

平成 28 年度
卒業論文

縦磁界効果を利用した
RE 系コート線材
3 層直流超伝導ケーブルの通電特性

電子情報工学科

木内研究室

学籍番号 13232077

宮島 悠

平成 29 年 3 月 1 日

目次

第1章 序論.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 臨界温度 T_c , 臨界磁界 H_c	1
1.3 第一種超伝導体, 第二種超伝導体.....	2
1.4 高温超伝導体.....	2
1.4.1 銅酸化物超伝導体.....	3
1.4.2 RE系超伝導体.....	3
1.5 臨界電流密度.....	3
1.6 磁束ピンニング.....	3
1.7 縦磁界効果.....	4
1.8 超伝導電力ケーブルにおける交流・直流送電.....	6
1.9 縦磁界効果を用いた直流超伝導ケーブル.....	6
1.10 ケーブル設計における数値解析.....	9
1.11 本研究の目的.....	12
第2章 実験.....	13
2.1 3層超伝導ケーブルの設計.....	13
2.1.1 設計に必要なREコート線材の縦磁界下での J_c 特性評価.....	13
2.1.2 フォーマーに対する線材の巻き角度 θ の決定.....	14
2.2 作製した3層超伝導ケーブルの諸元.....	16
2.3 直流四端子法.....	18
2.4 実験環境.....	19
2.4.1 Bi-2223超伝導マグネット.....	20
2.5 実験の測定および評価方法.....	21
第3章 実験結果及び考察.....	22
3.1 超伝導ケーブルの $V-I$ 特性.....	22
3.2 超伝導ケーブルの n 値.....	25
3.3 超伝導ケーブルの I_c-B_{ext} 特性.....	25
3.4 各層独立に通電した場合の $V-I$ 特性.....	26
第4章 まとめ.....	30
4.1 超伝導ケーブルの $V-I$ 特性.....	30
4.2 超伝導ケーブルの n 値.....	30
4.3 超伝導ケーブルの I_c-B_{ext} 特性.....	30
4.4 今後の展開.....	30
謝辞.....	31

目次

図 1.1 : 超伝導体の超伝導領域.....	2
図 1.2 : 超伝導体に対して磁界と電流を平行に印加した状態	5
図 1.3 : 円柱状超伝導体とテープ状超伝導体の自己磁界分布	5
図 1.4 : Ti-Nb 円柱超伝導合金の J_c - B 特性[6]	5
図 1.5 : 縦磁界を用いた直流超伝導ケーブルの構造[7]	7
図 1.6 : 超伝導層とコート線材の厚さ.....	8
図 1.7 : 縦磁界効果を用いた直流超伝導ケーブルのケーブル効率[9]	9
図 1.8 : 繰り返し近似計算による電流容量 I_c 導出の解析の流れ.....	11
図 2.1 : 試料に印加する磁界と電流の関係	13
図 2.2 : Superpower 社製市販のコート線材における J_c - B 特性(SCS2050CF)	14
図 2.3 : 本実験で使用する内側 3 層直流超伝導ケーブルの概形	14
図 2.4 : 最大電流容量 I_{cmax} の巻き角度依存性	15
図 2.5 : 繰り返し近似計算を用いた $\theta = 10^\circ$ の 3 層直流超伝導ケーブルの I_c - B_{ext} 特性	15
図 2.6 : 線材の巻き付け角度	16
図 2.7 : 3 層超伝導ケーブルの断面図	16
図 2.8 : 3 層超伝導ケーブルの電圧端子の接続部	17
図 2.9 : 超伝導テープ線材の重ねる方法	17
図 2.10 : 直流二端子法の回路図.....	18
図 2.11 : 直流四端子法の回路図.....	19
図 2.12 : 実験環境の概略図.....	20
図 2.13 : Bi-2223 超伝導マグネットの外観.....	21
図 3.1 : $B_{ext} = 0$ Tでの V - I 特性.....	22
図 3.2 : $B_{ext} = 0.1$ Tでの V - I 特性.....	22
図 3.3 : $B_{ext} = 0.2$ Tでの V - I 特性.....	23
図 3.4 : $B_{ext} = 0.3$ Tでの V - I 特性.....	23
図 3.5 : $B_{ext} = 0.4$ Tでの V - I 特性.....	24
図 3.6 : $B_{ext} = 0.5$ Tでの V - I 特性.....	24
図 3.7 : 各磁界における n 値.....	25
図 3.8 : 3 層直流超伝導ケーブルにおける実験値と設計値の I_c - B_{ext} 特性	26
図 3.9 : 各層独立で通電した場合の V - I 特性	27
図 3.10 : 超伝導ケーブルに外部磁界 B_{ext} が印加されている部分.....	27
図 3.11 : 1, 2 層目に同時に通電した場合の V - I 特性	28

図 3.12 : 1, 3 層目に同時に通電した場合の $V-I$ 特性	28
--	----

表目次

表 2.1 : ケーブルに使用した線材の縦磁界状態, 非縦磁界状態における J_c-B 特性の近似 式の展開係数	15
表 2.2 : 3 層超伝導ケーブルの諸元	17
表 3.1 : 3 層直流超伝導ケーブルの実験値と電流比	27

第 1 章 序論

1.1 はじめに

超伝導現象とは、特定の金属や化合物をある特定の温度まで下げると、急激に電気抵抗が低下し、ゼロになるという現象のことである。この超伝導になる特定の温度のことを臨界温度 T_c と呼ぶ。この現象を持つ物質は超伝導体と呼ぶ。この超伝導現象は、1911年にオランダのヘイケ・カメリン・オンネス(Heike Kamerlingh Onnes)が液化ヘリウムによる極低温下における水銀の電気抵抗を調べたときに発見された。それ以降、水銀だけでなく他の元素でも超伝導現象が起こることが確認されたが、超伝導体は高磁界や高温で超伝導状態が壊れ、常伝導状態になってしまうため、工学的な応用は期待できなかった。しかし、1933年にフリッツ・ヴァルター・マイスナー(Fritz Walther Meißner)とローベルト・オクセンフェルト(Robert Ochsenfeld)が超伝導体の完全反磁性(マイスナー効果)を発見した。このマイスナー効果完全反磁性とは、超伝導体外部から磁界を印加しても超伝導体内部の磁界が 0 に保たれる現象である。したがって、超伝導状態は、温度だけでなく、磁界によっても壊れることが明らかになった。この超伝導状態が壊れる特定の磁界のことを臨界磁界 H_c と呼ぶ。完全反磁性の概略を図 1.1 に示す。さらに、1957年ジョン・バーディーン(J. Bardeen), レオン・ニール・クーパー(L.N. Cooper), ジョン・ロバート・シュリーファー(J.R. Schrieffer)の三人が BCS 理論によって超伝導現象を微視的に解明し、超伝導に関する研究が大きく進んだ。この BCS 理論では、超伝導体の臨界温度 T_c は 30 K 程度が限界であると考えられていた。ところが、1986年にヨハネス・ゲオルク・ベドノルツ(Johannes Georg Bednorz)とカール・アレクサンダー・ミュラー(Karl Alexander Müller)が、30 K を超える T_c を持つ酸化物系物質 La-Ba-Cu-O 系超伝導体を発見した。このような超伝導体は酸化物超伝導体と呼ばれる。

この発見以降にも、液体窒素の沸点(77.3 K)以上の T_c を持つ高温超伝導体も発見された。この高温超伝導体の中でも銅酸化物のものは銅酸化物超伝導体と呼ばれ、冷媒に高価な液体ヘリウムを使わず安価な液体窒素を用いるため、超伝導体の実用化が期待されている。また、この超伝導体の研究は現在も進められている。

1.2 臨界温度 T_c , 臨界磁界 H_c

T_c , H_c は、それぞれ 1.1 節でも述べたようにある特定の値(臨界点)を超えると、超伝導状態ではなくなる温度、磁界である。また、臨界電流密度 J_c は、1.5 節に示す電気抵抗なしで流せる最大の電流密度である。この 3 つの臨界点によって、超伝導体の性能は決定される。図 1.1 に超伝導体の超伝導領域について示す。

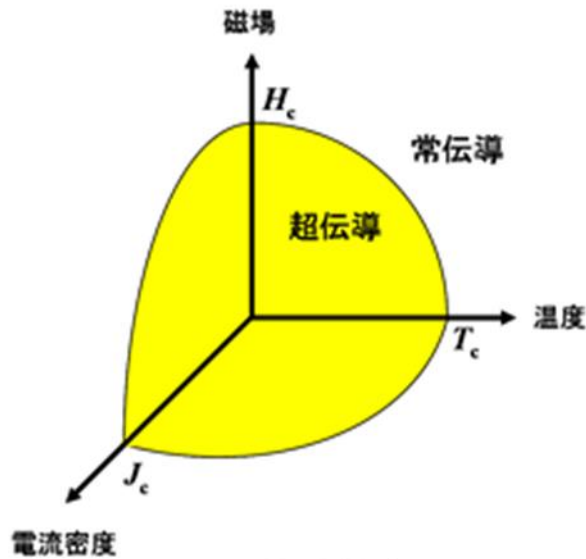


図 1.1 : 超伝導体の超伝導領域

1.3 第一種超伝導体, 第二種超伝導体

外部磁界が臨界磁界 H_c を超えると反磁性は失われ, 常伝導状態となる. 超伝導体は, 外部磁界に対する反応の違いによって第一種超伝導体, 第二種超伝導体に分けられる.

第一種超伝導体は, 外部磁界が臨界磁界を超えると, 反磁性の性質が完全に失われ, 常伝導体になるもののことを言う.

一方, 第二種超伝導体は, 外部磁界が臨界磁界を超えると, マイスナー効果が失われ, 磁界が部分的に超伝導体内に侵入し, 常伝導部分と超伝導部分が混在する混合状態となる. これに磁界をさらに加えると超伝導体は常伝導状態に転移する. 超伝導状態から混合状態になるときの臨界磁界を下部臨界磁界 H_{c1} , 混合状態から完全に常伝導状態となる臨界磁界を上部臨界磁界 H_{c2} と呼ぶ. 元素の中でニオブ(Nb)とバナジウム(V)の二つがこれに属している. 上部臨界磁界の大きい第二種超伝導体は工学的な応用に期待されている.

1.4 高温超伝導体

高温超伝導体とは, 国際電気標準会議(IEC)により「一般的には約 25 K 以上の T_c を持つ超伝導体」と定義されている. しかし, T_c が 90 K を超えるものが一般的になってきた今日では, 液体窒素温度(77.3 K)以上で転移するものを高温超伝導体と呼ぶことが多くなってきている.

1.4.1 銅酸化物超伝導体

銅酸化物超伝導体とは、結晶中に CuO_2 面を持つ超伝導体のことである。この超伝導体は、超伝導層の CuO_2 面とブロック層が交互に積み重なった構造をしている。この構造によって、銅酸化物超伝導体は電流特性の異方性を持つ。これは、 CuO_2 面に平行な方向に電流が流れやすく、垂直な方向には電流が流れにくいという特性である。銅酸化物超伝導体の多くは T_c が液体窒素温度(77.3 K)以上であり、冷媒には安価な液体窒素を用いることができるので、銅酸化物系の線材への応用が期待されている。

1.4.2 RE 系超伝導体

RE 系超伝導体とは、RE-Ba-Cu-O(REBCO)超伝導体のことであり、銅酸化物超伝導体の一つである。RE とは、Rare Earth の略称であり、希土類元素のことである。この中でも特に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、この超伝導体の T_c は約 90 K であるため、冷媒として液体窒素を用いることができる。REBCO は希土類元素のイオン半径が大きいほど T_c が高くなることが一般的に知られている。しかし、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、これを制御するのは困難である。そのため、用いられる希土類元素はイオン半径が中程度の Y や Gd が用いられる。

1.5 臨界電流密度

臨界電流密度とは、電気抵抗ゼロ流せる最大の電流密度であり、単位は A/m^2 である。この臨界電流密度を測定する最も一般的な方法として、電流を超伝導体に加えて電圧端子間の電圧を測定する四端子法がある。測定から得た電流・電圧特性で明確な立ち上がり電圧が現れる電流値を超伝導体の断面積で割って、臨界電流密度は求めることができる。しかし、実際には超伝導体内の臨界電流密度の不均一さや様々な原因のために、電流・電圧特性は直線的なものではなく、緩やかな立ち上がりであり、正確な立ち上がり電圧の発生点を同定することはできない。このため、電界基準や抵抗基準、オフセット法のような便宜的な方法が取られている[1]。本研究では、電界がある値に達した時の電流値を臨界電流とする電界基準を用いて、臨界電流密度を決定した。なお、基準値は $1.0 \times 10^{-4} \text{ V}/\text{m}$ 及び $1.0 \times 10^{-5} \text{ V}/\text{m}$ が用いられている。

1.6 磁束ピンニング

第 2 種超伝導体は、1.3 節で述べたように、下部臨界磁界 H_{c1} を超えると、超伝導体内に量子化された磁束が侵入する。この状態で超伝導体に電流を流すと、量子化された磁束は Lorentz 力 F_L を受け、速度 v で動く。したがって、超伝導状態においても電界 E

$$\mathbf{E} = \mathbf{B} \times \mathbf{v} \quad (1.1)$$

を生じる。しかし、実際にはある程度まで電流を流しても電界 \mathbf{E} が生じない、電気抵抗ゼロが測定される。したがって、量子化磁束は Lorentz 力 F_L を受けてもある力までは動けない、ピンニングもしくはピン止めされた状態であり、このような機構を磁束ピンニング機構という。また量子化磁束を止めるものをピンと呼び、超伝導体内にある欠陥や常伝導相粒子などがピンになる。したがって、量子化磁束をピン止めする力をピン力密度 F_p と呼ぶと、電気抵抗なしで電流を流すことが出来る最大の電流密度である臨界電流密度 J_c は、

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

の関係がある。したがって、臨界電流密度を大きくするためには、ピン力密度を大きくすればよいことが分かる。

1.7 縦磁界効果

縦磁界とは、図 1.2 に示すように、超伝導体に電流と磁界を平行に印加させた状態のことである。この環境下では、以下のような一般的な垂直磁界下とは異なる現象が起こる。これらのことを縦磁界効果と呼ぶ。

1. 外部磁界によって電流と同じ方向の磁化が正となる。(常磁性効果)
2. 外部磁界を増加させると交流電流による損失が減少する。
3. 縦磁界の場合、

$$\mathbf{J} \times \mathbf{B} = 0 \quad (1.3)$$

となり、磁束線に対して Lorentz 力 F_L が働かないため、臨界電流密度 J_c が非縦磁界の場合に比べて大きく増加する[2][3][4]。

4. 磁束線の運動と電磁現象を結びつける(1.1)式の Josephson の関係式は、磁束線の運動が異なるため成り立たない。

縦磁界効果による J_c の増加量は、超伝導体の形状によって変化する。その理由として、自己磁界の影響がある。図 1.3(a)に示すように円柱状超伝導体は、自己磁界の影響をほぼ受けない。一方、図 1.3(b)に示すテープ状超伝導体は、自己磁界が超伝導体内部に侵入し、電流に平行な外部磁界と干渉を起こすため、縦磁界効果は観測されない[5]。したがって、円柱状はテープ状に比べて縦磁界効果による J_c の増加量が顕著である。円柱状超伝導体の具体的な例として、図 1.4 に Ti-Nb 円柱超伝導合金の J_c - B 特性を示す[6]。また、テープ状超伝導体でも円筒に巻きつけることで自己磁界による影響を小さくすることができる。

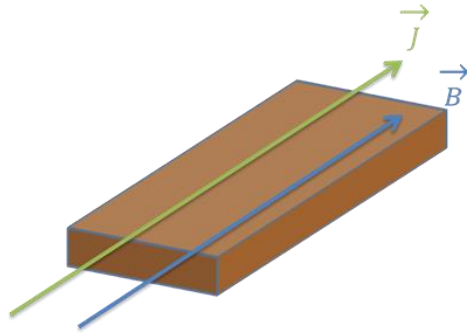


図 1.2 : 超伝導体に対して磁界と電流を平行に印加した状態

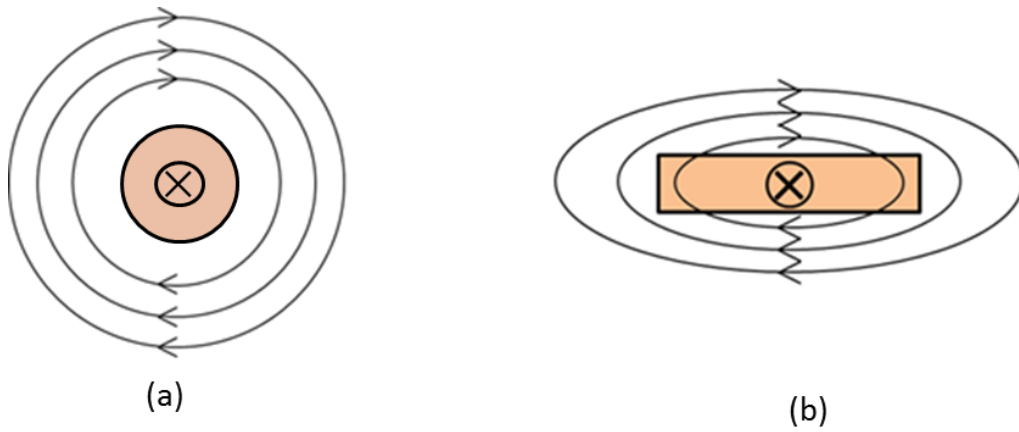


図 1.3 : 円柱状超伝導体とテープ状超伝導体の自己磁界分布

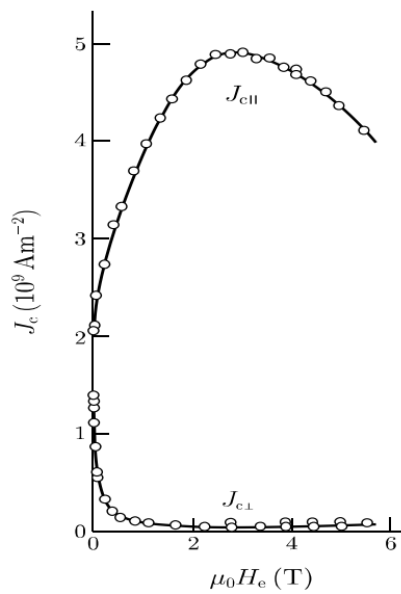


図 1.4 : Ti-Nb 円柱超伝導合金の J_c - B 特性[6]

1.8 超伝導電力ケーブルにおける交流・直流送電

超伝導電力ケーブルの送電方法として交流送電と直流送電の 2 種類がある。しかし、これらには長所と短所がある。交流送電の場合は、日本国内で現在主要とされている発電所から供給される交流電力をそのまま送電することができることと、送電する際の変圧が容易であるといった長所があるが、送電時に交流損失が発生することや、皮相電力に耐えうるケーブル設計をしなくてはならないため、ケーブルの利用効率が低下するといった短所もある。その一方で、直流送電の場合は、送電時の電力ロスがないという利点がある。また、太陽光発電によって生成した電力は直流電力なので、発電された電力が損失なしで送電することができるという長所がある。そのため、太陽光発電の送電には直流超伝導ケーブルが非常に有効である。ただし、送電網内の変圧施設のコストが交流に比べて高くなるといった短所がある。

1.9 縦磁界効果を用いた直流超伝導ケーブル

超伝導ケーブルの電流容量は、ケーブルに使用している超伝導線材の臨界電流 I_c によって決まる。したがって、 I_c を増加させるためには、ナノオーダーの超伝導内部の最適化や、線材そのものを変える必要がある。しかし、1.5 節で示した縦磁界効果を利用することにより材料自体の変更なく、超伝導ケーブルの電流容量を大幅に増加することが可能である。

よって、縦磁界効果を利用した直流超伝導電力ケーブルとして、縦磁界ケーブルが提案されている[7]。縦磁界効果をケーブルで利用するためには電流と平行な磁界を加える必要があるが、このケーブルは線材に通電される電流による自己磁界が、線材の通電方向に加わるように巻き線を工夫する。外側導体(シールド層)を内側導体と逆向きに線材を巻き付け、逆向きに通電を行うことにより、縦磁界を更に強くする。図 1.5 に内側 3 層、外側 3 層の縦磁界ケーブルの構造を示す。

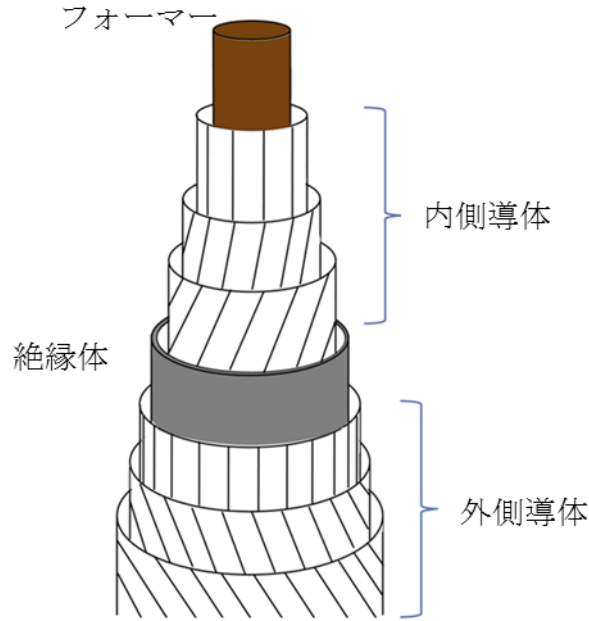


図 1.5 : 縦磁界を用いた直流超伝導ケーブルの構造[7]

ここで，縦磁界 B_{ext} は外側導体によって内側導体に与えられるが，実際は内側導体に電流を流した時に発生する自己磁界の影響も考慮する必要がある．内側導体領域には超伝導線材の厚さが 0.1 または 0.2 mm 程度のものを間隔が無いように，数層から 10 層程度巻くのだが，全体の厚さが半径よりも十分に小さいので，平板近似が可能である．フォーマーの半径を R ，線材の厚さを t ，層数を n とすると，線材の超伝導部分の厚さ d は $d = nt$ であり， $d \ll R$ であらわすことができる．また，線材の超伝導部分の厚さを s とすると，工学的臨界電流密度 J_e は，

$$J_e = \frac{s}{t} J_c \quad (1.4)$$

で与えられ，超伝導部分に対して一様に J_e が流れているものとする．

超伝導部分を y - z 平面に平行な平板として，最も内側の表面を $x = R$ ，最も外側の表面を $x = R + d$ とする． z 軸をケーブルの軸方向として， $x = R$ での磁界は z 軸成分が B_{ext} となる． x 軸状のある位置における磁界を $B(x)$ ， $B(x)$ の z 軸からの角度を $\theta(x)$ とすると， $x = R$ のとき， $\theta = 0$ である．また，縦磁界下での F_L は(1.2)式で表せられるので， B は x によらず一定でなくてはならない．よって，超伝導部分の磁束密度 B は，

$$B = (B_x, B_y, B_z) = (0, B \sin(x), B \cos(x)) \quad (1.5)$$

と表せる．これより，

$$\theta(x) = \frac{\mu_0 J_e}{B} (x - R) \quad (1.6)$$

が満たされれば,

$$J = (0, J_e \sin\theta(x), J_e \cos\theta(x)) \quad (1.7)$$

の電流分布となる. 最も外側の表面における磁界の角度 θ_{\max} は,

$$\theta_{\max} = \frac{\mu_0 J_c d}{B} \quad (1.8)$$

と表され, かつ, $x=R+d$ における電流の自己磁界 B_1 は,

$$\tan\theta_{\max} = \frac{B_1}{B_e} \quad (1.9)$$

を満たさなければならない. この条件は単独で決めることができないため, 式(1.6)の電流分布から得られる B_1 を用いて求める必要がある.

ここで, 図 1.6 で示すように, $s = 1.0 \mu\text{m}$, $t = 100 \mu\text{m}$ のコート線材を想定する. その縦磁界下および, 非縦磁界下の J_c をそれぞれ $J_{c\parallel}$, $J_{c\perp}$ とおいて,

$$J_{c\parallel} = (5.0 + 6.0B) \times 10^{10} \text{ A/m}^2 \quad (1.10)$$

$$J_{c\perp} = (5.0 - 4.0B) \times 10^{10} \text{ A/m}^2 \quad (1.11)$$

と仮定した. そして, $\theta_{\max} = 60^\circ$, フォーマーの半径 a を $a = 30 \text{ mm}$ とする場合, n を 4-10 まで変えた時のケーブル効率を求めた結果を図 1.7 に示す. ケーブル効率は, 縦磁界効果を用いた高温超伝導直流ケーブルの電流容量 I_t と従来型のケーブルの電流容量 I_0 を用いて, 式(1.11)で定義される[6].

$$\eta = \frac{I_t}{I_0} \quad (1.12)$$

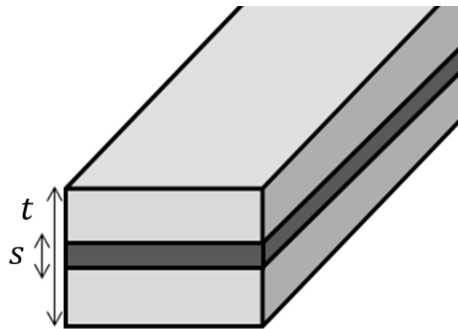


図 1.6 : 超伝導層とコート線材の厚さ

これにより, 超伝導層数が増えると, I_t が大きくなることが分かる. これは, 縦磁界が増えることによって J_c が増えるからであると考えられる. これらより, 縦磁界効果を用いたケーブルの特性の方が優れているといえる[8].

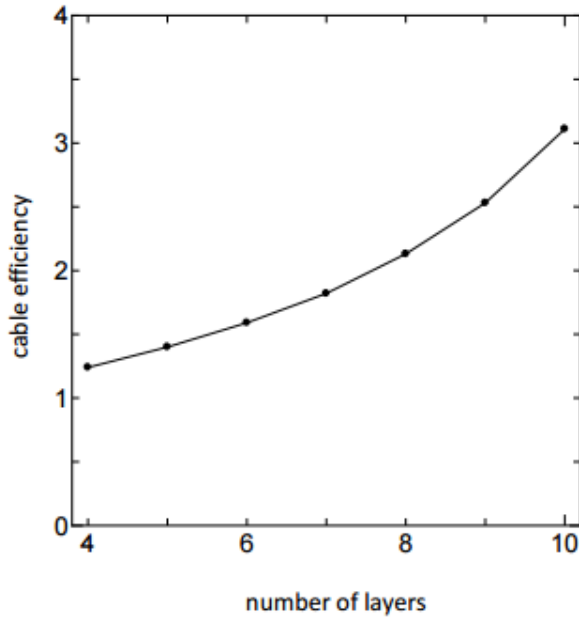


図 1.7 : 縦磁界効果を用いた直流超伝導ケーブルのケーブル効率[9]

1.10 ケーブル設計における数値解析

超伝導体に加わっている磁界の大きさによって J_c の値が変化するため、ケーブルの電流容量 I_c を導出する際はそのケーブルに加わる磁束密度と磁界と電流の成す角 θ を導き出す必要がある。

よって、今回のケーブルの設計には、繰り返し近似計算を用いた。繰り返し近似計算には、ケーブルに使用する線材の縦磁界状態、非縦磁界状態における J_c - B 特性の近似式とケーブルの寸法を用いて計算を行う。

縦磁界下の J_c を

$$J_{\parallel}(B) = J_c(B, \varphi = 0) \quad (1.13)$$

とし、非縦磁界下の J_c を

$$J_{\perp}(B) = J_c(B, \varphi = \pi/2) \quad (1.14)$$

とする。そして、これらの J_c の磁界依存性をそれぞれ

$$J_{\parallel}(B) = \sum_{j=0}^5 K_{\parallel} B^j \quad (1.15)$$

$$J_{\perp}(B) = \sum_{j=0}^5 K_{\perp} B^j \quad (1.16)$$

と表す。

また, J_c の角度依存性を,

$$J_{cn}(\varphi_n) = \frac{1}{2}(J_{||} + J_{\perp}) + \frac{1}{2}(J_{||} - J_{\perp}) \cos 2\varphi_n \quad (1.17)$$

のように近似することができる.

ケーブルの形状は, フォーマーの半径を R_0 , 内側から n 番目の超伝導層の中心からの距離を R_n , 超伝導層の厚さを d とすると,

$$R_n = R_0 + nd \quad (1.18)$$

と表すことができる.

n 層目における線材が内側に一様な磁束密度 B_n は,

$$B_n = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \tan \theta_n \quad (1.19)$$

と表す. ここで, θ_n は n 層目における巻き角度を表す.

上記より同様に超伝導電力ケーブルにおいて, n 番目の超伝導層に加わる縦磁界は,

$$B_{n||} = \sum_{k=n+1}^N \frac{\mu_0 I_k}{2\pi R_k} \tan \theta_k + B_{\text{ext}} \quad (1.20)$$

となる.

また, n 番目の超伝導層に加わる非縦磁界は, θ 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,

$$B_{n\perp} = \sum_{k=1}^{n-1} \frac{\mu_0 I_k}{2\pi R_k} \quad (1.21)$$

と表すことができる.

また, n 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,

$$B_n = \sqrt{B_{n||}^2 + B_{n\perp}^2} \quad (1.22)$$

$$\varphi_n = \theta_n - \tan^{-1} \frac{B_{n\perp}}{B_{n||}} \quad (1.23)$$

となる. この 2 式より, n 番目の層における臨界電流密度 J_{cn} , 臨界電流 I_{cn} が求められることができる.

$$I_{cn} = 2\pi J_{cn} R_n d \cos \theta_n \quad (1.24)$$

したがって, (1.13)式から(1.24)式を繰り返し計算することにより電流容量 I_t は

$$I_c = \sum_{k=1}^N I_{ck} \quad (1.25)$$

となる. 解析の流れを図 1.8 に示す.

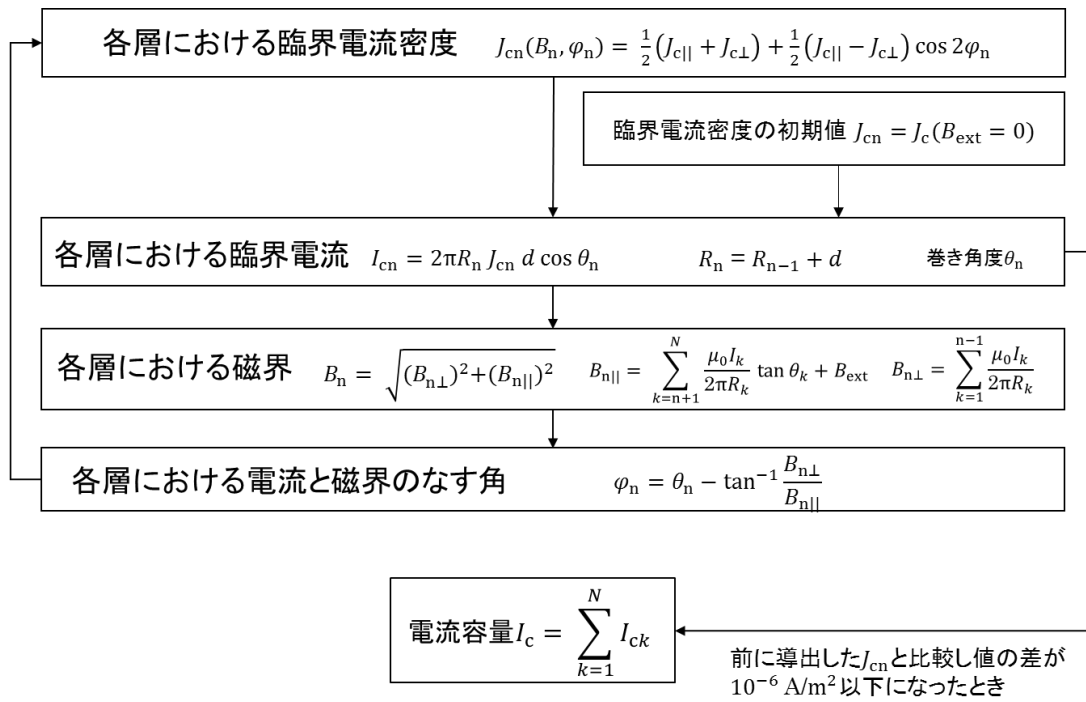


図 1.8 : 繰り返し近似計算による電流容量 I_c 導出の解析の流れ

1.11 本研究の目的

超伝導体を用いたケーブルは、直流電流を流すことで送電ロスを低減することができる。このケーブルの電流容量は用いられる超伝導体の臨界電流によって決定され、この特性を向上させることによって、ケーブルの電流容量も増加させることができる。一方で、超伝導体に流れる電流 I に平行に磁界 B を加える縦磁界下では、臨界電流を増加させることができる。この臨界電流の増加を縦磁界効果と呼ぶが、現在、この効果を利用した直流超伝導ケーブルが提案されている。このケーブルは外から磁界を加えるのではなく、線材が電流通電時に生じる自己磁界を縦磁界状態になるように巻き線を工夫する。

本研究では、短尺線材の縦磁界下での RE コート線材の臨界電流密度 J_c を用いて設計、製作された縦磁界直流超伝導ケーブルの内 3 層の通電試験を液体窒素中で行い、ケーブルの臨界電流 I_c を評価した。得られた測定結果と設計値を比較し、縦磁界下でのケーブル利用の有利性について調べた。

第 2 章 実験

2.1 3 層超伝導ケーブルの設計

2.1.1 設計に必要な RE コート線材の縦磁界下での J_c 特性評価

今回 3 層超伝導ケーブルに用いる RE コート線材は Superpower 社製の SCS2050-CF である。縦磁界ケーブルを設計する際には、用いる線材の縦磁界下での J_c 特性が必要になる。ここでは電流量を抑え、線材に均一な磁界を加えるために RE コート線材を、フォトリソグラフィを用いて、マイクロブリッジ加工をし(ブリッジ長 1 mm, ブリッジ幅 100 μm), 直流四端子法を用いて縦磁界下(磁界: B //電流密度: J)の J_c 特性を測定した。また、ケーブルに縦磁界が加わっていない、すなわち非縦磁界下($B \perp J$)の測定も行った。図 2.1 に磁界 B と電流 J の関係を示す。液体窒素中(77.3 K)で V - I 特性を測定し、 E - J 特性を評価し、電界基準 $E_c = 1.0 \times 10^{-4}$ V/m で J_c を求めた。図 2.2 に縦磁界下及び非縦磁界下での J_c の磁界依存性を示す。図 2.2 から、縦磁界を印加した場合の J_c は、非縦磁界の場合と比べて、優れていることが分かる。

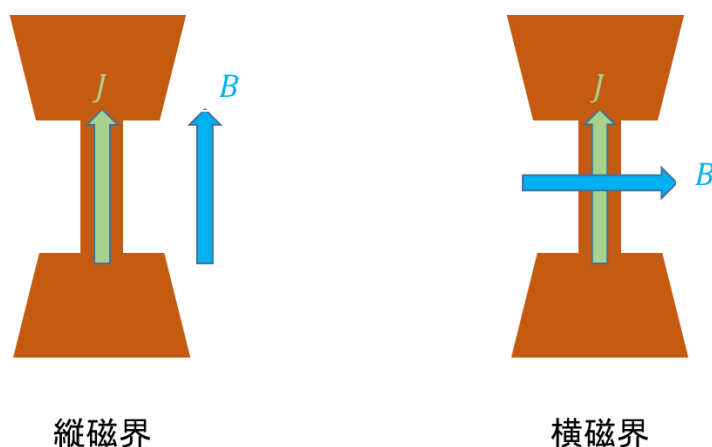


図 2.1 : 試料に印加する磁界と電流の関係

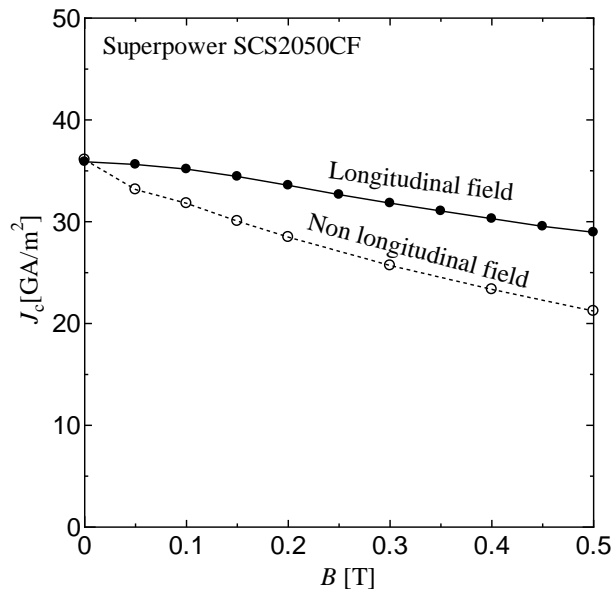


図 2.2 : Superpower 社製市販のコート線材における J_c - B 特性(SCS2050CF)

2.1.2 フォーマーに対する線材の巻き角度 θ の決定

上記の J_c - B 特性を用いて、フォーマーに対する線材の巻き角度 θ を 1.8 節中にある式を用いて決定する。図 2.3 に本実験で設計する内側 3 層直流超伝導ケーブルの概形を示す。図 2.4 は表 2.1 と 1.8 節中にある式を用いて計算した、ケーブルの巻き角度 θ を変化させたときの I_{cmax} - θ 特性の理論値である。ここで、表 2.1 の展開係数は多項式近似によって求めた。 I_{cmax} は外部磁界を変化させたときの電流容量の最大値を示す。図 2.4 を見てみると、3 層ともに $\theta = 6^\circ$ で $I_{cmax} = 3299$ A となり、 I_{cmax} が最大となる。ケーブルは $\theta = 0^\circ$ 付近で巻くとケーブルを曲げることが難しいので、ある程度の巻き角度をつける必要がある[10]。また、ケーブルを冷却した場合の熱収縮も考慮して、本実験では 3 層共 $\theta = 10^\circ$ で設計する。繰り返し近似計算を用いた $\theta = 10^\circ$ の 3 層直流超伝導ケーブルの I_c - B_{ext} 特性を図 2.5 に示す。

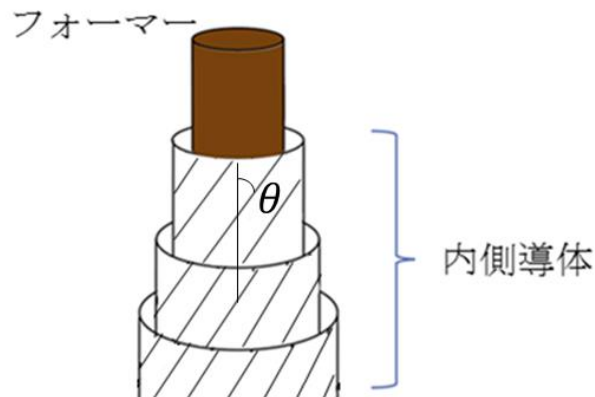


図 2.3 : 本実験で使用する内側 3 層直流超伝導ケーブルの概形

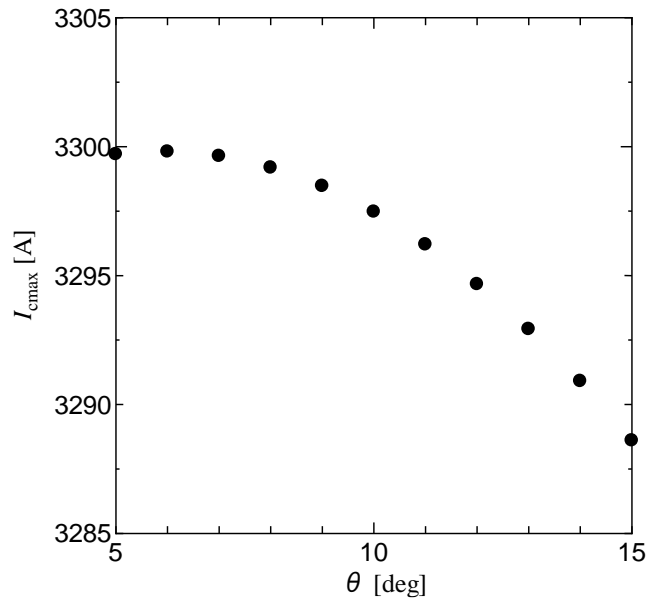


図 2.4 : 最大電流容量 I_{cmax} の巻き角度依存性

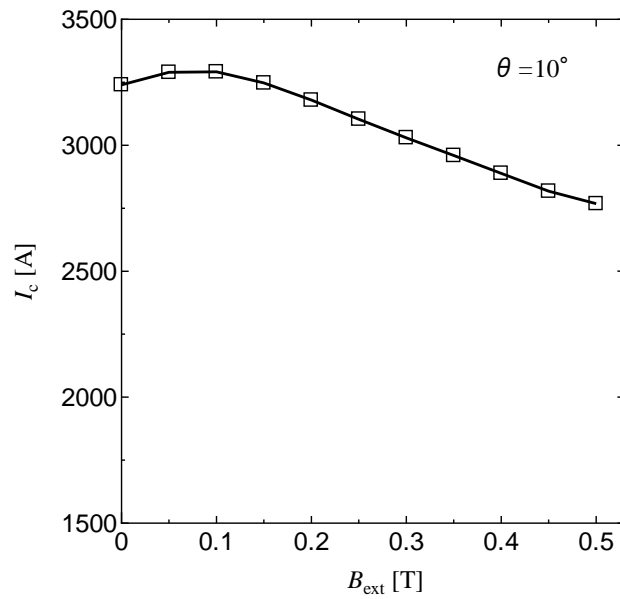


図 2.5 : 繰り返し近似計算を用いた $\theta = 10^\circ$ の 3 層直流超伝導ケーブルの I_c - B_{ext} 特性

表 2.1 : ケーブルに使用した線材の縦磁界状態, 非縦磁界状態における J_c - B 特性の近似式の展開係数

展開係数	j					
	0	1	2	3	4	5
$K_{ } [\times 10^{10} A/T^j]$	3.76	-0.343×10^{-1}	-6.26	8.91×10^1	-1.17×10^3	7.17×10^3
$K_{\perp} [\times 10^{10} A/T^j]$	3.61	-1.15×10^1	1.71×10^2	-1.31×10^3	6.77×10^2	4.46×10^4

2.2 作製した 3 層超伝導ケーブルの諸元

上記のような手法を用いて 3 層超伝導ケーブルを設計し、古河電気工業株式会社によりケーブルを製作した。

ここでは、具体的なケーブル作製について述べる。図 2.6 のように直径 8 mm のフォーマーの軸に対して角度 θ をつけて、超伝導線材を巻き付ける。フォーマーの軸と線材の成す角 θ は、2.1.2 節でも述べたとおり、3 層ともに $\theta = 10^\circ$ である。また、超伝導線材との間に絶縁テープを巻き付け、絶縁層を入れることにより、各層を絶縁している。図 2.7 に超伝導ケーブルの断面図、表 2.2 にケーブルの諸元を示す。また、図 2.8 ようにケーブルの 3 層目のみ、中央にケーブルの電圧端子間 100 mm の電圧端子を取り付けている。なお、各層への電流量の評価としては、電流端子を用いて電流量を計測した。

また、今回ケーブル作製に用いた線材は 2 mm 幅の RE 系コート線材であるが、RE 系も酸化物超伝導体であるので、超伝導体に加わる磁界の方向により臨界電流密度が異なる。特に縦磁界ケーブルでは、磁界は線材の広い面に平行で、さらに電流に平行となる環境下での利用を想定するが、線材端部にはテープ線材に対して垂直の磁界が加わることになる。したがって、図 2.9(a)のように層間で同じ配置で線材を巻き付けると、端部の垂直磁界が協調されることになり、縦磁界が弱められる可能性がある。したがって、本研究では、図 2.9(b)のように、内側の線材の端部が、外側の線材の中央部になるように、線材を配置した。

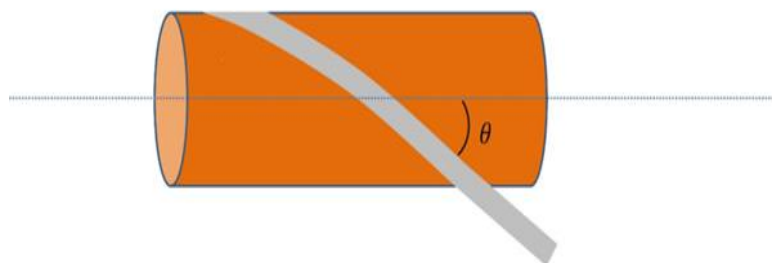


図 2.6 : 線材の巻き付け角度

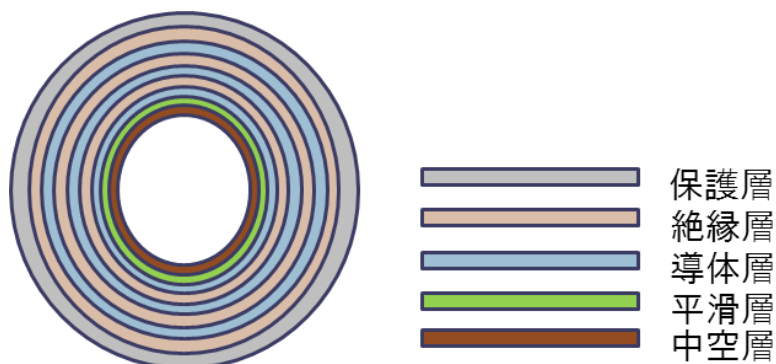


図 2.7 : 3 層超伝導ケーブルの断面図

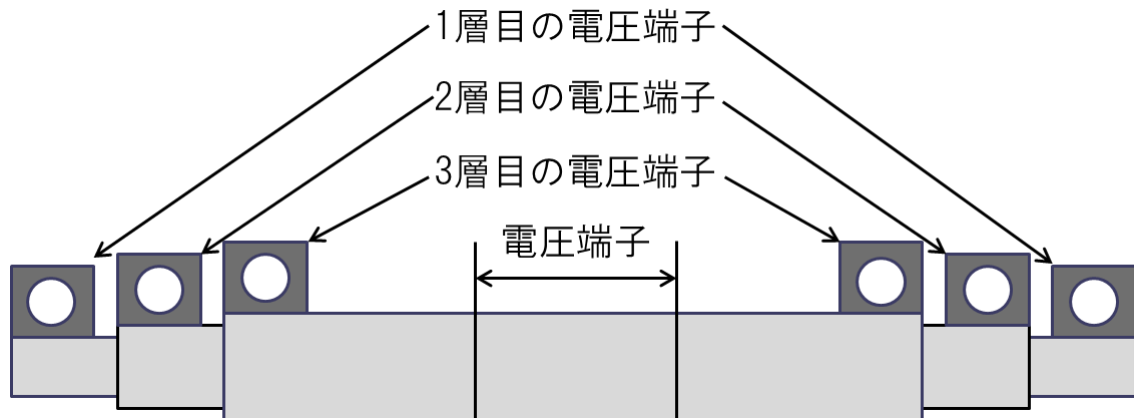


図 2.8 : 3 層超伝導ケーブルの電圧端子の接続部

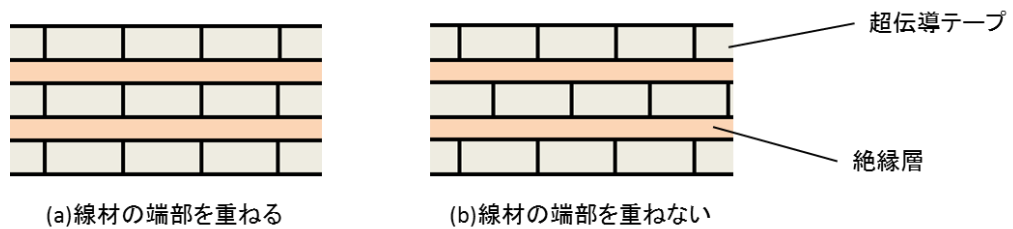


図 2.9 : 超伝導テープ線材の重ねる方法

表 2.2 : 3 層超伝導ケーブルの諸元

フォーマー	銅管
フォーマーの直径 [mm]	8.0
超伝導層	Superpower 社製 SCS2050-CF
線材数	1 層目 13 枚, 2 層目 14 枚, 3 層目 14 枚 計 41 枚
巻き角度 [degree]	3 層ともに 10
線材幅 [mm]	2
I_c [A] (77.3 K)	70
総電流量 [A](設計値)	1 層目 910, 2 層目 980, 3 層目 980 計 2870
絶縁層	絶縁テープ
保護層	不織布
ケーブルの外径 [mm]	13.6
ケーブルの全長 [mm]	700

2.3 直流四端子法

ケーブルの臨界電流を評価するために、ここでは直流四端子法を用いて、電流-電圧特性を測定した。以下、直流四端子法について説明する。

測定対象の電気抵抗を測定する手法として、直流二端子法と四端子法がある。特に超伝導体の特性評価の場合、ノイズレベルから生じる小さな電圧を評価する必要がある。したがって、測定対象になる材料により、測定手法を変える必要がある。測定しようとする材料の抵抗値が、接触抵抗等に比べて十分大きな値を有する場合は、一般的に直流二端子法が用いられる。図 2.10 に直流二端子法の回路図を示す。ここで、 R_m は測定する試料の抵抗、 R_0 は回路の接触抵抗である。この回路において電圧計Vで測定される電圧は、

$$V = (R_m + 2R_0)I \quad (2.1)$$

である。抵抗の大小関係が $R_m \gg R_0$ であるので、

$$V = R_m I \quad (2.2)$$

となり、接触抵抗 R_0 の影響がなく R_m を測定することができる。

一方で、接触抵抗に比べて小さな抵抗を持つ材料の抵抗を測定する場合は、この接触抵抗の影響を軽減する必要がある。直流四端子法が用いられる。図 2.11 に直流四端子法の回路図を示す。

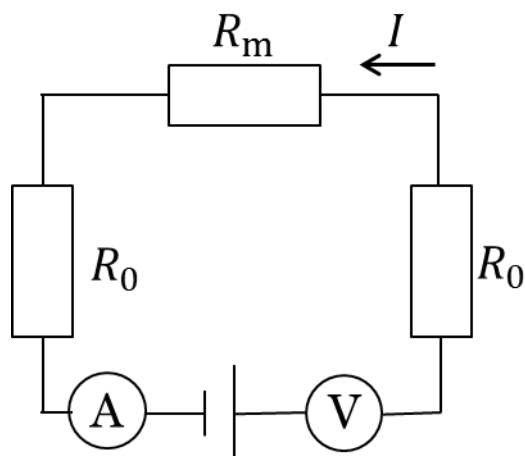


図 2.10：直流二端子法の回路図

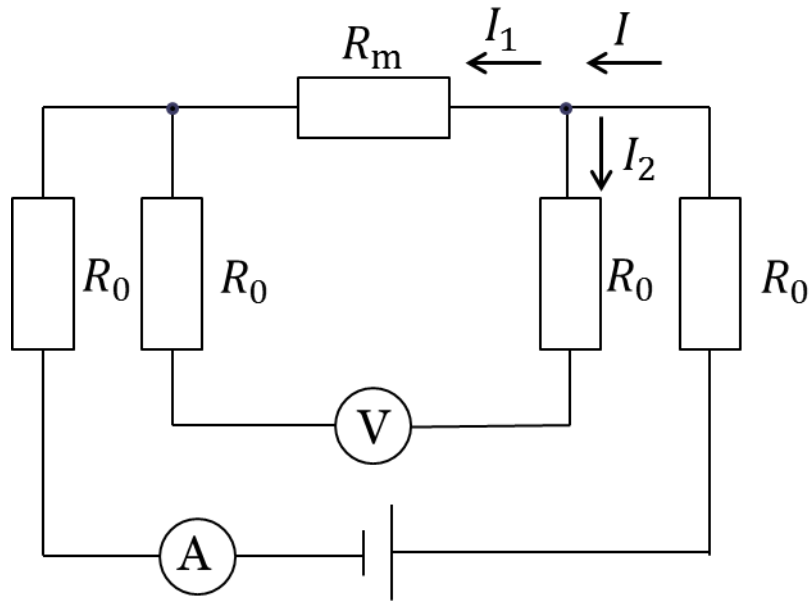


図 2.11 : 直流四端子法の回路図

この回路を流れる電流は,

$$I = I_1 + I_2 \quad (2.3)$$

である. また, この回路の電圧降下は,

$$R_m I_1 = V + 2R_0 I_2 \quad (2.4)$$

となつて,

$$V = R_m I_1 - 2R_0 I_2 \quad (2.5)$$

である. ここで, 電圧のインピーダンスは非常に大きいので,

$$I_2 \cong 0, \quad I_1 \cong I \quad (2.6)$$

したがって,

$$V = R_m I \quad (2.7)$$

となり, 試料を測定することができる.

ここでは, 実験に用いるケーブルの試料の抵抗が非常に小さいため, その試料を測定するのに適した直流四端子法を用いた.

2.4 実験環境

図 2.12 に実験環境の概略図を示す. ケーブルの冷却には液体窒素(77.3 K)を用いた. また, 今回のケーブルは内側層 3 層のみなので, シールド層が作る磁界を模擬するために液体窒素で稼働可能な Bi-2223 コイルをケーブル中央部に配置した. ケーブルへの電流供給は 6000 A 通電可能な直流電源を用いた. 電源とケーブルとの接続には, 幅 40 mm の平角

編み線を一層で2本つけて、電流を通電した。また、電流通電はPCを用いて、LabVIEWのプログラムにより制御を行った。なお、今回の測定はPCへの設定電流値を回路に流れる電流値とした。これは、通電電流が数千[A]になる点と、電流測定用のシャント抵抗を挿入することにより、電流リード部の抵抗が変化し、各層に均一に流れない可能性があるため、今回は設定値を電流値とした。また、各層への電流量をモニターするために、各層に取り付けている電圧端子から電圧を測定した。

外部磁界を加えるために、Bi-2223超伝導マグネットを使用している。図2.12では超伝導マグネットは電流源に接続されていないが、実験では電流源に接続されている。また、回路図を簡易化するために、超伝導マグネットは破線で示している。

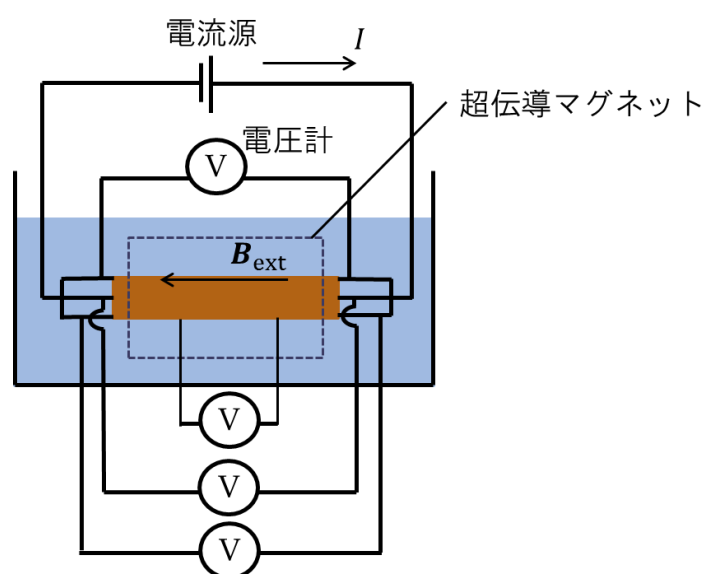


図 2.12 : 実験環境の概略図

2.4.1 Bi-2223 超伝導マグネット

本実験では、外部から縦磁界を加えるために、Bi-2223超伝導マグネットを使用している。これは、超伝導マグネットに電流を流すことで縦磁界を発生させることができ、最大で0.9 Tまで磁界を発生させることができる。マグネットは円筒状になっている。ケーブルを中に通すことで、縦磁界 B_{ext} を加えることを可能にしている。図2.13に超伝導マグネットの外観を示す。

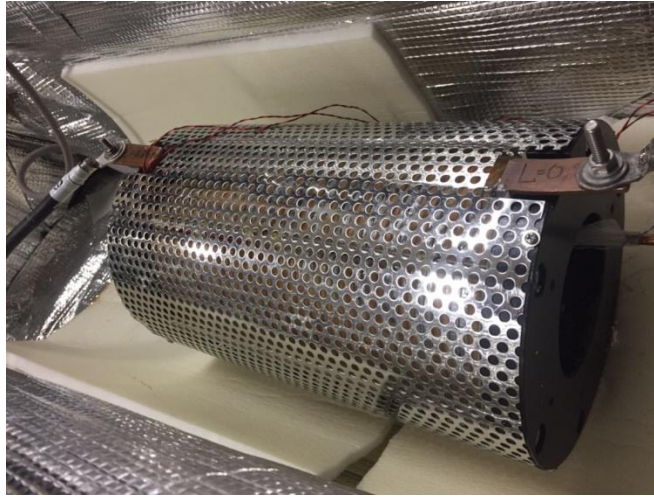


図 2.13 : Bi-2223 超伝導マグネットの外観

2.5 実験の測定および評価方法

本実験では、前述した試料、実験環境でケーブルの 3 層同時に流した場合、各層独立で電流を流した場合($B_{\text{ext}}=0$ T)、1, 2 層目のみ、1, 3 層目のみ電流を同時に流した場合($B_{\text{ext}}=0$ T)の V - I 特性を測定する。以下に測定手順を示す。

- ① ケーブルに外部から縦磁界を加えるために、Bi-2223 超伝導マグネットを容器に設置し、その内部にケーブルを設置する。
- ② ケーブル、超伝導マグネットを超伝導状態にするため、これら二つを入れた容器に液体窒素を入れ、容器内が 77.3 K になるようにする。
- ③ ケーブル、超伝導マグネットと電流源、電圧計を接続し回路を組む。
- ④ 超伝導マグネットに電流を流し、外部磁界 B_{ext} を 0 – 0.5 T の範囲でケーブルに印加する。
- ⑤ 超伝導ケーブルに電流を流し、 V - I 特性を測定する。初期電流は 0 A とし、2 – 5 A/s の範囲でスロープレートを設定し、1 秒おきに電流を増加していく。なお、電圧基準 $V_c = 1.0 \times 10^{-5}$ Vを超えた時点で電流値の増加を止め、測定を終了する。また、電圧基準 V_c の時点での電流値を臨界電流 I_c とした。本実験で用いたケーブルは設計上 3 層目の中央部 100 mm に発生した電圧しか測定できないため、各層独立で電流を流した場合、各層の臨界電流 I_{c1} (第 1 層)、 I_{c2} (第 2 層)、 I_{c3} (第 3 層)は電圧基準 $V_c = 5.0 \times 10^{-4}$ Vで定義した。そして、上記で定義した電圧基準をもとに、 I_c - B_{ext} 特性を求める。また、 I_c 近傍の非線形性の強さを示す n 値も V - I 特性から求め、超伝導ケーブルの通電特性を評価する。なお、 n 値を求めるときの電圧 V の範囲は 5.0×10^{-6} – 2.0×10^{-5} Vである。

第 3 章 実験結果及び考察

3.1 超伝導ケーブルの $V-I$ 特性

外部磁界 B_{ext} を変化させたときのケーブルの $V-I$ 特性を以下に示す.

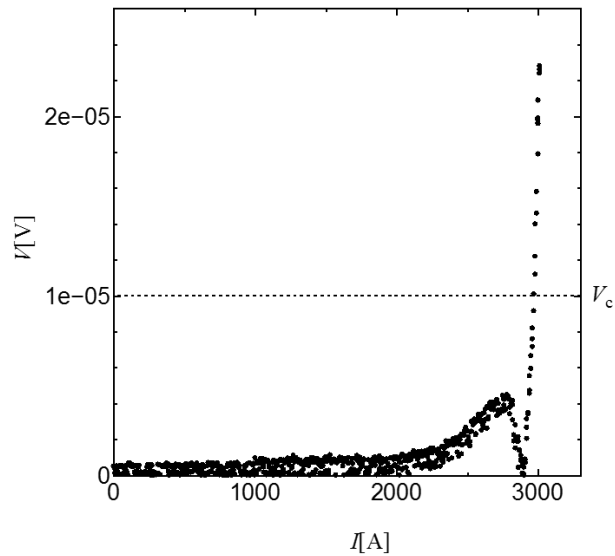


図 3.1 : $B_{\text{ext}} = 0$ Tでの $V-I$ 特性

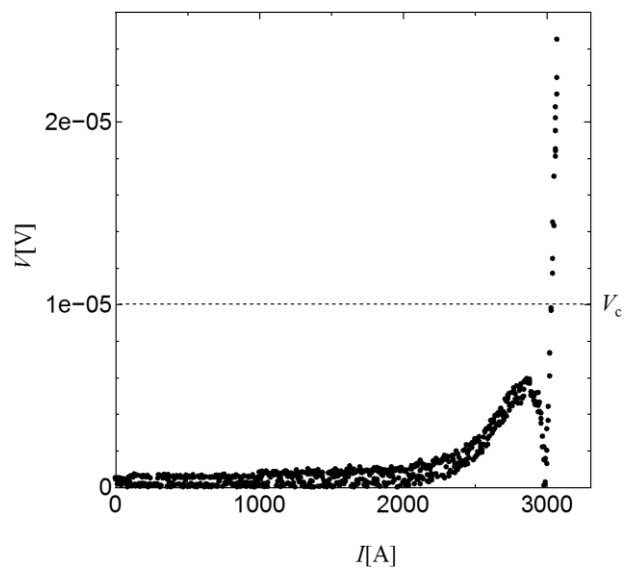


図 3.2 : $B_{\text{ext}} = 0.1$ Tでの $V-I$ 特性

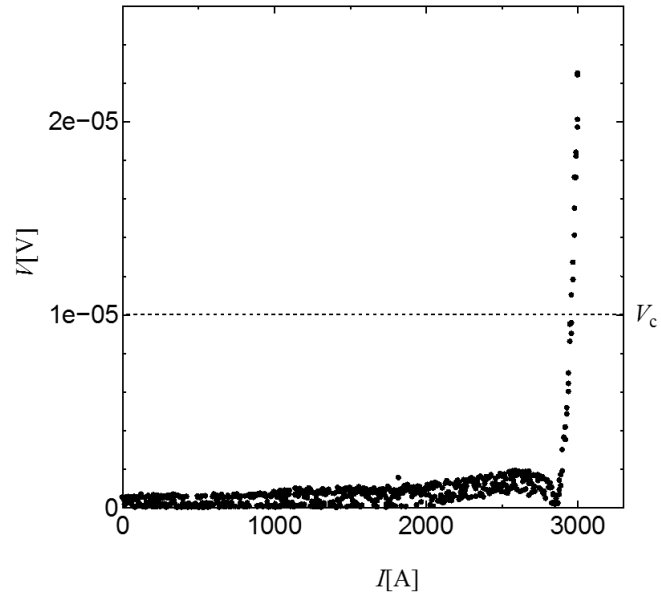


図 3.3 : $B_{\text{ext}} = 0.2$ Tでの V - I 特性

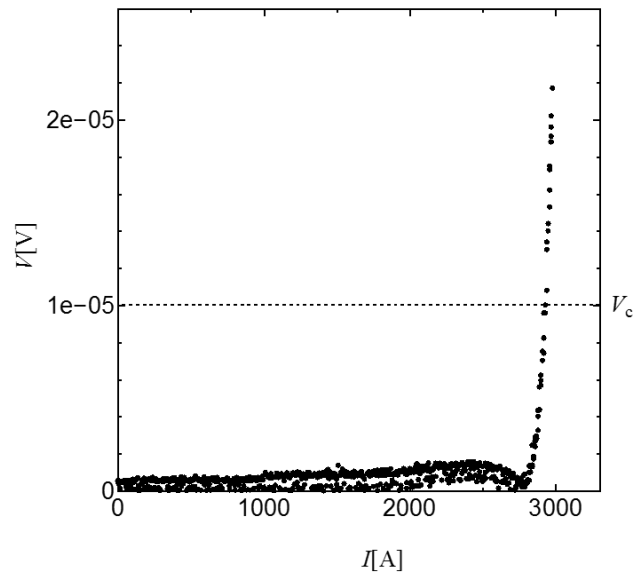


図 3.4 : $B_{\text{ext}} = 0.3$ Tでの V - I 特性

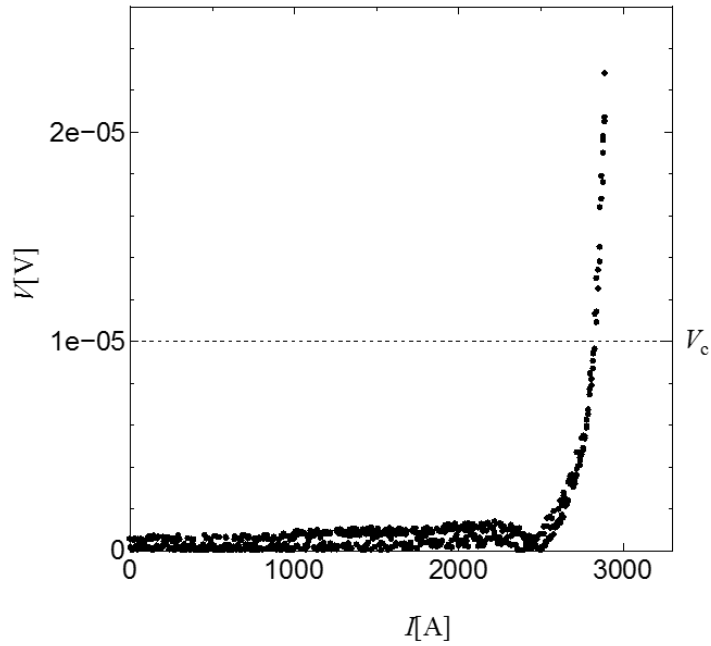


図 3.5 : $B_{\text{ext}} = 0.4$ Tでの V - I 特性

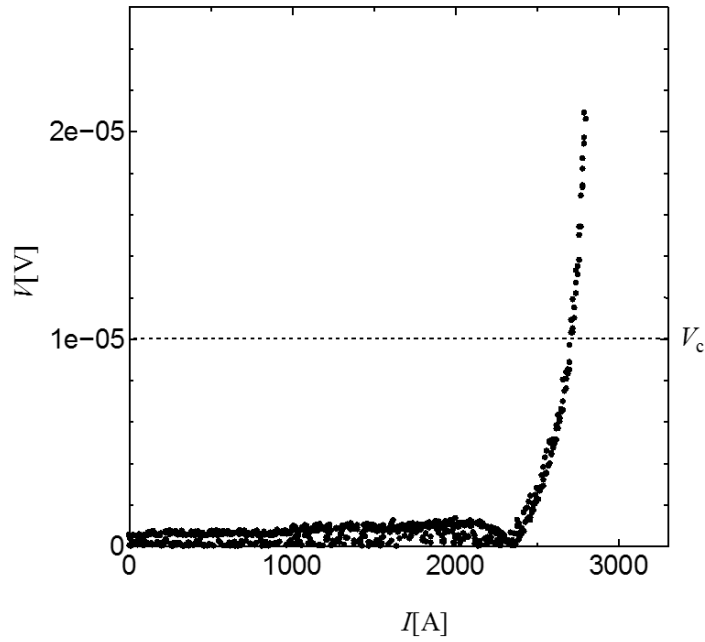


図 3.6 : $B_{\text{ext}} = 0.5$ Tでの V - I 特性

図 3.1 と図 3.2 を比較すると、 $B_{\text{ext}} = 0.1$ Tにおける電圧基準($V_c = 1.0 \times 10^{-5}$ V)で決めた I_c が自己磁界中での I_c より増加していることが V - I 特性からも分かる。また、図 3.2 と図 3.3, 図 3.4, 図 3.5, 図 3.6 を比較してみると、外部磁界 B_{ext} の増加と共に、 I_c が $B_{\text{ext}} = 0.1$ Tにおける I_c より小さいことが分かる。また、例えば、 $B_{\text{ext}} = 0.1$ Tの V - I 特性に注目すると、 I_c に比べると 1000 A 低い電流領域で端子間に生じる電圧が緩やかに増加し、更なる電流増加

で電圧が減少し、 I_c 近傍で再度増加する2段の電流電圧特性が確認できる。この2つの立ち上がりはケーブルの I_c が1番大きい $B_{ext} = 0.1$ Tで一番顕著となる。さらなる磁界の増加では、この立ち上がりが小さくなっていることが確認できる。このような特性は線材単体の臨界電流密度特性評価においても確認されており、電流方向と磁界(印加磁界+自己磁界)の平行具合に起因した特性と考えられるが、現時点ではこのメカニズムは不明である。

3.2 超伝導ケーブルの n 値

超伝導ケーブルの性能を調べるために、各磁界における $V-I$ 特性から非線形を表す n 値を導出した。図3.7に各磁界における n 値を示す。

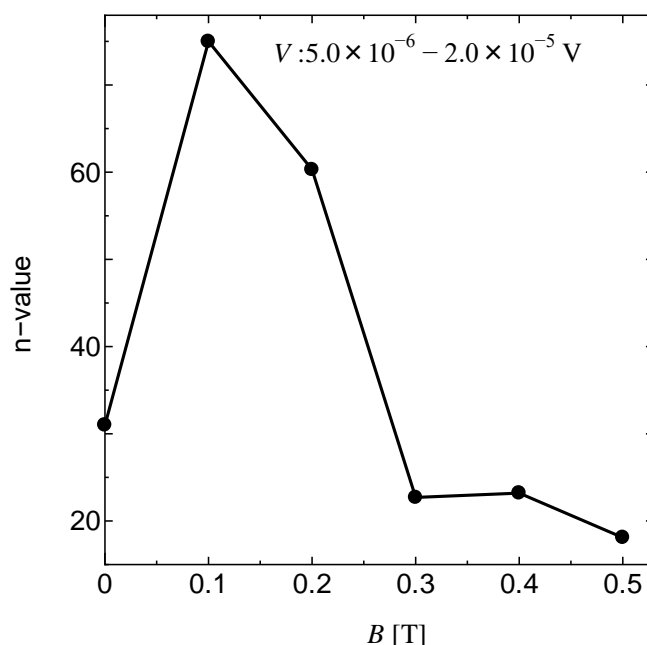


図 3.7 : 各磁界における n 値

図3.7より、 n 値は I_c 値のピークである $B_{ext} = 0.1$ Tで $n = 75.0$ で最大となっている。縦磁界ケーブルでの n 値の評価がこれまでに報告されていないので、この値の評価が出来ないが、酸化物超伝導体で一般的に開発されつつあるケーブルの値に比べると、この値はかなり大きい値となる。なお、短尺線材の縦磁界下での電流-電圧特性から評価される $n = 40$ 程度に比べても大きな値になっていることが分かる。ただし、この n 値はケーブルの I_c の大きさに依存していることから、 n 値決定にも I_c 同様のメカニズムが作用していることが考えられる。

3.3 超伝導ケーブルの I_c-B_{ext} 特性

3.1節の $V-I$ 特性からケーブルにおける実験値と設計値の I_c-B_{ext} 特性を導出した。その結

果を図 3.8 に示す。

設計値と実験値を比較してみると、どちらも $B_{\text{ext}} = 0.1 \text{ T}$ で I_c 値がピークである。よって、縦磁界を加えることによりケーブルの性能が向上することがこの実験からでも確認できる。また、非縦磁界下では I_c は単調減少しており、増加率はわずかであるが、縦磁界下での線材利用の有利性が確認できる。したがって、短尺線材の縦磁界下での臨界電流密度を用いた設計からケーブルの電流容量のピークとなる磁界を推定可能であると分かる。

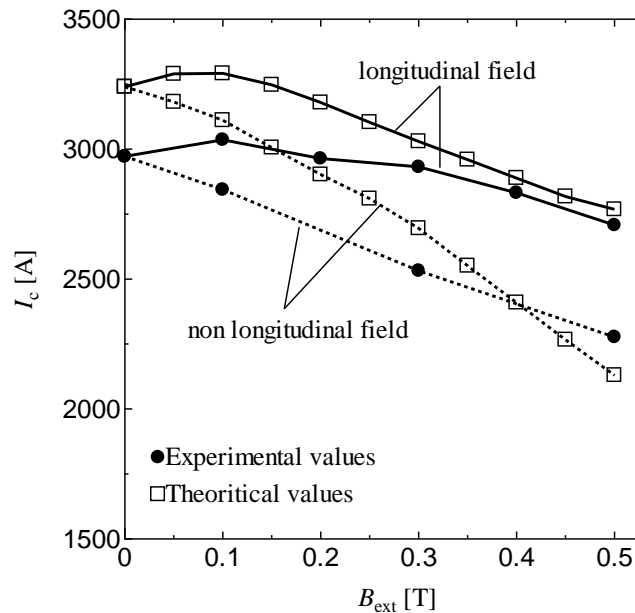


図 3.8 : 3 層直流超伝導ケーブルにおける実験値と設計値の I_c - B_{ext} 特性

3.4 各層独立に通電した場合の V - I 特性

上記で短尺線材の設計によりケーブルの臨界電流 I_c 特性が説明可能であることを示した。ただし、ケーブルの電流値に多少の違いが生じたので、ここではこの違いについて調査を行った。特に、電流の総電流は各層に均一に電流が流れた場合の理想的な値であり、不均一な電流の流れは、ケーブルの輸送特性に影響を与える。しかし、3層同時通電を行った場合、各層に流れる電流量を求めることができない。このため、各層の電流量を測定するには各層独立に通電試験を行う必要がある。ここでは独立通電試験を実施した。

ケーブルの各層に独立に通電した場合 ($B_{\text{ext}} = 0 \text{ T}$) の V - I 特性を図 3.9 に示す。また、表 3.1 に図 3.9 で測定された各層の I_c から求めた電流比を示す。ケーブルの線材使用量から、第 1 層に比べて、第 2, 3 層が線材を 1 本多く使用しているため、約 70 A 程度大きくなることが予想される。したがって、1 層が一番小さな電流量になっている点においては、適切な電流の均流化が実現していることが分かる。ただし、第 2, 3 層間でも 70 A 程度の差が生じていることが分かる。これは、図 3.10 のように、3 層目は超伝導マグネットによる外

部磁界 B_{ext} が最も印加されており，3層目ケーブルの大部分が縦磁界状態になっていることが理由であると考えられる．

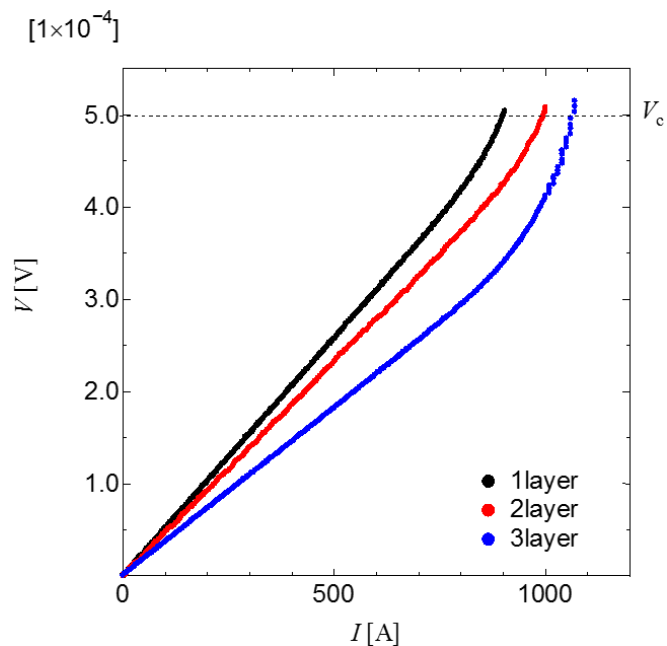


図 3.9 : 各層独立で通電した場合の $V-I$ 特性

表 3.1 : 3層直流超伝導ケーブルの実験値と電流比

	I_c [A] (77.3 K)	電流比
ケーブル全体	2982	—
1層目	904	0.30
2層目	1001	0.34
3層目	1077	0.36

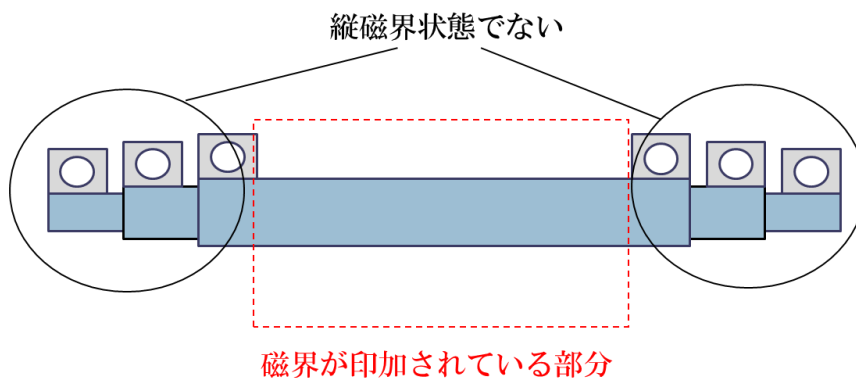


図 3.10 : 超伝導ケーブルに外部磁界 B_{ext} が印加されている部分

次に、層間での同一通電の際の均一化について調べた。ここでは、1, 2層目のみ, 1, 3層目のみの通電試験を行った。図 3.11 に 1, 2層目に通電した場合, 図 3.12 に 1, 3層目に通電した場合の V - I 特性を示す。

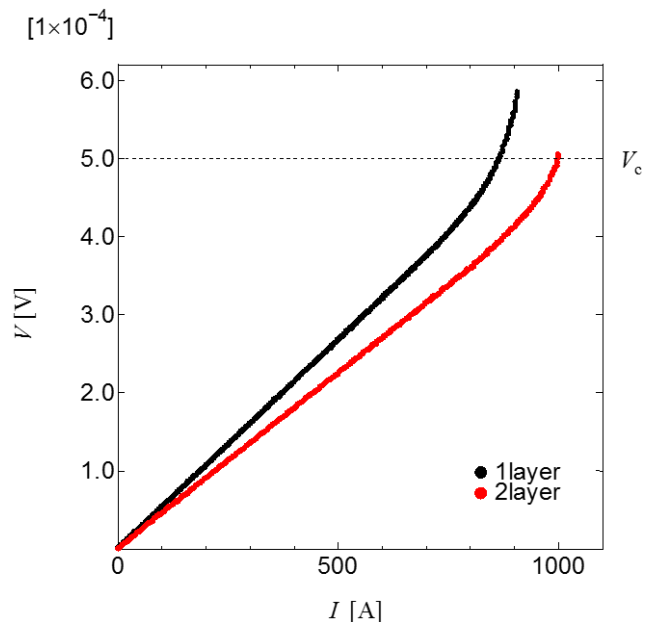


図 3.11 : 1, 2 層目に同時に通電した場合の V - I 特性

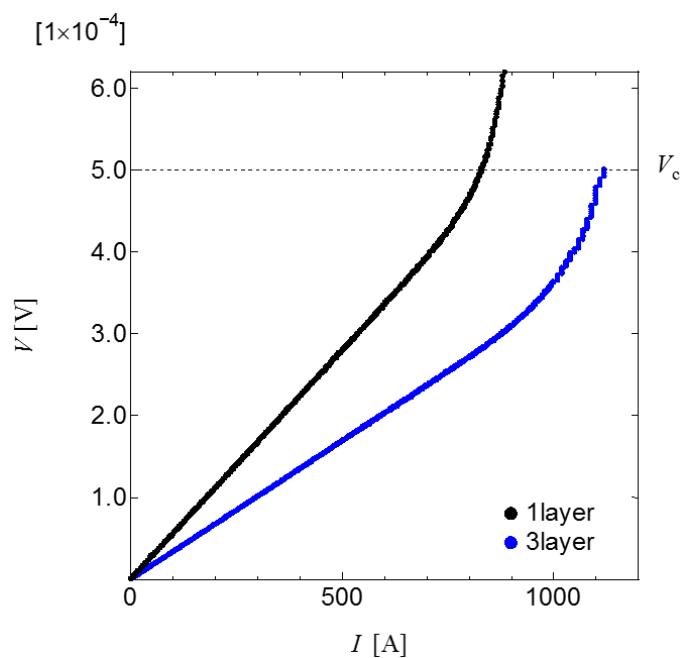


図 3.12 : 1, 3 層目に同時に通電した場合の V - I 特性

1, 2 層目を同時に通電した場合, 図 3.11 より, 1 層目が $I_{c1} = 865$ A で, 2 層目が $I_{c2} = 1004$ A であることが分かる。また, 1, 3 層目を同時に通電した場合, 図 3.12 から 1 層目が $I_{c1} = 830$ A で, 3 層目が $I_{c3} = 1116$ A であることが分かる。これらの結果と表 3.1 で示し

た各層の I_c を比較してみると、値の差は 3%程度しかないので、熱による I_c の減少はないといえる。また、それぞれの I_{c1} に注目すると、1, 2 層目に同時に通電した場合の I_{c1} が 30 A 程度大きい。これは、1 層目の外層から印加される磁界が強いことが原因であると考えられる。

以上から、電流量の定量的な違いの原因として下記が考えられる。

1. 各層に流れている電流が均一でないという可能性
今回は各層への電流が均一に流れるように、電流リードの長さとしてリード液体窒素冷却部の長さで調節を行った。また、縦磁界下でない環境での通電部分が含まれる。
2. ケーブル設計時では、ケーブル製作時に生じる超伝導テープ間の隙間を考慮していないこと
3. 短尺線材の J_c はすべて同じと仮定して設計したため、 J_c の値が多少ばらついた。ただし、これは線材の品質上の問題で今後改善される可能性がある
4. 温度履歴による線材の劣化

以上の要因が考えられるが、設計値と実験値の違いは 8%程度であるので、定量的にも一致した結果といえる。更なる一致は線材の品質向上により、得られるものと考えられる。

第4章 まとめ

本研究では、短尺線材の縦磁界下での RE コート線材の臨界電流密度 J_c を用いて設計、製作された縦磁界直流超伝導ケーブルの内 3 層の通電試験を液体窒素中で行い、ケーブルの臨界電流 I_c を評価した。得られた測定結果と設計値を比較し、このケーブルの有用性について調べた。

4.1 超伝導ケーブルの $V-I$ 特性

縦磁界下におけるケーブルの電流容量 I_c の磁界 B_{ext} 依存性を導出するために、3 層同時通電時の $V-I$ 特性を測定した。 $V-I$ 特性から電流方向と磁界(印加磁界+自己磁界)の平行具合により電圧が 2 つ立ち上がる電流電圧特性が確認できた。

4.2 超伝導ケーブルの n 値

n 値は I_c 値のピークである $B_{ext} = 0.1$ Tで $n = 75.0$ で最大となった。これと酸化物超伝導体で一般的に開発されつつあるケーブルの値に比べると、この値はかなり大きい値となり、縦磁界を加えることで n 値が大きく増加することが確認できた。

4.3 超伝導ケーブルの I_c-B_{ext} 特性

超伝導ケーブルの I_c-B_{ext} 特性は、 $B_{ext}=0.1$ Tで自己磁界($B_{ext}=0$ T)より 64 A 増加した 3036 A の電流をケーブルに流すことができた。実験値と設計値を比較して、短尺線材の縦磁界下での臨界電流密度を用いた設計からケーブルの電流容量のピークとなる磁界を推定可能であると分かった。また、設計値と実験値の差は、各層に流れる電流が不均一である可能性やケーブル製作時に生じる超伝導テープ間の隙間を考慮していないことなど様々な要因がある。しかしながら、縦磁界下での線材利用の有利性が確認できた。

4.4 今後の展開

設計値と実験値の差を小さくするには、線材の品質を向上させることで改善される。また、より均一に電流を流すことも改善につながる。

今後の実験として、電流による自己磁界によってケーブルに磁界を加えるため、大電流を流せる多層ケーブルを設計し、通電試験を行う必要がある。

謝辞

今回の実験をするにあたって、木内研究室の木内勝准教授、小田部研究室の小田部荘司教授、技術職員である新山誠司氏、木内研究室に所属している木戸竜馬氏、伊原大輔氏、田邊裕也氏、瀧久保翔吾氏に実験のサポート、多くの助言、超伝導に関する勉強のサポートをしていただきました。また、その他の小田部、木内研究室の皆様にも研究のサポートをしていただきました。そのことに心から感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] 松下 照男：「磁束ピンニングと電磁現象」，産業図書（1994）
- [2] S. T. Sekula, R. W. Boom, C. J. Bergeron : Appl. Phys. Lett. 2(1963)102
- [3] G. W. Cullen, G. D. Cody, J. P. Jr. McEvoy : Phys. Rev. 132 577
- [4] Yu. F. Bychikov, V. G. Vereshchagin, M. T. Zuev, V. R. Karasik, G. B. Kurganov, V. A. Mal'tsev : JETP Lett. 9 (1969) 404
- [5] 田邊 賢次郎 修士論文(2014)
- [6] Yu. F. Bychkov et al. : JETP Lett.9(1969)404
- [7] T. Matsushita, M. Kiuchi, E. S. Otabe : Supercond. Sci. Technol. 25 (2012) 125009
- [8] T. Matsushita, M. Kiuchi, E. S. Otabe, V. S. Vyatkin : Appl. Supercond. Conf. (2013)032
- [9] 松下 照男：低温工学 48 (2013) 11 569.
- [10] T. Matsushita, M. Kiuchi, E. S. Otabe, J.Wada, K.Tanabe, V. S. Vyatkin :Physica C 494(2013)137