

第三高調波電圧誘導法による 伝導薄膜の
特性評価に関する研究

福元 陽介

平成 17 年 2 月 14 日

目次

付録 A	1
A.1 SQUID による E - J 特性の電界の補正	1
A.2 コイル定数について	3
A.3 遮蔽電流の分布を考慮した第三高調波電圧の数値計算 (可逆も考慮)	3
A.4 新型コイルについて	3
A.5 数値計算の手法の紹介 (余裕があったら)	4
A.6 オリジナルのキャンベルモデルを用いた解析へ向けて	4
A.7 その他	4
A.7.1 <small>世界最強のエディタ</small> Emacs	4

付録 A

A.1 SQUID による E - J 特性の電界の補正

本研究では、第三高調波電圧誘導法の結果を考察するに当たり、その比較対象として2つの測定法を考えている。その一つ、SQUIDによる、磁化緩和測定を YBCO coated の線材ような薄いサンプルで測定を行う場合、電界の値を大幅に補正する必要がある事が最近明らかになった。そこで、この電界を補正する方法について説明する。図 A.1 は SQUID による磁化緩和法と第三高調波電圧誘導法による E - J 特性を比較したものである。第三高調波電圧誘導法による結果は可逆運動によって若干過大評価となっているが、電界領域だけで同一磁界の測定結果を比較すると、SQUID による磁化緩和法による電界領域が場合によっては第三高調波電圧誘導法による電界領域を上回っていることが分かる。また、第三高調波電圧誘導法による J_c を補正するとそれに伴い電界も下がるので、この逆転はさらに顕著になる。

三高調波電圧誘導法による測定で発生する電界は外部磁界を変化させることで強制的に誘導される電界で、例えば電界領域に逆転が見られる領域での交流磁界の周波数は 100 Hz ~ 200 Hz 前後で

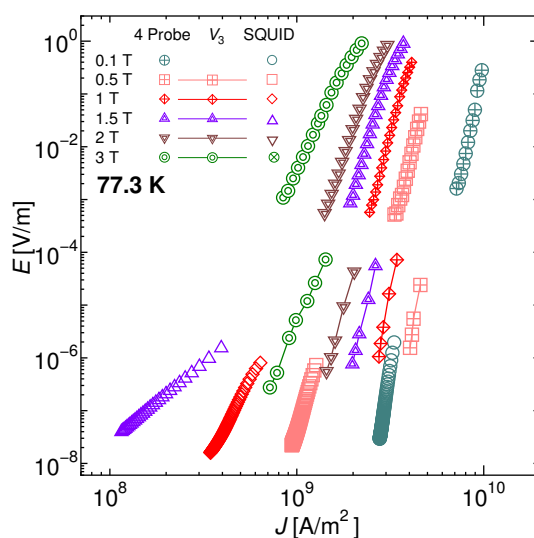


図 A.1 磁化緩和法による電界の過大評価の様子

ある。一方、磁化緩和法で発生する電界は静的な状態で磁化が緩和していく仮定で発生する電界である。このように強制的に誘導されている電界と、自然と磁化が緩和していく仮定で発生する電界が同程度の値を持ってしまうことは、その妥当性を疑われる余地のある結果である。

実際、YBCO coated 線材のような薄膜試料においては、磁化緩和法によって測定された電界領域は補正する必要があることが明らかになった。

この補正について説明を行う前に、磁化緩和法による E - J 特性を見積もる方法について簡単に説明する。

縦、横、高さがそれぞれ w 、 l 、 d の超伝導体に十分な大きさの外部磁界を印可した場合を考える。臨界状態モデルによると、このとき超伝導体内部には図 1 のように一様な大きさの J_c が環流する。この時、図 1 のように微小区間を流れる電流ループを考えると、この部分による磁化は簡単にこのような式で表される。このように、磁化と J_c は一対一対応するので、測定によってある磁気モーメントが測定されると J_c は

式

のような m の式で一意に求まる。電界は磁化の緩和測定から求める。具体的には遮蔽電流が減衰することで変化する超伝導体を貫く磁束を見積もることで、超伝導体の一番外側の表面に発生する電界を計算する。 Φ の変化がそのまま発生する電界につながるため、いかにして Φ を見積もるかが重要になる。

従来は、内部の磁束密度と外部磁界の差から磁化を見積もり Φ を計算していた。なぜなら、ここでは垂直方向の磁束密度しか (サンプルが十分長いことを過程している) 無いと仮定しているため、測定される磁化は図 2 (B_z の分布) の斜線部から求まる磁化にそのまま対応し、つまり、そのまま Φ にも対応したからである。このとき、電界は

式

で簡単に与えられた。これは、内部の磁束密度が z 成分だけを持つ図 2 のような磁束密度を仮定しているからである。しかし、実際にこのような仮定が厳密に成立するのは、サンプルが z 方向に十分長い場合のみである。この仮定がある場合に限り、 J_c は Φ に直接つながる B_z と一対一対応、つまり測定された磁化と Φ に一対一対応する。

しかし、実際には特に YBCO coated 線材のような薄いサンプルの場合、仮定した状況とはほど遠い状態にある。図 3 (a) はサンプルが薄い場合の実際の磁束密度の様子を模式的に表したもので図 3 (b) がこれまで仮定していた磁束密度である。十分厚い場合は図 3 (a) は図 3 (b) に近づくが、このように薄い場合状況は大幅に異なる。仮定しているのはどちらも内部を J_c が環流している状態だが、厚い場合が B_z のみが J_c に対応するのと異なり薄いと B_z 、 B_x どちらもが J_c に関係してくる。従って、 Φ に対応する B_z は図 3 のように仮定より大幅に小さくなる。このように、従来の仮定を薄い試料に直接当てはめた場合、その仮定で得られた Φ は、実際より大幅に大きい値となる。 Φ は電界に直接関係するので、この Φ を大きく見積もったことが電界を過大評価した原因である。

この Φ が小さくなる原因は次のように直感的にも説明可能である。シリンダーの重ね合わせと、リングの重ね合わせの時の内部の磁束密度分布。

このような過大評価を補正するには、薄いサンプルを J_c が流れるときにサンプルを貫く実際の Φ が、これまでの見積もりに比べてどれだけ小さいかを求めればよい。最も簡単な見積もり方法は細い導体でできた一巻きの円形コイルの自己インダクタンスを比較する方法である。つまり、一巻きコイルの自己インダクタンスを正確に計算した場合と、この一巻きコイルを十分長いシリンダーと見なして計算したインダクタンスの比較である。仮定した磁束密度と実際の磁束密度は図 のように与えられる。一巻きコイルの自己インダクタンスは解析的に得られているので、この値との比較になる。具体的には以下のように与えられる

式
式

厳密に Φ を求めるには数値的な計算が必要になる。数値計算で得られた Φ を図 (上の式のやつも併せて) に示す。具体的な方法は付録 に示すが、 d が大きくなるにつれてその比は 1 に近づいていることが分かる。具体的な値は例えば、サイズがこれこれのサンプルの場合、上記式で得られた値が約 750 程度、一方数値計算では????このくらいの値となる。

A.2 コイル定数について

第三高調波電圧誘導法ではサンプル直上に微小コイルを設置し、サンプルに交流磁界を印加する。この時、サンプル表面に印加される磁界を決定する定数としてコイル定数が用いられる。具体的にはサンプル表面に印加される磁界の平行成分^{*1}の強さをコイルの中心からの距離でプロットし、それが最大となる場所 (第三高調波電圧を一番最初に誘導する部分) での強さを決定する。

コイル定数は

$$\frac{N}{4\pi S} \int_{R_1}^{R_2} d\rho' \int_0^{2\pi} d\theta \int_{z_1}^{z_2} dz \frac{\rho' z \cos \theta}{R^3} \quad (\text{A.1})$$

で計算できる。ただし、

$$R = (z^2 + \rho^2 + \rho'^2 - 2\rho\rho' \cos \theta)^{1/2} \quad (\text{A.2})$$

これは数値的に計算できるが、この式を用いなくても数値的には計算可能である。

A.3 遮蔽電流の分布を考慮した第三高調波電圧の数値計算 (可逆も考慮)

こんな感じで、計算可能である。結果は以下の通り。

A.4 新型コイルについて

こんな理由でノイズに強そう。具体的に計算。

^{*1} サンプル表面での磁界のは AC コイルによる磁界と遮蔽電流による磁界であるが、遮蔽電流による磁界は理想的には鏡像電流と見なせるので、理想的にはサンプル表面での磁界は対称性よりサンプル表面に平行な成分のみである。

A.5 数値計算の手法の紹介 (余裕があったら)

今回の研究に限らず、様々な場面で数値計算が有力な解析手段となりうる。本節では数値計算のうちでも、特に使用することが多い数値積分 (多重積分) の手法としてモンテカルロ法について説明を行う。

一般によく用いられる数値積分の手法としては台形公式やシンプソン公式がある。これらの方法は、積分範囲を台形や二次関数に分割しそれを足し合わせることで積分を行う。シンプルな手法なので、実装も容易であるが多重積分になると困難なことが多い。筆者は研究で五十席分を行う必要に迫られたが、モンテカルロ法を用いると多重度が高くなっても実装の難易度はさほど変わらない。

A.6 オリジナルのキャンベルモデルを用いた解析へ向けて

今分かっていることをつらつらと

A.7 その他

A.7.1 世界最強のエディタ Emacs

Emacs は世界最強のテキストエディタです。研究室、特に大学院に進学すると研究に関連して様々なテキストを入力する必要があります。学会用の論文や、予稿だと $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ を用いますし、研究用の解析プログラムを書く必要多いと思います。このようなテキストの入力に使用するソフトウェアをテキストエディタといい、それこそ、ノートパッドのようなシンプルなものから秀丸のような高機能なものまで、多くのエディタが出回ってます。Emacs はそのようなエディタの一つに分類されるソフトウェアで、Linux にはほぼ標準で入っておりますので、使用されているかたも多いと思います。

BillGates

みたいな感じでつらつらとかく??

ngraph で改行 Excel で保存する時注意。桁落ちします。