

第 3 高調波電圧誘導法を用いた YBCO-coated 線材の $E-J$ 特性の評価

原口 輝久

平成 16 年 2 月 24 日

電子情報工学科

目次

第 1 章	序章	1
1.1	はじめに	1
1.2	試料の作製方法	2
1.2.1	中間層の 2 軸配向法	4
1.2.2	超伝導層の作製法	5
1.3	Y 系超伝導線材の現状	6
1.4	E - J 特性の評価法	6
1.5	第三高調波電圧誘導法の原理	7
1.6	表皮効果	13
1.7	本研究の目的	16
第 2 章	測定	17
2.1	試料	17
2.2	測定	17
2.2.1	四端子法による測定	17
2.2.2	SQUID を用いた磁化緩和法による測定	19
2.2.3	第三高調波電圧誘導法による測定	20
第 3 章	結果及び検討	22
3.1	V_3 - I_0 特性	22
3.2	E - J 特性	25
3.3	J_c - B 特性	30
3.4	n 値	33
第 4 章	結論と今後の課題	35
4.1	結論	35
4.2	今後の課題	35

図目次

1.1	IBAD-PLD 法による YBCO coated 線材の構造	3
1.2	第三高調波電圧誘導法のモデル	9
1.3	遮蔽電流の様子	10
1.4	$I_0 < I_{c0}$ ($I_0 = 0.5I_{c0}$) の磁束と電圧	10
1.5	$I_0 > I_{c0}$ ($I_0 = 1.5I_{c0}$) の磁束と電圧	10
1.6	FEM シミュレーションによる V_3-I_0 特性 (Wada <i>et al.</i> , 2002) .	11
1.7	超伝導薄膜内の磁束分布と遮蔽電流の分布	12
1.8	表皮効果	15
2.1	四端子法に用いた試料	18
2.2	y 軸方向からみた第三高調波電圧誘導法の測定モデル . .	21
3.1	V_3-I_0 特性の磁界依存性 (70.0K、75Hz)	23
3.2	V_3-I_0 特性の周波数依存性 (70.0K、3T)	24
3.3	$E-J$ 特性 (70.0K)	27
3.4	$E-J$ 特性 (77.3K)	28
3.5	図	29
3.6	J_c-B 特性 (70.0K)	31
3.7	J_c-B 特性 (77.3K)	32
3.8	n 値 (77.3K)	34

第 1 章 序章

1.1 はじめに

1911 年オランダのカメリン・オネス (Kamerlingh Onnes) が極低温での水銀の超伝導を発見以来、様々な超伝導体が発見されてきた。当初は金属や合金の超伝導体が開発され、超伝導の発現機構に関する研究が進められてきた。1957 年に超伝導発現機構を説明する BCS 理論が登場し、超伝導体が超伝導状態から常伝導状態へと移行する温度、すなわち臨界温度は 30K を越えないであろうと考えられていた。ところが、1986 年、酸化物系物質 (La-Ba-Cu-O) で 30 K 級超伝導の可能性がベドノルツ (Johannes G. Bednorz) とミュラー (Karl Alex Muller) によって示された。

その後、液体窒素の沸点 (77 K) を大きく越えた臨界温度を持つ Y-Ba-Cu-O や Bi-Sr-Ca-Cu-O などの酸化物超伝導体が発見され、高温超伝導に大きな期待が寄せられることとなった。特に、高温超伝導体の臨界温度が液体窒素の沸点よりも高いことから、冷却コストの低減が見込まれる。しかしながら、数年を経た今日、高温超伝導体の応用の難しさが理解され、単なる臨界温度の高い超伝導体の探査やそれらの構造解析だけでなく、超伝導機器としての応用のための特性改善が求められている。

現在応用が期待されている高温超伝導体線材の代表的なものとして挙げられるのが、先程も述べた Y 系超伝導線材と、Bi 系超伝導線材である。Bi 系超伝導線材は、圧延などの機械的な応力で容易に加工することが可能であるため、すでに km オーダーの線材も作られている。一方、Y 系超伝導線材は特殊な方法で作製する必要がある。また長尺化も容易ではない上、作製コスト面での課題もあるが、Bi 系超伝導体に比べて高温高磁界下における臨界電流特性に優れているため、次世代線材として大きな期待を寄せられている。

超伝導体が実用化される際には、臨界温度 T_c や作製コストなど、様々な条件をクリアする必要がある。その中でも、電気抵抗なしに流せる最大直流電流密度である臨界電流密度 J_c は、実際の使用に際しどこまで電流を流すことができるのかを判断する指標となるため、非常に重要であると言える。臨界電流密度は、発生する電界が基準に達したときの電流密度の値とする。これらの超伝導体は様々な分野での応用が考えられる。例えば電力貯蔵システム (SMES、フライホイールなど) や、電力輸送ケーブル、リニアモーターカー、高感度磁気センサー (SQUID)、医療分野 (MRI)、NMR (核磁気共鳴分析装置) などである。しかし、各応用ごとに超伝導体が置かれる電磁氣的環境が異なるため、超伝導体に発生する電界もそれぞれ異なる。例えば、NMR では極めて高い (0.01ppm/h 程度) 磁界の安定度が要求されるため、発生する電界は極めて小さい値となる。一方電力輸送用ケーブルでは交流の使用となるため、発生する電界も NMR に比べて高い値となる。このように、各応用によって発生する電界の大きさも異なるため、各々の応用に即した臨界電流特性が必要であり、幅広い領域での E - J 特性を測定することは非常に有意義であると言える。それに伴い、 E - J 特性を容易に評価する手法もまた必要とされている。

1.2 試料の作製方法

前述したように、Bi 系超伝導体は容易に線材化を行なうことができるが、Y 系超伝導体は結晶構造が 3 次元的であるため、高度な配向制御技術が必要で、現時点では実用レベル (km オーダー) の線材化には至っておらず、さらなる開発期間と開発投資が必要である。

今回の研究で使用した試料は、IBAD-PLD 法という方法で作製された Y 系薄膜線材であり、その構造は図 1.1¹⁾ のようになっている。IBAD-PLD 法では、まず IBAD 法により無配向結晶基板の上に中間層を 2 軸配向させ、その上に PLD 法により超伝導層を形成し、保護膜を張るという過程を踏む。Y 系超伝導線材の作製方法は IBAD-PLD 法以外にも多数の方法が提案されており、ここではその代表的な作製方法を、特に重要である中間層の 2 軸配向法と超伝導層の配向法に分けてそれぞれ説明する。

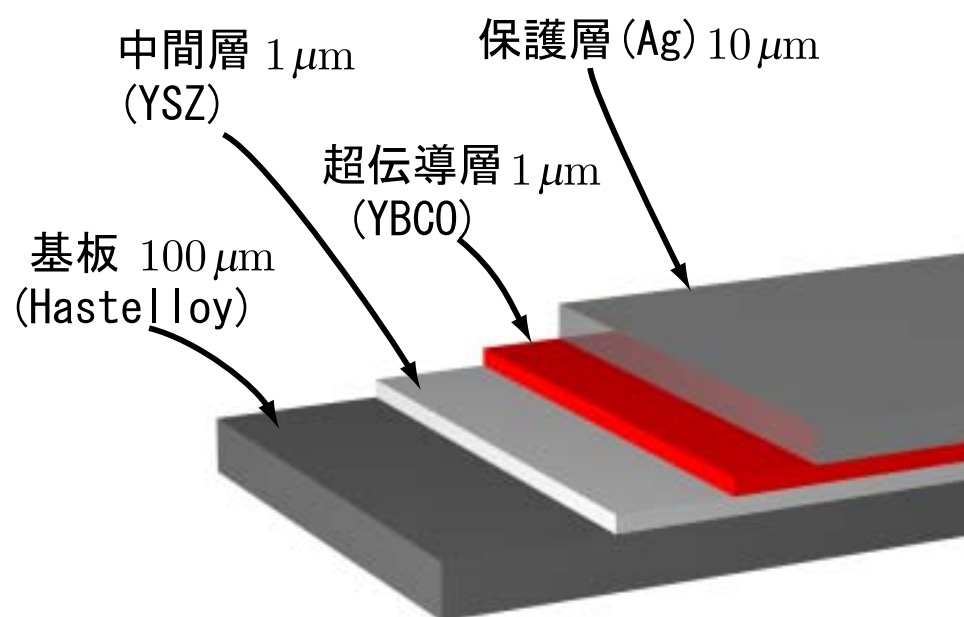


図 1.1 IBAD-PLD 法による YBCO coated 線材の構造

1.2.1 中間層の2軸配向法

- IBAD 法 (Ion Beam Assisted Deposition)

IBAD 法とは、無配向の耐熱金属テープ上においてイオンビーム照射を用いることにより高度に全軸配向した中間層を成長させる方法である。この IBAD 法は基材金属の結晶性に影響されることなく極めて緻密で平滑な成長表面が得られる。他の方法に比べ、 J_c を制限する要因が少なく、比較的安定に高特性が得られる。1991 年の IBAD 法開発当初においては、製造速度が遅い上に設備メンテナンスに手間がかかったことから長尺線材化は疑問視されることが多かったが、現在は技術の進歩により従来比 10 倍以上の製造速度が得られ、 $1.0[\text{m/h}]$ の製造速度で 60m 長、 $0.5[\text{m/h}]$ で 30m 長の中間層が製造されるようになった。

- SOE 法 (Surface Oxidation Epitaxy)

SOE 法とは、Ni テープを参加熱処理して、テープ表面に 2 軸配向した NiO 層を形成し、これを YBCO 成膜用の基板として用いるもので、次世代線材の長尺化および低コスト化の有力な方法として開発が進められており、配向中間層が形成された金属テープ基板を低コストで高速に作製する手法として大いに期待されている。Ni テープの 2 軸配向は圧延と熱処理で行なうことができる。また、SOE 法は中間層の形成までを非真空プロセスで行なえるという点に優位性がある。

- RABiTS 法 (Rolling Assisted Biaxially Textured Substrate)

RABiTS 法は、圧延と熱処理により冶金的に二軸配向した純 Ni テープを製作し、その上に中間層と YBCO 膜を成膜する手法である。IBAD 法と比較して個々のプロセスが簡単なため IBAD 法より低コストで済むにもかかわらず、短尺の試料では IBAD 法に匹敵する J_c 特性が得られている。しかし、長尺の試料での特性は IBAD 法より劣り、基板そのものを面内配向させる必要があるため使用できる基板の種類が限られるなどの問題もある。

- ISD 法 (Inclined Substrate Deposition)

ISD 法は、中間層を成膜する際に基板を傾げるだけで面内配向が実現できるため、長尺化が容易で、その作製速度も速いという特徴をもつ。しかし、その製法に由来した基板法線に対する結晶配向方向のずれ、

やや大きい面内配向性などの問題もある。

1.2.2 超伝導層の作製法

- TFA-MOD 法 (TriFluoroAcetate-Metal Organic Deposition)

TFA-MOD 法は、Y,Ba,Cu のトリフルオロ酢酸塩原料液を基板上に塗布して、水蒸気雰囲気中、700-800 程度で熱処理して、超伝導膜を得る手法である。この方法はこれまで、膜を厚くすることが困難であったが、数回の膜塗布を繰り返すことにより、膜を厚くし、150[A] 以上という大きな電流値を得ることに成功している。非真空中での作製であることから、PLD 法などに比べて 1/100 以下にもなる可能性があり、低コスト化の実現を期待されている。

- LPE 法 (Liquid Phase Epitaxy)

LPE 法は、溶液または融液から基板上に結晶を成長させる手法である。その特徴として、液相成長による高い結晶性を持つ、大面積化に有利、気相成長に対し 100-1000 倍の高速成長が可能、などが挙げられる。高い J_c 値を保ったまま超伝導膜の膜厚を増加することが可能であり、その性膜速度も PLD 法の 10 倍以上と大きい。さらに真空装置を必要としないのでコスト面でも有利であると言える。

- CVD 法 (Chemical Vapor Deposition)

CVD 法は、薄膜材料のハロゲン化物、硫化物、水素化合物などを高温中で熱分解、還元、重合あるいは気相化学反応などをさせたのち、金属分子を基板上に沈着させて膜を形成させる方法である。特にその材料に有機金属を用いる方法を有機金属科学気相蒸着法 (Metal Organic CVD, MOCVD) と呼ぶ。特徴としては、高真空を必要としない、大面積な基板や複雑な形状の基板にも成膜可能、量産性に優れている、などが挙げられる。

- PLD 法 (Pulse Laser Deposition)

PLD 法は PVD (物理気相蒸着) 法の一つであり、真空チャンバー内の焼結体ターゲットにパルスレーザーを断続的に照射し、ターゲットをアブレーションすることにより放出されるフラグメント (イオン、クラスタ、分子、原子) をターゲットと対向して配置された基板上に薄膜を堆積さ

せる方法である。単純な工程でもっとも安定して高特性が得られる方法である。

1.3 Y系超伝導線材の現状

これまでも述べたように、Y系超伝導体は線材化が困難なため、実用長の線材(kmオーダー)にはまだ至っていない。数年前から日欧米でY系線材開発の国家プロジェクトが立ち上げられているが、そこではある程度の長さ(10m ~ 50m)における通電特性の確認を第一の目標としており、これは今後実用長線材を作製するために必要とされる技術開発に際し、その見込みを判断する指標と位置づけられる。株式会社フジクラは、国際超伝導シンポジウム(ISS2002)で世界最長の46m長全長において臨界電流値74A(77K、0T)を液体窒素温度で達成したと発表した。また、全長において77K、0Tの条件下で n 値は30を越え、Y-123系の強いピンニング特性を保ったまま長尺化が可能であることを示した。フジクラでは、IBAD-PLD法によってY系線材を作製しているが、今回50m級線材の全長に渡って均一な高特性を維持して成膜することに成功したことで、現在のY系線材製作プロセスが実質的に長尺線材に対応できることを実証したと言え、実用Y系線材プロセスの開発に向けて確かな見込みを得ることができたと考えられる。²⁾

1.4 E - J 特性の評価法

今回、 E - J 特性を評価法する際に四端子法、磁化緩和法、第三高調波電圧誘導法という三通りの方法を用いた。これらの方法の詳細は2章で述べるが、ここでは各評価法の特徴を簡単に述べる。

- 四端子法

四端子法は測定が最も容易で短時間に行なえるため、世界で最もスタンダードな測定法であると言える。一方、試料にダメージを与えてしまう可能性があるという短所もある。具体的に挙げると、サンプルを加工する際のダメージや、サンプルに直接電流を流す際に生じる熱やローレンツ力の影響などである。

- 磁化緩和法

SQUIDを用いた磁化緩和法は、超低電界領域における E - J 特性を測定

することが出来る。しかし測定が容易ではない上、かなりの時間を要するため、実際にはあまり使われていない測定法である。また、測定するにはサンプルをストローのような小さな筒上の物に入れる必要があるため、測定可能なサンプルのサイズには大きな制限があると言える。

- 第三高調波電圧誘導法

第三高調波電圧誘導法は、測定が比較的容易である上、その名の通り誘導法であるため、非破壊・非接触での測定が可能であり、大面積なサンプルや長尺のサンプルでも測定可能である。またコイルに流す交流電流の周波数を変えることで、測定される電界領域を選択可能である点もこの測定法のメリットである。

1.5 第三高調波電圧誘導法の原理

ここで、本研究のテーマである第三高調波電圧誘導法の原理を述べる。

第三高調波電圧誘導法は Claassen³⁾ らによって提案されたもので、図 1.2 のように、試料の直上にコイルを置いて測定を行なう。コイルに交流電流を流し交流磁界を発生させると、超伝導体にはその交流磁界が入らないように、コイルに流れる電流とは逆方向の遮蔽電流が流れる。これにより、交流電流による磁束と遮蔽電流による磁束がコイルを貫く。コイルに通電する交流電流 I_0 がある閾値 I_{c0} より小さい間は遮蔽電流の大きさは交流電流と同じ大きさであり、言い換えれば、この遮蔽電流はコイルに流れる電流の鏡像電流とみなすことができる。この間は交流磁界に比例した遮蔽電流が流れるため、コイルに誘導される電圧はほぼ線形な応答を示す。(図 1.4 参照)。しかし I_0 が I_{c0} 以上になると、第三高調波電圧が急激に発生する。超伝導体に印加される交流磁界が増加するのに伴って、遮蔽電流も増加するが、この遮蔽電流が限界に達すると、図 1.3(b) のようにそれ以上磁界を遮蔽できなくなる。これにより今まで線形だった応答に異常が生じ、非線形応答となり、第三高調波電圧が検出されるようになる(図 1.5 参照⁴⁾)。図 1.5(a) は一見、図 1.4(a) と同じ図のように見えるが、図 1.4(a) の波形が滑らかであるのに対し、よく見ると図 1.5(a) の波形はわずかに乱れている。このわずかな乱れが、図 1.5(b) のようにコイルの両端に発生する電圧の大きな乱れの原因となる。

第三高調波電圧誘導法では、コイルに流す交流電流がある閾値に達すると第三高調波が急激に発生するため、挙動が判別しやすい。図 1.6 は和田らによるシュミレーションによる結果⁵⁾ であるが、交流電流 I_0 が閾値 I_{c0} を越えた途端に急激に第三高調波電圧が発生することがこの図からもわかる。なお、このシュミレーションにおける試料のサイズは幅 10mm、超伝導膜厚 $0.6\mu\text{m}$ で、コイルは内径 2mm、外径 5mm、巻数 400 としている。

これまで交流電流 I_0 が閾値 I_{c0} を越えると第三高調波電圧が発生すると述べたが、実際は $I_0 < I_{c0}$ においてもわずかに第三高調波は発生している。これは $I_0 < I_{c0}$ においても磁束の侵入に対する超伝導薄膜内の遮蔽電流の分布が交流の位相に対して変化する (図 1.7 参照) ためである。これにより第三高調波電圧が発生するが、そのオーダーは 10^{-7}V 程度であり、 $I_0 > I_{c0}$ のときのオーダーが 10^{-4}V 程度であることを考えると、大きな開きがあると言える。よって本研究内においては $I_0 > I_{c0}$ のときに発生する電圧を第三高調波電圧と表記する。

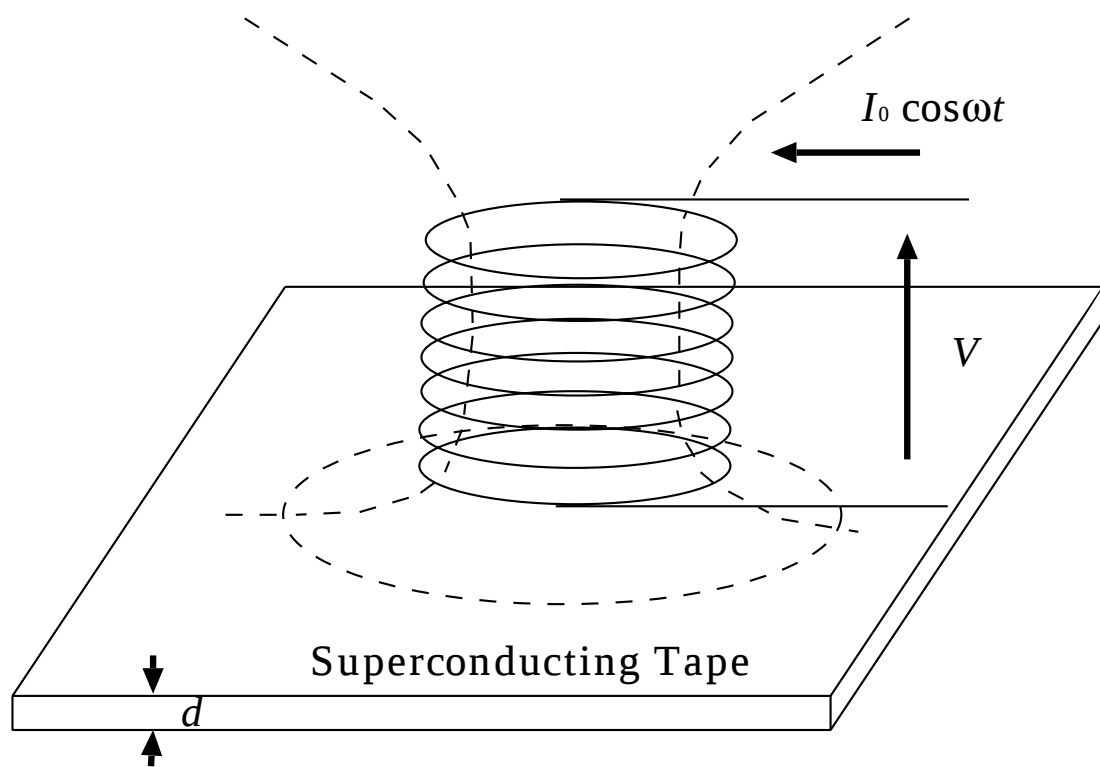


図 1.2 第三高調波電圧誘導法のモデル

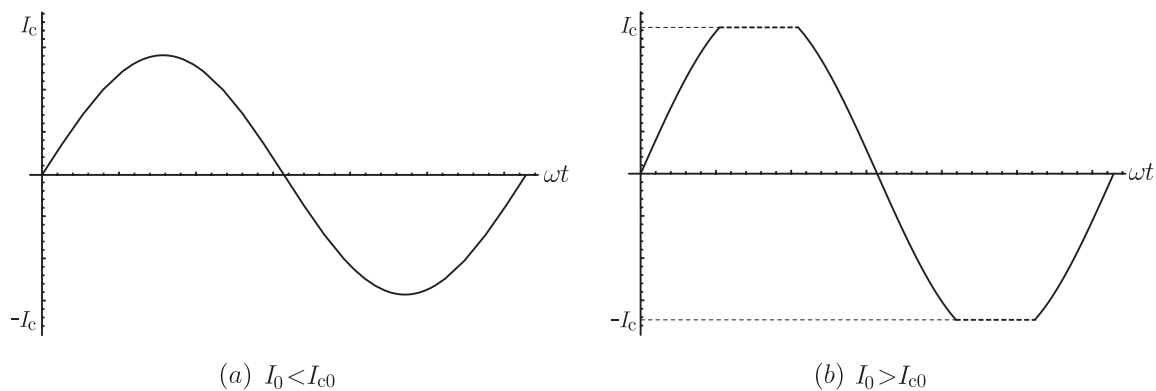


図 1.3 遮蔽電流の様子

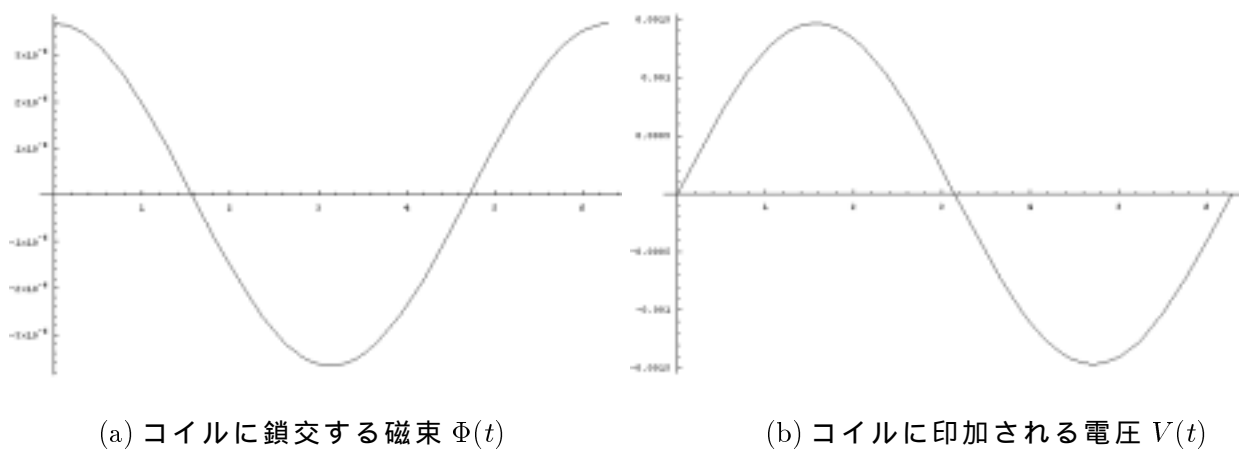


図 1.4 $I_0 < I_{c0}$ ($I_0 = 0.5 I_{c0}$) の磁束と電圧

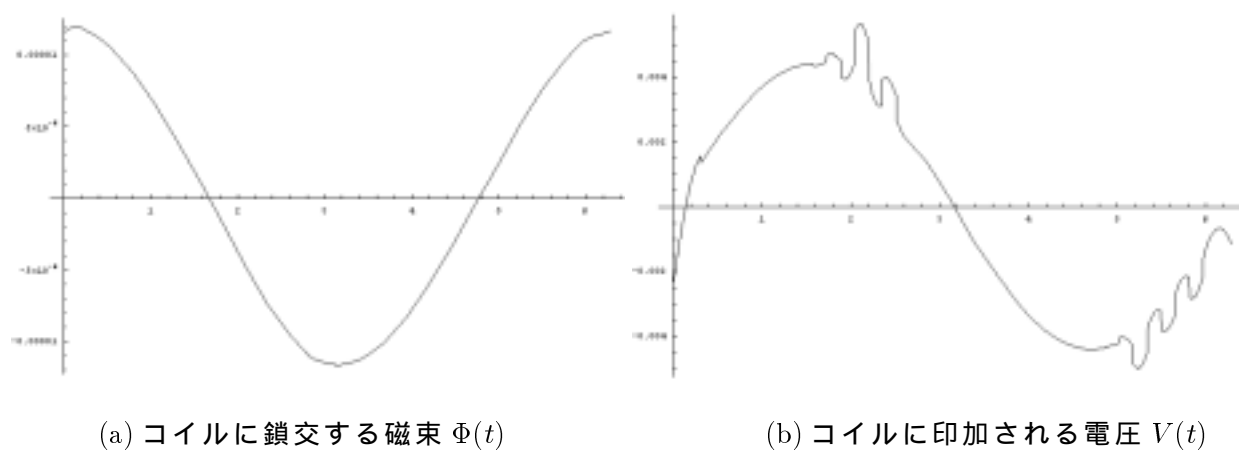


図 1.5 $I_0 > I_{c0}$ ($I_0 = 1.5 I_{c0}$) の磁束と電圧

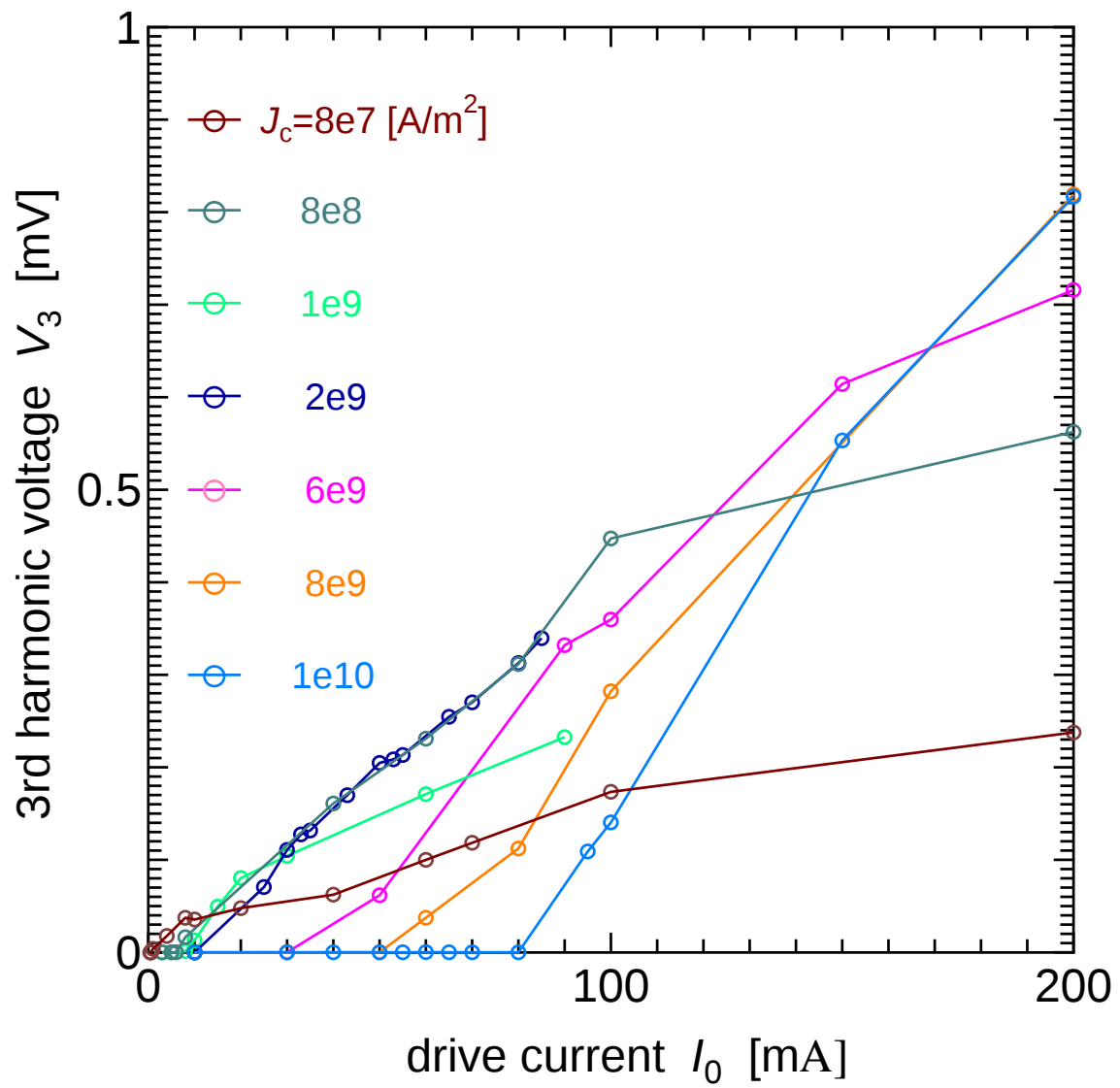


図 1.6 FEM シミュレーションによる V_3 - I_0 特性 (Wada *et al.*, 2002)

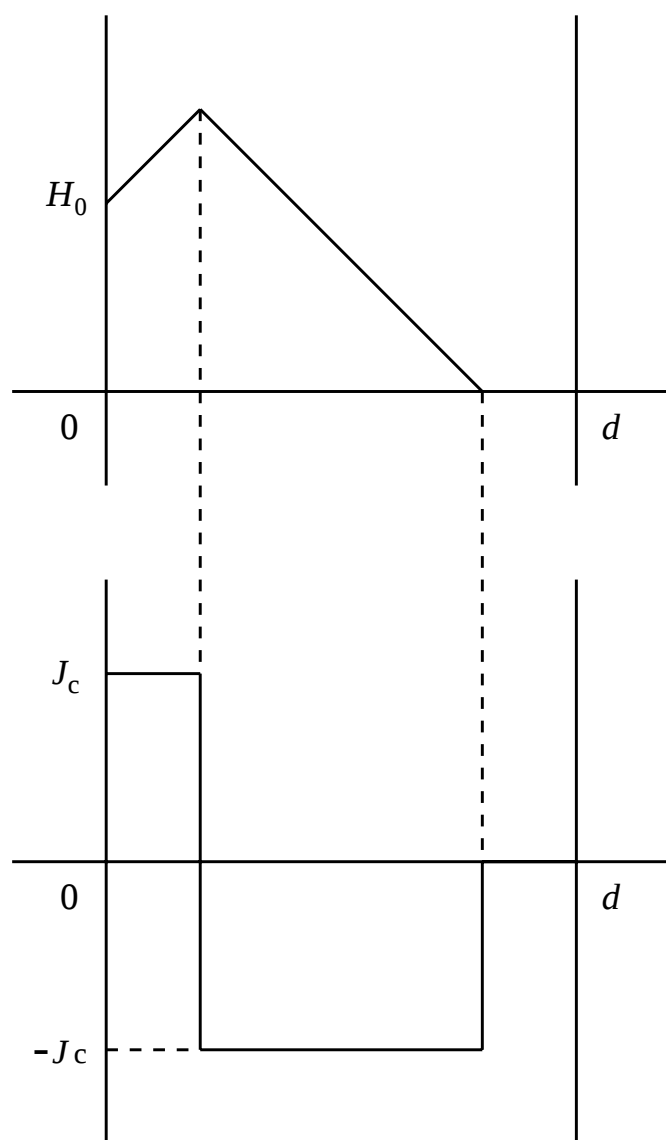


図 1.7 超伝導薄膜内の磁束分布と遮蔽電流の分布

1.6 表皮効果

1.2 節で述べたように、今回の研究で用いた、IBAD-PLD 法により作製された YBCO coated 線材は超伝導薄膜の上に銀の保護膜を形成している。そのため、この銀の保護膜による表皮効果の影響を受ける可能性がある。

表皮効果とは、導体に高周波の電流を流したり磁界を加えたりしたとき、遮蔽効果によりこれらの電流や電磁界が導体の表面付近に局限されて内部に入らない現象である。

図 1.8 のように厚さ d の平板導体 ($0 \leq x \leq d$) を考え、 $x < 0$ の側で導体に平行に z 軸方向に角周波数 ω 、振幅 H_0 の交流磁界を加えたとする。このとき導体内部の電界 $\vec{E}$ および磁束密度 $\vec{B}$ はそれぞれ

$$\vec{E} = (0, E, 0), \quad \vec{B} = (0, 0, B) \quad (1.1)$$

の成分しかなく、これらの量は x 軸方向にしか変化しない。すなわち

$$\frac{\partial}{\partial x} \neq 0, \quad \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} = 0 \quad (1.2)$$

である。角周波数 ω が十分小さく、変位電流が無視できれば、これらが従う Maxwell の方程式は

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad \frac{1}{\mu} \text{rot } \vec{B} = \sigma \vec{E} \quad (1.3)$$

で与えられる。ここで μ 、 σ はそれぞれ導体の透磁率及び電気伝導度である。(1.1) 式、(1.2) 式の条件の下では (1.3) 式は

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \sigma \mu \frac{\partial B}{\partial t}, \quad \frac{\partial^2 E}{\partial x^2} = \sigma \mu \frac{\partial E}{\partial t} \quad (1.4)$$

となり、これを解いて

$$B = \mu_0 H_0 \exp \left[-\sqrt{\frac{\mu \sigma \omega}{2}} (1 + i)x + i\omega t \right] \quad (1.5)$$

$$E = \sqrt{\frac{\omega}{2\mu\sigma}} \mu_0 H_0 \exp \left[-\sqrt{\frac{\mu \sigma \omega}{2}} (1 + i)x + i(\omega t + \frac{\pi}{4}) \right] \quad (1.6)$$

を得る (μ_0 は真空の透磁率)。このように B 、 E の振幅は表面からの距離 x とともに指数関数的に減少する。 B 、 E の振幅が $1/e$ になる深さ

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \sigma \omega}} \quad (1.7)$$

を表皮深さ (skin depth) という。したがって反対側の表面 $x = d$ における磁束密度の振幅は

$$\mu_0 H_0 e^{-d/\delta} \quad (1.8)$$

で与えられる。

このように、導体の片側からのみ交流磁界をかけると反対側表面では磁界が弱まってしまう。この表皮効果の影響により、超伝導体に到達する交流磁界が弱まってしまうのではないかと考えられる。試料の厚さに比べて表皮深さが十分に大きければその影響は小さく、表皮深さが小さければ表皮効果の影響が無視できなくなる。

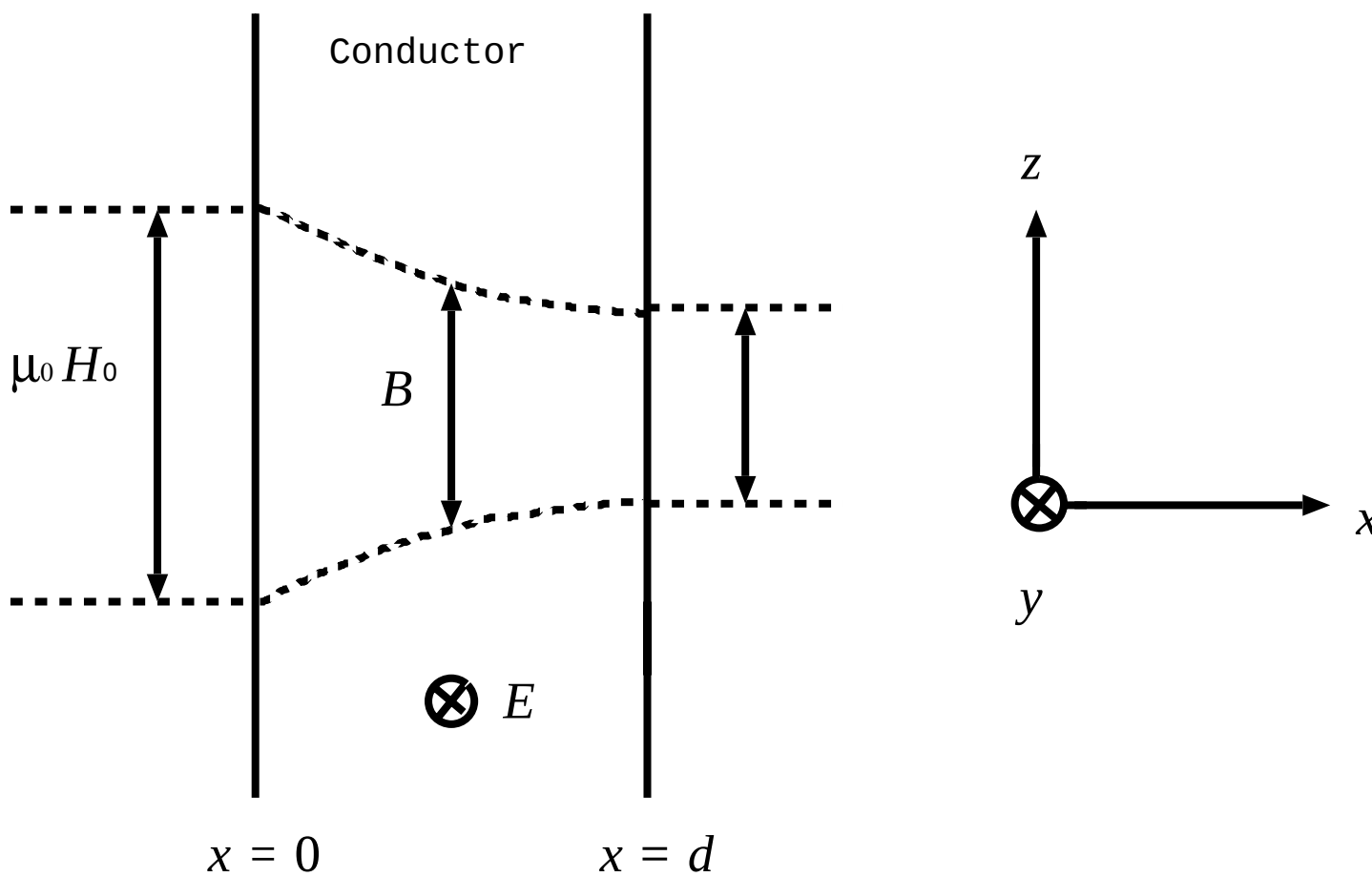


图 1.8 表皮效果

1.7 本研究の目的

1.1 節でも述べたように、幅広い電界領域において臨界電流特性 (E - J 特性) を測定することは、今後の研究にとって非常に有意義であると言える。 E - J 特性を測定する代表的な方法として挙げられるのが、四端子法、磁化緩和法、そして今回の研究テーマである、第三高調波電圧誘導法などである。これまで四端子法によって測定可能な高電界領域と、磁化緩和法により測定可能な超低電界領域における E - J 特性のデータは既に測定済みであった。そこで本研究では、第三高調波電圧誘導法を用いて E - J 特性の測定を行い、長尺の coated 線材の測定法としての有効性を調べるとともに、四端子法、磁化緩和法による結果との比較を行なった。

第 2 章 測定

2.1 試料

今回の研究で用いた試料は、株式会社フジクラが IBAD-PLD 法により製作した YBCO coated 線材である。試料のサイズは幅 10mm、長さ 10mm、YBCO の膜厚 $1.0\mu\text{m}$ となっている。

2.2 測定

2.2.1 四端子法による測定

四端子法は、試料の E - J 特性を測定する手法の一つで、試料の両端から直接電流を通電し、試料中央部の端子間の電圧を測定することで E - J 特性を評価する手法である。実験装置が比較的簡単で、測定時間も比較的短くてすむなどの特徴をもつ。試料は図 2.1 のようにブリッジ状にケミカルエッチングして作成されたものを使用し、ブリッジのサイズはブリッジの狭まった部分で 1 mm と $100\mu\text{m}$ となっている。試料は図 2.1 のように四ヶ所が銀蒸着されていて、その部分にリード線をつけて測定を行った。外側の二箇所から電流を通電し、内側の端子間に生じる電圧を測定することから E - J 特性が求まる。リード線と試料の間には比較的大きな接触抵抗があり通電によって熱が発生するが、この発熱による影響を出来るだけ抑えるために、電流は 1 秒間のパルス通電としている。

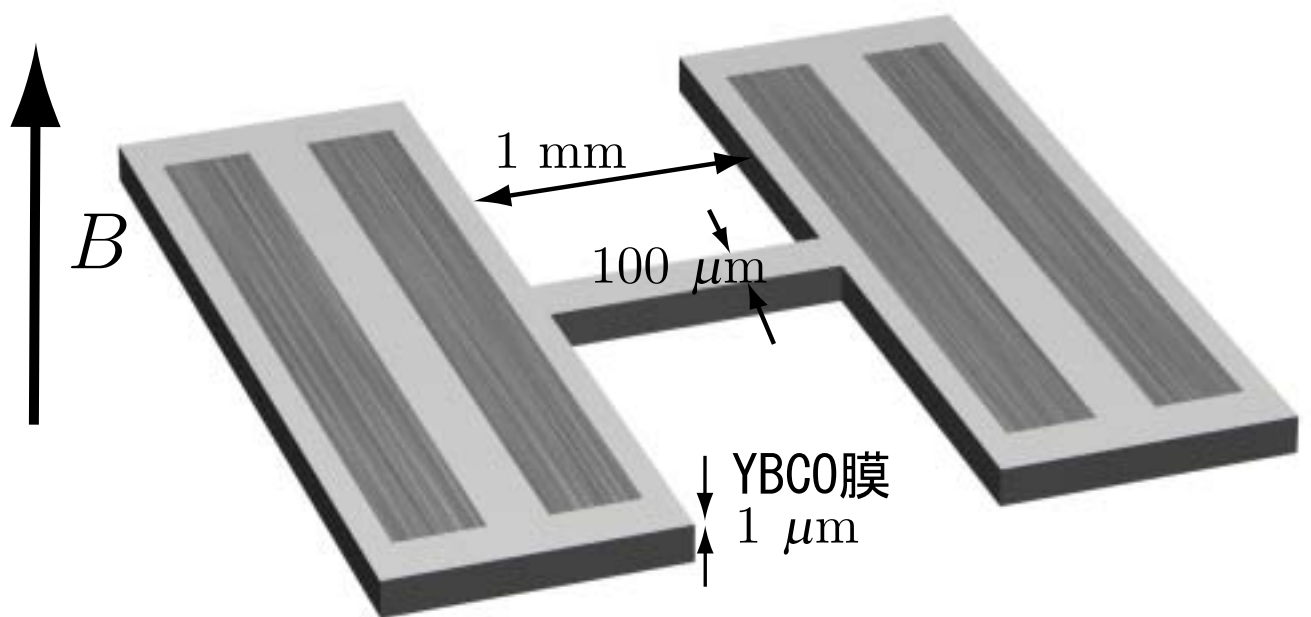


図 2.1 四端子法に用いた試料

2.2.2 SQUID を用いた磁化緩和法による測定

超低電界領域の測定はSQUID 磁力計 (Superconducting QUantum Interference Device: 超伝導量子干渉素子) を用いて行った。この測定で求まる磁気モーメントの値は内部を流れている遮蔽電流の値 J を、その時間変化がそのとき内部で発生している電界 E をそれぞれ次式のように与える。ただしここでは、遮蔽電流は場所によらず一定であると仮定している。

$$J = \frac{12m}{w^2 d(3l - w)} \quad (2.1)$$

$$E = -\frac{\mu_0 G}{2d(l + w)} \cdot \frac{dm}{dt} \quad (2.2)$$

ここで w, l, d はそれぞれ試料の幅、長さ、厚さを示している。

また、式 (2.2) には補正定数 G を掛けている。この G がない式は、試料の厚さが十分にある場合を仮定した式であり、今回の試料のように非常に薄い場合、電界が過大評価されてしまう。よって、その過大評価分を補正するために、補正定数を掛けておく必要がある⁶⁾。

用いた試料サイズは幅 w が 5.0 mm、長さ l が 4.7 mm、厚さが $1\mu\text{m}$ となっている。試料の c 軸方向の外部磁界に対する磁化の測定を行い、そこから (2.1) 式、(2.2) 式を用いて E - J 特性の評価を行った。ただし、SQUID 磁力計での磁化の測定値は [emu] であり、これを SI 単位系に換算するとき以下の式を用いた。

$$\Delta M[\text{A/m}] = \Delta M[\text{emu}] \times 10^3 \quad (2.3)$$

このようにして、磁化の測定から E - J 特性を得ることが出来る。

ここで、上でも述べた補正定数 G について詳しく述べる。試料が十分な厚さを持っている場合、試料を貫く磁束 Φ は $\Phi = m/d$ で表すことができる。しかし試料の厚さが薄い場合、磁束が過大評価されてしまい、その結果電界が実際の値よりもかなり大きな値として求められてしまう。試料の自己インダクタンスを L とすると、 $\Phi = LI$ と表せる。よって十分な厚さを持った試料と薄い試料の自己インダクタンスの比を取れば、 G のおおよその大きさを見積もることができる。十分な厚みを持つ試料の形状を円筒状、薄い試料をリング状であると仮定すると、自己インダクタンスはそれぞれ式 (2.4)、式 (2.5) のようになる。

$$L' = \frac{\pi\mu_0 l^2}{4d} \quad (2.4)$$

$$L'' = \left(\frac{\mu_0 l}{2}\right) \log \frac{8l}{d} \quad (2.5)$$

式 (2.4)、式 (2.5) の比を取ると、 G は

$$G = \frac{L''}{L'} = \frac{2d}{\pi l} \log \frac{8l}{d} \quad (2.6)$$

と表すことができる。ここで $x = l/d$ と置くと、

$$G = \frac{2 \log 8x}{\pi x} \quad (2.7)$$

となる。

2.2.3 第三高調波電圧誘導法による測定

低電界領域における E - J 特性は第三高調波電圧誘導法を用いて測定した。実験で使用したコイルは、線径 $50\mu\text{m}$ の銅線をボビンに 400 回巻いたもので、コイル部は内径 2mm、外径 6.05mm、高さ 1.12mm である。このコイルを図 2.2 のように、超伝導薄膜の 0.27mm 直上に設置し、交流電流を流して交流磁界を発生させた。今回の実験で測定した交流電流の周波数の範囲は 75Hz から 2kHz である。そしてこのコイルの両端間に発生する電圧を測定し、第三高調波成分の検出を行なった。

また第三高調波電圧誘導法において E - J 特性を求める際に、式 (2.8)、式 (2.9) を用いた。

$$J = \frac{2K}{d} I_{c0} \quad (2.8)$$

$$E = \frac{3\sqrt{3}}{8} \mu_0 \omega J d^2 \quad (2.9)$$

ここで、 K はコイル定数である。コイル定数 K を数値解析して正確な値を見積もることは、コイルの巻きずれなどの影響が考えられるため、非常に困難である。よって、コイル定数 K は 77.3K、1T における E - J 特性が四端子法による結果の外挿と一致するように決め、その結果 $2.67 \times 10^{-4} \text{m}_{-1}$ となった。

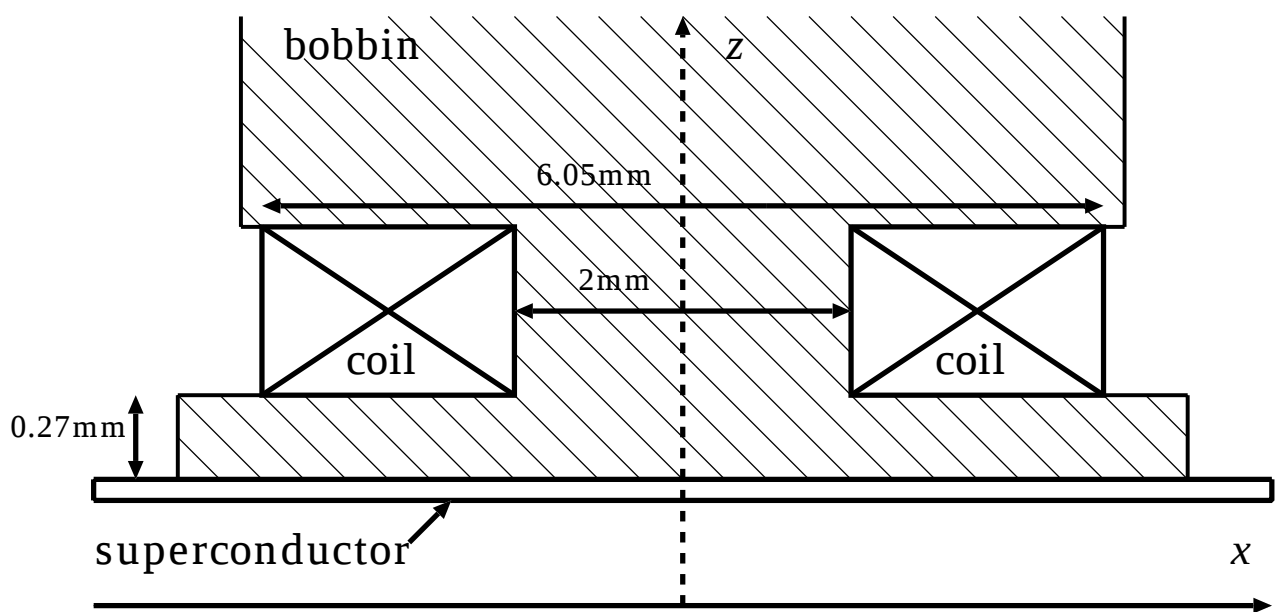


図 2.2 y 軸方向からみた第三高調波電圧誘導法の測定モデル

第 3 章 結果及び検討

3.1 V_3-I_0 特性

第三高調波電圧誘導法によって測定された V_3-I_0 特性を図 3.1、図 3.2に示す。図 3.1が 70.0K、75Hz における V_3-I_0 特性の磁界依存性、図 3.2が 70.0K、3T における V_3-I_0 特性の周波数依存性を示している。図 3.1を見てもわかる通り、外部磁界が高ければ高いほど V_3 の立ち上がり点が早くなることがわかる。これは高磁界中では J_c が下がることから明らかである。また図 3.2は、コイルに流す交流電流の周波数が高いほど立ち上がり点が遅くなることを示している。これは、交流磁界で誘起される電界が周波数に比例して増加するため、 J_c もそれに伴って増加することを意味している。図 3.2中の交流電流が閾値 I_{c0} よりも低い部分で、周波数が低いほど第三高調波電圧が高くなっているが、これは周波数で規格化しているためである。

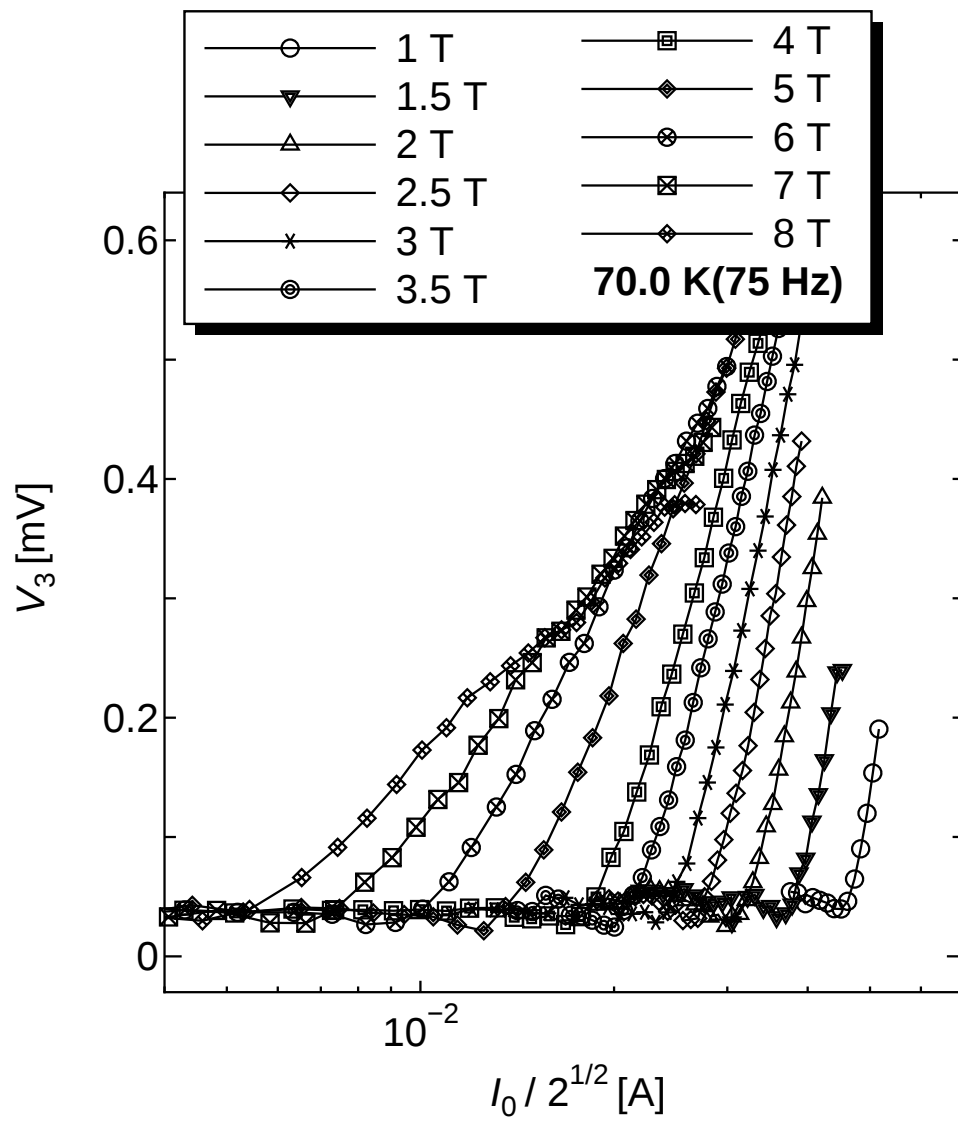


図 3.1 V_3 - I_0 特性の磁界依存性 (70.0K、 75Hz)

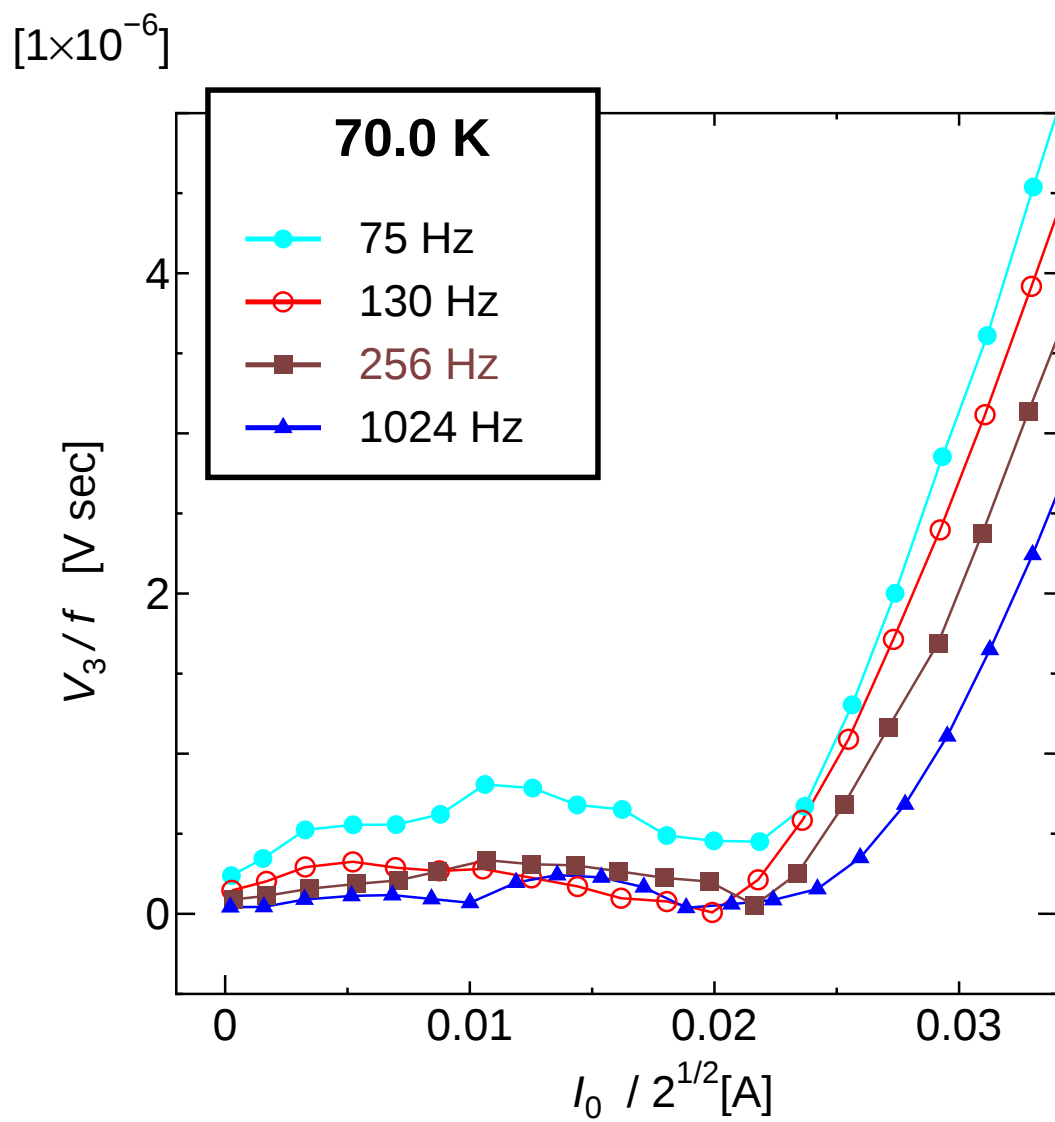


図 3.2 V_3 - I_0 特性の周波数依存性 (70.0K、3T)

3.2 E - J 特性

図 3.3、図 3.4 はそれぞれ 70.0K、77.3K における E - J 特性の測定結果である。各図の高電界領域のデータが四端子法により測定したデータで、超低電界領域のデータが SQUID を用いた磁化緩和法により測定したデータである。そして今回の実験である、第三高調波電圧誘導法により測定したデータが四端子法と磁化緩和法のちょうど中間あたりの低電界領域のデータである。図 3.3、図 3.4 を見てもわかるように、第三高調波電圧誘導法を用いて測定した結果、四端子法や磁化緩和法では測定困難な領域の E - J 特性を求めることに成功した。

これら三つの測定法によるデータを比較してみると、高磁界において多少ずれが見られるが、どちらの図も全体としてはほぼ一致しており、第三高調波電圧誘導法による測定が有効であることがわかる。図 3.3、図 3.4 によると、高磁界側では四端子法のデータに比べて第 3 高調波電圧誘導法のデータは J_c が大きくなっている。図 3.1 を見ると、高磁界側では V_3 - I_0 曲線の傾きが小さくなるため、これがずれの原因になっている可能性が考えられるが、現在検討中である。なお、図 3.1 と図 3.3 は測定した時期が異なり、使用したコイルも異なる。よって図 3.5 のように、 J_c がずれてしまっている。なお、 J_c は V_3/f が $1 \times 10^{-6} \text{V} \cdot \text{sec}$ のときの電流密度としており、本来ならば両方の図で、異なる磁界間での J_c の間隔が等しくなるはずだが、図 3.3 測定時のデータに乱れがあることもあって、異なる磁界間での J_c の間隔が異なっているのはこのためである。

また、今回使用した YBCO coated 線材は銀を保護膜として使用しているため、銀による表皮効果によって交流磁界が遮蔽されてしまう可能性が考えられるが、77.3K では 1 kHz のときで $900 \mu\text{m}$ と、試料の厚さに対して十分大きく、影響が出るには数 MHz 程度の周波数が必要であると予想される。周波数を変えることで得られた E - J 曲線は他の測定法によって得られた結果とよく一致しており、このことから表皮効果の影響はほとんどなかったと考えられる。

コイル定数 K は、2.2.3 節でも述べたように、77.3K、1T における E - J 曲線が四端子法による結果の外挿と一致するように決め、その値は $2.67 \times 10^{-4} \text{m}^{-1}$ とした。図 3.4 を見ると、77.3K において磁化緩和法の E - J 曲線ともほぼ一致していることがわかる。また、図 3.3 を見ると、異なる温度下に

においても四端子法、磁化緩和法の E - J 曲線とほぼ一致している。このことから、上記のようにして見積もったコイル定数 K がおおよそ正しい値であることが分かった。しかし K を計算から求めると、実験値の 2 倍近い値であり、計算値と実験値の間には開きがある。原因は現在検討中であり、今後の課題の一つである。

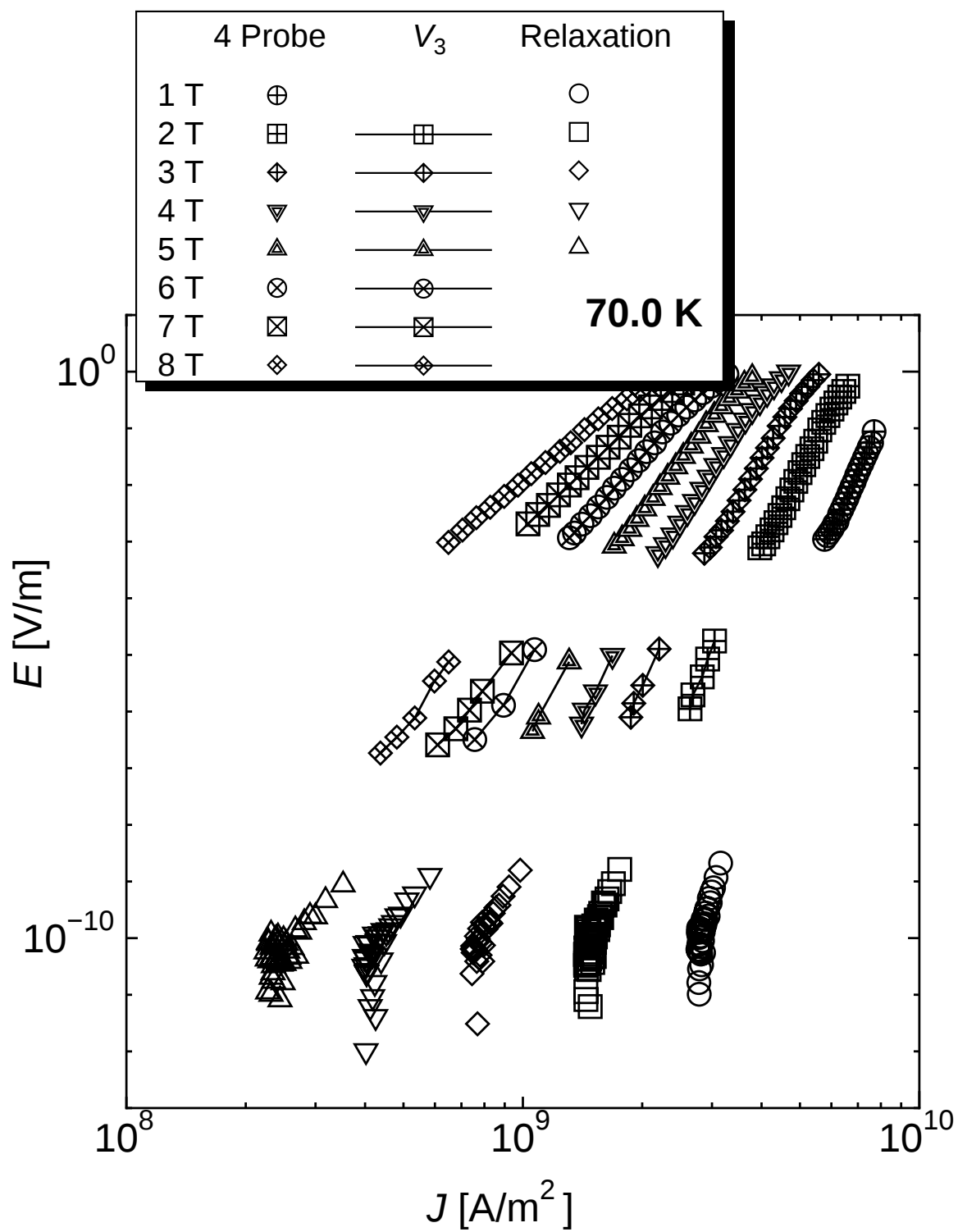


図 3.3 E - J 特性 (70.0K)

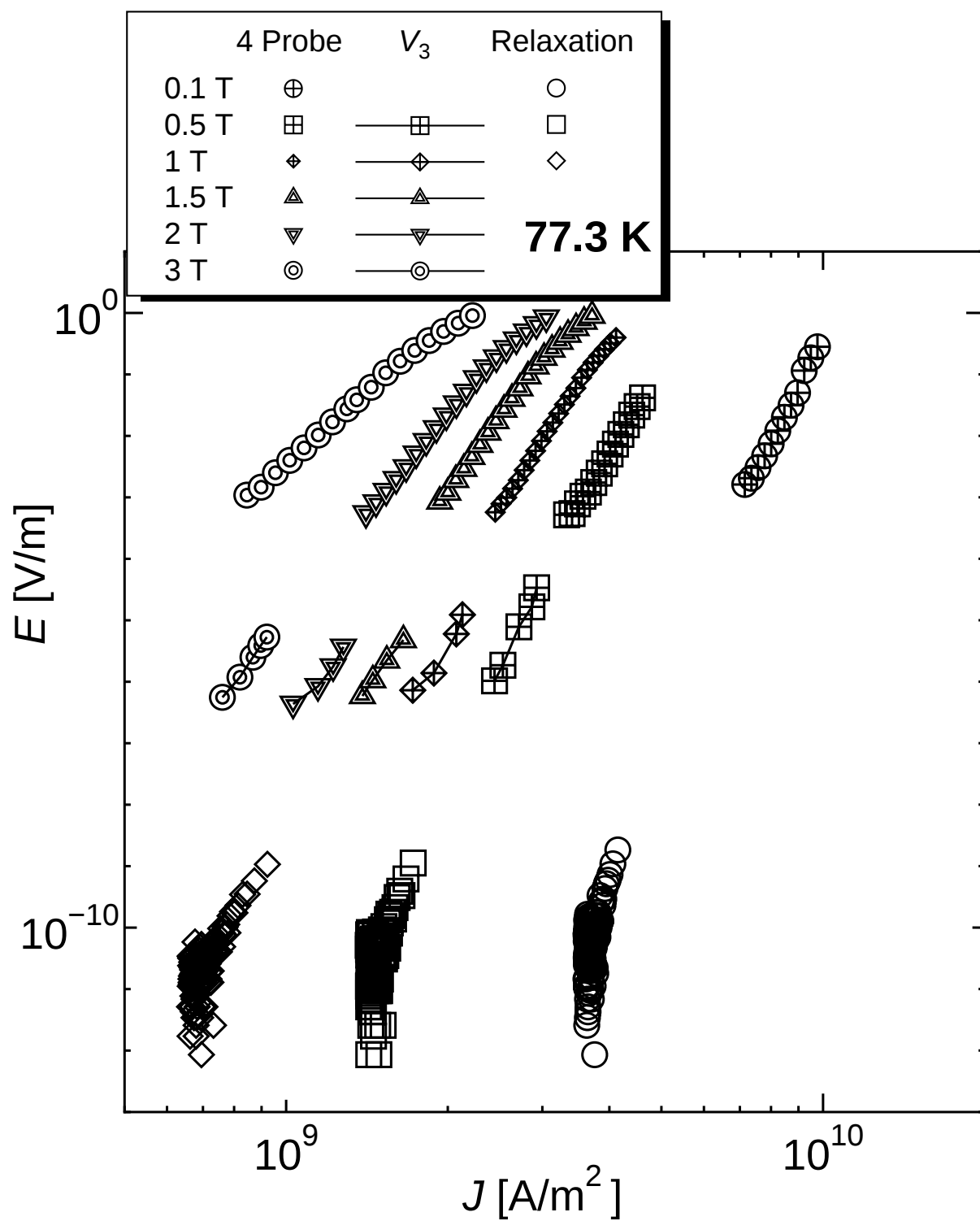


図 3.4 E - J 特性 (77.3K)

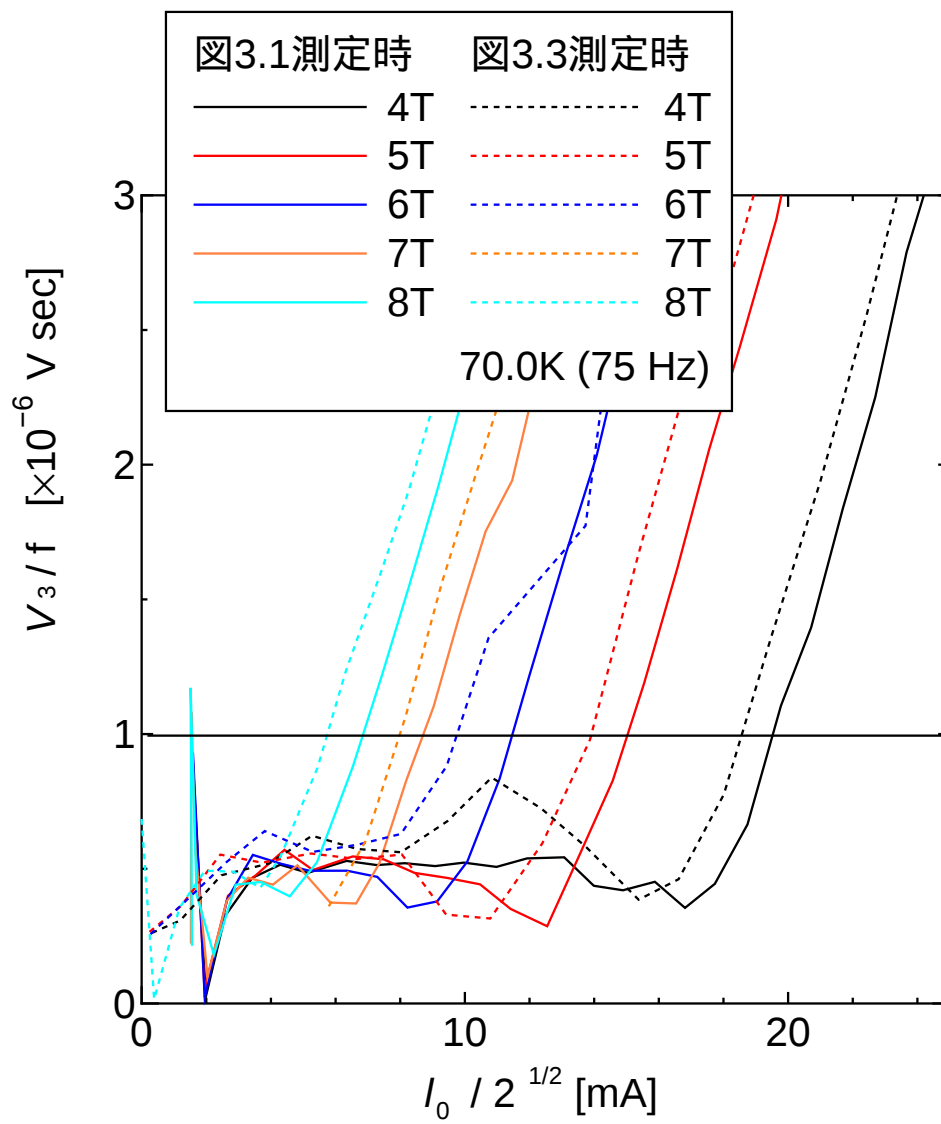


図 3.5 図 3.1測定時と図 3.3測定時の J_c の比較

3.3 J_c - B 特性

図 3.6、図 3.7は各測定法によって求められる J_c - B 特性である。図 3.6が 70K における J_c - B 特性、図 3.7が 77.3K における J_c - B 特性である。ここで、四端子法、第三高調波電圧誘導法、磁化緩和法の電界基準はそれぞれ 10^{-3}V/m 、 10^{-6}V/m 、 10^{-10}V/m としている。図 3.6、図 3.7を見ても、その結果は電界基準の影響が大きいことが分かる。

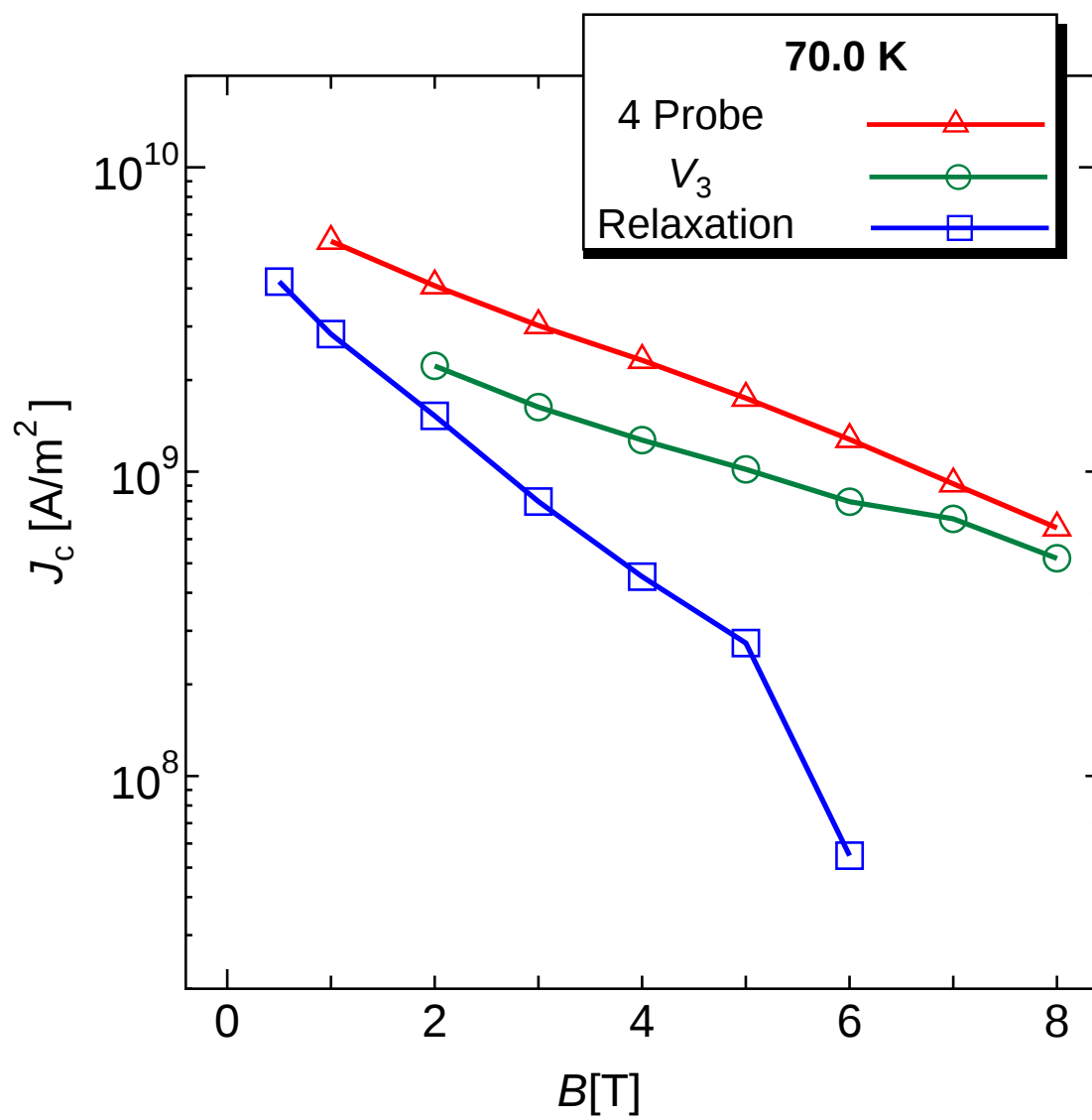


図 3.6 J_c - B 特性 (70.0K)

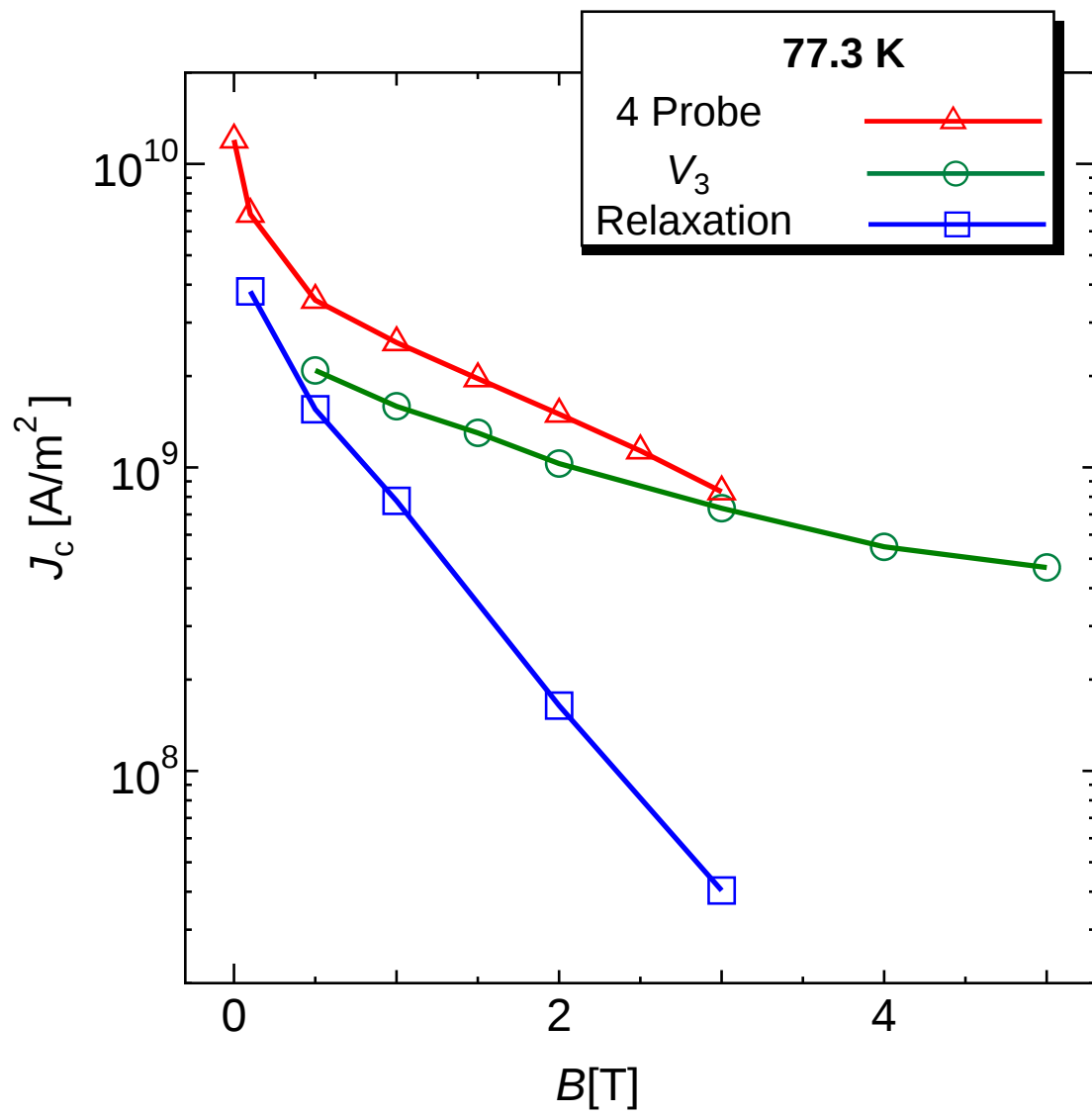


図 3.7 J_c - B 特性 (77.3K)

3.4 n 値

n 値とは E - J 特性の非線形性の強さを表すパラメーターで、値が大きいほど E - J 特性曲線の傾きが大きくなることを示している。具体的には、 E - J 特性を

$$E \propto J^n \quad (3.1)$$

のように表したときの指数 n のことを指す。 n 値が大きい線材は E - J 特性の傾きが非常に大きいため、流す電流を少し小さくするだけで発生する電圧を急速に下げることができる。このため、一般に実用超伝導線材では n 値が大きいほど優れているとされている。この n 値を決定する E - J 特性は、ピン・ポテンシャル場内での磁束線運動の非線形性などの微視的なものから超伝導線材内の臨界電流密度の空間的な不均一さや、ソーセージングなどの巨視的なものまで様々な要因によって影響を受ける。このため、 n 値を直接物理的な量として導くことは難しく、 n 値はあくまで実用上の便宜的なパラメータである⁷⁾。

図 3.8 は、三通りの測定法で得られた結果からそれぞれ求めた n 値である。ここでは、図 3.4 で電界 E が各電界基準（四端子法： 10^{-3} V/m、第三高調波電圧誘導法： 10^{-6} V/m、磁化緩和法： 10^{-10} V/m）に達する点での傾きから n 値を求めている。ここでも多少のずれは見られるが、それぞれの結果は各磁界でほぼ同じ値になっている。低磁界で 20 程度の値をとり、磁界の増加とともに減少している。 n 値は実用レベルとしては 50 以上の値が目安であると言われている。そういった意味では実用的にはまだまだ厳しいということが言える。km オーダーの実現とともに、高特性化という点でもさらなる研究開発が必要である。

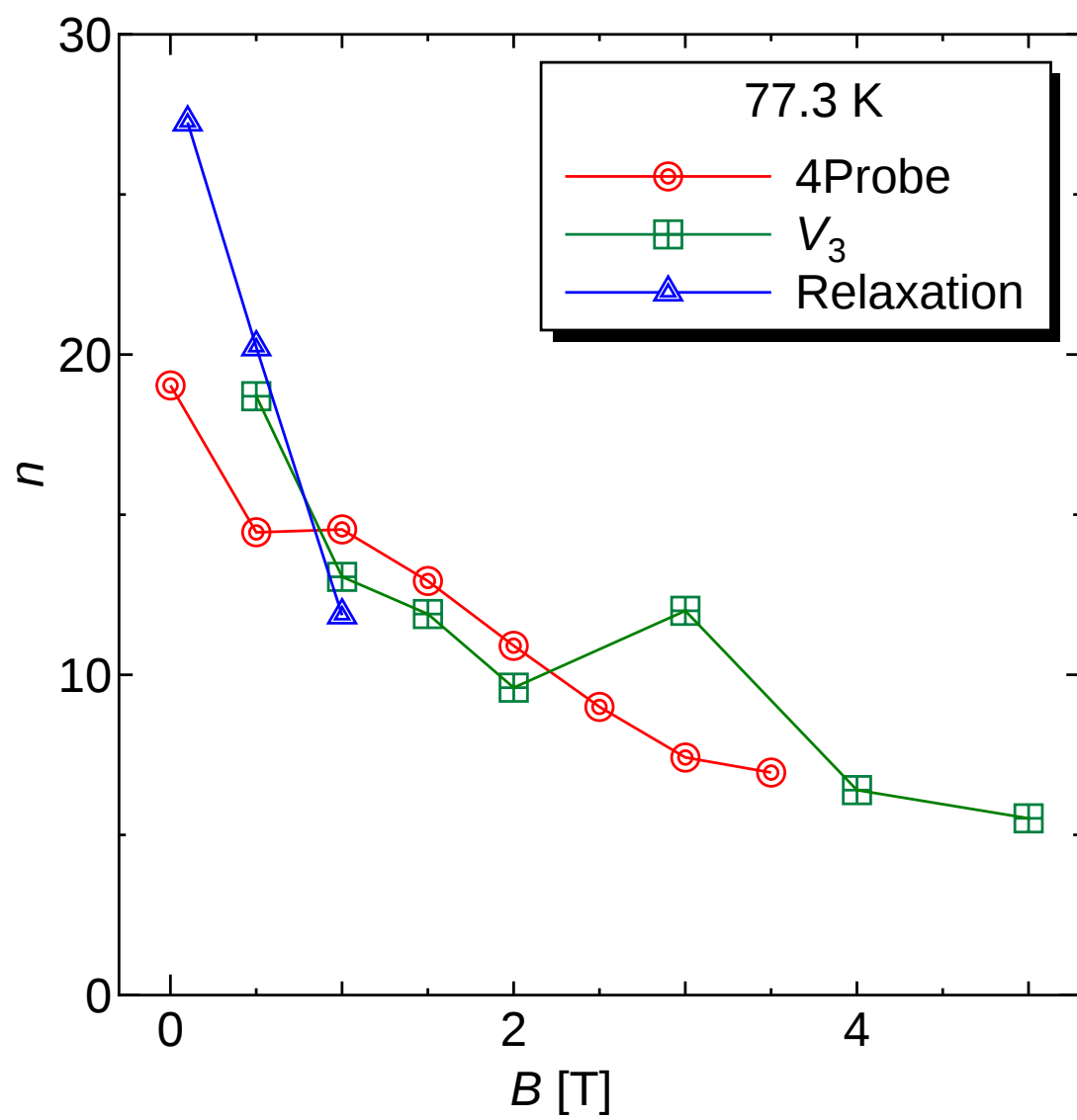


図 3.8 n 値 (77.3K)

第 4 章 結論と今後の課題

4.1 結論

今回、第三高調波電圧誘導法を用いて YBCO coated 線材の E - J 特性を評価した。その結果は他の測定法による結果とほぼ一致しており、これは長尺の coated 線材の非破壊・非接触での臨界電流特性の評価法として第三高調波電圧誘導法が有効であることを示している。

また、今回四端子法と磁化緩和法のちょうど中間にあたる電界領域の E - J 特性を測定することが出来たが、今回よりも更に低い周波数や更に高い周波数を測定することで、より広範囲の E - J 特性を測定することができる。このように、測定する周波数を変えることで、測定される電界領域を容易に選択可能であることもこの測定法の利点であると言える。またこのことから、 n 値を求める手法としても、非常に有効であると言える。

4.2 今後の課題

今回行なった第三高調波電圧誘導法の今後の課題として、

1. キャンセルコイルを設置して測定を行なう

今回の測定中、測定機器によるノイズの影響や、第三高調波電圧以外の何かをデータとして拾ってしまうということがあった。よってキャンセルコイルを設置しキャンセルを取ることで、これらの問題が改善されるのではないかと考えられる。

2. コイルを設置する高さを変えて測定を行なう

コイルを設置する高さ、場所を変えて測定を行なうことでどのような変化が起こるのかを調べる必要がある。

3. コイルを設置する場所を変えて測定を行なう

コイルを設置する高さを高くすれば、超伝導体からの距離が離れるた

め、より大きな電流を流さなければ第3高調波の発生が得られない。つまり、 V_3-I_0 特性において V_3 の立ち上がり点は大きくなると考えられる。また、今回は試料の丁度中心に位置するようにコイルを設置して測定を現在行なっている。試料の設置場所を中心から少しずつ離し、測定するとどのような変化があるのかを調べる必要がある。

4. K の決定についての問題

3.2 節でも述べたように、コイル定数 K は実験値と計算値の間には開きがある。この原因と、解決法を今後検討する必要がある。

5. 高磁界におけるずれの問題

また、図 3.3、図 3.4を見ると、全体としては一致しているものの、高磁界側では他の測定法によるデータとずれが見られる。3.2 節で述べたように、ずれの原因は高磁界側で V_3-I_0 曲線の傾きが小さくなるためという可能性が考えられるが、詳細は今後検討する必要がある。

などが挙げられる。

謝辞

本研究を行なうにあたり、多大なる御指導、助言を頂いた松下照男教授に深く感謝いたします。また、様々な助言、ご協力をして頂いた小田部荘司助教授、木内勝助手、福元陽介さんに深くお礼申し上げます。最後に、公私共々お世話になりました松下研究室、小田部研究室の皆様に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 福元陽介：YBCO-coated 線材の広範囲電界領域における E - J 特性の評価 [九州工業大学卒業論文 平成 15 年]
- 2) SUPERCONDUCTIVITY COMMUNICATIONS, vol12, No.1, Feb2003, 8. 50m 級の高特性 Y-123 線材を開発 - フジクラ -
- 3) J. H. Claassen, M .E .Reeves, R .J .Soulen Jr. , Rev. Sci. Instrum. **62**(1991)996.
- 4) 田中賢一：超伝導薄膜の第 3 高調波誘導電圧の数値計算 [九州工業大学卒業論文 平成 15 年]
- 5) H. Wada, M. Migita, E. S. Otabe, M. Kiuchi, T. Matsushita, Y. Mawatari, H. Yamasaki, Y. Nakagawa, Physica C **392** (2003) 1310.
- 6) Y. Fukumoto, M. Kiuchi, E. S. Otabe, T. Matsushita, H. Sawa, M. Inoue, T. Kiss, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh, ISS2002(2003)
- 7) 松下照男著：磁束ピンニングと電磁現象 (産業図書)