

論 文 概 要

九州工業大学大学院情報工学府 情報創成工学専攻 物理情報工学分野

学生番号	236E0303	氏 名	今泉圭佑
論文題目	有限要素法を用いた超伝導線材の接合の通電特性の評価		

1. 結言

超伝導体のうち、高い転移温度を有する超伝導体は高温超伝導体と呼ばれる。中でも希土類元素を用いた RE(Rare Earth)系超伝導体や Bi 系超伝導体は、液体窒素を冷媒として使用することができるため高価な液体ヘリウムが不要であり、冷却コストの大幅な削減ができるとして大きな期待が寄せられている。超伝導線材の応用先として注目されているのが超伝導体を用いた電力輸送ケーブルである。超伝導ケーブルは超伝導のゼロ抵抗の性質を最大限に活かせるほか、銅をはじめとする通常の金属と比べて非常に大きな電流密度を得ることが可能であるため、現用のケーブルよりもコンパクトなケーブルが実現できるからである^[1]。

では、超伝導ケーブルの実現にあたり、どのような事柄が課題となるのか。その一つが接合による通電特性への影響である。一本のケーブルで全ての設備を接続することは現実的に不可能である。そのため、ケーブル同士の接合が超伝導特性に及ぼす影響を正確に把握することが重要であるといえる。

本研究では、電力輸送ケーブルとして長距離での送電に対応させるにあたって必要となる超伝導線材の接合の高低差(接合ステップ)が臨界電流に与える影響を明らかにするため、有限要素法を用いて数値解析をおこなった。

2. 解析方法

本研究では超伝導線材の通電特性を調べる手法として JSOL 社のシミュレーションソフト JMAG を用いた有限要素法による数値解析をおこなった。

有限要素法は簡略化したモデル、メッシュモデルを用いて計算をすることで、実際に試料を作成して測定するより

も時間的・金銭的なコストをかけずに特性を評価することが可能な手法である。その一方で計算に用いるメッシュモデルのメッシュサイズやアスペクト比などのパラメータを適切に設定して計算をおこなう必要がある。メッシュモデルのパラメータ設定を誤ると、単純なモデルであっても膨大な計算時間を要する計算となったり、実際の挙動とは異なる結果となったりする場合がある。そのため、メッシュモデルのパラメータの設定が非常に重要な計算手法である。そのため線材モデルの作製方法についても検証をおこない、線材のメッシュモデルのパラメータ設定が有限要素法による数値計算を実施するうえで適切であることを事前に確認した^[2]。

線材モデルは Fig. 1 のように、2 枚の超伝導線材に接合ステップを設け、両線材の一端を接合した。線材モデルは幅 3.0 mm、厚さ 0.23 mm の超伝導線材を想定したもので、接合の長さは 10 mm とし、超伝導線材の接合ステップは 0 mm から 20 mm の範囲で、刻み幅 4 mm で変化させた。線材モデルには段階的に電流を印加し、その上限値を 300 A に設定した。また、線材モデルの超伝導特性に関しては、超伝導線材を製造する企業が公開している超伝導線材の製品情報を参考にした^[3]。

加えて、現在鉄道総合技術研究所が実施している超伝導ケーブルの実証試験では RE 系超伝導線材を用いたケーブルが使用されていることを踏まえ、Bi 系超伝導線材のモデルと同様の条件で RE 系超伝導線材に対する数値解析をおこなった。RE 系超伝導線材は Bi 系超伝導線材と異なる構造を有しており、特に超伝導層が極めて薄い構造をしている。そのため、RE 系超伝導線材と同じ厚さ 2 μm のモデルでも再度メッシュサイズやアスペクト比などのパラメータ設定についての検証をおこなった。

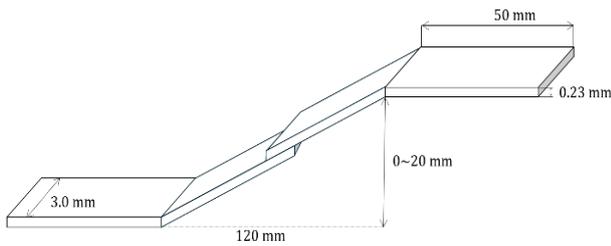


Fig. 1: Superconducting wire with a step at the junctions.

3. 結果と考察

JMAGを用いてBi系超伝導線材を流れる電流に対する電界の様子を解析すると、Fig. 2のような結果が得られた。考察に際し、電界および臨界電流をそれぞれ以下のように定義した。電界は電圧を電極間の距離で割った値とし、臨界電流は電界が 1.0×10^{-4} V/m に達したときの電流の大きさと定義した。この定義に基づいて各線材モデルの臨界電流の値を算出した結果、いずれの値も 271 A から 274 A の範囲に収まることが確認された。

Fig. 2の結果から、Bi系超伝導線材の接合ステップの大きさが増加するにつれて臨界電流が低下する傾向にあると言える。しかし、いずれの場合も接合ステップの変化による臨界電流の変化は非常に小さいものであった。通電特性にわずかに差が出たのは、数値解析の誤差のほか、接合ステップによる自己磁場の変化がわずかながら存在していることが影響しているのではないかと考えられる。

次にRE系超伝導線材のモデルの結果をFig.3に示す。RE系超伝導線材においても、ステップの有無によって最大 7 A 程度の臨界電流の差が確認された。また、接合ステップが 4 mm から 16 mm までの臨界電流の差は特に小さくなっていることが確認された。しかしながら、いずれの場合においても接合ステップが通電特性に与える影響は臨界電流値の数%程度に留まっている。このことからRE系超伝導線材の場合でも接合ステップが線材に及ぼす影響はBi系超伝導線材と同様に非常に小さいと考えられる。また、Bi系超伝導線材の結果と比較した際に、臨界電流の値が相対的に小さくなっていることが確認されたが、これは線材モデルの厚さの違いによるものであると考えられる。

以上の結果から、Bi系およびRE系問わず、超伝導線材の有する接合ステップが臨界電流に及ぼす影響は非常に小さく、電力輸送用の超伝導ケーブルとして実用するには性能に大きな支障を及ぼさないことが示唆される。

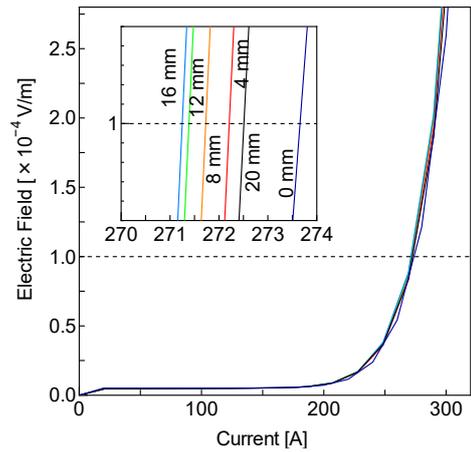


Fig. 2: I-V characteristics of Bi model with steps.

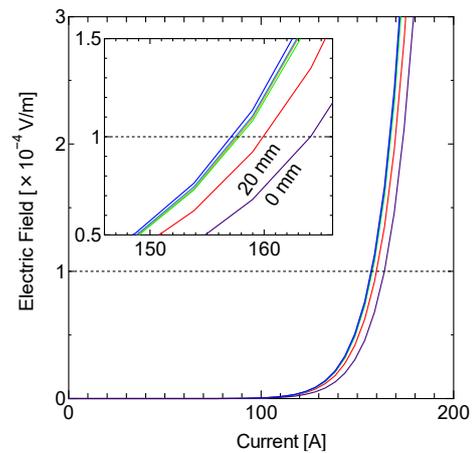


Fig. 3: I-V characteristics of RE model with steps.

4. 結言

本研究では接合にステップを有する超伝導線材の通電特性について有限要素法を用いた数値解析をおこない、その影響について評価した。

本研究の結果より、超伝導ケーブルの接合の際に生じることが想定される接合ステップは超伝導線材の臨界電流特性にわずかに影響を及ぼすものの、その影響は極めて小さく、実用上の性能に大きな支障をきたす程の影響ではないことを確かめることができた。

参考文献

- (1) 原 築志,ほか, ”高温酸化物超伝導交流ケーブルのニューズと開発”, *応用物理*, Vol. 65, No. 4, (1996), pp. 401-405.
- (2) R. Zhang, et al., *Physica C*, Vol. 577, (2020), 1353733.
- (3) 株式会社フジクラ | 製品情報,
<https://www.fujikura.co.jp/products/newbusiness/superconductors/01/superconductor.pdf>, (参照: 2024-1-22).