

京都大学	博士（工学）	氏名	重 政 茉 於
論文題目	短尺直線状銅複合マルチフィラメント薄膜高温超伝導線およびSCSCケーブルにおける磁化損失測定実験、並びにSCSCケーブルにおけるヒステリシス損失の実験則と解析式に基づく評価法の検討		
（論文内容の要旨） 本論文は、SCSCケーブルと呼ばれる高温超伝導集合導体を対象とし、その最大の特徴である低交流損失特性を初めて詳細に明らかにし、その理論予測につながる解析式の適用法について提案したものであって、8章からなっている。 第1章は序論であり、高温超伝導体の応用可能性、薄膜高温超伝導線における磁化損失、薄膜高温超伝導線やSCSCケーブルの応用上の課題について説明し、本論文の構成を示している。特に、薄膜高温超伝導線における集合導体の必要性、交流で用いたときに発生する交流損失の低減の必要性に言及し、交流損失を低減し得る集合導体として提案されているSCSCケーブルと、それを構成する銅複合マルチフィラメント線について紹介し、さらに、SCSCケーブルの交流損失特性については十分明らかにされていないことを指摘している。そして、本論文では、その交流損失特性の詳細を明らかにし、このうちヒステリシス損失の実験値について、これをよく説明するための解析式の適用法を提案していると述べている。 第2章は銅複合マルチフィラメント線の電磁特性について説明する章であり、まず、第一種超伝導体と第二種超伝導体について説明し、後者の電磁特性を記述する臨界状態モデル、高温超伝導線の緩やかな電界—電流密度特性を表現するためのn値モデルについて紹介している。そののち、ヒステリシス損失、結合損失、渦電流損失といった第二種超伝導体、複合超伝導線の交流損失について概説し、さらに、薄膜高温超伝導線のヒステリシス損失の理論式として広く用いられているE. H. Brandt、M. Indenbomによる解析式について紹介し、これをSCSCケーブルのヒステリシス損失に適用するひとつの方法を示している。 第3章は、第4章以下に示される実験結果を得るための共通の実験方法について説明した章であり、電界—電流特性の測定方法および臨界電流の決定方法、磁化損失の測定原理・測定方法について説明している。特に、磁化損失の測定原理・測定方法については、実際に実験に用いた装置の詳細に触れながら、大きな誘導性電圧の中から微小な抵抗性電圧をロックインアンプで検出するための位相検出の工夫などについて詳細に説明している。さらに、大振幅の磁界下における磁化損失測定値からヒステリシス損失と結合損失を分離する方法、微小振幅の磁界下における磁化損失測定値の周波数依存性から結合損失の指標である結合時定数を決定する方法について説明している。 第4章は、SCSCケーブルの磁化損失測定に先立ち、その構造を模擬した短尺直線状マルチフィラメント線の磁化損失測定の結果について説明し考察した章である。SCSCケーブルにおいては、コアのまわりに銅複合マルチフィラメント線をらせん状に巻き付けることによって、横方向からの交流磁界がかかった場合に発生する結合電流をらせん半ピッチに対応する長さの銅複合マルチフィラメント線に閉じ込め、結合時定数を小さくし結合電流を速やかに減衰させている。これを模擬するために、様々な長さの平らな状態の銅複合マルチフィラメント線の磁化損失を測定した結果を示している。より具体的には、磁化損失と線幅、フィラメント幅、銅層厚さ、線材長さとの関係を明らかにして、さらに、結合損失と渦電流損失を分離し、結合損失の形状因子と、線幅およびフィラメント幅との関係を定式化している。			

京都大学	博士（工学）	重 政 茉 於
第5章は、単層SCSCケーブルの磁化損失測定の結果について説明し考察した章である。ここでは、もっとも単純な単層SCSCケーブルに対象を絞りと、それを構成する銅複合マルチフィラメント線の線幅、フィラメント幅、銅厚さが磁化損失特性に与える与える影響を調べている。試料の諸元と測定条件について説明したあと、まず、平らな銅複合モノフィラメント線・マルチフィラメント線、コアのまわりにらせん状に巻き付けた銅複合マルチフィラメント線の磁化損失測定結果を比較し、銅複合マルチフィラメント線をコアのまわりにらせん状に巻き付けた場合、他の場合に比べて磁化損失を大幅に低減できることを示している。これは、SCSCケーブルによる磁化損失低減の原理実証である。次に、銅複合マルチフィラメント線のフィラメント幅とヒステリシス損失の関係を分析し、フィラメント幅に比例してヒステリシス損失が低減できていることを示している。さらに、結合損失は銅層厚さや線幅を小さくすることによって低減できることを示している。この章の結果を踏まえ、第6章、第7章の実験で用いるSCSCケーブルは、線材幅2mm、フィラメント数10（フィラメント幅は約0.2mm）、銅層厚さ10μmの銅複合マルチフィラメント線により構成している。 第6章は、多層SCSCケーブルの磁化損失測定の結果について説明し考察した章である。層数を1、2、4、8と変えた4種類のSCSCケーブルの磁化損失を測定し、まず、層数を変えても、線1本あたりの磁化損失、ヒステリシス損失、結合損失は、ほとんど変わらないことを明らかにしている。また、磁化損失からヒステリシス損失、結合損失を抽出するにあたっては、磁化損失の周波数依存性を利用しているが、高温超伝導線の緩やかな電界—電流密度特性に起因する磁化損失の周波数依存性は、結合損失の周波数依存性に比べて十分小さいと考察している。結合時定数については、層数が増えるにつれて増加することを見出し、これは異なる層の線の結合電流同士が電磁的に結合するためであると考察している。一方、線材1本あたりの結合損失の形状因子は層数が増えるにつれて減少していることを見出し、結果として、線1本あたりの結合損失は層数に依らないのではないかと考察している。 第7章は、SCSCケーブルのヒステリシス損失特性を説明するための解析式の適用法について検討した章である。この章における検討は、第6章に示した多層SCSCケーブルの磁化損失測定結果に基づいている。まず、ヒステリシス損失の発生原因であるフィラメントへの磁束の侵入過程において隣接フィラメントの磁化の影響が無視できないことを指摘し、E. H. Brandt、M. Indenbomによる解析式とMawatariの解析式を組み合わせ、これを考慮することを提案している。また、高温超伝導線の緩やかな電界—電流密度特性と交流磁界印加時の高い誘導電界が組み合わさった結果、高温超伝導線内部の電流密度は、100μV/mの電界で定義される通常の臨界電流密度より高くなっていることを数値解析で明らかにし、1000μV/mの電界に対応する電流を臨界電流として解析式適用の際に用いることを提案している。また、線材面に垂直な磁界成分でヒステリシス損失が支配されると仮定して解析式を角度に対して積分することにより、ケーブル内における線材面の回転を考慮することを提案している。実測されたフィラメント間隔を考慮した上で、これらの提案を反映して解析式を適用することにより、SCSCケーブルのヒステリシス損失特性をよく説明できることを明らかにしている。 第8章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。		

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、低交流損失かつ大電流容量の高温超伝導集合導体として提案された S C S C ケーブルの交流損失について、短尺導体を用いた低交流損失性の実証と、その詳細な損失特性の解明を目標に研究した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 短尺直線状マルチフィラメント線を用いた模擬実験により、磁化損失と線幅、フィラメント幅、銅層厚さ、線材長さとの関係を明らかにし、結合損失の形状因子と、線幅およびフィラメント幅との関係を定式化した。
2. S C S C ケーブルの構造、すなわち、コアのまわりに銅複合マルチフィラメント線をらせん状に巻き付けた構造により、磁化損失を有効に低減できることを実証した。
3. S C S C ケーブルを構成する銅複合マルチフィラメント線について、フィラメント幅を縮減すればそれに比例して S C S C ケーブルのヒステリシス損失を低減できること、銅層厚さや線幅を小さくすることによって S C S C ケーブルの結合損失を低減できることを明らかにした。
4. 電流容量を増やすために多層化した S C S C ケーブルにおいても、線 1 本あたりの磁化損失、ヒステリシス損失、結合損失は層数に依存せずほとんど変わらないことを明らかにした。
5. フィラメント間隔の実測値を考慮の上で E. H. B r a n d t、M. I n d e n b o m による解析式と M a w a t a r i の解析式を組み合わせ、線材面に垂直な磁界成分でヒステリシス損失が支配されると仮定して解析式を角度に対して積分し、 $1000\mu\text{V}/\text{m}$ の電界に対応する電流を解析式における臨界電流として利用することにより、S C S C ケーブルのヒステリシス損失を理論的に計算することを提案した。
6. 5 により、ヒステリシス損失の実験値をよく説明することに成功した。

以上のように、本論文は短尺試料を用いた実験データに基づいて、S C S C ケーブルによる磁化損失低減を実証し、その短尺状態における磁化損失特性を詳細に明らかにしたものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 8 年 1 月 1 6 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第 1 4 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。