

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 杉田 晋哉

本論文は「超電導薄膜を用いた抵抗形限流素子の数値解析に関する研究」と題し、高温超電導薄膜の超電導-常電導転移 (SN 転移) に基づく抵抗形限流素子の限流特性や交流損失特性の解析のためのシミュレーション技術を確立し、これらの特性と限流素子中の電磁現象等をまとめたものであり、7章から構成される。

第1章は「序論」であり、超電導体中の電磁現象、超電導限流器と超電導薄膜テープ線材の研究状況を整理し、超電導薄膜を用いた抵抗形限流器の特徴と技術的課題を明らかにした上で、本研究の目的と内容について述べている。

第2章は「有限要素法による解析手法」と題し、超電導薄膜を用いた抵抗形限流素子の解析に適した有限要素法による解析手法について述べている。本解析は、二次元電磁界解析、三次元熱伝導解析および電気回路からなる三連成解析であり、そのための解析コードを開発した。電磁界解析では、電流ベクトルポテンシャル法に薄板近似を適用し、超電導体の電流電圧特性はべき乗則でモデル化して等価的な抵抗率として組み込んでいる。超電導薄膜上の金属保護膜の影響も考慮した解析手法となっている。また、限流動作時のスイッチング解析の精度を高めるための工夫が施されている。

第3章は「偏流特性解析」と題し、超電導薄膜における交流通電時の偏流現象について述べている。まず、超電導薄膜に生じる偏流現象の概要を述べている。次に、限流素子中の電流分布の解析を行い、ホール素子を用いた測定結果との比較から、解析手法の妥当性を確認した。交流通電時には、電流分布は薄膜端部から急激に変化して徐々に内部が追従していく様子を確認し、磁束フロー抵抗が端部で大きいことを示した。また、 $1\ \mu\text{V}/\text{cm}$  の電界基準による臨界電流以下の交流通電の場合でも薄膜端部では臨界電流密度以上の電流が流れること、および、臨界電流の約1.3倍程度の通電で偏流が緩和されて電流分布が均一になることを見出した。通常、限流素子の限流動作開始電流は臨界電流の2倍程度であるから、限流動作時には電流分布を均一であることを明らかにした。

第4章は「限流特性解析」と題し、限流素子の限流特性の解析結果について述べている。超電導薄膜中に超電導特性のバラツキがない場合とある場合の電流分布を比較し、両者の違いを考察している。臨界電流の低い部分での磁束流抵抗は大きいため、その部分を迂回して電流が流れることを確認し、その様子をベクトル表示で可視化している。また、超電導特性のバラツキの程度を変化させて、抵抗発生過程と限流特性の違いを述べている。さらに、解析結果からSN転移伝播速度に算出し、 $20\sim 100\ \text{m/s}$ であることを示した。これらは、提案する解析手法が限流素子の最適設計や物理現象の理解に有用であることを示している。

第5章は「復帰特性解析」と題し、限流動作後の超電導状態への復帰特性の解析結果を述べている。液体窒素の冷却特性は素子表面の状態などで決まるため、ここでは5通りの液体窒素の沸騰曲線を仮定し、基板厚(0.1-1.0mm)と初期温度(100-500K)の違いが復帰特性に与える影響を議論している。液体窒素の冷却特性が良好である場合には、1.0秒以内に超電導状態に復帰する可能性があることを示した。

第6章は「交流損失特性解析」と題し、超電導薄膜の交流損失特性の解析結果について述べている。測定値と良く一致する Norris の解析式から得られる理論値と解析結果を比較している。両者は良く一致し、解析手法の妥当性を示している。また、Norris の解析式のストリップモデル、楕円モデルと解析結果の差異についても言及している。この原因として、Norris の解析式で想定している Bean モデルとは異なり、実際には磁束フローが生じる部分と生じない部分が不連続に存在するのではないこと、および、磁束フローが生じる部分での磁束フロー抵抗は一樣ではないことを挙げている。提案する解析手法は次世代超電導線材として期待される YBCO テープ線材の交流損失の見積りにも有用である。

第7章は「結論」であり、本研究の成果を総括している。

以上これを要するに、本論文は、高温超電導薄膜の超電導-常電導転移 (SN 転移) に基づく抵抗形限流素子に関して、発熱と冷却、外部電気回路等を考慮して素子内部の電磁現象を詳細に解析するシミュレーション技術の確立と解析コードの開発を行い、さらにその解析手法を用いて抵抗形限流素子の限流動作特性、交流損失特性等を明らかにしたものであり、電気工学および超電導工学に貢献するところが多い。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。