超電導材料の現状と応用

富田　優*　鈴木　賢次*　福本　祐介*
石原　篤*　赤坂　友幸*　小林　祐介*

The Present Situation and Application of Superconducting Materials

Masaru TOMITA　Kenji SUZUKI　Yusuke FUKUMOTO
Atsushi ISHIHARA　Tomoyuki AKASAKA　Yusuke KOBAYASHI

High superconducting material is classified into tape material and bulk material according to its shape and its application, and the research and development are advanced actively for the practical use. In this paper, we introduce the technology of their processing and applications of the high superconducting material. In order to evaluate the electric properties of superconducting tapes, we measure the critical current characteristic of the tapes when winding and the over current property. In order to improve the mechanical strength properties of the superconducting bulks, epoxy resin is permeated into the bulks. Resin-impregnated bulk RE-Ba-Cu-O materials have already been applied to several practical uses.

キーワード：高温超電導材，超電導ケーブル，臨界電流，バルク磁石，磁場強度

1．緒言

超電導とは，ある温度以下に冷却することで電気抵抗がゼロになる現象のことを言い，この温度を超電導転移温度と言う。超電導転移温度が 25 K 以上の超電導体を高温超電導体と呼び，一般的には，超電導材料を線材やバルク材などの形態に加工して，応用機器に用いる。図 1，図 2 に示すように，超電導の応用機器は多岐の分野にわたっており，鉄道総研では，応用機器に向けた超電導材料の高特性化を目標に，線材やバルク材などの研究開発を進めている。超電導材料は，原料粉末を混合，成型，焼成して作られる。線材とバルク材の違いは，一部，成型過程が異なるだけであり，製作における基本工程は同じである。バルク材は，成型機に粉末を詰め，一軸プレスで円盤状に成型した後，電気炉で焼結することで製作する（図 3）。一方線材は，銀パイプに粉末を詰め，圧延機で線状に引き伸ばして，焼結し製作する。製作する際に，粉末の混合する割合や，電気炉で焼成する際の温度条件の制御などにより，超電導特性の向上を図っている。

2．超電導線材の開発

超電導線材は，電気抵抗がゼロのため，送電ケーブルとして活用すれば送電距離による損失がなくなる。鉄道のき電線に適用することで，回生効率の上昇，電力損失の低減，変電所の負荷平準化や集約化，レール電位の抑制などが期待される[1) 2)]。また，超電導線材の応用として，電力を高効率に貯蔵できる SMES（Superconducting magnetic energy storage）や，モーター，変圧器[3)]の開発を行っている。

高温超電導線材は現在，イットリウム系やガドリニウム系に代表される RE 系（RE：Rare Earth, 希土類系）と，

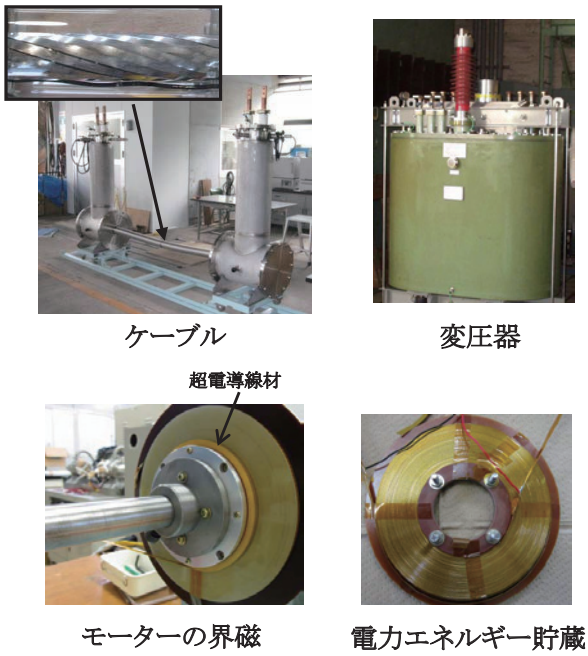


図 1　超電導線材の応用

＊　材料技術研究部　超電導応用研究室

図２　超電導バルク材の応用

ビスマス系の酸化物超電導材を中心に研究開発が進められている。動作温度（臨界温度以下）領域で一般の銅線と同じように使用でき，損失なく電気を運べる。これまで実用的に使われてきた金属系の超電導線材の臨界温度は，比較的高いニオブ系（Nb_3Sn）で 18.3 K（-255℃）である[4]。それに対し，酸化物の高温超電導材の臨界温度は 90 K（-183℃）以上である。そのため，液体窒素が利用可能であり，実用化における冷却システムの簡素化ができるといった利点がある。

近年では新しい材料として軽元素で形成される二ホウ化マグネシウム（MgB_2）が着目されている。MgB_2 は金属系超電導体の中で最高の臨界温度約 40 K（-233℃）をもつ物質であり，高い臨界磁場，臨界電流密度をもつ特徴があり，RE を含まない新しい超電導材料として期待されている。MgB_2 線材の作製に適用される一般的な手法としては，主に工業化に適するパウダー・イン・チューブ（PIT）法が用いられる。この PIT 法は，MgB_2 粉末を金属管に充填して伸線加工する ex-situ 法，Mg と B の混合粉末を金属管に充填して伸線加工した後，熱処理によって超電導化する in-situ 法の 2 方式に大別される。

一般に超電導線材を応用機器に組み込むにあたっては，コイル状や螺旋状に巻いて用いるが，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（I_c）が低下する。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，曲げ試験を行い機械特性に起因する臨界電流値の評価を行った。様々な直径をもつ円筒治具に，ビスマス系超電導線材のピッチ長を変えて巻くことで（図 4），歪曲度を変化させ，各歪曲度において臨界電流値（I_c）を測定した。円筒治具の直径は，ϕ10 mm，ϕ16 mm，ϕ30 mm のものを使用し，各直径における試験結果を図 5 に示す。縦軸は曲げた後の状態で測定した I_c を曲げなしの臨界電流値で規格化した値であり，曲げの増加に対する臨界電流値の低下の割合を示す。どの径においてもあるピッチ長より小さくなると I_c の低下が認められるが，低下の割合は径が小さいほど顕著である。

また，短絡などの事故時には超電導ケーブルの電流容量を大きく超えた電流が印加される可能性がある。超電導線材に臨界電流値を超えた電流が流れると，ある程度は超電導材料の周りに存在する銀や銅といった金属に分流されるが，その発熱により最終的には線材が焼損する。超電導線材の過電流特性を把握するために，鉄道の短絡電流を模擬した電流を超電導線材に流した際の，電流特性の評価が重要となる[5]（図 6）。

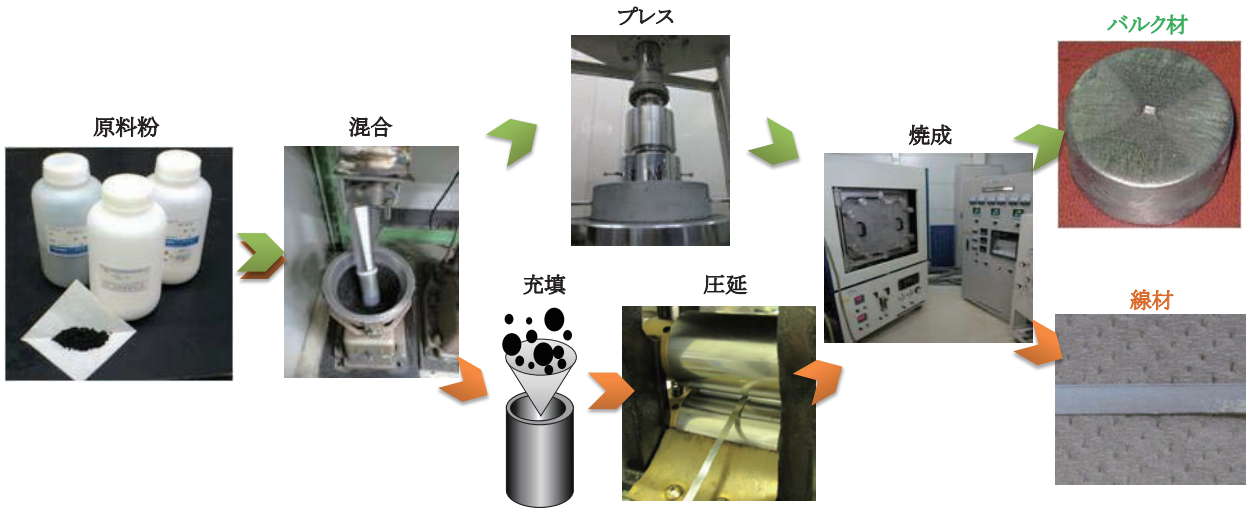


図３　超電導材料の製作方法

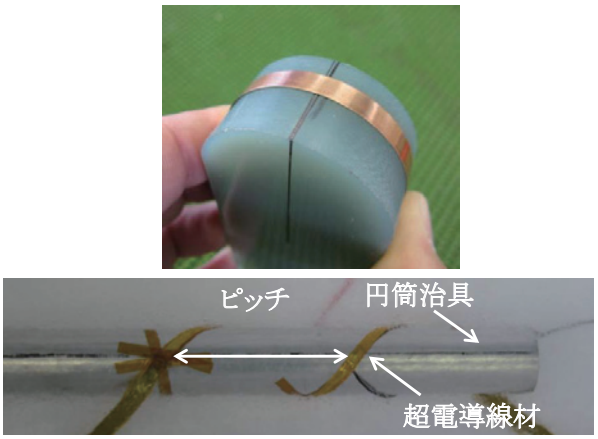


図４　超電導線材の曲げ試験

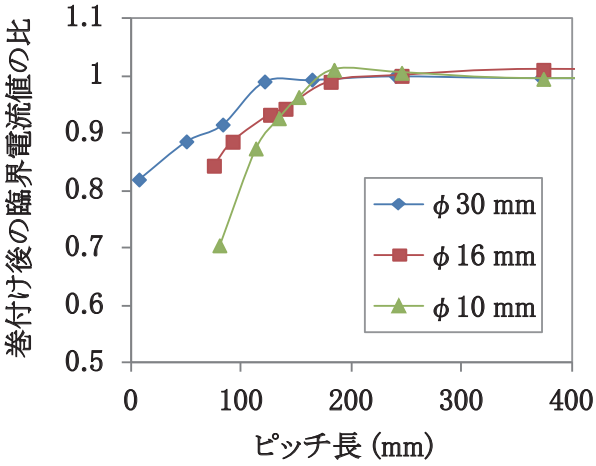


図５　曲げ試験の結果

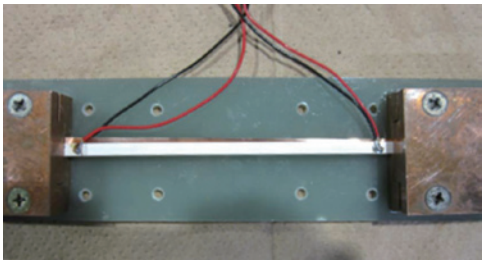


図６　超電導線材の過電流試験

３．超電導バルク材の開発

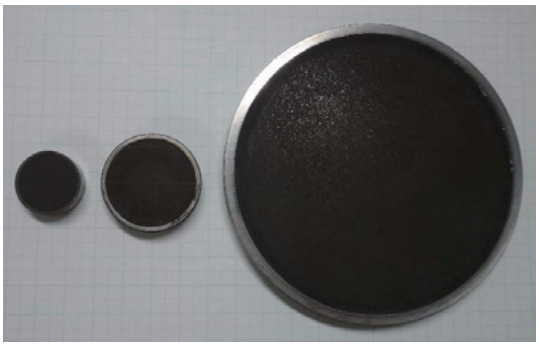
超電導バルク材は，材料内に磁束線を閉じ込める特徴を有し，永久磁石よりも非常に高い磁場を発生させることができるため，図 2 に示したように，主に強力な磁石としての応用に用いられる。鉄道総研では，超電導バルク材を利用して，持ち運び可能な小型の超電導マグネット[6]や，磁気軸受[7]，電流リードなどの開発を行っている。

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，冷媒循環用のポンプとしては主に遠心ポンプが使われている。遠心ポンプは，熱侵入低減のため回転軸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るため，高速回転が困難となり，揚程が稼げなくなる。そのため，羽根車付近に軸受の設置が必要となるが，極低温中であるため潤滑油が使用できず，メンテナンス周期が短くなる。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した。リング状に加工したバルク材と，磁石を埋め込んだ軸を組み合わせて軸受を構成し，その支持力について評価を進めている。

近年の材料研究により，RE 系超電導バルク材の発生磁場値は向上したが，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る。機械強度が不十分であると，電磁力によりバルク材が破壊される恐れがあるため，その対策として，バルク材の機械強度向上を目的として含浸処理法を開発した。エポキシ系樹脂を真空中でバルク材に含浸することで，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，さらに金属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，温度 29 K（-244℃）において，17.24 T（テスラ）の極めて高い磁場捕捉を実現している[8]。RE 系超電導バルク材の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期待されている。

従来は RE を用いたバルク材が一般的であったが，近年では MgB_2 磁石に着目し開発を行った[9]。MgB_2 は製作が容易で，非常に軽量であり様々な形状に設計が可能で，新しい超電導バルク材として期待されている。すなわち，40 K 以下で動作可能な強力磁石として，輸送・医療などへの応用が期待でき，特に，高い磁場均質性が求められる MRI（核磁気共鳴画像法），NMR（核磁気共鳴）などの計測機器への応用に適すると考えられる。以上のことから，MgB_2 バルク材の製作方法と，超電導特性の評価を行い，新材料超電導磁石としての素質を検討した。従来の RE 系バルク材では製作時において結晶配向プロセスが必要であるため，大型試料の製作が困難であった。一方，MgB_2 バルク材は結晶配向プロセスが不要であるため，比較的大型試料の製作に適していると考えられる。本研究では，最大で直径 100 mm サイズの MgB_2 バルク材の製作を試みた。製作した試料の写真を，様々なサイズのバルク材と合わせて図 7 に示すが，表面にクラックなどは存在せず，大型試料を製作することができた。また，MgB_2 バルク材の試料の均質性を評価するため，磁場測定を行った。直径 30 mm，厚み 10 mm の MgB_2 バルク材の磁場測定結果を図 8 に示すが，理想的な円錐状の磁場分布が確認できた。この磁場分布から，試料内部

で均質な特性を有しているバルク材を製作できていることが分かった。



20 mm Φ (～4 g)　40 mm Φ (～16 g)　100 mm Φ (～100 g)

図７　製作した MgB_2 超電導バルク材

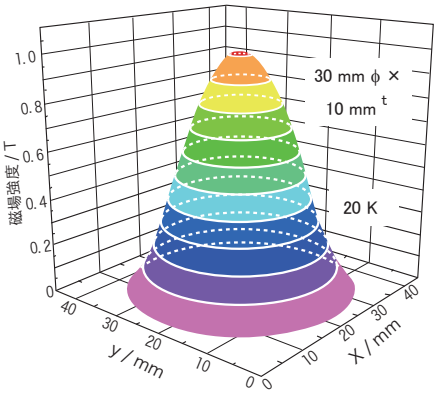


図８　製作した MgB_2 超電導バルク材の磁場強度

４．結言

鉄道の将来に向けた研究開発として，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る。材料製作では，RE 系超電導材料と新材料である MgB_2 材料の高特性化を狙い，製作方法の検討を行っている。超電導ケーブルで用いる超電導線材では，曲げ試験や過電流試験など，応用する上で必要な物性評価を行っている。今後も，各種応用開発を進め，必要となる材料開発に取り組む。

本研究の一部 は，国立研究開発法人科学技術振興機構（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」における研究開発課題「次世代鉄道システムを創る超電導技術イノベーション」の支援を受けて進めたものである。

文　献

１）富田優 , 鈴木賢次 , 福本祐介 , 石原篤 , 赤坂友幸 , 小林祐介 , 前田淳：鉄道用超電導き電ケーブルシステムの開発，低温工学・超電導学会概要集，Vol.90, p.25, 2014
２）M. Tomita, K. Suzuki, Y. Fukumoto, A. Ishihara and M. Muralidhar :Next generation of prototype direct current superconducting cable for railway system, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS 109, 063909,2011.
３）上條弘貴 ほか：超電導主変圧器の実用化に向けた交流損失低減と冷却特性向上 , 鉄道総研報告 , Vol.23, No.11, 23-28, 2009
４）M. Tomita, K. Nemoto, M. Murakami, K. Sugawara：Sching Reaction of Nb3Sn Persistent Current Switsh with a high Current Capacity, Physica C, Vol.357-360, pp.1336-1341, 2001.
５）福本祐介 , 鈴木賢次 , 石原篤 , ミリアラムラリダ , 富田優：鉄道き電線用超電導ケーブルの線材特性評価，　低温工学・超電導学会概要集，Vol.83, p.138, 2010
６）石原篤，赤坂友幸，福本祐介，富田優，禹泰城，関野正樹，大崎博之：リング状バルク超電導体における空間磁束密度分布の温度依存性評価 , 低温工学・超電導学会概要集 , Vol.91，p.62，2015
７）福本祐介，富田優：超電導バルク材を用いた磁気軸受，低温工学・超電導学会概要集 , Vol.90，p.153，2014
８）M. Tomita, M. Murakami, High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K, *Nature* Vol.421, 521, 2001.
９）富田優 , 石原篤 , 赤坂友幸 , 山本明保 , 杉野翔 , 岸尾光二：MgB_2 超電導バルク磁石の開発と応用検討 , 低温工学・超電導学会概要集 , Vol.89，p.176，2014