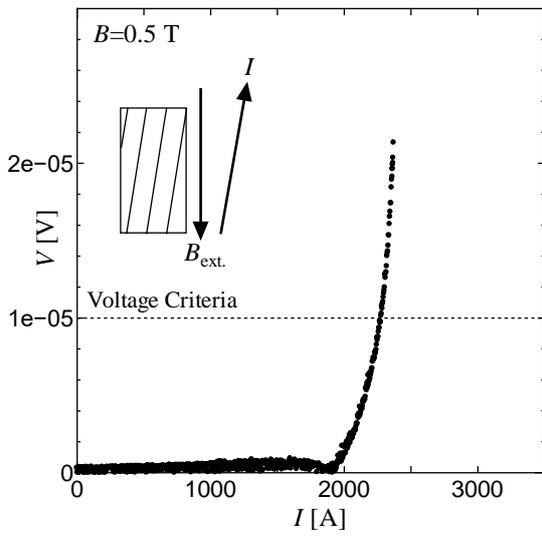


図 4.11:(a)  $B = 0.1$  T、(b)  $B = 0.3$  T、(c)  $B = 0.5$  T の非縦磁界中での  $V$ - $I$  特性。

## 4.4.2 $I_t$ - $B$ 特性

各磁界中での $V$ - $I$ 特性から、電界基準 $E_c$ を用いて求めた $I_t$ の磁界依存性と、第3章での計算結果の比較を図4.12、図4.13に示す。測定結果から、 $B = 0.1$  Tの縦磁界中でケーブルの $I_t$ は最大となり、自己磁界での $I_t = 2946$  Aに対して84 A増加していることがわかる。ただし、この増加率は自己磁界からの増加率であり、外側層による縦磁界が加わる前から自己磁界が縦磁界となるようなケーブル構造のために、一般的な超伝導ケーブルの増加率とは異なることに注意が必要である。また、ケーブルの磁界依存性は計算結果と一致しており、 $I_t$ は $B = 0.1$  T付近でピークとなっていることがわかる。従って、第3章で行った縦磁界ケーブルの設計は有効で、短尺線材の縦磁界中での $J_c$ 特性からのケーブル設計は可能であることが示された。

また、自己磁界においてケーブルの各層に1層ずつ通電した場合の $I_t$ を表4.4に示す。測定結果より、1層目の $I_t$ は設計値よりも約0.7%低くなり、2層目は約2.1%、3層目は約9.9%高くなっていることがわかる。3層の中で最も設計値との差が大きい3層目では設計値との差が97 Aであり、線材1枚当たり7 Aの差となる。今回使用したCVD線材は $I_t$ 設計値は70 Aであるが、長尺線材の局所的な $I_t$ の分布が最大で30 A程度見られることが報告されている[32]。従って線材の $I_t$ の分布が、各層間の $I_t$ の差につながったと考えられる。

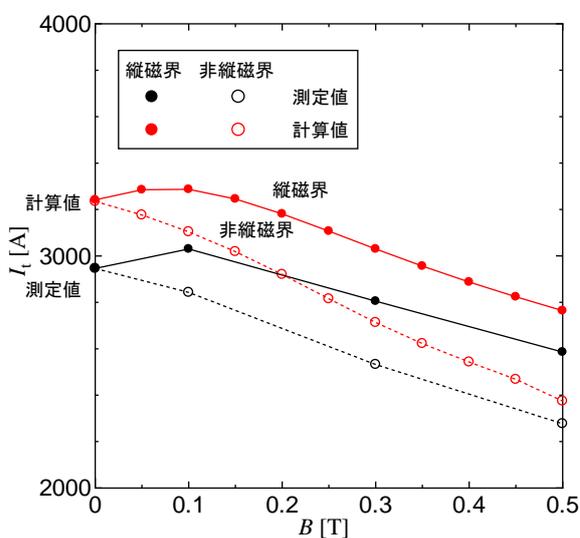


図 4.12:  $I_t$ - $B$ 特性の計算値と測定値の比較。

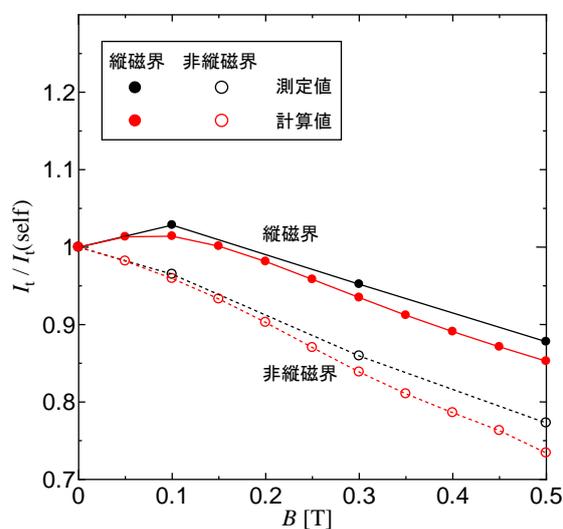


図 4.13: 自己磁界での値で規格化した $I_t$ - $B$ 特性の計算値と測定値の比較。

表 4.4:1 層ずつ通電した場合の $I_t$ 。

	線材枚数	設計値		測定結果	
		Min. $I_t$ [A]	数値比	$I_t$ [A]	数値比
1 層目(最内層)	13	910	1.00	904	1.00
2 層目(中間層)	14	980	1.08	1001	1.11
3 層目(最外層)	14	980	1.08	1077	1.19

## 4.5 今後の課題点

本研究では縦磁界効果によるケーブルの $I_t$ の増加を確認できたが、さらに高い $I_t$ のケーブルの開発やケーブルの実用化に向けた課題点として、ケーブルに応用可能な高性能線材の開発と、ケーブルの構造の改良が挙げられる。

はじめに縦磁界下用線材について注目すると、本研究でケーブル作製に用いた MOCVD 線材は、第2章で示したように線材内での $J_c$ の分布や $E$ - $J$ 特性の安定性などに優れた薄膜を、大量かつ高速に作製できるプロセスが確立されており、実用線材として電気的特性だけでなく、湿気や熱収縮に対する物理的特性も安定している。

ただし、縦磁界下での $J_c$ の増加は十分なものではない。一方で短尺な PLD 試料や MOD 試料は縦磁界中で高い $J_c$ を示すが、上記のような実用線材までの作製プロセスが確立されておらず、現時点では長尺化にはまだ時間が必要な状況である。短尺線材の特性と同じレベルの長尺線材が作製可能になれば、第3章で設計を行った $I_t$ の増加率が高いケーブルが作製できる。

また、後のケーブル試験においては、1.10 節で示したように電流の往路と復路からなるケーブルであるために、シールド層を配置し、外部からの磁界を加えることなく、縦磁界効果による電流容量の増加を確認する必要がある。

## 4.6 小括

本章では、第3章でのケーブルの計算結果に従って長尺線材を作製し、液体窒素中で通電試験を行い、設計方法とケーブルの有効性を調査した。

作製したケーブルは半径 5 mm の銅製のフォーマーに 2 mm 幅の CVD 線材を 41 枚巻き付けた、全長 700 mm のケーブルである。直流四端子法で通電試験を行うためにケーブルの両端に各層毎に独立した電流端子を設け、ケーブルの中央部 100 mm の位置には電圧端子を設けた。

実験は 3 層の超伝導層に同時に通電し、外部から  $B = 0 - 0.5$  T の磁界を印加した場合の  $I_t$  の磁界依存性と、磁界を印加せずに各層に個別に通電した場合の  $I_t$  特性を測定した。

測定結果から、 $B = 0.1$  T の縦磁界を印加した場合に  $I_t$  がピークとなり、全ての領域で非縦磁界状態よりも  $I_t$  が増加することがわかった。従って測定結果は設計結果と一致しており、第3章での計算方法とケーブルの有効性を確認できた。

また、各層に個別に通電した場合には  $I_t$  の設計値との差が最大で 9.9 % 生じた。ケーブルに用いた線材は  $I_t$  の分布が最大で 30 A 程度であることが報告されており、この分布によってケーブルの  $I_t$  に差が生じた可能性がある。

本実験では市販の MOCVD 線材を用いてケーブルを作製したが、前述のように縦磁界中での  $J_c$  特性に優れた他の線材を用いた場合は、計算結果で示したように更に高い  $I_t$  のケーブルを実現できると考えられる。従って、縦磁界中での  $J_c$  が高い PLD 試料や MOD 試料も CVD 線材と同様に長尺線材の作製プロセスを確立する必要がある。また、今回作製したケーブルは内側層のみであったため、外側層も作製し、外部からの磁界を加えることなく、縦磁界効果による電流容量の増加を確認する必要がある。

# 第5章

## 総括

地球温暖化や発電方法の見直しによる電力供給の逼迫などから、これまで以上に電力使用量の削減と利用効率の向上が求められている。超伝導体は電気抵抗ゼロの性質を持ち、損失無しに電流を通電できるため、送電ケーブルとして利用した場合、送電過程での電気抵抗による損失を大幅に低減できる。現在の日本で送電に用いられている銅やアルミニウムなどの常伝導体で構成されたケーブルを超伝導ケーブルに交換した場合、電気抵抗による送電経路全体での損失を3%程度削減できるという試算もある。従って、超伝導ケーブルによる送電は電力の利用効率を向上させる手段として有効であり、実用化に向けて研究開発が進められているが、課題点として臨界輸送電流 $I_t$ の向上が挙げられる。

これまで超伝導ケーブルを構成する超伝導線材には、長尺の線材が作製可能なビスマス系超伝導体が利用されていた。一方でビスマス系と同程度の臨界温度 $T_c$ を持ち、さらに高磁場中でビスマス系よりも高い臨界電流密度 $J_c$ を持つRE系超伝導体も、近年では長尺線材の作製が可能になりつつあり、超伝導ケーブルへ応用した場合にはケーブルの $I_t$ を大きく増加させることができると考えられる。

超伝導線材の $J_c$ を増加させる方法の一つとして、縦磁界効果の利用が挙げられる。縦磁界効果による $J_c$ の増加は、線材の利用環境を変化させ、線材に対して電流と平行に磁界を印加することで得られる。従って、超伝導ケーブルにおいてもケーブル内部の構造を工夫することで縦磁界効果による $I_t$ の増加が得られ、高性能な線材開発と合わせて、より高い $I_t$ を持つ超伝導ケーブルが開発できると考えられる。

以上の背景から、本研究ではRE系超伝導線材を利用した縦磁界直流超伝導ケーブルを開発するために、作製方法や材質が異なる3種類のRE系超伝導短尺試料の縦磁界中と横磁界中での $J_c$ 特性を測定し、その測定結果を利用して3層縦磁界直流超伝導ケーブルを設計した。さらに、設計したケーブルのうち長尺線材が作製可能なCVD線材を用いたケーブルを実際に作製し、磁界中での臨界電流特性の評価を行い、設計方法の有効性を調査した。

第2章では、CVD法、PLD法、MOD法で作製されたRE系超伝導線材を準備し、縦磁界中および横磁界中での $J_c$ - $B$ 特性を測定した。測定の結果、PLD試料では外部磁界が $B = 0.3$  T以上の高磁界領域にて $J_c$ が大きく増加し、 $J_c$ そのものと $J_c$ の増加量のいずれにおいても、全試料中で最も高くなった。またMOD試料は $J_c$ の増加量はCVD試料との差は見られないが、縦磁界中での $J_c$ は1.8倍程度高くなり、更に $B = 0.2$  Tまでの領域では全試料中で最も高い $J_c$ となった。また、各試料の $E$ - $J$ 特性から、縦磁界中と横磁界中における $n$ 値を求めた。CVD試料とMOD試料では縦磁界と横磁界のいずれにおいても磁界の増加と共に $n$ 値が減少した。

一方で PLD 試料は横磁界中での $n$ 値は他の試料と同様であるが、縦磁界中では磁界と共に増加し、高磁界領域でピークが見られた。

第 3 章では、第 2 章で得られた $J_c$ - $B$ 特性から、各線材を使用した 3 層縦磁界直流超伝導ケーブルをモデル化し、ケーブルの $I_t$ - $B$ 特性と、線材の巻き付け角度を変化させた際の $I_t$ の変化を求めた。計算結果から、CVD 線材は巻き付け角度が $6^\circ$ 、PLD 線材は $12^\circ$ 、MOD 線材は $10^\circ$ の場合に $I_t$ の増加率が最大となることがわかった。また、CVD 線材と MOD 線材を用いたケーブルは縦磁界 $B = 0.1$  T のとき、PLD 線材を用いた場合は $B = 0.4$  T のときにそれぞれ $I_t$ が最大となることがわかった。さらに、線材の巻き付け角度を各ケーブルで最適化した場合は、ケーブルに加わる縦磁界が $B = 0.2$  T までの領域では MOD 線材を用いたケーブルが $I_t$ が最も高く、以降の領域では PLD 線材を用いたケーブルが最も高くなることがわかった。

第 4 章では、第 3 章での計算結果に従い、MOCVD 線材を用いて超伝導ケーブルを作製し、縦磁界中および非縦磁界中での $I_t$ 特性を評価した。作製したケーブルは SuperPower 社製の MOCVD 線材を、直径 10 mm の銅製のフォーマーに $10^\circ$ の角度で巻き付けた 3 層ケーブルで、このケーブルの縦磁界中および非縦磁界中での $I_t$ 特性を測定し、計算結果との比較を行った。測定の結果、ケーブルに対して $B = 0.1$  T の縦磁界を印加した場合に自己磁界の場合と比較して $I_t$ が約 3% 増加した。また、 $I_t$ の磁界依存性は計算結果と一致した。従って、第 3 章での計算結果を実際に観測でき、計算方法の有効性を確認することができた。

今後の課題点として、ケーブルの構造の改良と線材の高性能化が挙げられる。本研究で作製したケーブルは外部から縦磁界を印加することで $I_t$ の増加を実現したが、1.10 節で示したようにケーブルの外側層についても作製を行い、外部からの磁界を加えることなく、縦磁界効果による電流容量の増加を確認する必要がある。また、第 3 章での計算結果で示したように縦磁界での優れた $J_c$ 特性を持つ線材をケーブルに利用した場合には、さらに高性能なケーブルを実現できる。従って、第 2 章での PLD 試料や MOD 試料のような $J_c$ 特性をもつ高性能な長尺線材の作製プロセスを確立する必要がある。

# 謝辞

本研究の遂行にあたり、御多忙の中、論文の執筆をはじめ研究の方針策定や実験結果の考察、実験環境の改善などに関する様々な御指導と御助言を頂きました、九州工業大学 大学院情報工学研究院准教授 木内勝先生に深く感謝申し上げます。

超伝導の研究だけでなく、大学院での学習の進め方や英語学習の取り組み方、学会などでの振る舞いなど、様々な面での御指導と御助言を頂きました、九州工業大学 大学院情報工学研究院教授 小田部エドモンド荘司先生に深く感謝申し上げます。

本研究および縦磁界中での臨界電流特性に関する研究にて測定を行った PLD 法超伝導試料は、九州工業大学 工学部マテリアル工学科 エネルギー環境材料学研究室より提供頂きました。超伝導試料の作製および測定結果に関する御指導を頂きました同大学院工学研究院教授 松本要先生に深く感謝申し上げます。

超伝導試料の作製および測定結果の考察、研究方針に関する貴重な御助言と御指導を頂きました同研究院助教授 アロク クマル ヤハ先生、室蘭工業大学 環境調和材料工学研究センター准教授 メレ パオロ先生に深く感謝申し上げます。

本研究および本研究室での研究にて測定を行った TFA-MOD 法超伝導試料は、成蹊大学 理工学部 システムデザイン学科 電力・エネルギー研究室 三浦研究室より提供頂きました。超伝導試料の作製及び、本研究を進める際の御助言と御指導を頂きました同研究室准教授 三浦正志先生に深く感謝申し上げます。また、超伝導試料の作製と測定に関する貴重な御助言を頂きました同研究室博士後期課程 佐藤迪夫氏に深く感謝申し上げます。

最後に、研究室での 3 年間の苦楽を共にし、公私共々大変お世話になりました九州工業大学 大学院情報工学府 木内研究室 平松佑太氏をはじめ小田部・木内研究室の皆様へ深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1]H. K. Onnes: Commun . Phys. Lab. Univ. Leiden, Suppl. **34** (1913)
- [2]H. K. Onnes: Commun . Phys. Lab. Univ. Leiden, Suppl. **139f** (1914)
- [3]J. G. Bednorz and K. A. Muller: Z. Physik B **64** (1986), 189
- [4]M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Thorng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Q. Wang, C. W. Chu: Phys. Rev. Letters, **58** (1987), 908
- [5]A. Schilling, M. Cantoni, J. D. Guo and H. R. Ott: Nature **363** (1989), 56
- [6]J. File and R.G. Mills: Phys, Rev. Lett. **10** (1963) 93
- [7]松下 照男: 「超伝導応用の基礎」, 米田出版, 2004 年
- [8]向田昌志ら: 「2 次元人工ピン導入 RE123 膜における磁束ピンニング特性評価」
- [9]D. Dew-Hughes: LOW TEMPERATURE PHYSICS VOLUME **27**, NUMBER 9-10
- [10] T. Sueyoshi, T. Nishimura, T. Fujiyoshi, F. Mitsugi, T. Ikegami and N. Ishikawa: Supercond. Sci. Technol. **29** (2016) 105006
- [11]松下 照男: 「磁束ピンニングと電磁現象」, 産業図書, 1994 年
- [12]Yu. F. Bychkov et al.: JETP Lett. **9** (1969) 404
- [13]G. W. Cullen and R. L. Novak: Appl. Phys. Lett. **4** (1964) 147-149
- [14]K. Takahashi, et al.: Supercond. Sci. Technol. **18** (2005) 1118
- [15]T. Tamegai, A. Watanabe, I. Oguro, and Y. Iye: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L1304
- [16]S. Tsurumi, M. Hikita, T. Iwata, K. Semba, and S. Kurihara: Jpn. J. Appl. Phys. **26** (1987) L856
- [17]Z. Zou, K. Oka, T. Ito, and Y. Nishihara: Jpn. J. Appl. Phys. **36** (1997) L18
- [18]Y. Nakabayashi, Y. Kubo, T. Manako, J. Tabuchi, A. Ochi, K. Utsumi, H. Igarashi, and M. Yonezawa: Jpn. J. Appl. Phys. **27** (1988) L64
- [19]フジクラ技報 2011, Vol2, 第 121 号
- [20]A.Tsuruta, S.Watanabe, Y.Ichino, and Y.Yoshida: Jpn. J. April. Phys. **53** (2014), 078003
- [21]スマートジャパン 「高効率送電が可能な「超電導ケーブル」」  
<<http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1305/31/news109.html>>
- [22]超伝導直流送電は電力網に革命をもたらすか?  
<[http://origin.tel.co.jp/museum/magazine/environment/120401\\_topics\\_04/](http://origin.tel.co.jp/museum/magazine/environment/120401_topics_04/)>
- [23]さくらインターネット社 プレスリリース  
<[https://www.sakura.ad.jp/press/2015/0924\\_superconductivity/](https://www.sakura.ad.jp/press/2015/0924_superconductivity/)>
- [24]「データセンターの世界動向と HVDC (高電圧直流給電)」  
<[http://www.nttdata.com/jp/ja/insights/trend\\_keyword/2016061601.html](http://www.nttdata.com/jp/ja/insights/trend_keyword/2016061601.html)>
- [25]NANO 「高温超伝導送電・蓄電技術」

<<http://www.nano-opt.jp/jpn/technology/cable.html>>

[26]T. Matsushita et al.: Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 125009 (8pp)

[27]V. S. Vyatkin, K. Tanabe, J. Wada, M. Kiuchi, E. S. Otabe, T. Matsushita: Physica C **494** (2013) 135

[28]SuperPower 社 線材諸元

<<http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>>

[29]K. Sugihara, Y. Ichino, Y. Yoshida Supercond. Sci. Technol. **28** (2015) 104004 (6pp)

[30]P. Mele, R. Guzman, J. Gazquez, T. Puig, X. Obradors, S. Saini, Y. Yoshida, M. Mukaida, A. Ichinose, K. Matsumoto: Supercond. Sci. Technol. **28** (2015) 024002

[31]T. Matsushita, K. Kimura, M. Kiuchi, Y. Yamada, Y. Shiohara: Supercond. Sci. Technol. **20** (2007) S189–S196

[32]The “Albany Cable Project” Final Report DOE Cooperative Agreement Number DE-FC36-03GO013301

# 研究業績

## 論文

1. R. Kido, M. Kiuchi, E. S. Otabe, T. Matsushita, A. K. Jha, K. Matsumoto  
“Critical current properties in longitudinal magnetic field of YBCO superconductor with APC”,  
Physics Procedia 81(2016) 117-120

## 国際会議

1. R. Kido, M. Kiuchi, E. S. Otabe, T. Matsushita, A. K. Jha, K. Matsumoto  
”Critical current properties in longitudinal magnetic field of YBCO superconductor with APC”  
28th International Symposium on Superconductivity, TOWER HALL FUNABORI,  
November 16 2015.

## 国内学会

1. 木戸 竜馬、秀島 匡彦、木内 勝、小田部 荘司、松下 照男、佐藤 迪夫、三浦 正志、  
「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」  
第 62 回 応用物理学会春季学術講演会、東海大学 湘南キャンパス  
平成 27 年 3 月 12 日
2. 木戸 竜馬、木内 勝、小田部 荘司、松下 照男、Jha Alok K.、松本 要  
「人工ピンを導入した Y 系超伝導薄膜の縦磁界下における臨界電流特性」  
第 76 回 応用物理学会秋季学術講演会、名古屋国際会議場  
平成 27 年 9 月 14 日
3. 木戸 竜馬、木内 勝、Jha Alok K.、松本 要  
「人工ピンを導入した Y 系超伝導薄膜の縦磁界下における臨界電流特性」  
九州・西日本支部研究会／第 3 回材料研究会 合同研究会、KKR 山口あさくら  
平成 27 年 10 月 9 日
4. 木内 勝、木戸 竜馬、小田部 荘司、松下 照男、Jha Alok K.、松本 要  
「人工ピンを導入した Y 系超伝導薄膜の縦磁界下における臨界電流特性」  
2015 年度秋季低温工学・超伝導学会、姫路商工会議所  
平成 27 年 12 月 2 日

5. 木戸 竜馬、木内 勝、小田部 荘司、Jha Alok K.、松本 要

「人工ピンを導入した YBCO 超伝導薄膜の縦磁界下における臨界電流特性」

平成 28 年電気学会 基礎・材料・共通部門大会、九州工業大学 戸畑キャンパス

平成 28 年 9 月 5 日