

1. はじめに 現在開発が進んでいる酸化物超伝導体を用いた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限流器などが挙げられる。本来、超伝導体に臨界電流 (I_c) 以下の定常電流を通電しても抵抗はゼロであるので、損失は発生しないが、交流電流を通電すると、 I_c 以下の電流であっても、交流損失が発生する。従って、超伝導体を交流条件下で使用する場合は、交流損失を考慮しなければならない。

一方で、Y-123 バルク超伝導体などの I_c は液体窒素温度で数 100 A を超えるものもあり、十分な電流での交流損失の測定には超伝導体の I_c に見合った電流源を確保しなければならない。一般に数 100 A を超える電流源は非常に高価であるため、本研究では小電流源と超伝導トランスを組み合わせ、交流損失測定用の温調可能な伝導冷却型 1000 A 級超伝導トランスを作製した。

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ことは、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。これを用いて臨界電流密度 (J_c) の磁界依存性、試料の形状依存性を考慮し、損失の実験結果の説明を試みる。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。

2. 伝導冷却型 1000 A 級超伝導トランスの製作

2 台の冷凍機を用いた試料温調可能な 1000 A 級超伝導トランスを作製した。トランス真空容器の外形は直径約 600 mmφ、高さ約 1000 mm となっている。検証の結果、一次側と二次側の変流比はおよそ 72 倍であり、1 ~ 75 Hz の周波数範囲で、二次側に 1000 A を超える電流をゆがみや位相ずれなしで誘起できることを確認した。さらに、サンプル部の温調や、通電による巻線の温度上昇などの影響が、お互いに影響し合わないことも確認された。

作製された 1000 A トランスを用いて、銀シース Bi-2223 超伝導多芯線材の交流損失を測定した (Fig. 1)。楕円断面の Norris の理論式との比較の結果、特に低電流領域で、両者にずれが生じていることが分かる。この原因として、実際の超伝導体には J_c の磁界依存性があるが、Norris の式は磁界依存性のない Bean モデルを仮定しているためだと考えられる (次節参照)。

3. FEM による解析結果および検討 円断面超伝導体において、磁界の増加に伴って J_c が単調に減少するような一般的な磁界依存性を考慮した場合、通電電流に対する損失の傾きが大きくなる傾向が伺えた。これは、通電電流が増加すると、自己磁界の増加に伴って J_c が低下するためだと考えられる。一般に J_c が低いと損失は大きくなる。

また、磁界依存性の無い、 J_c 一定の Bean モデルを仮定した矩形断面超伝導体において、断面積を

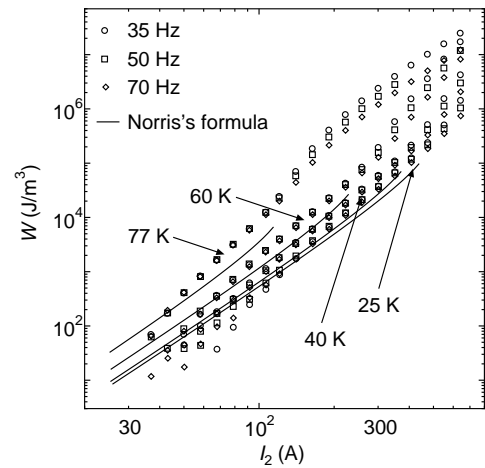


Fig. 1 1000 A トランスにより測定された各温度での Bi-2223 の通電交流損失。

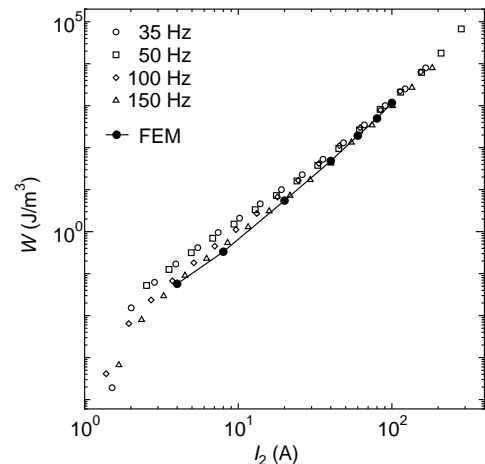


Fig. 2 Y-123 バルク超伝導体の損失と FEM による解析結果。

保った状態でアスペクト比を大きくすると、損失が小さくなる傾向が伺えた。これは、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に損失が小さくなるのだと考えられる。

これら、磁界依存性と形状依存性を考慮して、以前に測定された QMG 法 Y-123 バルク超伝導体の損失を FEM で数値計算した (Fig. 2)。ただし、 J_c の磁界依存性は SQUID 磁力計により測定された磁化のヒステリシスから見積もったものを用いた。Fig. 2 から分かるように、FEM での計算が実験結果をよく表現できていることが分かる。これらのことから、磁界依存性および形状依存性を考慮した、より現実的な超伝導体の損失の見積もりに FEM が有効であると考えられる。

一方、 n 値モデルにおける円断面の超伝導体の損失の解析を行った結果、定性的には問題ないが、定量的には理論の見積もり値から最大で 1.5 倍程度の誤差あり、今後検証が必要だと考えられる。

研究業績

- (1) 電気学会九州支部 (2001, 2002)
- (2) 応用物理学会 (2002)
- (3) 応用物理学会九州支部 (2001, 2002)
- (4) 低温工学超伝導学会 (2001 秋, 2002 春, 2002 秋)
- (5) International Symposium on Superconductivity, (2002)