

所属専門分野	電子情報工学分野 (小田部研究室)		
学籍番号	06674076	氏名	吉田 貴昭
論文題目	n 値モデルを用いた超伝導体の電磁界計算に関する研究		

1. はじめに 超伝導体は電力ケーブルなどの様々な応用が期待されており、電力応用ではとくに交流損失が重要なパラメーターとなる。超伝導体の交流損失は電界-電流密度 (E - J) 特性より評価でき、数値計算により損失を評価する場合に臨界状態モデルや直流定常通電状態における E - J 特性を

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (1)$$

と表す n 値モデルなどが用いられる¹⁾。しかし、交流の場合に n 値モデルによって E - J 特性の数値計算を行うのは致命的な誤りを含む可能性があることを発見した。

本研究においては、超伝導薄膜の表面に対して平行に交流磁界を印加した場合において n 値モデルを用いた有限要素法による数値解析を行い、様々な n 値における表面の電流密度及び電界の時間依存性を詳細に見るとともに、Bi-2223 銀シーステープ線材及び YBCO-coated 線材に対して交流損失の測定を行い、測定結果と数値計算結果の比較を行うことで、交流における n 値モデルの問題点を明らかにする。

2. 実験及び解析 測定に用いた資料は PIT 法により作製された Bi-2223 銀シーステープ線材及び IBAD/PLD 法により作製された YBCO-coated 線材である。各試料の諸元を表 1 に示す。測定は液体窒素中の 77.3 K において行い、磁界を試料表面に対して垂直方向に 0 - 0.4 T まで印加した。電界基準 E_c が 100 μ V/m となるところで臨界電流密度 J_c を決定し、 n 値は電界が 1.0×10^{-4} - 1.0×10^{-3} V/m の範囲で決定した。交流損失においては、測定される電圧に抵抗成分と誘導成分が含まれるため、キャンセルングによって誘導成分を除去した。有限要素法による数値解析は A - ϕ 法を用いて行い、超伝導体内部の磁束密度及び電流密度を求め、得られた電流密度から (1) 式に示す n 値モデルにより電界を求めた。

表 1 試料の諸元

試料	J_c (A/m ²) [77.3 K, 0 T]	T_c (K)
Bi-2223	6.82×10^7	110
YBCO	2.07×10^{10}	87.2

3. 結果及び検討 図 1 に、超伝導層表面に交流磁界 $H_0 \cos \omega t$ が印加されている条件下で、各 n 値での数値計算による電界の時間依存性と、Bean モデル及び Irie-Yamafuji モデルによる理論値をあわせて示す。位相が $3\pi/4 < \omega t < \pi$ の範囲で大きな違いが見られ、 n 値が低いほどその違いは顕著である。電界の最大値に注目すれば、 $n \geq 30$ では理論値と一致するが、 $n \leq 25$ では $\omega t = \pi$ で最大をとっている。本来ならば $\omega t = \pi$ において磁束密度の変化がゼロとなるため電界はゼロとならなければならないが、 n 値モデルが大きな誤りを含んでいることが分かる。

図 2 に各 n 値における交流損失の測定値 W_{exp} 及び有限要素法による数値計算結果 W_{FEM} を示す。損失は各 n 値において W_{exp} よりも W_{FEM} が大きく n 値が低いほど W_{FEM} の過大評価の割合が大きくなる。 $n = 24.6$ の時、 $I_p = 5.0$ A で $W_{\text{FEM}}/W_{\text{exp}} = 1.27$ であり、30 % 弱の過大評価が見られた。

4. まとめ $n \leq 25$ では電界が $\omega t = \pi$ において最大となったが、本質的には超伝導体内部で発生する電界は磁束線の移動によるものであり、磁束密度の変化がゼロとなる $\omega t = \pi$ において電界もゼロとなる Bean モデル及び Irie-Yamafuji モデルによる理論値が正しく、 n 値モデルによる電界は誤りを含むことが分かった。また、交流損失などの数値解析を行う場合、 n 値が 30 程度以上なければ正しい数値計算は出来ないと予想され、特に Bi-2223 銀シーステープ線材のように、 n 値が低い線材において注意が必要である。

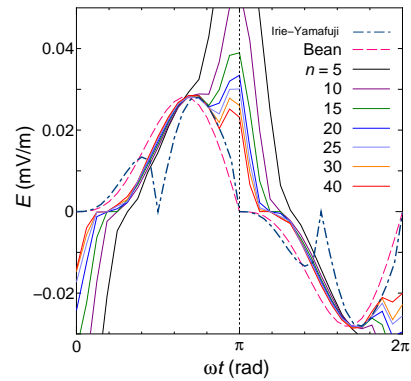


図 1. n 値モデルによる計算値と Bean モデル及び Irie-Yamafuji モデルによる理論値の比較

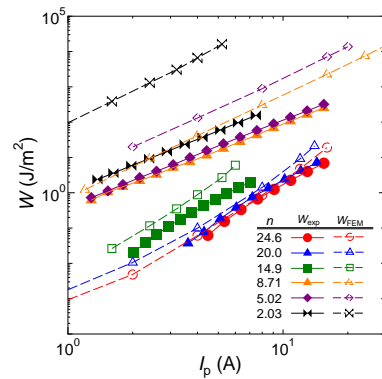


図 2. 各 n 値における交流損失の測定結果及び数値計算結果の比較

【参考文献】

1) 渡辺ら, 九州工業大学卒業論文 (2003)

【研究業績】

- (1) 応用物理学会 (2006 秋, 2007 春)
- (2) 低温工学・超電導学会 (2006 秋, 2007 春, 秋)
- (3) International Symposium on Superconductivity (2006, 2007)