

# メタルジャケット付き高温超伝導導体の機械的接合の基礎研究

Fundamental study on mechanical joint of HTS conductor with metal jacket

伊藤 悟<sup>1</sup>, 橋爪 秀利<sup>1</sup>, 大日方 達也<sup>1</sup>, 川井 健司<sup>1</sup>, 小黒 英俊<sup>2</sup>

<sup>1</sup>東北大・工, <sup>2</sup>東北大・金研

S. Ito<sup>1</sup>, H. Hashizume<sup>1</sup>, T. Ohinata<sup>1</sup>, K. Kawai<sup>1</sup> and H. Oguro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Tohoku University

<sup>2</sup> Institute for Materials Research, Tohoku University

## 1. はじめに

本研究グループでは核融合炉の建設コスト、メンテナンスコストを削減する新しい設計案として、Fig. 1 に示すようなマグネットを分割製造し着脱可能とする分割型高温超伝導マグネットを提案している[1,2]。本設計は複雑、かつ巨大な超伝導マグネットを有するヘリカル炉の工学的課題を解決するために有効である。また米国では、Component-Test Machine として分割型高温超伝導マグネットを採用したトカマク炉の設計も進められている[3]。

マグネットを着脱可能とするためには、機械的接合法を採用する必要がある。本設計では、接合部でのジュール発熱を許容するため、使用温度域を上げることで比熱をある程度大きくできる高温超伝導体を材料として選択している。使用温度域を高めた場合、冷却に必要な電力を減らすことができるため、接合部である程度の損失があったとしても、分割型高温超伝導マグネットの運転コストは低温超伝導体の超伝導マグネットのそれよりも低くすることが可能である。

本研究グループでは分割型高温超伝導マグネットに適用する接合法の1つとして Fig. 2 の左図に示す機械的バットジョイントを提案し、過去の研究において、BSCCO 2223 線材を使用した銅ジャケット付き積層導体（臨界電流値  $I_C = 1 \text{ kA}$  at 77 K, self field）の機械的バットジョイント試験を行い[4]、接合抵抗  $0.14 \mu\Omega$  を達成した。しかしながら、BSCCO 2223 は強磁場中において臨界電流が著しく低下してしまう材料であるため、核融合炉で使用することができない。そのため、強磁場環境下において比較的臨界電流値を高く保つことのできる REBCO 系（YBCO, GdBCO など）高温超伝導テープを用いて製作した高温超伝導導体の機械的バットジョイント法の開発が必要となる。以上の経緯より、昨年度から GdBCO 導体の機械的バットジョイントの試験を開始した。

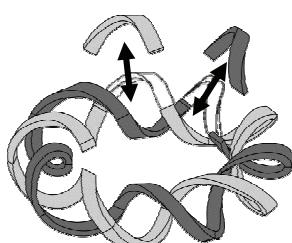


Fig. 1 Schematic view of a remountable (demountable) high-temperature superconducting magnet.

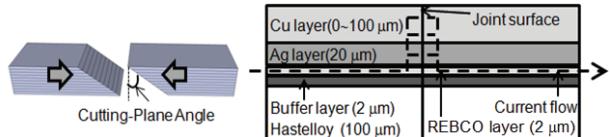


Fig. 2 Schematic views of the mechanical butt joint.

昨年度実施した実験では、GdBCO 導体の機械的バットジョイントで得られた接合抵抗が、BSCCO 導体のそれに比べて大きくなる結果となった。また、6T-CSM を用いて磁場を印加し、接合抵抗を評価したが、1 T を超える磁場では、ノイズにより臨界電流および接合抵抗を評価することができなかった。そこで、GdBCO 導体の機械的バットジョイントの接合抵抗を低減するため、GdBCO 導体の構造と接合抵抗の関係を数値解析および実験により評価した。また、接合抵抗や臨界電流を評価するうえで必要な電圧測定においてフィルタ処理を適用し、1 T を超える外部磁場印加時の接合抵抗を評価した。なお、今年度も一連の実験は 6T-CSM に 500A の電流印加が可能な機械的接合試験装置（液体窒素浸漬冷却体系）を設置して行った。

## 2. 導体構造が接合抵抗に与える影響の評価

### 2-1. 数値解析

REBCO 線材を用いた機械的バットジョイントでは、Fig. 2 右図に示すように、接合部において電流が REBCO 線材の導電層（銀層や銅層）を介して流れると考えられる。すなわち導電層を厚くすることで接合抵抗の低減が可能であると考えられる。そこで、まず、テープ導電層厚さが接合抵抗に与える影響を、一枚の REBCO テープ同士のバットジョイントを模擬した2種類のモデル（モデル A と B）を用いて、二次元電流分布解析により評価した。各モデルを Fig. 3 に示す。モデル A は銀-銅層間に接触抵抗が存在しない理想的な体系を模擬した体系であり、モデル B は銀-銅層間にひんだによる接続抵抗が存在する（後述する実験で用いる）GdBCO テープの仕様を模擬した体系である。各モデルにおいて、接合面角度は 0 度であり、接合部におけるずれや隙間はないものとした。また、絶縁層である中間層には電流は流れないので、モデル化において中間層とハステロイ層は除外した。モデル B では銀層と銅層の間に厚さ  $20 \mu\text{m}$  のひんだ層を設定し、その電気抵抗率を、過去の研究で報告されている YBCO テープのはんだによるラップジョイントの接合抵抗率 ( $3 \times 10^{-12}$

$\Omega \cdot m^2$  [5]を基に決定した。本解析では、銀層、はんだ層、銅層の接合部に仮想的な導体を導入することで接触抵抗を表現している。この仮想導体の電気抵抗率は、過去の研究で行った BSCCO 2223 積層導体を用いた機械的バットジョイント試験から得られた接合抵抗に銀安定化層の接合面積をかけて求めた接合抵抗率 ( $1.06 \times 10^{-12} \Omega \cdot m^2$ ) [4]を基に設定した。また、電流が超伝導層から超伝導層に流れないことを模擬するため、非常に大きな電気抵抗率を持つ仮想的な絶縁体を超伝導層の接合部に導入した。Table 1 に各構成材料の電気抵抗率を示す。本解析には商用有限要素法コードの ANSYS を用いた。また、Fig. 3 に示すように超伝導層の両端に境界条件として電位ポテンシャルを設定し、その電位差は 0.1 mV とした。要素としては 4 節点アイソパラメトリック要素を用い、要素数は約 1000 個とした。さらに、全計算領域のジュール損失を算出することにより接合抵抗（接触抵抗と電流分布によって発生する導電層抵抗の和）を評価した。以上の解析方法を用いて導電層厚さ  $x$  と接合抵抗の関係を評価した。

解析結果を Fig. 4 に示す。この図において、Simple Estimation は接合抵抗がテープ導電層の接合断面積に反比例すると仮定した場合の曲線である。モデル A の結果は Simple Estimation より若干大きい値となった。これは、導電層厚さが増加するにつれて、電流が導電層を通過する距離が長くなるためだと考えられる。導電層厚さの増加とともに接合抵抗の低減率は銅層厚さ 100  $\mu m$  で既に小さくなっている。また導体性能の指標となる工学的臨界電流密度が導電層厚さの増加とともに低下することから、導体設計に対して最適な導電層厚さが存在すると考えられる。また、モデル B における接合抵抗はモデル A におけるそれよりも大幅に大きくなっている。これは、はんだによる接続抵抗が接合抵抗に大きく影響を与えている事を意味する。すなわち、接合抵抗をより低減させるためには銀-銅層間の界面抵抗が小さいテープを使用することが必要であり、例えば、銅層が蒸着接合されているような REBCO 系テープ等がその候補として考えられる。

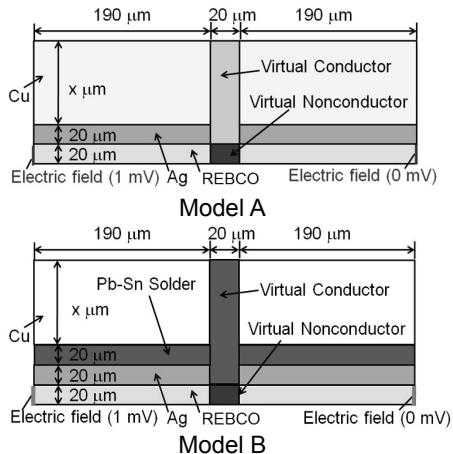


Fig. 3 Numerical models.

Table 1 Electrical resistivity of constituted material.

Material	Electrical Resistivity ( $\Omega \cdot m$ )
Cu	$0.2 \times 10^{-8}$
Ag	$0.3 \times 10^{-8}$
GdBCO	$1.0 \times 10^{-20}$
Virtual Conductor	$5.28 \times 10^{-8}$
Virtual Nonconductor	1.0
Pb-Sn solder	$1.5 \times 10^{-7}$

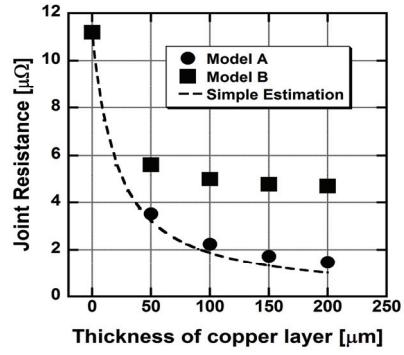


Fig. 4 Numerical results.

## 2-2. 接合試験

続いて、REBCO 線材の銅層厚さと接合抵抗の関係を、GdBCO 導体を用いた機械的バットジョイント試験により評価した。なお、今回は昨年度の実験結果[6]と新たに行う実験の結果を比較することで、上記検証を行うものとする。今回の実験で用いた試験用導体と試験部を Fig. 5 に示す。試験用導体は昨年度の実験と同様に GdBCO テープを 4 枚使用した銅ジャケット付き GdBCO 積層導体とした。この導体は幅 5 mm の GdBCO テープを銅ジャケットの中に 4 枚積層し、はんだで含浸して製作したものである。昨年度に行った実験で使用した GdBCO テープは上から銀層 (20  $\mu m$ )、GdBCO 層 (2  $\mu m$ )、中間層 (2  $\mu m$ )、ハステロイ層 (100  $\mu m$ ) の層状構造をしている。一方、今回使用した GdBCO テープは昨年度に用いた GdBCO テープの銀層の上に銅層 (100  $\mu m$ ) がはんだ付けされた構造をしている。いずれの試験用導体も、一体で作られた導体の中心部を角度 45° で切断することで一対の試験用導体とした。切断面は機械的バットジョイントにおける接合面とす

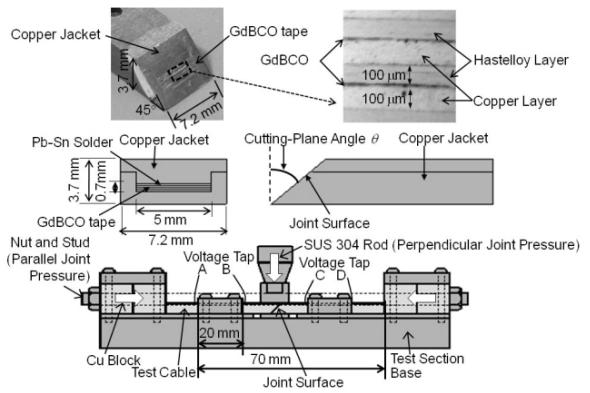


Fig. 5 Test conductors and test section.

るため 1500 番の砥石で研磨した。なお、本試験では、接合部における GdBCO テープのずれの影響を軽減するために、接合部に厚さ 20  $\mu\text{m}$  のインジウム箔を挿入した状態で接合試験を行っている。Fig. 5 に示されている試験体系では接合部に垂直方向と平行方向の接合力を負荷することができる。垂直方向の接合力は SUS 304 製のロッドによって与えることができ、試験部を液体窒素で浸漬冷却する前後に關わらず、液体窒素容器の外に設置されているハンドルとロードセルを用いて制御することができる。また、平行方向の接合力は両脇のスタッドボルトとナットを締めることによって与えることができ、ナットの締結トルクによって制御した。本実験では冷却前に平行方向の接合力をトルク 1.6 Nm で制御し、冷却後に垂直方向の接合力をロッド下面で接触圧力が 60 MPa となるように制御した。接合抵抗は電圧端子 A-D 間の電圧降下より算出した。また、電圧端子 A-B 間の電圧降下より、GdBCO 導体の電流-電圧特性（臨界電流特性）をモニタした。

本実験結果、昨年度の実験結果、2.1 節の数値解析結果（モデル B）におけるテープの銅層厚さと接合抵抗の関係を Fig. 6 に示す。なお、数値解析結果については、4 枚積層導体の接合抵抗にするために、2.1 節の結果を 1/4 倍している。本実験で得られた接合抵抗は 0.83  $\mu\Omega$  であり、過去の実験で得られた接合抵抗の約 69 % となった。これは、テープ導電層の厚さが増加したことにより電流が通過する断面積が増加し、接合抵抗が低下したためであると考えられる。しかしながら、実験結果は数値解析結果に比べ大幅に低い値となった。これは接合部において電流が銅ジャケットに迂回したためであると考えられる。すなわち、超伝導テープ層から直接超伝導テープ層に流れる電流経路と銅ジャケットを迂回する電流経路が存在し、実験ではこの並列回路における合成抵抗を測定したため、数値解析で評価した超伝導層から超伝導層に直接流れる電流経路における接合抵抗と比較して過小評価したものと考えられる。ここで、この並列回路における銅ジャケットを迂回する経路の抵抗を、導電層厚さが異なる 2 つの数値解析結果と実験結果により算出すると、約 2  $\mu\Omega$  となり整合性を確認できる。しかしながら、テープ同士の接合抵抗を実験によって取得し数値解析結果と正しく比較するためには、銅ジャケットに電流が迂回しないよ

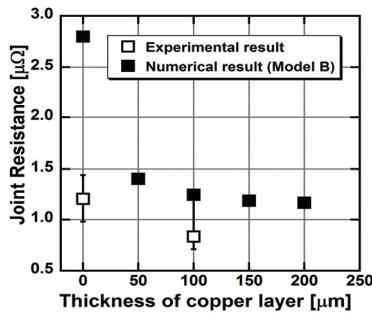


Fig. 6 Experimental results.

うに導体サイズを大きくすること、もしくは試験用導体内の電流分布を把握するための三次元電流分布解析を実施することが必要になる。

### 3. 磁場印加時の接合抵抗評価

昨年度は磁場印加時のノイズにより、GdBCO テープ・導体の臨界電流および接合抵抗を～1 T の条件下でしか取得することができなかつた。そこで、測定電圧の時系列データに対して単純移動平均を取ることで、ノイズを除去することを試みた。まず、6T-CSM を用い、GdBCO 線材の c 軸方向に平行な磁場を 5 T まで印加し磁場-臨界電流特性を取得した。なお、電圧端子間距離は 3 cm、臨界電圧は 1  $\mu\text{V}/\text{cm}$  とした。実験結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 のプロットは実験結果、破線は文献値[7]である。本手法により、測定におけるノイズを除去し、～5 T の磁場印加時における磁場-臨界電流特性を得られることができた。

続いて、前年度の実験[6]で用いた GdBCO 導体（銅層なし GdBCO テープ 4 枚積層導体）を用いて、磁場-接合抵抗特性を評価した。なお、本実験は液体窒素浸漬冷却体系で行っており、3 T を超える磁場では臨界電流がゼロに近くなるため、印加磁場は～3 T とした。導体の臨界電流の 7 割の電流を印加した際の結果を Fig. 8 に示す。印加磁場の増加により、接合抵抗は上昇した（0 T → 3 T で 5 % 程度の上昇）が、77 K, 3T 程度の環境では、接合抵抗はほぼ変化しないと言えるレベルであることが確認できた。今後は、伝導冷却体系を用いて、より広範囲の温度、磁場条件で接合抵抗を取得する予定である。

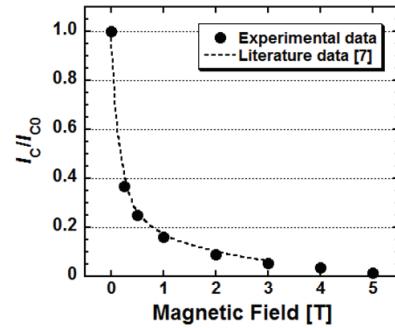


Fig. 7 Relationship between magnetic field and critical current of GdBCO tape.

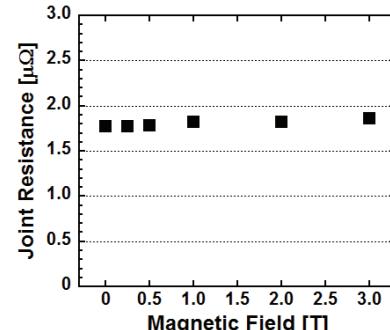


Fig. 8 Relationship between magnetic field and joint resistance in mechanical butt joint of GdBCO conductor.

#### 4. まとめ

GdBCO 線材の導電層の厚さの増加により機械的バットジョイントにおける接合抵抗が低減できることを二次元電流分布解析と接合試験により確認した。また、GdBCO 導体の磁場-接合抵抗特性を取得し、垂直磁場 3 T まででは、接合抵抗がほぼ変わらないことを確認した。

今後は、より大型導体を用いた接合試験と電流分布解析を行い、実機における設計を満足する導体構造および接合法を検討する。また、伝導冷却を用いた接合試験体系を整備し、より広範囲の温度、磁場条件で接合抵抗を取得し、核融合炉用分割型高温超伝導マグネット設計のためのデータベースを構築する予定である。

#### 参考文献

- [1] H. Hashizume, S. Kitajima, S. Ito, K. Yagi, Y. Usui, Y. Hida, A. Sagara, "Advanced fusion reactor design using remountable HTc S.C. magnet", Journal of Plasma Fusion Research SERIES, vol. 5, (2002), pp. 532-536.
- [2] S. Ito, H. Hashizume, "Overview of fundamental study on remountable HTS magnet", Fusion Engineering and Design, vol. 81, (2006), pp. 2527-2533.
- [3] Z. S. Hartwig, C. B. Haakonsen, R. T. Mumgaard, and L. Bromberg, "An initial study of demountable high-temperature superconducting toroidal field magnets for the Vulcan tokamak conceptual design", Fusion Engineering and Design, vol. 87, no. 3, (2012), pp. 201-214.
- [4] S. Ito, H. Hashizume, "Investigation of an optimum structure for mechanical butt joint of a stacked HTS cable with a metal jacket", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 21, no. 3, (2011), 1995-1999.
- [5] N. Yanagi, T. Mito, R. Champailler, G. Bansal, H. Tamura, A. Sagara, "Design progress on the high-temperature superconducting coil option for the heliotron-type fusion energy reactor FFHR", Fusion Science and Technology, vol. 60, (2011), pp. 648-652.
- [6] 伊藤悟, 橋爪秀利, 小黒英俊, 淡路智, 「メタルジヤケット付高温超伝導導体の機械的接合の基礎研究」, 東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター平成 22 年度年次報告, (2011), pp. 50-52.
- [7] 岡元洋, 二森茂樹, 伊藤喜久男, 斎藤隆, 町敬人, 塩原融, 「Gd 系高温超電導線材の臨界電流の温度磁場特性」, 独立行政法人 物質・材料研究機構 共用基盤部門 強磁場共用ステーション 2009 年度成果報告書, (2010), pp. 65-66.