

有限要素法を用いた第三高調波電圧誘導法測定時における  $n$  値の影響

04232005 小田部研究室 岩本 賢太郎

**研究背景** 近年、超伝導ケーブルのような超伝導体を用いた製品の実用化に伴い、超伝導体の長尺化・大型化が進んでいる。そこで製造された超伝導体の臨界電流密度特性を効率よく評価する測定方法が必要とされている。本研究では、測定が容易でサンプルを非破壊・非接触で測定可能な第三高調波電圧誘導法に着目した。第三高調波電圧誘導法では超伝導薄膜の直上に設置したコイルに交流電流  $I_0 \cos \omega t$  を通電し、コイルの発生磁界を遮蔽する超伝導薄膜の電流によりコイルに誘導される電圧に第三高調波電圧  $V_3$  が発生しはじめる電流振幅  $I_{th}$  より臨界電流密度  $J_c$  を求める。しかしながら、 $V_3$  は  $I_{th}$  以下の電流値においても緩やかに発生しており、 $V_3$  の発生を正確に検出することは困難である。そこで本研究では電界  $E$  が電流密度  $J$  の  $n$  乗に比例する  $n$  値モデルを用いた数値解析によって求めた  $V_3/I_0-I_0$  曲線に対して、四端子法の測定でよく用いられている off-set 法を用いて  $I_{th}$  を求めた。また、 $I_{th}$  周辺での超伝導体内部の磁束密度や電流密度の分布を解析することで、第三高調波電圧誘導法によって求まる  $J_c$  の妥当性を検証することを目的とした。

**解析方法** 今回の解析に用いたコイルと超伝導薄膜の概要を図1に示す。図の枠の部分の解析モデルを解析ソフト JMAG Studio 9.0 を用いて作成した。コイルの巻き数は400回、基準となる電界  $E_c$  を発生しているときの超伝導体の電流密度  $J_c$  は  $2.60 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$ 、電界基準  $E_c$  は  $1.00 \times 10^{-4} \text{ V/m}$ 、超伝導-常伝導転移の鋭さを示す  $n$  値は  $10 \sim 40$  の範囲で変化させた。コイルに通電した電流の周波数は  $1000 \text{ Hz}$  であり、3周期分を計算して波形の安定する3周期目を1周期分解析に用いた。

**解析結果** 図2に  $n$  値が  $10, 20, 30, 40$  の時の  $V_3-I_0$  特性を示す。挿入図は  $n$  値が  $30$  の場合の  $V_3-I_0$  の傾きの変化が明確に読み取れるように縦軸を  $V_3/I_0$  としたグラフであり、傾きの変化が顕著な  $0.100 \text{ A}$  から  $0.180 \text{ A}$  の部分について拡大表示している。更に off-set 法によって  $I_0$  が十分に小さい領域から引いた接線と  $V_3/I_0$  が  $50 \mu\text{V}$  となる点付近から引いた接線の交点から、 $I_{th}$  を  $0.140 \pm 0.002 \text{ A}$  とした。求めた  $I_{th}$  から計算して得られた  $J_c$  は  $(2.63 \pm 0.040) \times 10^{10} \text{ A/m}^2$  であり、これは  $2.60 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$  に対して  $-0.39 \sim 2.7\%$  の誤差となっている。他の  $n$  値についても同様に計算したところ、 $n$  値が  $40$  の時に  $I_{th}$  は  $0.138 \pm 0.001 \text{ A}$  となり、得られた  $J_c$  は  $(2.59 \pm 0.020) \times 10^{10} \text{ A/m}^2$  で誤差は  $-1.2 \sim 0.39\%$  と、 $n$  値が  $30$  の時と比較して誤差の範囲は減少している。一方  $n$  値が  $20$  の時は  $I_{th}$  が  $0.146 \pm 0.005 \text{ A}$  となり、 $J_c$  は  $(2.74 \pm 0.100) \times 10^{10} \text{ A/m}^2$  で、誤差は  $1.5 \sim 9.2\%$  にも及ぶ。更に低い  $n$  値が  $10$  の場合では、 $I_{th}$  は  $0.173 \pm 0.010 \text{ A}$  で  $J_c$  は  $(3.25 \pm 0.190) \times 10^{10} \text{ A/m}^2$  と高く、誤差も  $18 \sim 32\%$  にも及ぶことが明らかとなった。また、 $n$  値が  $20$  から  $30$  の間について細かく解析したところ、 $n$  値が  $27$  のときに  $I_{th}$  が  $0.142 \pm 0.003 \text{ A}$  となり、 $J_c$  が  $(2.67 \pm 0.060) \times 10^{10} \text{ A/m}^2$  で誤差が  $\pm 5.0\%$  以内に収まること明らかとなった。

**考察** off-set 法によって求めた  $I_{th}$  から計算される  $J_c$  は、 $n$  値が増加するに従って、設定で与えた真の  $J_c$  である  $2.60 \times 10^{10} \text{ A/m}^2$  との誤差が減少する傾向にあることが本研究で明らかとなった。この誤差の許容範囲を  $\pm 5.0\%$  以内と定義すると、許容範囲内の  $J_c$  を得られる  $n$  値は  $27$  以上であると言える。また、低い  $n$  値の場合は  $V_3/I_0-I_0$  曲線がゆるやかに立ち上がるため、off-set 法によって接線を引く際にも  $n$  値が減少するにつれて接線の傾きのばらつきが増加するという傾向が見受けられる。 $n$  値が  $27$  の場合ならば接線の取り方による  $I_{th}$  の誤差は  $\pm 0.003 \text{ A}$  なので有効数字3桁を確保可能だが、 $n$  値が  $20$  の場合だと接線の取り方による  $I_{th}$  の誤差が  $\pm 0.005 \text{ A}$  となり、有効数字は2桁となってしまう、計算結果の精度を保つことは困難である。よって、 $n$  値が小さい場合は接線を決定することが難しく、得られる  $I_{th}$  の評価に多大な誤差を含むものと考えられる。以上の考察より、off-set 法を用いて  $J_c$  を正しく評価可能な  $n$  値は  $27$  以上であるということが分かった。

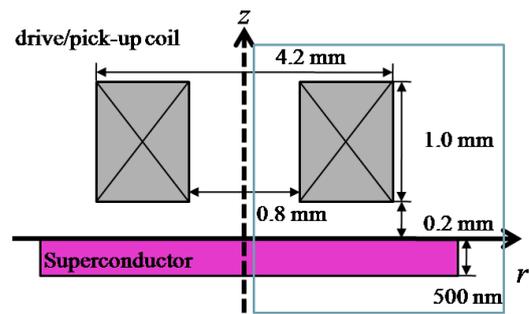
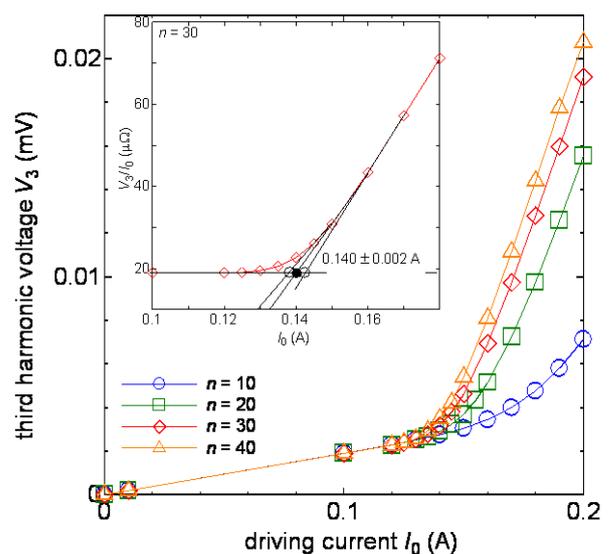


図1. 解析に用いたモデル

図2.  $n=30$  の場合の  $V_3-I_0$  特性

## 【研究業績】

1. 第三高調波電圧誘導法測定時における有限要素法を用いた  $n$  値モデルの検証 (応用物理学会 2007 秋)