

氏名	赤坂 友幸		
学位の種類	博士 (情報工学)		
学位記番号	情工博甲第375号		
学位授与の日付	令和5年3月24日		
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	超電導き電ケーブルの長尺化に向けた中間接合技術の開発		
論文審査委員	主査	教授	小田部 荘司
		〃	福間 康裕
		〃	伊藤 高廣
		准教授	木内 勝

学位論文内容の要旨

鉄道の電化方式は、20世紀初頭に低周波交流が採用され、その後、直流電化、商用周波数交流を用いた交流電化と実用化されていき、近年では、離隔を取らなくて良いことから都市部を中心に直流送電への展開が進みつつある。一般的な在来線の架線では、変電所間隔が2~3km程度を超えると送電ロスや電圧降下の問題が顕在化するという課題がある。一方で、超電導材料を鉄道用の送電ケーブルとして応用することで、電気抵抗ゼロにて電力を送ることが出来るため、電力損失の低減、回生失効の低減、変電所間の負荷平準化や電圧降下抑制による変電所の集約化が可能となる。そこで、本研究では「変電所間に導入できる長尺の超電導き電ケーブルの開発」に取り組む。長尺の超電導ケーブルについて、実際に研究所や工場にて作製することは可能である。しかし、鉄道沿線に超電導ケーブルを導入するにあたり、現場へ輸送するには、道路交通法などの制限から、一度に輸送できるケーブル長は約500mが限界となる。そこで、数km間隔で設置されている変電所間への導入を考えた場合、数百mの超電導ケーブル同士を接合する必要性が生じる。本研究論文では、超電導ケーブルの長尺化に向け、ケーブルの中間接合技術の開発を行った。超電導ケーブルは、フォーマと呼ばれる金属の中空パイプに、数10本の超電導線材や絶縁紙などを層状に巻線することで作製する。方針として、まず初めに、2枚の超電導線材同士を接合する方法を検討し、その次に集合導体である超電導ケーブル自体の接合技術を扱った。

まず、超電導線材の接手法の検討では、鉄道での応用を想定した仕様として、接合の前後で臨界電流値の劣化がないこと、接合抵抗： 10^{-7} ~ $10^{-8}\Omega$ 程度、引張強度：300N以上、曲げ半径：150mmで曲げられること、という目標値を掲げた。上記の要求仕様を満たせるよう、本研究では、はんだによる接合を選定し検討を行った。検討するにあたり、まず有限要素法により最適な接合条件の解析を実施した。解析結果をもとに、実際に超電導線材を用い、実験室での接合サンプルの試作を行った。接合した超電導線材の通電特性を評価するとともに、引張強度や曲げ強度などの機械特性の評価を実施し

た。本研究では、超電導材料の解析と作製において、両面から高性能な超電導線材の接合技術の開発を行った。その結果として、2枚のビスマス系超電導線材間のはんだ部分に対して、接合長が20mm以上の場合にて、臨界電流値が劣化することなく、接合抵抗や機械特性の目標値を達成できることが分かった。また、鉄道現場では屋外での作業のため、実験室で作業できるような精密な接合が困難な場合がある。そのため、はんだ接合を行うにあたり、接合部に角度ズレや幅ズレ等が生じたケースにおいても、解析および実験を行うことで、鉄道現場を想定した広い視点での検討を行った。接合部の超電導線材同士に、接合角度がある場合、幅ズレがある場合、段差がある場合などの条件下にて通電測定を行った結果、理想的な接合ができない場合に対して、接合抵抗や臨界電流値の変化を評価できた。解析と実験を通じ、超電導線材のはんだ接合を実施する際の指針を得ることができた。

次に、超電導線材の接合技術を活用し、超電導ケーブルの接合について検討した。はんだを用いたケーブル接合方法として、金属のスリーブを用いるスリーブ接合、超電導線材を橋渡しさせるブリッジ接合を提案し、実際に超電導ケーブルを用いて接合を実施し、評価を行った。まず、スリーブ接合では、施工上は簡易な接合方法であったが、接合抵抗が $10^4 \Omega$ 以下と比較的高い結果となった。一方で、ブリッジ接合では線材を1本ずつ接合するため工程は多いものの、超電導線材を直線的に橋渡しして接合することで、接合抵抗は $10^8 \Omega$ 以下となり、鉄道応用における目標値以下であることを確認した。また、曲げ強度の向上のため、接合部の超電導線材を螺旋状に配置する、螺旋接合の有用性も確認した。

また、開発したケーブル接手法を用いて、真空層なども含む超電導ケーブルの中間接合部を作成し、冷凍機や循環ポンプなどを合わせた超電導き電システムに組み込み検証試験を行った。屋外の試験線路沿いに、30mの超電導ケーブルを敷設した後、螺旋接合による中間部の接合処理を行った。30mの超電導き電システムを液体窒素により冷却後、通電試験を行った結果、目標となる接合抵抗 $10^8 \Omega$ 以下であることを確認し、中間接合部が機能していることが確認できた。

超電導線材およびケーブルの接合に関する研究を通じ、鉄道現場で適応可能な接手法を検証した。接合抵抗、臨界電流値、機械特性の評価から、鉄道での要求仕様を満たすことが分かった。基礎的な技術構築ができたため、今後は鉄道現場に合わせた接合技術の高度化が重要と考える。今回の研究にて、スリーブ接合やブリッジ接合などの方法を試し、それぞれ接合抵抗や作業性において一長一短の特徴を示した。実際に鉄道事業者と施工についてヒアリングを行い、路線ごとに最適な方法を選定し、接合技術を確立していく。その後、実路線に上記の技術を導入し、営業車両への送電試験により技術実証を行うことで、都市路線における長尺超電導き電ケーブルの実装が促進できると考える。

学位論文審査の結果の要旨

超電導線を鉄道のき電ケーブルに応用する際には線同士の接合がかかせない。本研究では鉄道での応用を想定した仕様として、接合の前後で臨界電流値の劣化がないこと、接合抵抗： $10^7 \sim 10^8 \Omega$

程度、引張強度：300 N以上、曲げ半径：150 mmで曲げられること、という目標値を掲げた。そして FEMによる数値計算による予測と実際に実験をした結果を示し、目標が達成されたことを確認した。このことにより鉄道現場で適応可能な接合手法の指針が得られた。そして接合抵抗、臨界電流値、機械特性の評価から鉄道での要求仕様を満たすことが分かった。これらの成果は世界に先駆けて行なわれて実証に成功したものであり、大変高く評価されるものである。実際に鉄道現場で施工する際には、スリーブ接合やブリッジ接合などの方法があり、それぞれ一長一短の特徴を示している。これらを踏まえて技術実証を行なうことが必要となる。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（情報工学）の学位に十分値するものであると判断した。