

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 8 日現在

機関番号：74301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420669

研究課題名(和文)超伝導臨界電流の一軸圧縮/引張歪依存性とその非対称性 = 工業化技術の完成に向けて =

研究課題名(英文) Asymmetric behavior of the uniaxial compressive and tensile dependence of superconducting critical current

研究代表者

長村 光造 (Osamura, Kozo)

公益財団法人応用科学研究所・その他部局等・理事・特別研究員

研究者番号：50026209

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：臨界電流の一軸歪依存性等の機械 超伝導特性を調べるため新しくスプリングボード用いて圧縮から引張側まで臨界電流を測定する方法を完成し、J-PARC「匠」に極低温一軸性応力負荷装置を設置した。臨界電流の一軸歪依存性を(a)単純に引張歪を印加する方法、(b)スプリングボードにより圧縮から引張の全一軸歪を印加する方法で測定した。量子ビーム回折による歪測定と計算により超伝導層に加わる熱歪を考慮した局所歪と臨界電流の関係は(a)、(b)の両データを合理的に説明できることを示した。実用的な観点から除荷時の規格化された $I_{cr}/I_{c0}$ が99%に戻るときの引張応力・歪を可逆限界値と定義することの妥当性を示した。

研究成果の概要(英文)：The present study tried to elucidate the effect of uniaxial stress / strain on the critical current of practical REBCO and BSCCO tapes. An inverse parabolic behavior was observed for the uniaxial strain dependence of  $I_c$  of REBCO tapes. From the quantum beam experiments, the local strain exerted on the REBCO layer itself was evaluated. The proposed one-dimensional chain model can explain its parabolic strain behavior. The critical current of the BSCCO tapes decreased linearly with tensile strain and returned reversibly with decreasing strain in a small strain region. When compressive strain was applied, the critical current first increased and then reached a weak maximum. The quantum beam diffraction suggested that the local strain changed linearly with applied strain where the reversible strain dependence of  $I_c$  was observed. For the industrial application, the tensile stress and strain at 99% recovery of  $I_c$  were proposed for the reversible stress and strain limits.

研究分野：材料物理学

キーワード：金属物理 超伝導 高温超伝導体 臨界電流 量子ビーム回折 量子磁束 局所歪

## 1. 研究開始当初の背景

21世紀の科学・技術の要として超伝導技術は最重要キーテクノロジーのひとつであり、これまでにヒッグス粒子の実験的証明に使用された素粒子検出器、超伝導リニアモーターカーあるいは熱核融合炉 ITER 原型炉に超伝導コイルが使用されている。これらの機器には数キロメートルにおよぶ長尺の超伝導線が使われるが、現在実用化が進められている超伝導テープ線材の共通する特徴は脆弱な金属間化合物である  $Nb_3Sn$ ,  $MgB_2$  や酸化物 REBCO ( $REBa_2Cu_3O_{6+d}$ , RE= 希土類元素)、BSCCO ( $(Bi,Pb)_2Sr_2Ca_xCu_{x+1}O_{5x}$ ,  $x=1,2$ ) を如何に安定に利用するかが喫緊の問題となっており、その解決のため延性のある金属と複合化する対策が取られている。

金属との複合体にすることにより超伝導成分に生起する局所歪の状態は複雑となるので、製造過程や電磁力が発生する動作中の機械 超伝導特性を正確に把握することが極めて重要となる。学問的見地からも、種々の超伝導材料で可逆領域における臨界電流の歪依存性を統一して取り扱える理論の構築が望まれてきた。

## 2. 研究の目的

超伝導複合線材の臨界電流の歪依存性は2つの要因から負荷歪に対して非対称となると考えられる。最近の理論的取扱いによれば臨界電流は超伝導成分に生起する歪がゼロを中心に圧縮歪と引張歪に対して非対称に変化することが予測されている。さらに複合成分である金属からの影響で超伝導成分には圧縮性の熱残留歪が生起するため超伝導成分が破断して臨界電流が劣化する負荷歪は圧縮と引張側で異なる。この複雑さを理解するため回折実験から求めた超伝導成分に生起する歪に対する臨界電流の依存性を調べることにより、提唱される理論がすべての超伝導材料で可逆歪領域におけ

る臨界電流の歪依存性を統一して説明できるかどうか検証することを目的とした。さらに圧縮破断歪、引張破断歪、可逆負荷歪範囲等の機械 超伝導特性を体系的に調べ、その制御・改良方法を考案し産業応用に資する基礎データの収集を行うことであった。

## 3. 研究の方法

本研究で新しく考案したスプリングボードを用いて磁場中で一軸性圧縮 / 引張歪を負荷して臨界電流を測定するとともに量子ビームを用いた回折実験から負荷歪の下での超伝導成分に生起する局所歪を決定した。それらのデータより臨界電流の局所歪依存性を実験的に明らかにし、理論的に予測される臨界電流の歪に対する非対称性および磁場依存性を検証した。実用的に重要な4系統の超伝導線材についてスケーリングパラメータ  $b$ ,  $Kd^2$  等を決定して臨界磁場、臨界温度、コヒーレンス長さ等の物性パラメータとの相関を明らかにした。引張試験、スプリングボードを用いた局所歪測定から熱残留歪、破断歪、弾性定数、耐力、引張強度等のデータを得た。これらのデータと臨界電流の歪特性をもとに臨界電流の負荷歪依存性、応力 歪曲線および可逆負荷歪範囲を予測する方法を考案し、実用超伝導複合線材を設計し、歪特性を制御・改良するための基礎を完成することを試みた。

## 4. 研究成果

臨界電流の一軸応力依存性の実験に関して応用科学研究所に所有する応力負荷環境下での臨界電流測定装置の試料ホルダー部分を本研究で提案するスプリングボードに交換し、圧縮側から引張側まで一軸性の応力を負荷して、無磁場のもとで臨界電流を測定する方法を完成した。これにより試料に貼り付けた歪ゲージにより負荷歪の関数として臨界電流を測定できるようになった。また磁場中臨界電流測定のため現有の臨界電流測定装置を改良して試料に磁場を印加

するため、長さ 50mm, 幅 20mm の試料範囲に均一磁場が印加でき、また磁場強度を変動できる装置の製作を行った。

低温一軸性応力負荷のもとでの歪測定環境の整備のため J-PARC「匠」に設置されている低温引張試験装置の一部を改良して一軸応力環境下で超伝導成分に生起する局所歪の測定を可能にする極低温一軸性応力負荷装置を製作し、設置した。

超伝導複合線材の臨界電流の歪依存性は 2 つの要因から負荷歪に対して非対称となると考えられる。提唱される理論がすべての超伝導材料で可逆歪領域における臨界電流の歪依存性を統一して説明できるかどうか検証することを目的として、次のような研究成果を得た。Superpower, SuNAM 等の実用 REBCO 超電導線の臨界電流の一軸歪依存性を (a)単純に引張歪を印加する方法、(b)springboard に貼り付けて圧縮から引張の全一軸歪を印加する方法で測定した。A>0 の領域で両者の臨界電流の印加歪依存性を見ると、その依存性に違いがあることが解かった。Tape on SB では臨界電流の歪依存性に極大が現れている。この顕著な相違は試料テープをスプリングボードにハンダ付けすることにより REBCO 超電導層に生起する局所歪が変化したことに起因すると考えられる。そこで Tape そのもの、スプリングボードにハンダ付けした Tape の各々について室温で測定した局所歪をもとに計算により 77 K における REBCO 超電導層に生起する局所歪  $A_{REBCO}$  を求めた。一方計算により (a), (b)の条件により生ずる 77K における超電導層に加わる熱歪を考慮した局所歪に対して臨界電流をプロットすると (a), (b)の両データを合理的に説明することができた。つまり臨界電流の真の歪依存性を知るためには、超電導層そのものに加わる局所歪に対する考察が必要であることを実証した。

さらに次のような研究成果を得た。REBCO および BSCCO テープ線材は超伝導層/フィラメントを複数の金属機能層と組み合わせた典型的な複合材料である。これらの機能層は臨界電流の応力・歪特性に著しい影響を与える。応力を負荷した状態で測定した臨界電流  $I_c$  と応力をゼロに戻した時の回復臨界電流  $I_{cr}$  を測定し、臨界電流を初期値で規格化した値、 $I_c/I_{c0}$ ,  $I_{cr}/I_{c0}$  についてそれらの応力・歪依存性について解析を行った。引張負荷により試料が破断等により劣化しなければ、除荷時の値  $I_{cr}/I_{c0}$  は 1 になるはずである。しかし観測された  $I_{cr}/I_{c0}$  は荷重の増加とともに最初は徐々に減少し、ある荷重以上では急激に減少する。この急激な現象は超電導層/フィラメントの破断によるものと考えられる。さらに超電導の破断によるかを確認するため繰り返し荷重負荷試験を行った。実用的な観点から除荷時の値  $I_{cr}/I_{c0}$  が 99% に戻るときの引張応力・歪と定義した。一方従来行われてきた  $I_c/I_{c0}$  が 95% 維持される時の引張応力・歪は妥当性が無いことを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 5 件)

1. K Osamura, S Machiya and G Nishijima;  
“Reversible Stress and Strain Limits of Critical Current of Practical REBCO and BSCCO Wires”, Supercond. Sci. Technol. 29(2016) 094003 (9pp)  
doi:10.1088/0953-2048/29/9/094003
2. K Osamura, S Machiya and D Hampshire;  
Mechanism for the uniaxial strain dependence of the critical current in practical REBCO tapes, Supercond. Sci. Technol. 29(2016) 065019 (17pp)  
doi:10.1088/0953-2048/29/6/065019

3. Takayoshi Nakashima, Kohei Yamazaki, Shinichi Kobayashi, Tomohiro Kagiya, Masashi Kikuchi, Souichirou Takeda, Goro Osabe, Jun Fujikami, and Kozo Osamura, "Drastic Improvement in Mechanical Properties of DI-BSCCO Wire With Novel Lamination Material", IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY Vol 25, No.3 (2015)6400705(5pp)  
doi: 10.1109/TASC.2014.2385873
4. Kozo Osamura, Shutaro Machiya, Stefanus Harjo, Tatsushi Nakamoto, Najib Cheggour and Arend Nijhuis, "Local Strain Exerted on Nb<sub>3</sub>Sn Filaments in an ITER Strand", Supercond. Sci. Technol. 28 (2015) 045016 (9pp) doi:10.1088/0953-2048/28/4/045016
5. Kozo Osamura, Shutaro Machiya, Damian P Hampshire, Yoshinori Tsuchiya, Takahisa Shobu, Kentaro Kajiwara, Goro Osabe, Kouhei Yamazaki, Yuichi Yamada and Jun Fujikami, "Uniaxial strain dependence of the critical current of DI-BSCCO tapes, Supercond. Sci. Technol. 27 (2014) 085005 (11pp) doi:10.1088/0953-2048/27/8/085005

〔学会発表〕(計 5件)

- 1 .長村光造、町屋修太郎、西島元; 実用 REBCO および BSCCO 線材における臨界電流の可逆応力・歪限界、第94回低温工学・超電導学会講演概要集(May, 2017)178
- 2 . 長村 光造、町屋 修太郎、Hampshire Damian ; 実用 REBCO 超電導線における臨界電流の一軸歪依存性のメカニズム、第93回低温工学・超電導学会講演概要集(May, 2016)19
- 3 . 長村 光造、町屋 修太郎、Hampshire Damian ; 実用 REBCO 超電導線における臨界電流の一軸歪依存性、第92回低温工学・超電導学会講演概要集(Dec, 2016)220
- 4 . 長部 吾郎, 鍵山 知宏, 山崎 浩平, 菊地 昌志, 中島 隆芳, 武田 宗一郎,

門谷 琢郎, 岡田 朋之, 小林 慎一, 林 和彦, 加藤 武志, 佐藤 謙一, 北口 仁, 下山 淳一, 長村光造; 高強度 DI-BSCCO 線材の開発、第92回低温工学・超電導学会講演概要集(Dec, 2015)33

5 . 長村光造、町屋修太郎、西島元(NIMS), 実用 REBCO テープ線の77Kにおける機械超電導特性、第91回低温工学・超電導学会講演概要集(May, 2015)88

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

6 . 研究組織

(1)研究代表者 長村光造

( Osamura, Kozo )

公益財団法人応用科学研究所・その他部局等・理事・特別研究員

研究者番号: 50026209

(2)研究分担者 町屋修太郎

( Machiya, Shutaro )

大同大学・工学部・准教授

研究者番号: 40377841