

令和7年度 卒業論文概要					
所 属	物理情報工学科・電子物理工学コース				
学生番号	222C3012	学生氏名	稲田 楓人	指導教員	小田部 荘司
論文題目	有限要素法を用いた超伝導線材の接合が電流特性に与える影響の解析				

1. 緒言

超伝導ケーブルは、大電流を低損失で輸送可能であることから、電力機器や輸送機関への応用が期待されている。しかし、製造可能な超伝導線材の長さには制限があるため、実用的なケーブル長を得るには複数の線材を接続する技術が不可欠である。このため、低抵抗かつ高信頼性を有する接続技術の確立を目的として、接合部の電気的特性に関する研究が進められている。近年では、はんだ材や拡散接合を用いた接合方法が検討されている。一方で、接合部の形状や寸法が電流分布に与える影響については、一次元理論モデルが提案されている[1]ものの、その妥当性を三次元モデルにより検証した例は限られている。そこで本研究では、超伝導線材の接合部を対象として、有限要素法に基づく三次元電磁界解析を行い、接合部形状および寸法が電流特性に与える影響を明らかにするとともに、一次元理論モデルの三次元への適用可能性について検討する。

2. 解析方法・モデルの理論と詳細

本研究では、有限要素法に基づく電磁界解析ソフトウェア JMAG-Designer 24.0 を用いて解析を行った。対象とした接合方式は、下層の超伝導層から通電された電流が常伝導層を経由し、上層の超伝導層へと流れる構造である。この接合構造は、長さ方向の電流分布のみを考慮し、幅方向および厚さ方向の依存性を無視した一次元理論モデルとして定式化されている。本研究では、この一次元理論モデルが三次元構造においても成立するかを検証するため JMAG にて図2のような三次元モデルを作成した。線材の幅と接合長さ、厚さを目的に合わせて変更する。はじめに、超伝導層を厚さ 0.1 mm、幅 100 mm とし、常伝導層の寸法を長さ 10 mm、厚さ 0.1 mm、幅 100 mm とした。接合部の寸法は、接合長さ 10 mm、厚さ 0.6 mm、幅 100 mm である。幅方向の寸法を大きく設定することで、幅方向依存性が顕著に現れる条件とし、一次元理論モデルが三次元構造においても成立するかの検証を行う。

次に、実際のテープスケール超伝導線材を想定したモデ

ルとして、幅 4 mm、厚さ 0.1 mm の構造を用い、接合長さを 10 mm および 30 mm とした二種類のモデルを作成した。加えて、これらのモデルをねじった構造についても解析を行い、ねじりが電流分布に与える影響について検討した。

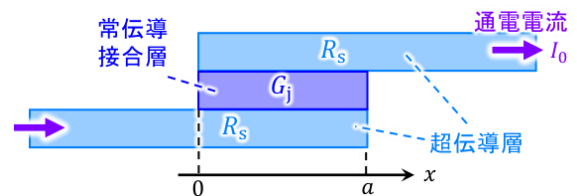


図 1 理論の接合方式

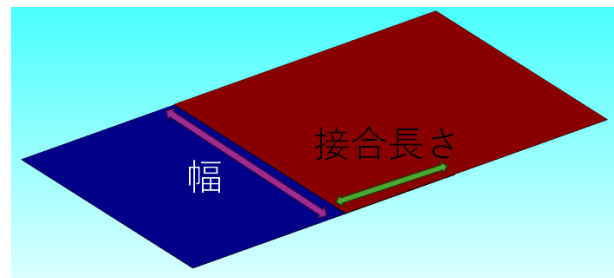


図 2 理論の三次元モデル

3. 結果及び考察

3.1. 三次元モデルにおける理論の成立性の検討

幅方向の依存性を強調した幅 100 mm モデルの解析結果を図7に示す。縦軸は超伝導層を流れる電流を通電電流で規格化した値、横軸は接合部における位置座標であり、点線は理論値を示している。解析結果は理論値とほぼ一致しており、幅方向の依存性を考慮した三次元モデルにおいても、一次元理論モデルが適用可能であることが確認された。

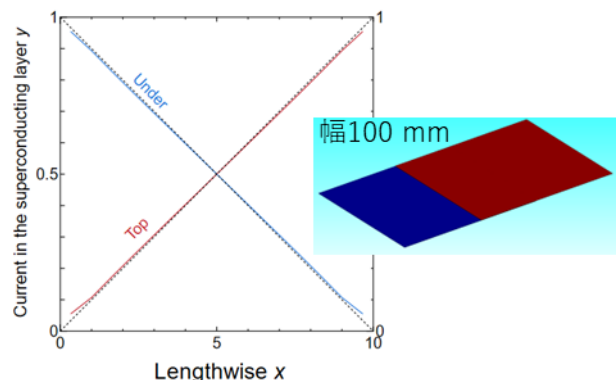


図 3 幅依存性が大きいモデルの計測値と理論値との比較

3.2. テープスケールの三次元モデルにおける検討

幅4 mm のテープスケール超伝導線材を想定した接合長さ10 mm および30 mm のモデルに対する解析結果を図3、図4に示す。いずれのモデルにおいても、幅方向の電流分布の偏りは確認されず、理論値とほぼ変わらない結果が得られた。これは、線材幅が4 mm と小さいことにより、幅方向依存性の影響がほとんど現れなかったためであると考えられる。この結果から、実際のテープスケール超伝導線材においても、理論通りに電流が流れることが確認された。

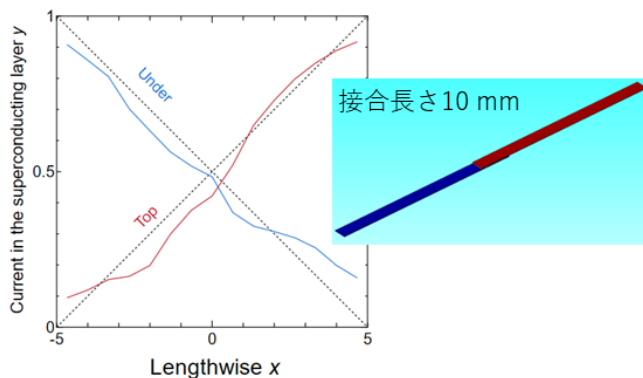


図4 幅4 mm 接合長さ10 mm の計測値と理論値の比較

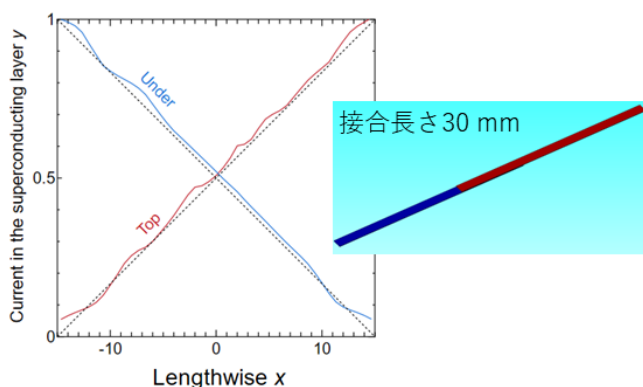


図5 幅4 mm 接合長さ30 mm の計測値と理論値の比較

3.3. ねじったテープスケールにおける検討

ねじりを付与したモデルに対する解析結果を図6、図7に示す。接合長さ10 mm および30 mm のいずれのモデルにおいても、理論値と完全には一致しないものの、全体としては概ね近い電流分布が得られた。しかし、30 mm のモデルでは10 mm の場合と比較して、電流分布にわずかな凹凸が確認された。この凹凸は局所的に電流の流れ方が変化していることを示しており、接合部分におけるねじれ具合の違い、すなわち接合区間内で線材が受けるねじれの角度の差が影響しているものと考えられる。

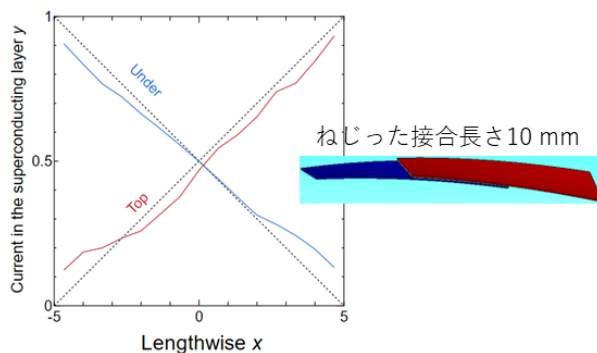


図6 幅4 mm 接合長さ10 mm をねじったモデルの計測値と理論値の比較

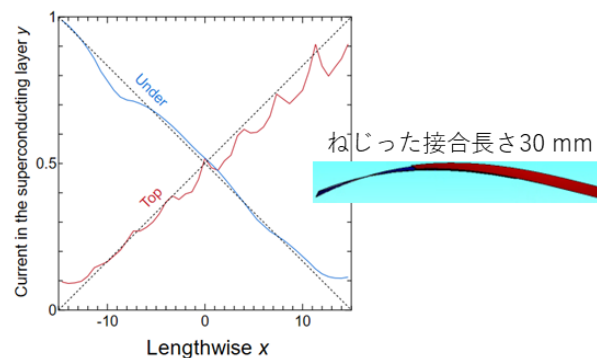


図7 幅4 mm 接合長さ30 mm をねじったモデルの計測値と理論値の比較

4. 結言

本研究では、超伝導線材の接合部を対象として、有限要素法を用いた三次元電磁界解析を行い、接合部形状および寸法が電流特性に与える影響について検討した。その結果、一次元理論モデルは三次元構造に対しても適用可能であることが示された。また、実際のテープスケール線材において理論値に近い電流分布を得るためには、幅方向依存性が十分に小さくなるよう、線材幅と接合長さの比を適切に設計することと、電流分布に偏りがでないようなねじれの決定が重要であることが明らかとなった。

参考文献

- [1] 2025 年 第 72 回応用物理学会春季学術講演会 16a-K206-4

研究実績

稲田 楓人ほか、“超伝導線材および超伝導ケーブルの接続に関する研究”、2025 年度応用物理学会九州支部学術講演会、6Ap-4