

はじめに 十分広い超伝導薄膜の臨界電流密度 J_c を非破壊、非接触で測定する方法として、薄膜の直上に小さなコイルを設置して交流電流 $I_0 \cos \omega t$ を流し、薄膜の遮蔽電流によってコイルに誘導される電圧の第三高調波成分の振幅 V_3 を測定する方法が用いられている。 V_3 - I_0 の関係は近似的に超伝導薄膜に加わる磁界が遮蔽電流のため表面に平行になると仮定して、臨界状態モデルを用いて近似的に導くことができる [1]。この誘導法による J_c 測定は薄膜だけでなく、バルクや厚膜でも有効な事を馬渡らは理論的に示した [2]。しかし、厚膜試料での理論と実際の実験結果を比較すると、 V_3 と I_0 の関係において I_0 を大きくしていくと、理論値は実験値からはずれ始め、厚膜に流れる遮蔽電流が臨界値に達する閾値電流 I_{th} 近くでは V_3 の値が理論よりかなり小さくなっている。また、 I_{th} 付近の V_3 の挙動について、理論的にまだ明らかにされていない。さらに、実際には超伝導厚膜の表面に対して平行でない磁界を持つ領域が存在しており、この影響も明らかではない。しかしながらこのような振る舞いを解析的に明らかにすることはひじょうに困難であるので、本研究ではこの現象を有限要素法 (FEM) を用いて数値計算し、その結果を理論により求めた結果と比較及び検討する。

数値計算 数値計算には日本総研の JMAG studio 8 を用いた。厚さが 0.4 mm、 $J_c = 1.0 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ の超伝導厚膜の 0.25 mm 上部に、内径 1.0 mm、外径 3.6 mm、高さ 1.0 mm のコイル (巻き数 400 回) を設置した。このモデルの断面図を図 1 に示す。また、軸に関する対称性より全体の領域の 1/360 である 1 度の方角の領域内部について、超伝導体内に臨界状態モデルを仮定して磁束密度分布を求めた。各 I_0 に対してコイルに鎖交する磁束からコイルに誘導される電圧を計算し、それをフーリエ級数展開して V_3 を求めた。

結果および検討 図 2 に FEM によって得られた V_3 - I_0 特性を示す。実線は理論による結果である。 $I_0 < 20 \text{ mA}$ では理論と同様に V_3 は I_0 の 2 乗に比例しているが、 $I_0 > 20 \text{ mA}$ では V_3 は理論値からはずれはじめている。理論と FEM での違いをみるため、超伝導体内の遮蔽電流の分布を求めた。このときの各電流振幅 I_0 における超伝導厚膜断面の電流分布を図 3 に示す (左端がコイルの中心に対応する)。 $I_0 = 10 \text{ mA}$, 20 mA の場合は理論とほぼ同じような分布をしているが、 $I_0 = 40 \text{ mA}$, 56 mA の場合は、FEM の電流分布が理論よりも中心側にずれており、分布がかなり違うことがわかる。これは理論では厚膜表面に平行な磁界のみを仮定しているのに対し、厚膜表面に垂直な磁界の影響によって電流分布にずれが生じるからと考えられる。図 3 の領域 (a) は磁界の垂直成分が強い中心に近い部分で電流が理論より深さ方向 ($-z$ 軸方向) に多く分布しているが、この部分は遮蔽電流のループ径が小さいために V_3 の値の増加にほとんど寄与していない。それに対して、それに対して、電流が理論より少ない中心から遠い領域 (b) は遮蔽電流のループ径がコイルの径とほぼ同じであるので、 V_3 の減少に寄与してい

ると考えられる。したがって、 V_3 の値が理論値とずれるのは、磁界の垂直成分から生じる電流分布のずれが影響していると考えられる。

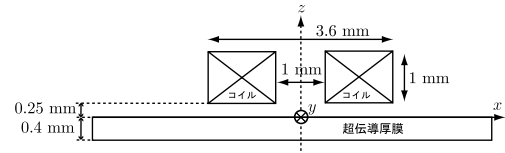


図 1 : FEM で計算したモデルの断面図

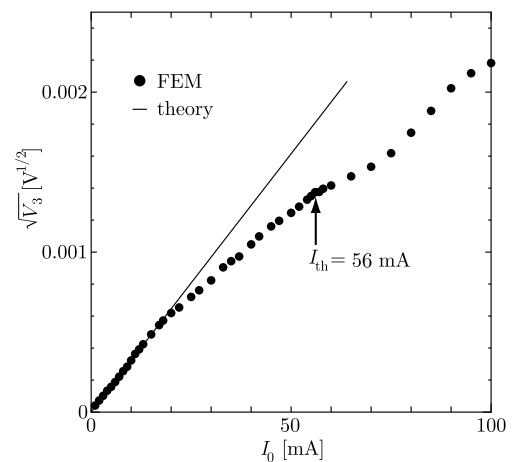


図 2 : V_3 - I_0 特性

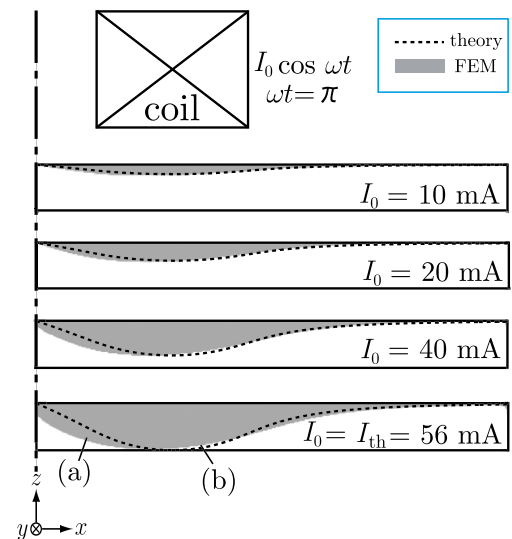


図 3 : 厚膜内の遮蔽電流分布

[参考文献]

- [1] Y. Mawatari, H. Yamasaki, Y. Nakagawa : *Appl. Phys. Lett.* 81, 2424 (2002).
- [2] Y. Mawatari, H. Yamasaki, Y. Nakagawa : *Appl. Phys. Lett.* 83, 3972 (2003).