

# 有限要素法による超伝導体の交流電損失の数値解析

99232093 松下研究室 渡辺 忠明

**1. 研究背景** 超伝導体は完全反磁性やゼロ抵抗といった、通常の物質では見られない特徴的な性質を示し、その応用が広く期待されている。既に応用されているものとしては、医療用MRIや産業用超伝導マグネット、高精度磁気センサーなどが挙げられる。しかしながら、これらに使われている超伝導体は金属超伝導体であり臨界温度 $T_c$ (常伝導状態から超伝導状態に移る温度)が低く冷却コストがかかる。そこで、現在注目されているのが酸化物超伝導体の実用化であり、現在開発が進んでいる交流応用機器の代表例として超伝導電力輸送ケーブルや抵抗型超伝導限流器などが挙げられる。

**2. 本研究の目的** 本来、超伝導体において、臨界電流密度 $J_c$ (抵抗無しで流せる最大の電流密度)以下では定常電流を無損失で通電することができるが、交流、もしくは変動する直流電流であれば、 $J_c$ 以下であっても損失は生じる。従って、超伝導体を交流条件下で使用する場合、交流損失を考慮しなければならない。

また、超伝導体を用いた機器の開発に際して、実際に超伝導試料を作成して電磁特性を測定し、その結果をフィードバックして新たに試料を作成する、といった手順を取ると、効率が悪く、コストもかさんでしまう。そこで、試料を作成する前に、あらかじめ目的の試料の特性を理論計算または数値計算などで予想することができれば非常に有意義である。しかしながら、複雑な形状をした試料の電磁現象を理論計算によって見積もるためには、自己無矛盾の磁束分布解を求める必要があり、非常に困難である。このような場合の電磁現象を見積もる方法の一つとして、有限要素法(以下FEMと述べる)が挙げられる。これを用いて $J_c$ の磁界依存性、試料の形状依存性を考慮し、交流電損失の評価を行なう。また、より現実的な解析のために、磁束クリープの影響を近似的に表現するモデルとして、電界 $E$ と電流密度 $J$ の関係を $E = E_c(J/J_c)^n$ で近似した $n$ 値モデルでの解析を試みる。

**3. FEMによる解析結果および検討** 図1は、 $J_c$ が磁界に依存せず一定であるというBeanモデルを仮定した場合に、超伝導体の断面がいろいろなアスペクト比の矩形のときと円のとき(Norrisの式<sup>1)</sup>)の損失の比較を表している。ただし、断面積は $4.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ で一定であるという条件の下である。この図より、アスペクト比が大きくなるに従って損失が小さくなる傾向が示された。アスペクト比を大きくすると、超伝導体の外周が長くなり、磁束の侵入距離が短くなるため、損失が小さくなると考えられる。また、超伝導体の外周 $l$ と損失 $W$ の間には

$$W \propto l^{-2} \quad (1)$$

の関係があることが示せる。これによると、アスペクト比を無限大にした場合、損失がゼロになる。

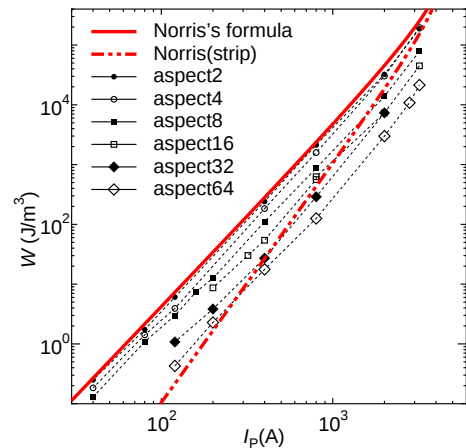


図: 1 矩形断面の各アスペクト比による損失と円断面での損失との比較

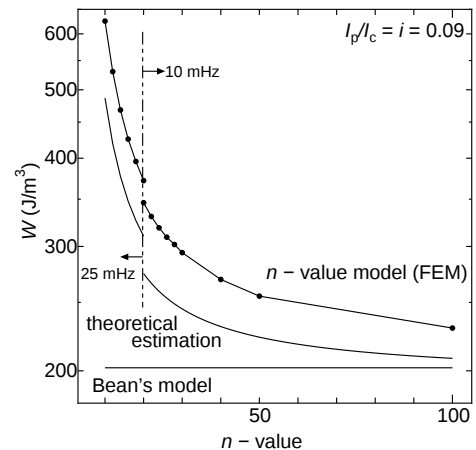


図: 2 FEMと理論的見積もりとの比較

一方、厚さのない有限幅の無限長平板の交流損失は以下のようなNorrisのstripモデル<sup>1)</sup>が実験結果によく一致することが知られている。

$$W = \frac{\mu_0 I_c^2}{\pi S} \{ (1+i) \log(1+i) - i^2 + (1-i) \log(1-i) \} \quad (2)$$

これによると、アスペクト比には依存しない。また図1において、我々が仮定している矩形断面の損失の電流依存性とNorrisのstripモデルのそれは異なっている。このような違いは、仮定している形状が違うことが原因にあると考えられるが、この理論的説明は今後の課題である。

また、 $n$ 値モデルを用いた円断面超伝導体の数値解析を行なった結果(図2)、定性的には問題はないものの、理論的見積もりにおいて多少の誤差(最大で1.2倍程度)を含んでおり、今後より正確な見積もりが必要である。

## 【参考文献】

- 1) W. T. Norris: J. Phys. D (Appl. Phys.) **3** (1970) 489.