

電気設備を軽減するための 超電導ケーブルをつなぐ



赤坂 友幸
Tomoyuki Akasaka

浮上式鉄道技術研究部
超電導・低温研究室
副主任研究員



石原 篤
Atsushi Ishihara

浮上式鉄道技術研究部
超電導・低温研究室
主任研究員



恩地 太紀
Taiki Onji

浮上式鉄道技術研究部
超電導・低温研究室
副主任研究員



富田 優
Masaru Tomita

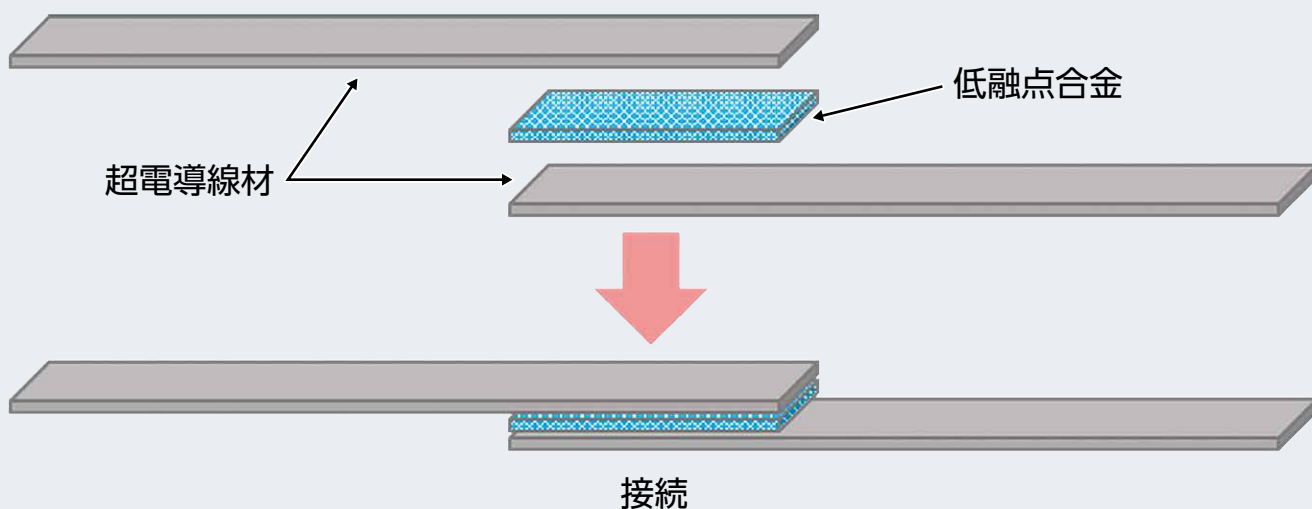
浮上式鉄道技術研究部長

はじめに

超電導は電気抵抗ゼロになる特性から、電力応用や磁場応用といった幅広い応用が期待されています。鉄道総研では、直流電気鉄道の電力システムの効率化および省エネルギー化を目的に、超電導材を用いた鉄道用超電導ケーブルの開発を進めています¹⁾²⁾。ここでは、超電導ケーブルの長尺化に必要な超電導材の接続技術について紹介します。超電導材の接続方法としては、

はんだなどの低融点合金による接続、低温熱処理の機械的接続、音波接続などがありますが、これまで鉄道現場で施工可能な接続方法は開発されていませんでした。ここでは、超電導ケーブルの鉄道現場における接続に向け、[図1](#)に示すような低融点合金による接続技術について紹介します。接続技術の開発においては、解析と実験の双方が必要であるため、最適な超電導材の接続条件の解析を実施するとともに、実際に

図1 低融点合金により接続した超電導材



超電導材を用いて実験室での接続サンプルを製作し、通電特性の評価を行いました。

長距離超電導ケーブルの導入効果

長距離の直流送電では送電による電力損失や電圧降下が生じます。電圧降下が大きくなるとパンタ電圧が十分に確保できない場合、電車は加速ができなくなり、タイヤに乱れが生じます。そのため、多くの鉄道路線ではパンタ電圧が下がりにくいように、数キロ間隔で変電所が設置されています。ここで、超電導材を鉄道送電線用にケーブル化すると、電気抵抗ゼロで送電でき、電圧降下が抑制できることから変電所の集約化が可能となるとともに、電力損失の低減や回生失効の抑制にともなう省エネ効果が期待できます。

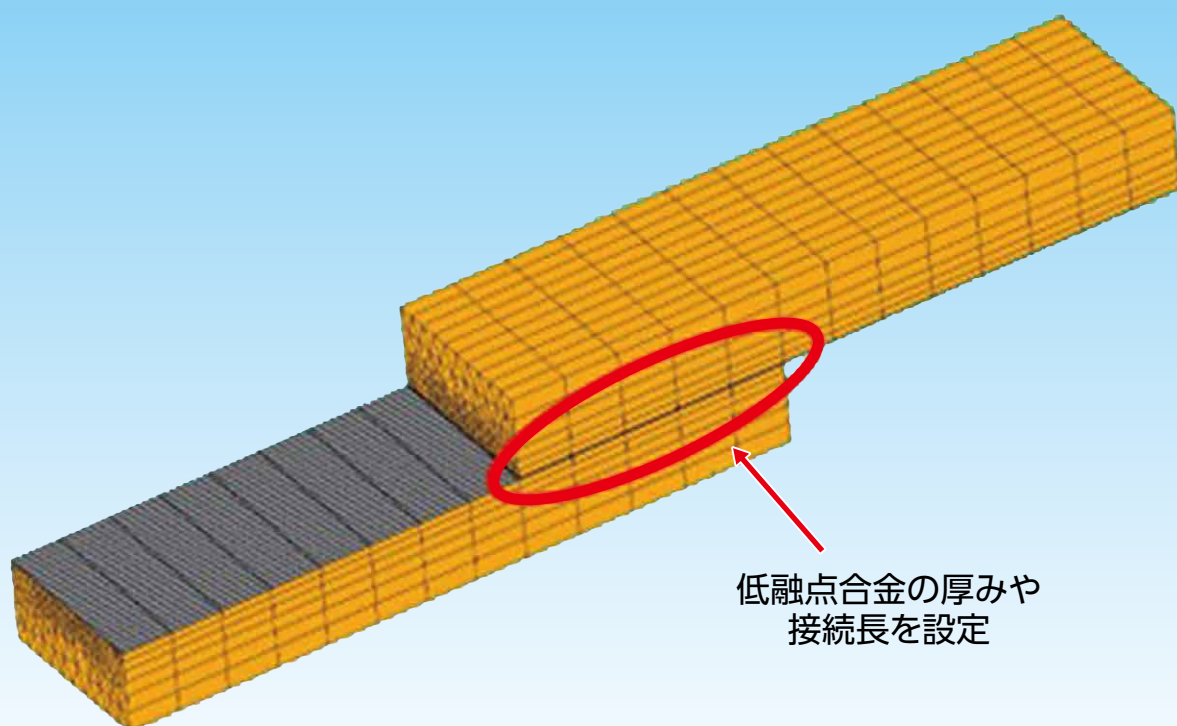
実用化に向けた課題の一つに、超電導ケーブルの接続技術が挙げられます。超電導ケーブルを鉄道現場へ輸送するには、輸送車の関係から約500m程度が限界となります。数km間隔で設置されている変電所間への導入を考えた場合、超電導ケーブル同士を接続する必要があります。

営業運転に支障せず、鉄道現場で実施できる簡易な接続技術の構築が必要不可欠です。電車の駆動に必要な電流値が数千アンペアであることを考慮すると、これまでの研究で接続抵抗値を $10^{-7} \sim 10^{-8} \Omega$ 台にできれば、接続部の発熱の影響を抑えられることがわかっています。そのため、接続抵抗値 $10^{-7} \Omega$ 以下を目標とし、超電導ケーブルの接続技術の開発に取り組んでいます。

超電導材の接続方法

2枚の超電導材をはんだなどの低融点合金により接続した際の、最適な接続条件の見通しを得るため、有限要素法による電磁解析を行いました。有限要素法を用いることで、材料をメッシュに分割し、各メッシュ間において電磁解析を行うことで、材料全体の電流特性を算出することができます。図2に超電導材を接続した際の解析モデルを示します。超電導材は実際に用いる材料を想定し、臨界電流値や断面形状を設定しており、低融点合金を介して、2枚の超電

図2 超電導材を接続した際の解析モデル



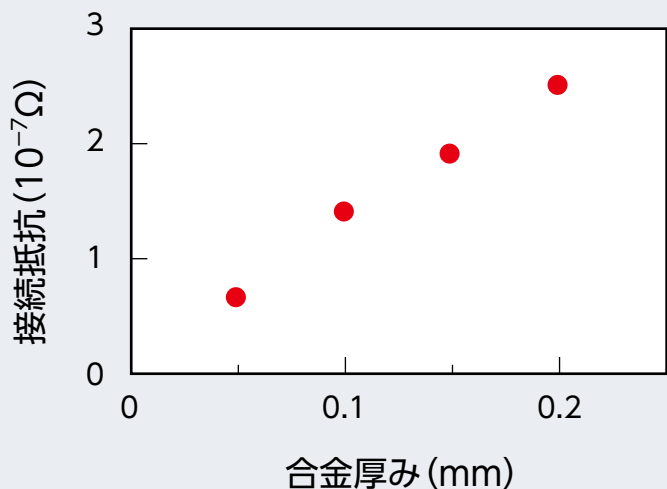


図3 さまざまな低融点合金厚みで接続した解析結果 (接続長 : 30 mm)

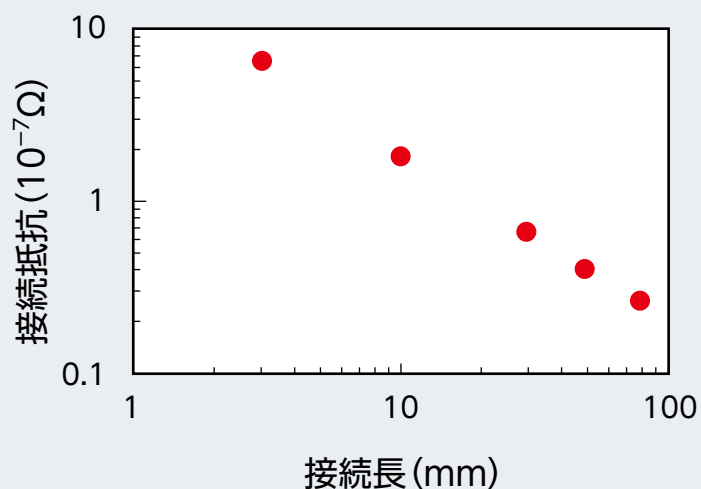


図4 さまざまな接続長で接続した解析結果 (合金厚み : 0.05 mm)

導材を接続しています。このモデルに対し、超電導材長を50mm、低融点合金の厚みは、0～0.2mm、接続長は3～80mmとしています。解析では、接続モデルの左側断面から右側断面に直流電流を流して、接続部の電流特性を計算しました。また、図2に示すように約10000程度のメッシュに分割し、有限要素法による解析を実施しました。

超電導材間の低融点合金の厚みを変えて電

流特性を解析し、接続抵抗を算出した結果を図3に示します。接続抵抗と低融点合金の厚みに比例の関係があることがわかります。また、実験上における最大の合金厚みと予想される0.2mmにおいて、接続抵抗が $10^{-7}\Omega$ 台であることを確認しました。図4に、接続長を変えて接続した際の接続抵抗を算出した結果を示します。接続長が20mm以上あれば、接続抵抗値 $10^{-7}\Omega$ 以下となることがわかりました。以上

図5 角度をつけて接続したイメージ図

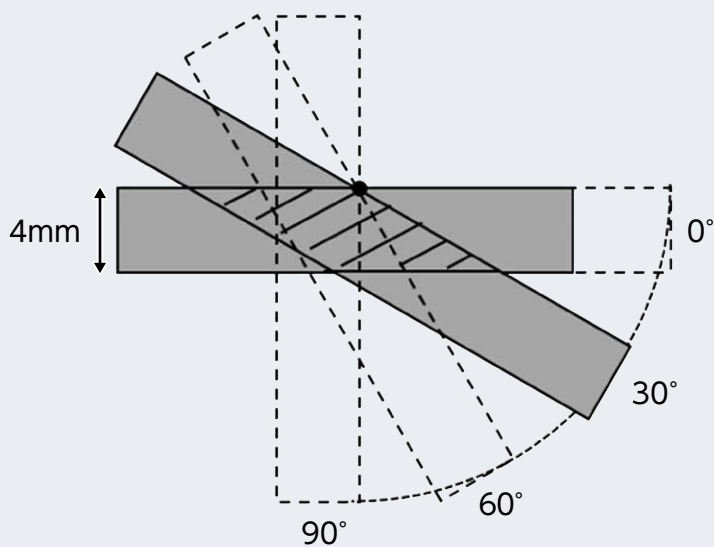
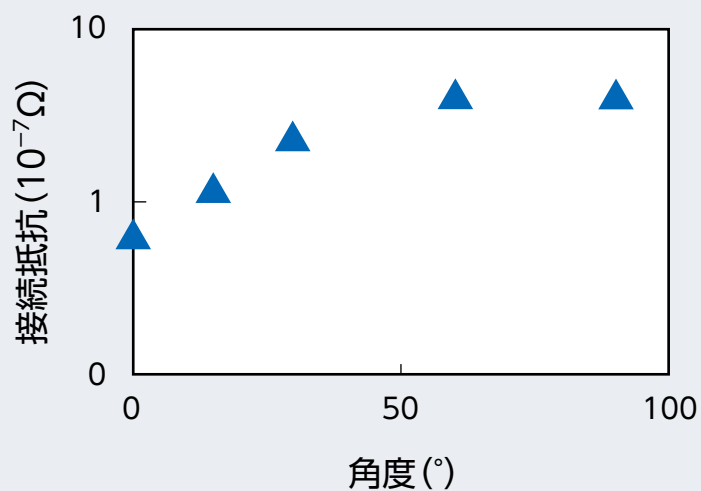


図6 角度をつけて接続した解析結果



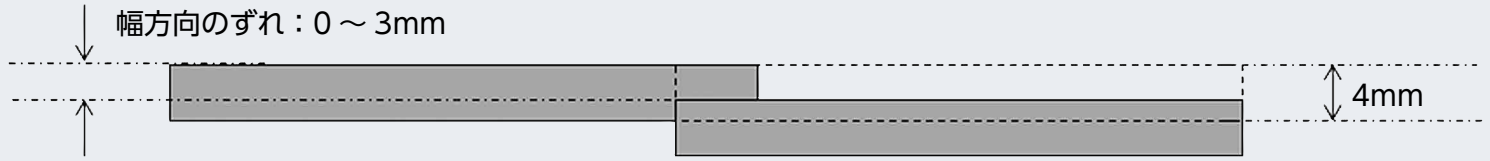


図7 幅方向にズレをつけて接続したイメージ図

より、低融点合金での接続を行う際には、合金の厚みを薄くしつつ、接続長を必要な長さとなるように接続すればよいという指針を得ました。

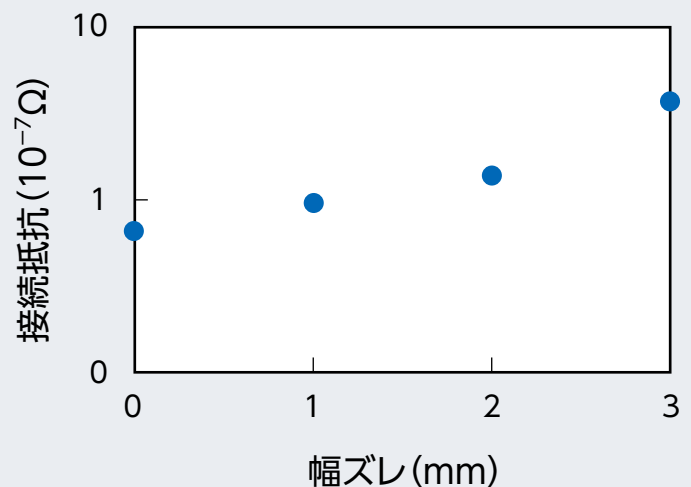
鉄道現場における作業は、実験室で実施できるような精密な接続が困難な場合があります。そのため、低融点合金での接続を行うにあたり、接続部に角度ズレや幅ズレなどが生じたケースにおいても解析および実験を行うことで、鉄道現場を想定した接続方法について検討を行いました³⁾。

超電導ケーブル中の超電導材の接続角度が異なる場合の電磁解析を実施しました。4mm幅の超電導材間の角度のズレが15度、30度、60度、90度とずれていた場合のイメージを図5に示します。超電導材同士に角度をつけて接続した場合の電磁解析結果と、電流特性から接続抵抗を算出した結果を図6に示します。15度の角度では、接続抵抗は $10^{-8}\Omega$ 台であり、一方で30度以上の角度では接続抵抗は $10^{-7}\Omega$ 台となることを確認しました。

角度のズレだけでなく、接続時の幅方向のズレについても、同様に解析しました。図7に示すように、長手方向120mmに対して、ズレを0～3mmまで1mm刻みで順に変化させ、電

流特性接続幅依存性を評価しました。幅方向のズレを変化させた超電導材の電流特性を解析した結果と、電流特性から接続抵抗を算出した結果を図8に示します。ズレがないもの(0mm)およびズレが1mmのものでは接続抵抗は $10^{-8}\Omega$ 台となり、一方、2mm以上になると接続抵抗が大きくなり、接続抵抗は $10^{-7}\Omega$ 台となることがわかりました。角度や幅ズレが生じた場合、2枚の超電導材の接続面積に変化

図8 幅方向にズレをつけて接続した解析結果



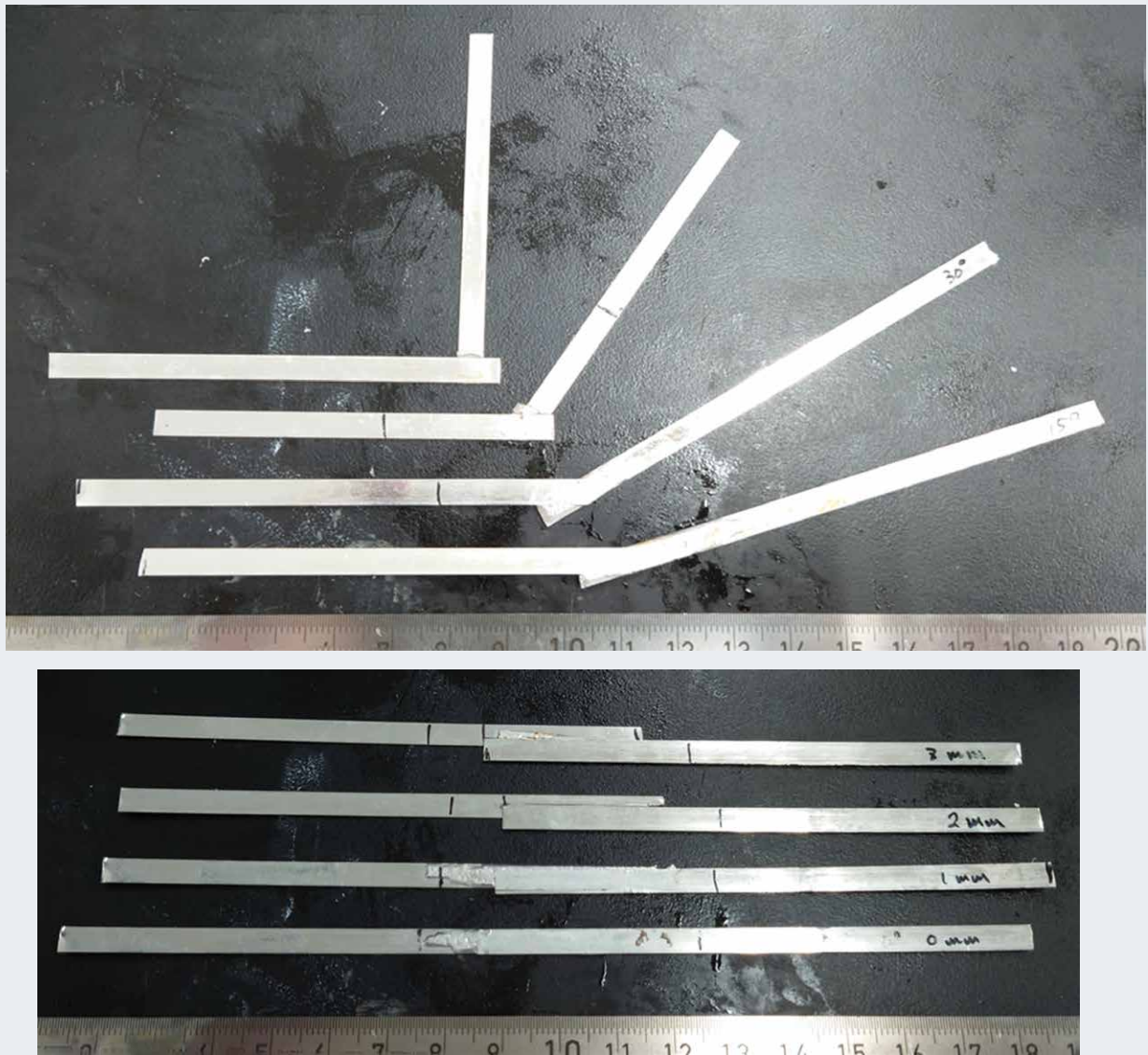


図9 角度および幅方向にズレをもつ超電導材サンプル

が生じ、それにともない接続抵抗も変化していると考えられます。

次に解析結果をもとに、実際に接続角度と幅方向のズレを変化させ接続した超電導材を作成し、通電実験を行いました。作成したサンプルの写真を図9に示します。異なる角度で接続し電流特性を評価した結果を図10に示します。また、幅方向のズレを変えて接続し電流特性を評価した結果を図11に示します。いずれも、接続面積が大きいほど、接続抵抗値が小さくなることを確認しました。

図12には、有限要素法による解析と、実際の超電導材を用いた通電試験により、得られた

接続抵抗値をまとめたものを示します。解析値と実験値は同じ傾向を示しており、データの整合性が取れていることを確認しました。いずれの結果も、接続抵抗値 $10^{-7}\Omega$ 以下を得るためには、接続面積が 90mm^2 以上となるように接続すればよいことがわかります。以上より超電導材を接続する際における、基準となる抵抗値の指標を得ることができました。また、鉄道現場での作業では作業精度が高くないため、角度や幅方向にズレが生じる状況においては、接続長を長くすることで接続面積を大きくしたり、複数本にまたがって接続するなどの工夫を行うことが重要と考えられます。

おわりに

長尺化超電導ケーブルの実現に向け、超電導材の接続技術について検討しました。低融点合金接続の最適条件の見通しを得るため、接続箇所を有限要素法による電磁解析を行いました。また、鉄道現場を想定した接続として角度や幅方向にズレが生じた場合について、解析と実験の両面から評価を行いました。解析値と実験値は、同じ傾向を示したことから、データの整合性が取れていることを確認し、また、接続抵抗と接続面積の関係を導くことができ、接続において許容できるズレを指針として定義することができました。

なお本研究の一部は科学技術振興機構 (JST) の未来社会創造事業 (JPMJMI17A2) の支援を受けて実施しました。RRR

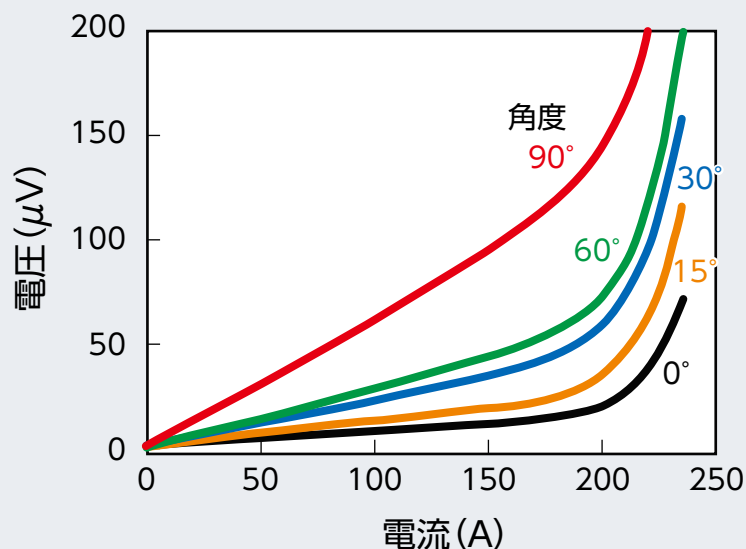


図10 角度をつけて接続した通電実験結果

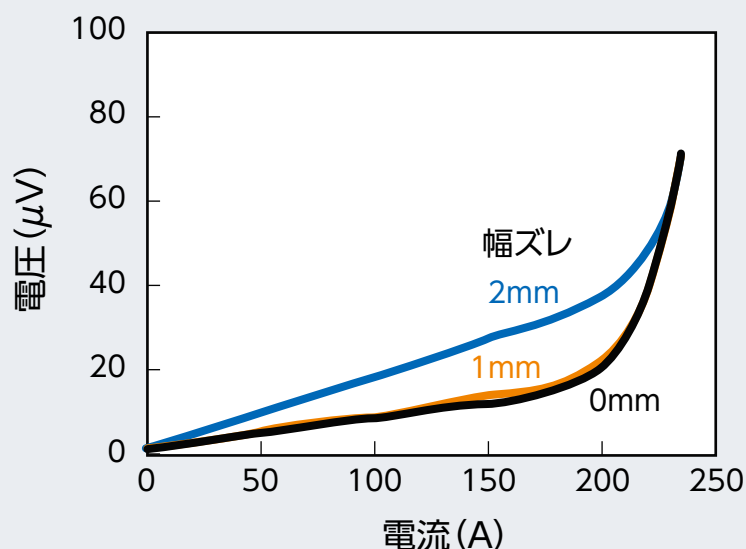
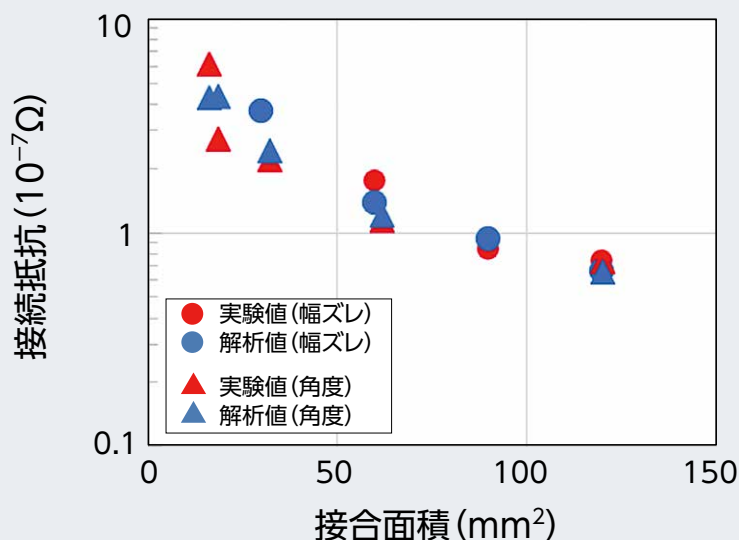


図11 幅方向にズレをつけて接続した通電実験結果

図12 接続面積と接続抵抗の関係



文献

- 1) Superconductors drive trains, Nature, Vol.542, No.7641, p/275, 2017
- 2) 富田優: 超電導ケーブルで電力供給を効率化する, RRR, Vol.72, No.10, pp.8-11, 2015
- 3) Tomoyuki Akasaka, Taiki Onji, Suguru Yano, Yuxuan Zhong, Edmund Soji Otabe, Atsushi Ishihara, Masaru Tomita: Analytical and experimental evaluation of the joints in Bi-based superconducting tape for the feeder cable, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.33, Issue: 2, 2023