

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：55101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04584

研究課題名（和文）高分解能 $\mu$ MRIへの応用を目指した脱着可能なBi系高温超伝導接合の臨界電流改善

研究課題名（英文）Improvement of critical current in superconducting detachable joint for high-resolution micro MRI

研究代表者

田中 博美（Tanaka, Hiromi）

米子工業高等専門学校・その他部局等・教授

研究者番号：60511491

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では脱着式Bi系高温超伝導接合で問題となっている低い臨界電流の改善を目指した研究を行った。接合の作製には圧着法などの簡単な手法を採用し、接合作製における条件を最適化した。そして作製した接合の特性評価を行なった。なお、圧着法の前処理として、Bi系高温超伝導線材の最外皮である補強用金属材（補強材）を、非加熱で機械的に取り除く手法を施した。実験の結果、ウェットエッチングにより補強材を除去する従来法に比べて補強材除去時における特性劣化を低減できることが明らかになった。また、作製した接合の超伝導転移温度は、接合作製前のBi系高温超伝導線材自身と同程度であり、線材特性が維持されていることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高分解能 $\mu$ MRIは関節リウマチの早期発見など、幅広い分野での利用が可能であり世界中で研究が進められている。特に分解能100 $\mu$ m以上の高分解能 $\mu$ MRIは、コイル化し易いBi系高温超伝導線材をパンケーキ状に巻いて作製する。コイル間をゼロ抵抗で接続する必要があるが、現状では接合部の超伝導特性が低いという問題がある。本研究では、この接合部の超伝導特性を改善するため、補強材を非加熱で機械的に取り除く手法および圧着法の導入を行った。その結果、優れた高温超伝導接合を得ることに成功した。本研究の進展により、高分解能 $\mu$ MRIの実用化が促進され、先端医療診断を安価に受けられる社会の実現に寄与できたと考えている。

研究成果の概要（英文）：In this research, we focused on improving critical current in Bi-based high-temperature superconducting (Bi-based HTS) joint. To fabricate the Bi-based HTS joint, we adopted simple method named “pressing method” for connecting between two Bi-based HTS conductors. In advance of the pressing method, we mechanically peeled a supporting Ni-alloy layer. We named the peeling method as “mechanically peeling method”. As a result, we found that the mechanically peeling method is useful to reduce the chemically damaged layer at interface between two Bi-based HTS conductors. In addition, we succeeded in producing Bi-based HTS conductors’ joints which have superconducting transition of 109K. The superconducting transition value is same as the one of original Bi-based HTS conductor. These results indicate that our new method is useful to produce the Bi-based HTS conductors’ joint with good superconducting properties.

研究分野：電気電子材料工学

キーワード：電子・電気材料 解析・評価

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

高分解能 $\mu$ MRIは関節リウマチの早期発見や食品異物検査など、幅広い分野での利用が可能であり世界中で研究が進められている。特に分解能 $100\mu\text{m}$ 以上の高精度な $3\text{T-}\mu\text{MRI}$ は、コイル化し易い $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$  (Bi系)高温超伝導線材をパンケーキ状に巻いて作製する。作製した複数のコイル間はゼロ抵抗で接続する必要がある。一方で、パンケーキコイル間の接合部である高温超伝導接合の超伝導特性は不十分であり、高分解能 $\mu\text{MRI}$ の実用化を妨げている。そのため、良質なBi系高温超伝導接合の実現が必要となっている。

### 2. 研究の目的

本研究では“脱着可能な”Bi系高温超伝導接合の超伝導特性を改善し、高分解能 $\mu\text{MRI}$ の実用化を促進する。これにより、先端医療診断を安価に受けられる社会を目指す。本研究ではBi系高温超伝導接合の超伝導特性改善のため機械的ピーリングでマルチフィラメントの露出を試みる。そして、露出したフィラメントを直接重ねて圧着し超伝導特性の改善を行った。

### 3. 研究の方法

Bi系高温超伝導線材(住友電工製、DI-BSCCO)において圧着接合法を用いて接合を作製した。接合の作製方法としては、前処理として“機械的ピーリング法”を用いて非加熱で超伝導フィラメントを露出する。そして研磨面を直接重ねて圧着し多数のフィラメント間をつないだ。圧着条件を次の範囲で最適化した。加圧時間： $0.5\sim 5\text{h}$ 、印加圧力： $\sim 100\text{MPa}$ 。

そして、接合 $I_c$ などの超伝導特性を評価するため、電流-電圧特性や抵抗-温度特性を測定し、詳細な評価を行った。

### 4. 研究成果

圧着法を用いてBi系高温超伝導接合を作製し、その超伝導特性の評価を行なった。なお、圧着法の前処理として、Bi系高温超伝導線材の最外皮である補強用金属材料(補強材)を、非加熱で機械的に取り除く手法を施した。その結果、従来法(ウェットエッチングにより補強材を除去)に比べて補強材除去時における化学的ダメージを低減できることが明らかになった。また、銀箱中でBi-2212ペレットと抱き合わせてBi系高温超伝導接合を加熱することで、接合部の組成ずれを抑制でき、超伝導特性も改善できることが明らかとなった。

(1) Bi系高温超伝導線材の補強材を、非加熱で機械的に取り除く手法を検討した。補強材を簡単に剥離させるため、補強材表面の一部に予め亀裂を入れた。そして、亀裂とは反対側から線材に力を印可することで、亀裂をガイドに線材端部を折り曲げた。その後、折り曲げた線材を引き剥がす方向に力を加え続けることによって、非加熱で簡単に剥離が実現できることが分かった。剥離面はBi系高温超伝導多芯線が既に露出しており、従来法であるウェットエッチングにより補強材を除去する際に生じる化学的ダメージを低減できることが分かった。

次に、この機械的除去法で作製した剥離面同士を単純に重ね合わせた後、室温でプレス機を用いて一軸方向加圧した。その後、二つの線材の乖離を防ぐために、はんだ等で線材外部を機械的に結合させ仮補強した。

このようにして作製したBi系高温超伝導接合の抵抗-温度特性を測定したところ、超伝導転移特性が明瞭に観測され、接合界面での電流パスが形成されていることが確認された。これらの結果から、補強材の機械的除去法の導入と一軸方向加圧により、非加熱でも超伝導接合が作製できることが分かった。特に、非加熱およびエッチングレスの双方により高温超伝導多芯線へのダメージを抑制できた点は大きい。

(2) 非加熱で補強材を機械的に取り除いた線材を用いて、接合作製する際の条件を種々に変えながら作製条件の最適化を行った。特に、Bi系高温超伝導線材接合の結合力を向上させるために、プレスした接合に対して加熱処理を施した。このとき、プレス圧力： $100\text{MPa}$ 、加熱時間： $60\text{min}$ 、加熱温度： $\sim 900^\circ\text{C}$ とした。また、加熱中による試料からの酸素が抜けを防止するため、加熱時の雰囲気は酸素雰囲気下とした。なお酸素流量は $50\text{ml/min}$ とした。

実験の結果、加熱温度を $850^\circ\text{C}$ 以上にすると接合の結合力が大きくなり、Bi系高温超伝導線材接合の機械的強度が高くなることが分かった。一方で、超伝導特性は劣化( $T_c$ 以下でも接合に残留抵抗が存在)することが電気輸送特性測定の結果から分かった。そこで、超伝導特性劣化した接合試料に対してEDX組成分析等で丹念に分析した。その結果、接合表面(剥き出しにした線材内部)のBiが大きく減少していることが明らかとなった。そこで、Biの離脱を防ぐためにBi系高温超伝導バルク体(Bi-2212ペレット)を、接合と抱き合わせて $850^\circ\text{C}$ で加熱した。その結果、残留抵抗がなくなり、超伝導特性を確認できた。

(3) Bi離脱を防ぐためにBi系高温超伝導バルク体(Bi-2212ペレット)を、接合と抱き合わせ

る手法を導入し、作製条件の最適化を行った。840 °C、24 h の焼結条件で作製した Bi-2212 ペレットを Bi 系高温超伝導線材接合と共に銀の箱に入れることで、半密閉空間を作った。接合の加熱処理は ~ 850 °C の温度条件下で行った。なお、Bi-2212 ペレットは 0.5g を 4 つ銀箱中に入れ、銀箱内部の Bi 蒸気圧が飽和蒸気圧に達するようにした。作製した Bi 系高温超伝導線材接合の EDX 測定、SEM 観察や電気輸送特性測定を行った。

その結果、加熱処理 850 °C で作製した試料の接合部における組成比は Bi : Sr : Ca : Cu = 1.6 : 1.9 : 2.1 : 2.8 であり、DI-BSCCO 線材の組成比と同程度まで改善されることが分かった。また、Bi 系高温超伝導線材接合の断面を SEM により観察した。その結果、~ 800 °C 加熱では接合内部に亀裂が複数、観察された。一方、銀箱中で Bi-2212 ペレットと抱き合わせて 850 °C で加熱を行った試料では、接合内部に亀裂がなく完全に接合されていることが分かった。加えて、抵抗-温度特性の測定を行った。その結果、接合の超伝導転移温度は 109 K であり、DI-BSCCO 線材の元々の特性が維持されていることが分かった。以上のことから、銀箱中で Bi-2212 ペレットと抱き合わせて Bi 系高温超伝導線材接合を加熱することで、接合部の組成ずれを抑制でき、超伝導特性も改善できることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hiromi Tanaka, Yi Li, Yoonhyuck Choi, Dongkeun Park, Wooseung Lee, Hideki Tanaka, Juan Bascunan, and Yukikazu Iwasa	4. 巻 31
2. 論文標題 An MgB2 Superconducting Joint with its Own Heat-Treatment Schedule	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity,	6. 最初と最後の頁 6200205
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2021.3064517	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Ryo Matsumoto, Sayaka Yamamoto, Yoshihiko Takano, and Hiromi Tanaka	4. 巻 30
2. 論文標題 Crystal Growth and High-Pressure Effects of Bi-Based Superconducting Whiskers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ASC OMEGA	6. 最初と最後の頁 4702305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acsomega.1c00880	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ryo Matsumoto, El Hadi Sadki, Hiromi Tanaka, Sayaka Yamamoto, Shintaro Adachi, Adnan Younis, Hiroyuki Takeya, Yoshihiko Takano	4. 巻 730
2. 論文標題 Concurrent synthesis and boron-doping of amorphous carbon films by focused ion beam-assisted chemical vapor deposition	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Thin Solid Films	6. 最初と最後の頁 138704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tsf.2021.138704	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Choi Yoonhyuck, Park Dongkeun, Li Yi, Tanaka Hiromi, Lee Wooseung, Bascu??n Juan, Iwasa Yukikazu	4. 巻 33
2. 論文標題 Persistent-mode operation and magnetization behavior of a solid-nitrogen-cooled MgB2 small-scale test coil towards a tabletop 1.5-T osteoporosis MRI	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Superconductor Science and Technology	6. 最初と最後の頁 125007 ~ 125007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6668/abba07	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Park Dongkeun, Choi Yoonhyuck, Li Yi, Lee Wooseung, Tanaka Hiromi, Bascunan Juan, Ackerman Jerome L., Tanaka Hideki, Iwasa Yukikazu	4. 巻 30
2. 論文標題 Design of a Magnet and Gradient Coils for a Tabletop Liquid-Helium-Free, Persistent-Mode 1.5-T MgB <sub>2</sub> Osteoporosis MRI	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2981295	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Yi, Park Dongkeun, Lee Wooseung, Choi Yoonhyuck, Tanaka Hiromi, Bascunan Juan, Iwasa Yukikazu	4. 巻 30
2. 論文標題 Screening-Current-Induced Strain Gradient on REBCO Conductor: An Experimental and Analytical Study With Small Coils Wound With Monofilament and Striated Multifilament REBCO Tapes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2974857	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanaka Masashi, Kataoka Noriyuki, Kobayashi Haruya, Fujioka Masaya, Oda Masaru, Yamamoto Aishi, Terashima Kensei, Nishii Junji, Tanaka Hiromi, Yokoya Takayoshi	4. 巻 153
2. 論文標題 Modification of the synthesis of layered titanium chloride nitride	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Materials Research Bulletin	6. 最初と最後の頁 111896 ~ 111896
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.materresbull.2022.111896	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamamoto Sayaka, Matsumoto Ryo, Adachi Shintaro, Terashima Kensei, Tanaka Hiromi, Irifune Tetsuo, Takeya Hiroyuki, Takano Yoshihiko	4. 巻 334-335
2. 論文標題 Pressure-induced superconductivity in TiGeTe <sub>6</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Solid State Communications	6. 最初と最後の頁 114363 ~ 114363
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ssc.2021.114363	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Matsumoto Ryo, Hou Zhufeng, Adachi Shintaro, Yamamoto Sayaka, Tanaka Hiromi, Takeya Hiroyuki, Irifune Tetsuo, Terakura Kiyoyuki, Takano Yoshihiko	4. 巻 33
2. 論文標題 Experimental Observation of Pressure-Induced Superconductivity in Layered Transition-Metal Chalcogenides (Zr,Hf)GeTe <sub>4</sub> Explored by a Data-Driven Approach	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemistry of Materials	6. 最初と最後の頁 3602 ~ 3610
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.chemmater.1c00272	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Murakami Ryo, Yoshikawa Hideki, Nagata Kenji, Shinotsuka Hiroshi, Tanaka Hiromi, Iizuka Takeshi, Shouno Hayaru	4. 巻 2
2. 論文標題 Automatic estimation of unknown chemical components in a mixed material by XPS analysis using a genetic algorithm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science and Technology of Advanced Materials: Methods	6. 最初と最後の頁 91 ~ 105
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/27660400.2022.2061878	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 H. Tanaka, R. Matsumoto, S. Yamamoto, H. Muto, and Y. Takano
2. 発表標題 Crystal Size Improvement of Bi-based High Temperature Superconducting Whiskers under Stress-Controlled Condition
3. 学会等名 Materials Research Meeting (MRM2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中博美, 松本凌, 山本紗矢香, 高野義彦, 武藤浩行
2. 発表標題 応力を利用したBi系高温超伝導ウィスカーの育成
3. 学会等名 日本セラミックス協会 第34回秋季シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松本凌, 田中博美, 高野義彦
2. 発表標題 高温超伝導体の探索と実用化に向けた取り組み
3. 学会等名 第70回応用物理学会 春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中 博美, 谷村 凌, 大田 修太郎, 武藤 浩行
2. 発表標題 雰田気制御によるBi系高温超伝導ウィスカーの育成
3. 学会等名 日本セラミックス協会; 第35回秋季シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 檀田 英治, 川崎 太楼, 松本 祐也, 田中 博美
2. 発表標題 小型 MRI の実現を目指した超伝導接合の特性改善
3. 学会等名 2022年度 応用物理・物理系学会 中国四国支部 合同学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------