

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 鉄道応用を目指したイットリウム系超電導線材の開発

鉄道総研では高温超電導技術の鉄道応用として、超電導き電ケーブル、超電導貯蔵コイル、超電導フライホイール、車両用超電導変圧器などの開発を進めるとともに、バルク材や線材など、基礎的な材料開発に取り組んでいます。高温超電導線材については、さまざまな種類の研究を進めており、高機械強度、磁場中での良好な通電特性などのメリットから昨今ではイットリウム系超電導線材について、実用の観点から取り組みを進めており、その開発状況について紹介します。



**鈴木 賢次**  
Kenji Suzuki  
研究開発推進部  
超電導き電ケーブル課  
副主査  
兼 材料技術研究部  
超電導応用研究室  
副主任研究員  
[専門分野] 超電導工学



**富田 優**  
Masaru Tomita  
研究開発推進部  
担当部長  
兼 超電導き電ケーブル課 課長  
兼 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

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であり、多くの場合超電導状態になる温度が液体窒素温度（-196℃）以上の超電導体を高温超電導体とよびます。1986年に、スイスでランタン（La）系酸化物の高温超電導材料が発見され、1987年に、アメリカでイットリウム（Y）系、1988年に日本でビスマス（Bi）系酸化物の高温超電導材料が相次いで発見されました。超電導材料は、線材やバルク材などの形態に加工して、応用機器に用いられます。鉄道総研では、機器応用に向けた線材やバルク材などの材料開発を進めています。線材はBi系とY系を中心に開発が進められており、冷却することで、いずれも一般の銅線と同じように使用できます。ここでは、Y系の高温超電導線材の開発状況とその応用について紹介します。

## 高温超電導線材の作製方法

高温超電導線材は、Y系超電導線材（ $YB_{a_2}Cu_3O_{7-x}$ 〈YBCO〉）、テープ状金属などの構造体の上に“コート”されるその形態から“Coated Conductor”ともよばれる、臨界温度93K）とBi系超電導線材（ $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{8+x}$ 〈BSCCO〉、臨界温度110K）に大別されます。高温超電導技術の鉄道応用として、超電導き電ケーブル<sup>1)2)</sup>、超電導貯蔵コイル<sup>3)</sup>、超電導フライホイール<sup>4)</sup>、車両用超電導変圧器<sup>5)6)</sup>などの開発が進められています。Bi系超電導線材は、銀パイプに超電導粉末を充填し圧延加工と熱処理によって作製され、すでに商業化が開始されています。

Y系超電導線材の作製では、超電導電流を線材長さ方向にわたって流すためには、超電導材料の結晶の向きをそろえることが重要です。結晶の向きがそろっている程度を表す指標を配向性

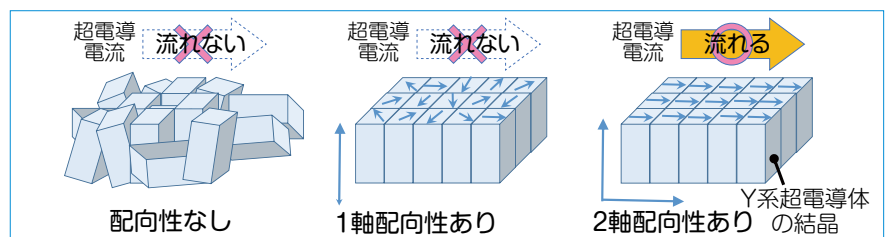


図1 Y系超電導体の配向性と超電導電流

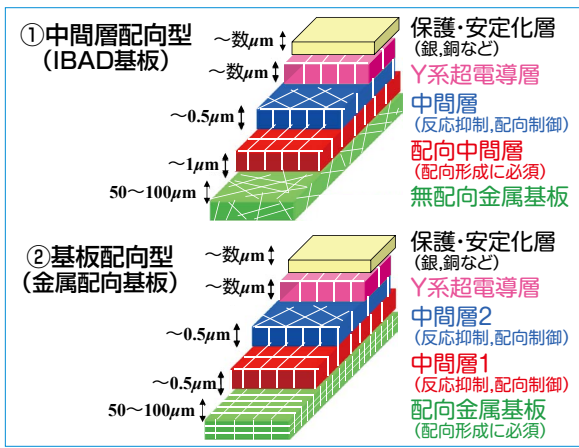


図2 主要なY系超電導線材の構造

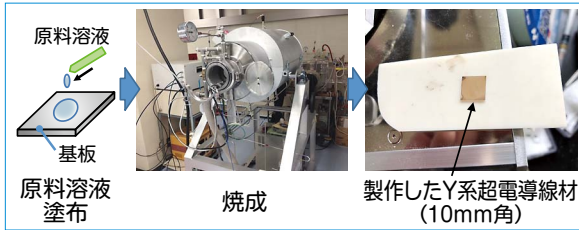


図3 MOD法によるY系超電導線材の作製方法

とよび、図1にイメージ図を示します。Y系の超電導材料の線材化では、結晶の向きを1軸だけでなく、2軸配向させるため、高度な結晶制御が必須になります。また、配向性が良好で結晶が規則正しく並んでいるほど、線材の超電導特性が高く、単位断面積当たり多くの電流（電気抵抗ゼロで流せる最大の電流値を臨界電流とよびます）を流すことができます。

Y系超電導材料への配向性の付与には、大きく分けて二つの方法があります。

無配向の金属基板上に、特定の角度からArイオンを照射しながら、スパッタ蒸着し配向中間層を得るイオンビームアシスト蒸着法（IBAD：Ion Beam Assisted Deposition）による方法、金属に圧延と熱処理を施し配向金属基板を得るRABiTS法（RABiTS：Rolling Assited Biaxially Textured Substrates）による方法があります。これらに続き、中間層、Y系超電導層、保護・安定化層を順番に積層することによって、最終的に下地の配向性をY系超電導材料に付与します。Y系超電導線材は、基板の配向方法によ

て、中間層配向型（IBAD基板）と基板配向型（金属配向基板）の2種類に大別されます（図2）。また、超電導層の積層には、高真空中で熱源にレーザーや電子ビームを用いて原料を気化させて成膜するパルスレーザー蒸着法や共蒸着法、非真空中で化学原料を加熱気化させて基板に送ることで成膜する手法、原料を混ぜ込んだ溶液を基板上に塗り、これを熱処理して成膜する有機金属堆積法<sup>7)</sup>（MOD：Metal Organic Deposition）、などの手法があります。Y系超電導線材は、Bi系超電導線材に比べ、高機械強度、磁場中での良好な通電特性などのメリットが期待されており、従来からのY系バルク材製作の知見を応用し、大型の真空容器が不要で低コストが見込めるMOD法でのY系超電導線材の作製に取り組んでいます（図3）。

### Y系超電導線材の評価・加工

高温超電導線材の応用に向け、Y系およびBi系高温超電導線材の基礎特性評価、加工による特性改善を進めています。図4では、Y系超電導線材の

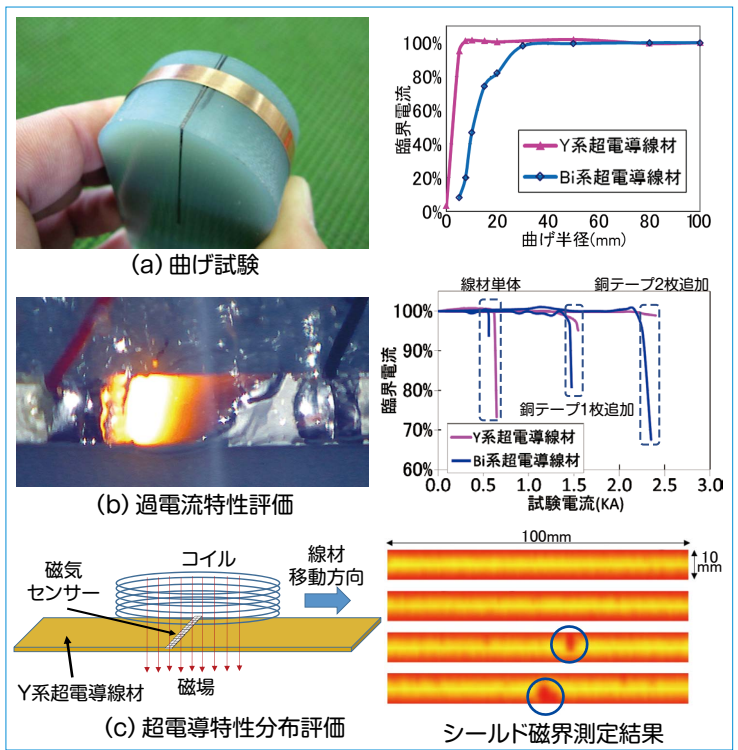


図4 Y系超電導線材の特性評価

主要な評価手法を紹介します。

図4 (a) では、試験前の液体窒素中における臨界電流を100%として、所定の曲げ半径の治具に沿わせて曲げを加え、臨界電流を再度測定した結果を比率で表しています。Y系超電導線材は、Bi系に比べ良好な曲げ特性を持つことがわかります。図4 (b) では、鉄道用超電導き電ケーブルに事故電流が流れる状況を想定し過電流が臨界電流に与える影響を、試験前の臨界電流を100%として比率で示しています。このケースでは、Y系超電導線材は、Bi系超電導線材と同等の過電流に対する耐久性を持つことがわかります。また、銅テープを付加し通電することにより、過電流に対する耐久性が改善することがわかります。

また、図4 (c) では、液体窒素中にY系超電導線材を磁界中に進入させ、欠陥の有無を表面磁界測定により評価した結果を示します。表示の濃さは、測定磁界の大きさを示しています。上2本のサンプルは、超電導のシールド効果により、線材の幅方向中央部まで外部磁界が侵入していませんが、下2

本のサンプルでは、青線部付近に磁界の侵入があり、超電導特性が低下した欠陥の存在を確認できます。

また、Y系超電導線材を実際に使用する際には、いくつかの課題が明らかになっており、その解決に取り組んでいます。一つ目として、Y系超電導線材に交流磁界を印加すると磁束線の運動に起因するエネルギーの熱損失

(交流損失)が発生することが知られています。そのため、交流の超電導応用機器では、大きな冷却負荷が予想され、冷凍機などの機器の大型化が懸念されます。直流においても、電流を掃引する際に、線材は変動磁界を経験するので、値は小さいものの同様に熱損失が発生します。この熱損失は、細線化加工によって低減できることが知られています。図5では、一例としてレーザーによって、Y系超電導線材を細線化加工し、20本の線(フィラメントとよばれる)に分割し、評価を行った結果を示します。加工したY系超電導線材の通電試験により、フィラメント本数に比例した臨界電流が得られ、超電導特性に大きな低下がないこと、熱損失測定試験から、分割数に反比例した熱損失の低減を確認しています。

二つ目として、Y系超電導線材は、基板が高強度である一方で、薄膜の積層構造に起因した剥離(図6(a))の問題が指摘されており、その作製プロセスおよび、応用機器開発の巻き線段階でさまざまな剥離特性の改善の取り組みがなされています。剥離面の組成分析(図6(b))によって剥離層の特定やその対策として、通常絶縁のため、テープにて巻きつけるポリイミドを電着に

よって付加し剥離を防止する技術の開発に取り組んでいます。図7にポリイミド電着したY系超電導線材の外観を示します。電着により、ほぼ均一のポリイミド厚さが得られ、電着前後でY系超電導線材の液体窒素中での超電導特性の劣化のないことを確認しています<sup>7)</sup>。

### Y系超電導線材を用いた応用

超電導ケーブル試作装置を利用し、曲げ特性に優れたY系超電導線材を用いた小型超電導き電ケーブルの試作を進めています(図8)。超電導線材をよるリール<sup>より</sup>熱線機、絶縁紙等を巻き付けるテープ巻き機、ケーブルを先に送り出すキャタピラー式引取機で構成され、各工程を複数回通すことにより、超電導ケーブルの試作が可能です。

スタック方式の小型超電導ケーブルは、芯材が不要であり長ピッチであることから使用する線材量の削減が期待されますが、通電により発生する自己磁界の影響で通電電流が若干減少することがわかっています。一方、小径フォーマー方式は、液体窒素の流路が確保でき、自己磁界による通電電流の低下がありませんが、短ピッチであるため、使用する線材量が増える課題が

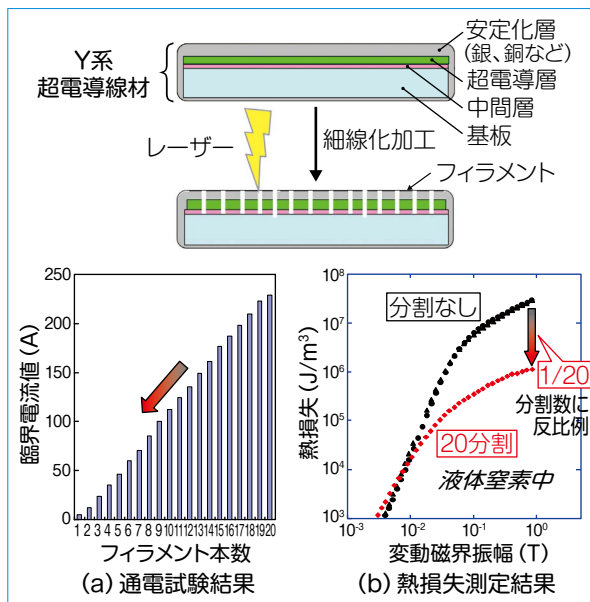
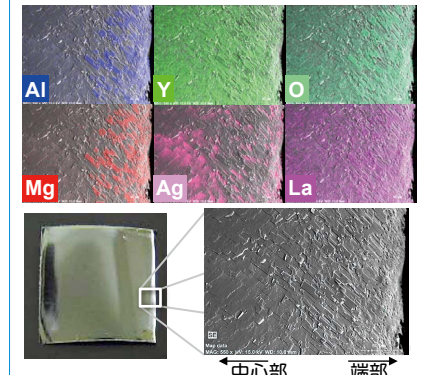


図5 細線化加工したY系超電導線材の評価



(a) 剥離事例



(b) 剥離面の組成分析結果例

図6 Y系超電導線材の剥離



図7 ポリイミド電着したY系超電導線材

あります。現在、これらの新しい構造のY系超電導ケーブルについて、設計の最適化、通電特性の評価を進めており、将来的には、鉄道用超電導き電ケーブルとして、空間的な制約を受ける敷設箇所への適用を検討しています<sup>8)</sup>。

鉄道総研所内には、太陽光発電システムの効率評価を目的に、50kW級太陽光発電システムが設置されています。太陽光発電の送電に超電導ケーブルの利用を検討するため、Y系超電導線材を使った超電導ケーブルのプロトタイプを製作しました。Y系超電導ケーブル本体は、6m長、液体窒素中での通電容量350Aであり、室温で通常のケーブルと接続するための電流端末、電流リードなどで構成されています(図9)。所内の電力網と接続して送電試験を行った結果、直流電圧はほぼ一定で、電流は日光の照度に比例して増減しており、正常に送電されていることを確認しています<sup>9)</sup>。

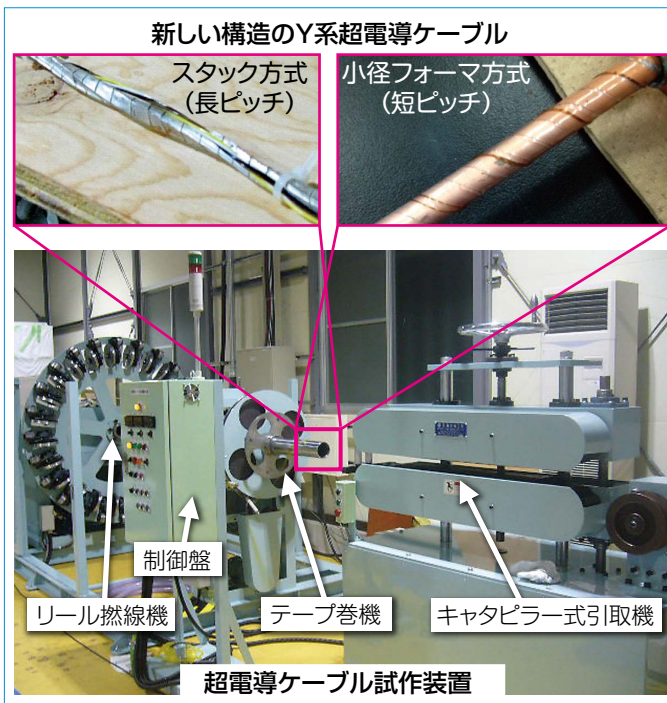


図8 超電導ケーブルに使用するY系超電導線材の巻線技術

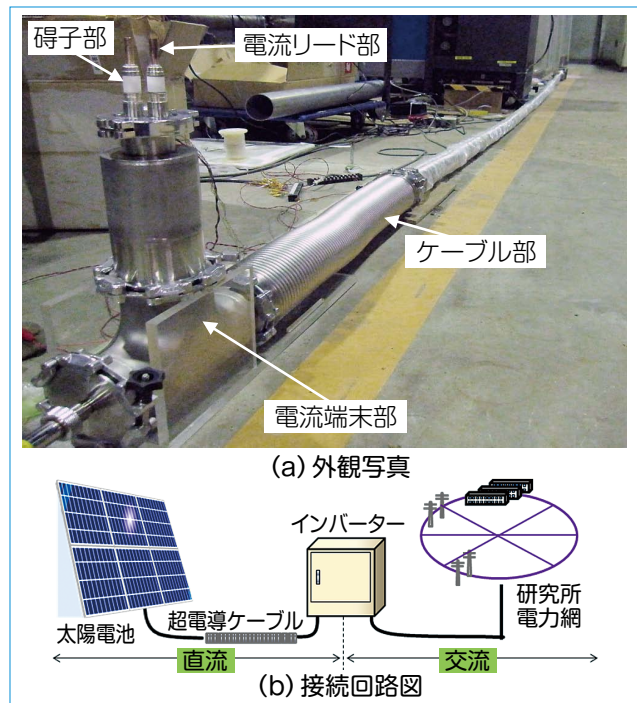


図9 試作した太陽光発電システム用直流超電導ケーブル

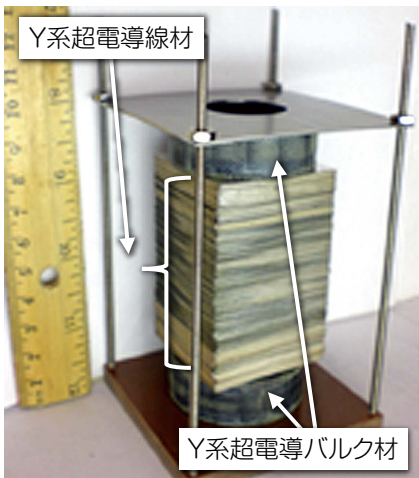


図10 小型超電導マグネット用リング状超電導材

超電導フライホイールは、電力を円盤状の部材(フライホイール)を回転させ運動エネルギーとして貯蔵し、必要に応じて再度電力に変換する仕組みであり、鉄道への応用の取り組みが進められています。大荷重を保持するため、超電導軸受部分にY系超電導線材、回転軸部分にY系超電導バルク材が組み込まれています<sup>4)</sup>。

核磁気共鳴(NMR)/MRI用に向けて、リング形状に加工したY系超電導線材とY系バルク材を組み合わせ、小型超電導マグネット(図10)の

高品質磁場化、大口径ボア化を、マサチューセッツ工科大学と共同で進めてきました(図8)<sup>10)</sup>。特に大口径ボア化が実現できると、従来の大型超電導コイルマグネットとは異なり、可搬性を有した小型な超電導マグネットが実現でき、移動困難な汎用の超電導コイルマグネットをステーション化し、必要な場所に任意の磁場空間を自由に配置することを目指しています。

### おわりに

鉄道分野への適用が期待される、イットリウム系超電導線材の開発状況、および応用機器への適用状況について紹介しました。今後、材料開発とともに、実用材として必要な技術開発を進めていきます。

なお、これらの研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金、国立研究開発法人科学技術振興機構(JST)及び国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援を受けて行っています。**RRR**

### 文献

- 1) M. Tomita et al.: Energy-saving railway systems based on superconducting power transmission, Energy, 122, 579-587, 2017
- 2) Superconductors drive trains, Nature, 542, 275, 2017
- 3) M. Tomita et al.: Superconducting Properties of a Prototype Pancake Coil Using a MgB<sub>2</sub> Rutherford-Type Stranded Conductor, IEEE Trans. Appl. Supercond, Vol.28, No.3, pp.1-4, 2018
- 4) 山下知久, 小方正文, 松江仁, 宮崎佳樹, 杉野元彦, 長嶋賢: 超電導フライホイール蓄電システムの信頼性検証と鉄道への応用, 鉄道総研報告, Vol.31, No.1, pp.47-52, 2017
- 5) 上條弘貴, 秦広, 池田和也, 長嶋賢, 宮崎佳樹, 福本祐介: 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, pp.23-28, 2009
- 6) 福本祐介, 上條弘貴, 坊野敬昭, 岡岡章, 山田尚生, 船木和夫, 岩熊成卓: 低交流損失Bi2223超電導線を適用した巻線の特性評価, 第79回秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 1P-p20, 2008
- 7) 鈴木賢次, 富田優: イットリウム系超電導線材の開発, 鉄道総研報告, Vol.31, No.8, pp.47-52, 2017
- 8) M. Tomita et al.: Critical Current Properties of HTS Twisted Stacked-Tape Cable in Subcooled- and Pressurized-Liquid Nitrogen, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 102 012024, 2015
- 9) 富田優, 小林祐介, 鈴木賢次: 太陽光発電システムを使った鉄道用超電導ケーブルの通電試験, 第86回秋季低温工学・超電導学会講演概要集, 2P-p21, 2012
- 10) 富田優: 超電導技術の産業応用研究の動向, RRR, Vol. 74, No.8, pp. 4-7, 2017