

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

高温超電導材料を 在来鉄道に導入する

高温超電導材料に関して、材料構成とその特性を総体的に解説するとともに、小型超電導マグネットや超電導ケーブルなど、高温超電導材の在来鉄道への導入に向けた最新の研究開発状況と今後の方向性を紹介します。



富田 優
Masaru Tomita
材料技術研究部
超電導応用研究室
室長
[専門分野] 超電導工学

はじめに

鉄道総研では、超電導材料の製作から各種応用へ向けた一貫した研究開発に取り組んでいます。各種機器に適応した形状や性能に合わせ、超電導材料の製作や改良を行うことにより、超電導機器の高性能化の実現を目指しています。ここでは高温超電導材料の応用開発の1つである、在来方式鉄道に向けた超電導ケーブルなどの研究開発の取り組みを紹介します。

高温超電導材料の製作

超電導とは、物質を冷やすとある温度以下で電気抵抗がゼロになる性質のことをいいます。また、一般的に超電導になる温度が、液体窒素温度(-195.7°C, 77.3K)を超える物質を指して高温超電導材料と呼ぶ場合があります。超電導の応用には、超電導体をバルク材や線材などの形態に加工して、応用機器として用いることが一般的です。鉄道総研では、バルク材や線材などの作製を行っており、ここではその製作技術を紹介します。超電導材料は、セラミックス材料であるため、無機粉末を混合、成型、焼成して

作られます(図1)。バルク材と線材の違いは、一部、成型過程が異なるだけであり、製作における過程は基本的に同等といえます。バルク材では、成型機に粉末を詰め、一軸プレスで円盤状に成型します。一方線材では、パイプに粉末を詰め、圧延機で線状に引き伸ばして作製します。作製する際に、粉末の混合する割合や、電気炉で焼成する際の温度条件を制御するなどし、超電導特性の向上を図っています。

超電導バルク材

超電導バルク材は、材料内に磁束線を閉じ込めることができる特徴をもつため、永久磁石よりも非常に高い磁場を発生させることが可能です。超電導バルク材を活用した応用機器としては、NMR(核磁気共鳴)分析器、モーター、電流リード、磁気分離装置、フライホイール、永久電流スイッチ素子などがあります。近年の材料研究で超電導バルク材の発生磁場値はより大きくなっていますが、それに伴って超電導材料が受ける電磁力も増大し、材料強度の負担が大きくなります。機械強度が不十分であると、磁場をかけたときの電



図1 鉄道総研における超電導材料の製作

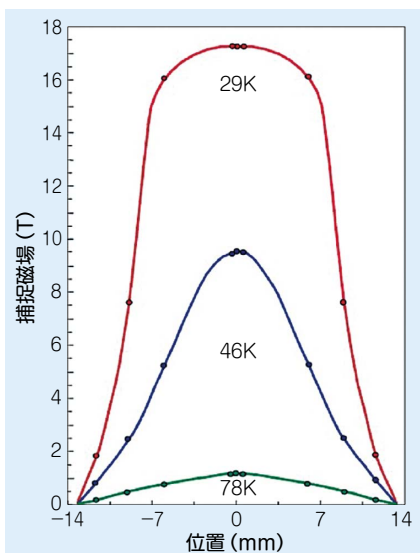


図2 超電導バルク材の着磁例

磁力で、バルク体が破壊されてしまいますが、その対策として、含浸処理法があげられます。エポキシ系樹脂を真空中でバルク体に含浸することで、バルク全面にわたり完全に樹脂で覆うことができ、機械強度の向上が望めます。樹脂含浸強化との相乗効果によって、超電導バルク材は、非常に大きな磁場をかけても破壊されず、図2に示すように、温度29Kにおいて、世界最高の17.24T(テスラ)の極めて高い磁場捕捉を実現しています。超電導バルク材の

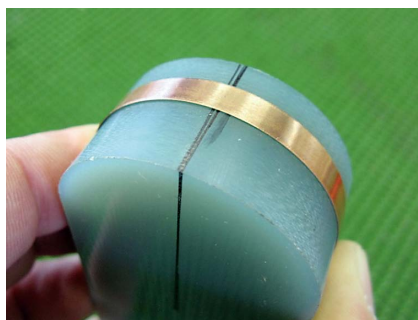


図3 超電導線材の曲げ試験

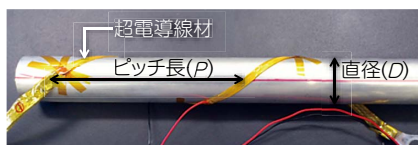


図4 超電導線材のら旋状巻き試験

樹脂含浸と金属含浸技術は、発生磁場の向上を図る上で、合理的な強化・低温安定化法として注目を受けています。

超電導線材

高温超電導線材には、ビスマス系とイットリウム系があり、いずれも超電導状態になる温度である、臨界温度以下で一般の銅線と同じように使用できます。超電導線材は電気抵抗がゼロのため、送電線に活用すれば、送電距離による損失がなく電気を送ることがで

きます。ビスマス系線材は銀をシース材料として制作するのにに対し、イットリウム系線材はニッケル系などの基板を用いて制作する薄膜状線材です。ビスマス系線材は比較的高い信頼性があり、応用化に向けた巻き線技術による通電特性向上や交流損失の軽減対策などの研究が進められています。

鉄道応用を目指した高温超電導材料の評価

超電導線材は、電気抵抗なく電流を流すことができますが、その電流値には限りがあり、この値を臨界電流値(I_c)と呼びます。一般に超電導線材を応用機器に組み込むにあたっては、コイル状やら旋状に巻き線をしします。超電導線材を曲げると、超電導体に機械的な応力がかかり、内部にひずみが生じ、臨界電流値が低下します。応用を考える上では、この曲げに対する臨界電流の低下量を把握することが重要になるため、図3に示すような超電導線材の曲げ試験を行っています。また、ケーブル応用では超電導線材をら旋状に巻き線するため、図4のように、パイプへピッチ長を制御した巻き試験も

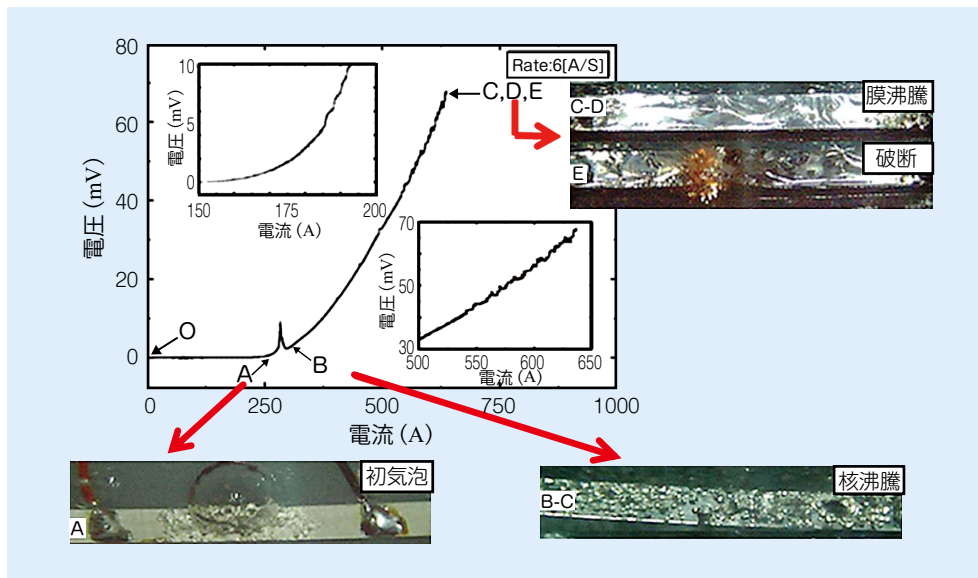


図5 超電導線材の過電流の挙動

進めており、ら旋状に巻き線した状態で、四端子法により臨界電流を測定しています。

鉄道用超電導ケーブルに定格電流を超える過電流が流れた際に事故につながるないように、電流の逃げ道として銅の保護層を設けます。鉄道の事故電流発生時に超電導層が焼き切れないように銅保護層の断面積を計算したところ、約45mm²以上必要であることが分かりました。銅保護層は、超電導層と隣接して銅テープを巻き線するなど、超電導層と電氣的に接続して設計しなければなりません。焼き切れる前の領域においても、過電流によって酸化した冷媒（窒素）の気泡が発生する現象が存在し（図5）、この気泡が超電導線材の絶縁を低下させる恐れがあることが分かりました。対策として、液体窒素を過冷却にすることで、気泡の発生を抑制することができます。

鉄道用超電導ケーブルの開発

超電導ケーブルを鉄道のき電線へ応用すると、電気抵抗がゼロである性質から、損失なく電気を遠くまで運ぶこ

とができるため、変電所の負荷平準化や電圧効果の低減による変電所数の削減、再生効率の向上が期待できます（図6）。また、レールに流れる帰線電流を超電導ケーブルに流すことで大地への漏れ電流もなくなり電食の問題も解決できます。

現在の電気鉄道に適用可能な超電導ケーブルとして、図7に示す構造を持つ超電導ケーブルの製作を行いました。構造としては、導体層およびシールド層の二層構造とし、電流容量を確保するために、導体層で53本、シールド層で61本もの超電導線材が巻き線されています。これまでに、液体窒素に浸漬冷却した通電試験を行った結果、導体層で10.1kA、シールド層で10.9kAの臨界電流値が得られています。

また、これまでのケーブルシステムの特性試験の結果をもとに、鉄道総研所内の試験線へ31m長の超電導ケーブルを導入しました（図8）。現在は、冷却・通電試験や実車両を用いた実証試験を行っています。また、実証試験と並行し、実路線を対象としたシミュレーションによる確認を進めてお

り、実証試験の結果と合わせて導入効果について明らかにし、鉄道事業用として適用可能な超電導ケーブルの実現を目指していきます。

小型超電導マグネット

超電導バルク材を利用して、小型の超電導マグネットの開発を行っています。超電導ケーブルでは冷媒として液体窒素を循環させるため、送液用の循環ポンプが必要になります。液体循環用のポンプとしては一般的に遠心ポンプが使われています。遠心ポンプでは、熱侵入低減のため回転棒であるシャフトを長くすると、回転時の軸ブレが大きくなり、高速回転が困難で、揚程が稼げなくなります。そのため、羽根車付近に軸受の設置などの工夫が考えられますが、極低温中であるため、頻繁なメンテナンスが必要となります。そこで、超電導材の超電導転移温度以下である極低温中に配置されるという特徴を生かし、超電導バルク材を用いた磁気軸受について検討を進めています。超電導バルク材は、図9に示すように、中心が空洞となるリング状のバルク材

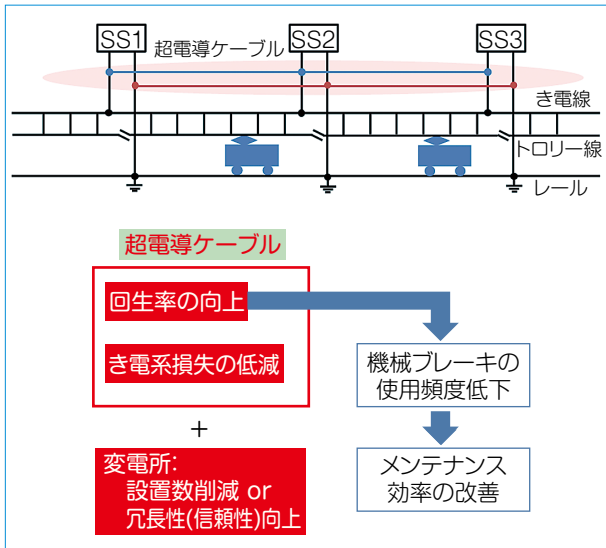


図6 超電導ケーブルを導入した場合



図8 鉄道総研実験線に敷設した超電導ケーブル

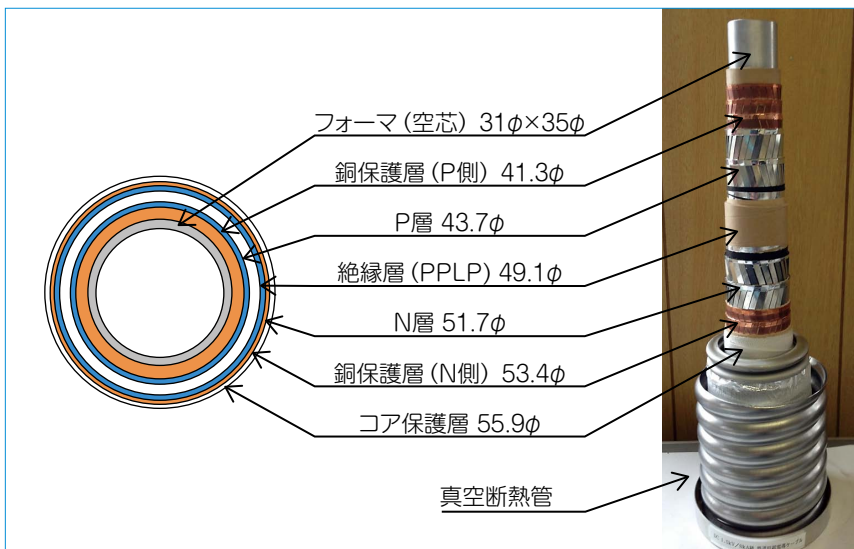


図7 鉄道用超電導ケーブルの構造



図9 リング状超電導バルク材

を製作し、軸ブレ低減を試みました。これまでに得られた知見として、超電導バルク材が大きいほど軸受の高い支持力が得られ、また超電導バルク材の数に比例して支持力も大きくなることわかりました。

おわりに

鉄道総研では、超電導技術に関し、基礎的な材料の製作から応用への多岐にわたる研究を行っています。そのた

め各種応用機器で得られた実験結果は材料作製にフィードバックされ、機器に適した材料開発につなげています。今後も、基礎的な材料開発から各種応用のトータル的な超電導技術の構築を目指していきます。

なお、本研究の一部は、国土交通省の補助金を受けて実施しています。また、(独)科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業「戦略的イノベーション創出推進プログラム」における

研究課題「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」の支援を受けて行っています。RRR

文献

- 1) M.Tomita et.al. : Nature Vol.421, pp.521, 2003
- 2) M.Tomita et.al. : JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 109,063909, 2011