

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360281

 研究課題名（和文）ナノ多層化超伝導複合材料の負荷応力下での  
層識別応力状態評価と超伝導臨界電流解析

 研究課題名（英文）Layer-identified stress state evaluation and superconducting critical  
current analysis in stressed nano-multilayered composite superconductor

研究代表者

落合 庄治郎 (OCHIAI SHOJIRO)

京都大学・大学院工学研究科・名誉教授

研究者番号：30111925

研究成果の概要（和文）：

超伝導テープは力学的・電磁気学的の応力が一定以上になると、損傷が生じ、超伝導特性が低下する。そのため、特性評価および信頼性設計には、応力状態が超伝導特性や破壊特性に及ぼす影響を定量的に記述する必要がある。本研究では、応力を負荷されたコーテッド系およびフィラメント系コンダクターについて、X線異常分散を利用した構成各層の力学応答の非破壊評価手法、および、超伝導特性の負荷応力依存性シミュレーション手法の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：

When mechanical and/or electromagnetic stress exceeds a critical value in superconducting composite tape, damage of superconducting phase takes place, resulting in reduction of superconducting property. Accordingly, for evaluation of property and design with high reliability, it is needed to describe quantitatively the influence of stress state on fracture behavior and superconducting property. In the present work, non-destructive estimation method of stress response of the constituents by using X-ray anomalous scattering and simulation method of stress-dependence of superconducting property in stressed coated- and filamentary- composite conductors were developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2011年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012年度	1,800,000	540,000	2,340,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：複合材料，超伝導工学，変形・破壊

科研費の分科・細目：材料工学・複合材料物性

キーワード：複合変形応力，超伝導複合材料，残留応力，臨界電流，モデリング

## 1. 研究開始当初の背景

超伝導複合テープとして、フィラメント系と超伝導層を耐熱合金に被覆したコーテッドコンダクター系が開発されてきた。前者は超伝導物質である $Nb_3Sn$ 、 $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_x$ など

を多芯化して銅や銀に埋め込んだもの、後者は超伝導層 $Re(Y, Dy, Sm)$ などの希土類元素 $Ba_2Cu_3O_y$ （以下、 $ReBCO$ と略称）を膜状に形成させたものである。これら、超伝導複合テープは、医療診断(MRI)や磁気浮上列車に用

いられ、さらに電力貯蔵やスマートグリッド（高効率電力輸送ネットワーク）などへの応用が見込まれている。このテープには、冷却時の構成材間の線膨張率差に起因する残留応力、超伝導磁石作製時にコイルに捲く際の曲げ応力、作動時の電流・磁場で誘起されるローレンツ力などさまざまな応力がかかる。応力が高くなると超伝導相に損傷が生じ、臨界電流・臨界温度・上部臨界磁場などの超伝導特性が低下する。そのため、今後超伝導複合テープを汎用工業材料として実用化するための特性および信頼性設計には、各要素の応力場における力学応答特性と、応力状態が超伝導特性や破壊特性に及ぼす影響を定量的に解明する必要があり、その手法の開発が要望されていた。

## 2. 研究の目的

これまで著者らがフィラメント系で開発してきた X 線回折手法に、元素の吸収端差を利用して多層を識別できる異常分散効果を利用した新規手法を組み込み、コーテッドコンダクターを含む多層化コンダクターの構成各層の応力状態のその場非破壊個別評価手法を開発すること、および、著者らが提唱しているメゾメカニクスによるモデリングを発展的に応用し、上記の直接的な実証データを利用した応力状態と超伝導特性の相関のモデリング・シミュレーション法を構築することを目的とした。

## 3. 研究の方法

フィラメント系コンダクターではフィラメント体積率が約 30%と高く、構成材（フィラメント、銀、銀合金、強化シース）も比較的少ないのに比して、多層化コーテッドコンダクター複合テープの特徴は超伝導層が 1~2mm と薄く、界面結合保持・残留応力制御・結晶方位制御のため多数の中間層を介して超伝導層をエピタキシャル成長させ、その上に銀や強化シースを配置するため、多数の回折ピークが存在するので、超伝導層の識別が難しい。この点が X 線測定では問題となる。本研究では、X 線吸収端の元素による違いを利用して層識別ができ、入射角制御により高散乱強度を得ることができ、かつ X 線回折実験中に負荷応力レベルをできるように、システムを設計した。実験は SPring8 のビームライン 46XU で行った。

負荷応力下での超伝導特性測定では、77K、4 端子法で、負荷応力レベルを変えながら、発生電圧 (V) - 輸送電流 (I) カーブ、臨界電流 ( $I \cdot V/cm$  基準) および超伝導から常伝導への遷移の鋭さを示す n 値を求めた。測定後、被膜破壊の様相を走査電子顕微鏡で観察した。これら一連の実験から、負荷応力下で生

じるさまざまなサイズと分布をもった損傷が臨界電流に及ぼす影響を解析するための基礎データを得て、以下の負荷応力-超伝導特性相関のモデル化およびシミュレーションに供した。

引張負荷応力下での損傷挙動と臨界電流の相関モデル化・シミュレーションは、損傷部での電流迂回による電圧発生モデルを、さまざまな損傷が存在する場合の発生電圧 V - 輸送電流 I カーブ、臨界電流、n 値を記述できるように改善し、コーテッド型およびフィラメント型の両コンダクターに適用した。また応力-ひずみ曲線を利用した超伝導臨界電流の耐ひずみおよび耐力特性に及ぼすシース層体積率の影響のモデル化、“損傷ひずみ”導入による曲げ変形下での臨界電流分布記述法の開発を行った。

## 4. 研究成果

層識別 X 線回折法による超伝導層のひずみ測定研究では、SPring8 のビームライン 46XU に材料種別に応じた治具・部品を工夫して装着することによりコーテッド系・フィラメント系の両方が測定できるようにした。図 1 に DyBCO コーテッドコンダクターに含まれる主な元素について、各元素の原子散乱因子と光子エネルギーの関係を示す。Dy では 7.785 keV が吸収端近傍にある。他の元素の吸収端は図のエネルギー範囲では無い。そこで、本研究では 7.290 keV と 7.785 keV を用いた。

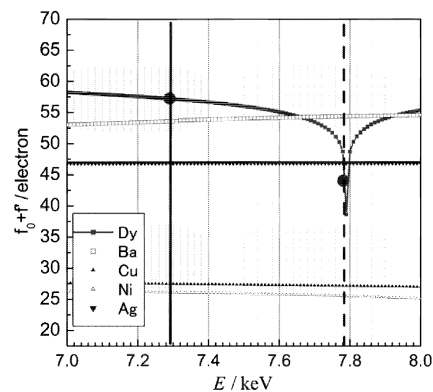


図 1 DyBCO コーテッドコンダクターに含まれる主な元素の原子散乱因子とエネルギーの関係。Dy の吸収端は 7.785 keV。

図 2 に示すように、DyBCO の (110) 面のブラッグピークは吸収端近傍で低い。このように吸収端を用いることによってどの層のブラッグピークであるかを同定できる。この現象を利用することによって、(i) DyBCO 層の

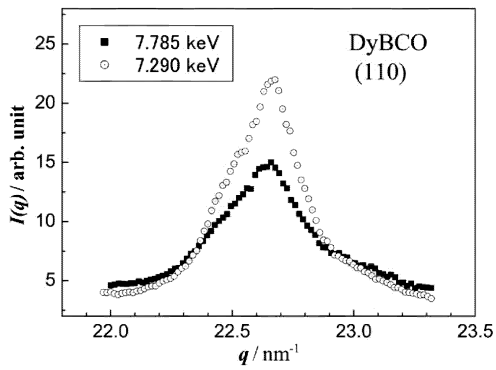


図2 DyBCO の(110)面の吸収端近傍(7.785 KeV)とどこから離れたエネルギーでのブラッグピーク。

ひずみは初期段階ではテープ全体の弾性域における平均ひずみと一致すること、(ii)さらに負荷ひずみを増加させると、構成層であるハステロイ合金がリュウダース変形し、DyBCO 相はその後ほぼ一定値を示すこと、(iii)この原因は DyBCO 層の多重クラッキングによるものであることを明らかにした。

変形・破壊と超伝導特性の関係のモデリング・シミュレーション法の開発研究では、臨界電流値は試片ごとに異なることから、臨界電流分布を、X線回折から求めた熱残留ひずみと引張応力-ひずみ曲線の解析から求めたフィラメントの固有破壊ひずみからなる”損傷パラメータ”と曲げ変形での損傷先端位置との関係の試片ごとの違いをモデル化して求める方法を開発した。この手法により、図3、図4に示すように、実験結果をよく再現できた。

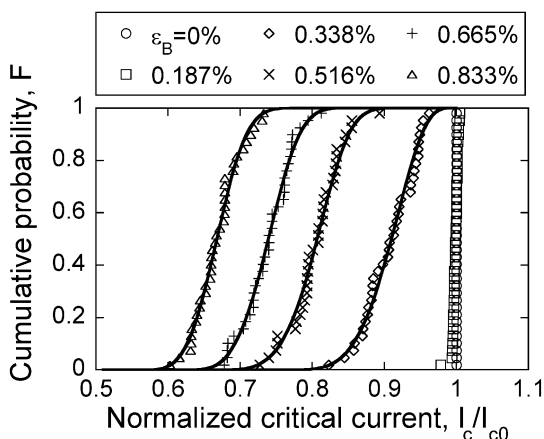


図3 BSCCOフィラメント型コンダクターの臨界電流の集積分布の実験値とモデル計算結果(実線)

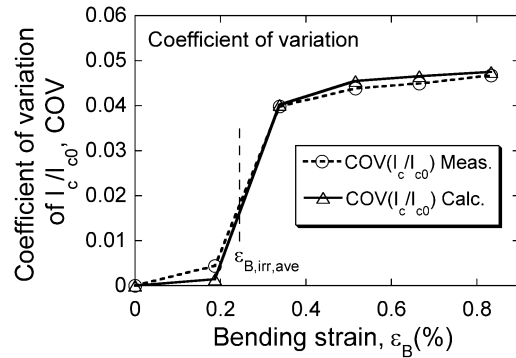


図4 BSCCO フィラメント型コンダクターの臨界電流分布の変動係数の曲げひずみに伴う変化の実験結果とモデル計算結果

安定化銅を増すと超伝導層には冷却の過程で圧縮ひずみがかかり、臨界電流の耐ひずみ特性は改善される。しかし、一方では、銅は基盤(Hastelloy)より柔らかいため、臨界電流の耐応力特性は低下する。このトレードオフ問題を弾塑性解析で解く手法を開発した。結果を図5に示す。

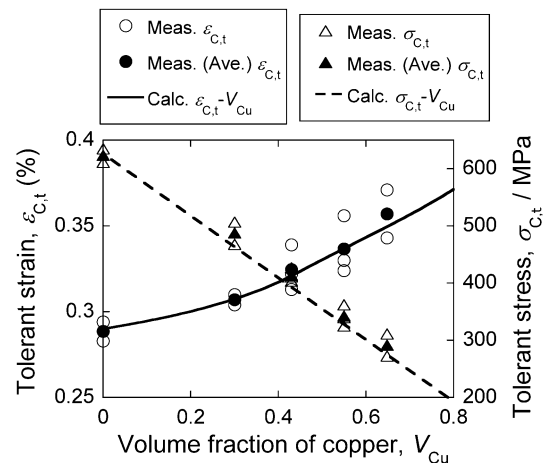


図5 DyBCO コーテッドコンダクターの臨界電流の耐ひずみ特性と耐応力特性の銅シーズ体積率依存性の実験結果とモデル解析結果

さらに、引張負荷応力下のフィラメント型コンダクターにおける集合クラック(collective crack)が臨界電流およびn値に及ぼす影響のモデル化と実証、曲げ変形を受けたフィラメント型コンダクターにおける臨界電流の負荷逆ひずみ分布関数の導出と検証、引張損傷を受けたコーテッド型コンダクターにおけるn値と臨界電流値の相関の定量化、コーテッド型・フィラメント型コンダ

クターに共通するクラック部での迂回電流が臨界電流と  $n$  値に及ぼす影響のモデル解析、フィラメント型コンダクターにおける引張り変形と曲げ変形における  $n$  値と臨界電流の関係の差異の検証と定量解析法の提案など、力学的見地からの超伝導特性評価研究を進展させる結果を得た。

#### 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 25 件)

(1) S. Ochiai, H. Okuda, T. Arai, 他 3 名: "Influence of Copper Volume Fraction on Tensile Strain/Stress Tolerances of Critical Current in a Copper-plated DyBCO-coated Conductor", Mater. Trans. 54 (2013)269-275, 査読有り。

DOI:10.2320/matertrans.MBW201201

(2) S. Ochiai, H. Okuda, M. Fujimoto, 他 3 名 J.-K. Shin, M. Sugano, M. Hojo, K. Osamura, S. S. Oh and D. W. Ha: "Analysis of the Correlation between  $n$ -value and Critical Current in Bent Multifilamentary Bi2223 Composite Tape Based on Damage Evolution Model", Supercon. Sci. Technol., 25 (2012) 054016. 査読有り。

DOI:10.1088/0953-2048/25/5/054016

(3) S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他 3 名: "Relation of Shunting Current at Cracked Part to Critical Current and  $n$ -value in Multifilamentary Bi2223 Composite Tape", Mater. Trans., 53 (2012) 1549-1555. 査読有り。

DOI: 10.2320/matertrans.MAW201201

(4) S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他 7 名: "Relation of  $n$ -value to Critical Current in Bent-damaged Bi2223 Composite Tape", Physics Procedia .27 ( 2012 ) 264 - 267. 査読有り。

DOI: 10.1016/j.phpro.2012.03.461

(5) S. Ochiai, H. Okuda, A. Toda, 他 4 名: "Influences of Cracking of Coated Layer on Critical Current in Coated Composite Superconductor" Mater. Sci. Forum, 706-709 (2012) 143-148. 査読有り。Doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.708-709.143.

(6) S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他 2 名: "Influences of Electroplated Copper on Tensile Strain and Stress Tolerance of Critical Current in DyBCO-Coated Conductor", IEEE Trans. Appl. Supercond., 22 (2012) 8400607. 査読有り。

DOI: 10.1109/TASC.2011.2165844

(7) S. Ochiai, H. Okuda, A. Toda, 他 4 名:

"Influences of Cracking of Coated Layer on Critical Current in Coated Composite Superconductor", Mater. Sci. Forum, 706-709 (2012) 143-148. 査読有り。DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.706-709.143.

(8) S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他 7 名: "Analysis of Distribution of Critical Current of Bent-damaged Bi2223 Composite Tape", IOP Conf. Seri.: Mater. Sci. Eng., 18 (2011)152002. 査読有り。DOI:10.1088/1757-899X/18/15/152002

(9) S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他 2 名: "Influences of Electroplated Copper on Tensile Strain and Stress Tolerance of Critical Current in DyBCO-Coated Conductor", IEEE Trans. Appl. Supercond., 22 (2012) 8400607. 査読有り。DOI: 10.1109/TASC.2011.2165844

(10) S. Ochiai, H. Okuda, T. Arai, 他 4 名: "Relation of Crack-induced Current Shunting to Transport Current and  $n$ -value in DyBCO-coated Superconductor", Cryogenics, 51 (2011) 584-590. 査読あり。DOI:10.1016/j.cryogenics.2011.08.003

(11) S. Ochiai, H. Okuda, M. Fujimoto, 他 3 名: "A Monte Carlo Simulation of Critical Current Distribution of Bent-damaged Multifilamentary Bi2223 Composite tape", Physica C: Supercond. Appl. 471 (2011) 1114-1118. 査読あり。DOI:10.1016/j.physc.2011.05.138

(12) H. Okuda, T. Arai, N. Noda, S. Ochiai, 他 2 名: "In-situ Strain Measurements of Superconducting Composites by Depth and Layer Sensitive X-ray Diffraction Technique Utilizing Synchrotron Radiation", Physica C: Supercond. Appl. 471 (2011) 1067-1070. 査読有り。DOI: 10.1016/j.physc.2011.05.125

(13) S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他 7 名: "A Monte Carlo Simulation of Critical Current Distribution of Bent-damaged Multifilamentary Bi2223 Composite tape", Physica C: Supercond. Appl. 471 (2011) 1114-1118. 査読有り。DOI:10.1016/j.physc.2011.05.138

(14) S. Ochiai, M. Fujimoto, H. Okuda, 他 2 名: "Simulation for Prediction of Distribution of Critical Current among Specimens under Low Applied Bending Strains near the Average Irreversible Strain in Bi2223 Composite Tape", Cryogenics, 50 (2010) 765-771. 査読有り。

DOI:10.1016/j.cryogenics.2010.10.003

(15) S. Ochiai, T. Arai, A. Toda, H. Okuda, 他3名: "Influences of Cracking of Coated Superconducting Layer on  $V-I$  Curve, Critical current and  $n$ -value in DyBCO-coated Conductor Pulled in Tension", J. Appl. Phys., 108 (2010) 063905. 査読有り。DOI:10.1063/1.3488014

(16) S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他7名: "Applicability of Weibull Distribution to Description of Distributed Normalized Critical Current of Bent-damaged Bi2223 Composite Tape", Mater. Trans., 51 (2010) 1663-1670. 査読有り。DOI:10.2320/matertrans.MAW201001

(17) S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他7名: "Modeling Analysis of Irreversible Bending Strain Distribution and Critical Current Distribution at Low Bending Strains of Bi2223- Composite tape", Physica C: Supercond. Appl., 470 (2010) 1401-1405. 査読有り。DOI:10.1016/j.physc.2010.05.123

(18) A. Toda, T. Arai, S. Ochiai, H. Okuda, 他4名: "Influence of Tensile Damage on V-I Curve and Critical Current of DyBCO Coated Conductor", Physica C: Supercond. Appl., 470 (2010) 1346-1349. 査読有り。DOI:10.1016/j.physc.2010.05.109

(19) S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他2名: "Prediction of Variation in Critical Current with Applied Tensile/Bending Strain of Bi2223 Composite Tape from Tensile Stress-Strain Curve", J. Appl. Phys., 107 (2010) 083904. 査読有り。DOI:10.1063/1.3380828

(20) S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他7名: "Analysis of Critical Current Distribution of Bent Bi2223 Composite Tapes by Unifying Parameter Approach and Its Application to Description of Average Critical Current - Bending Strain Relation near the Average Irreversible Strain", Supercond. Sci. Technol., 23 (2010) 025006. 査読有り。

DOI:10.1088/0953-2048/23/2/025006

[学会発表] (計28件)

(1) 落合庄治郎, 奥田浩司, 新井貴博, 他3名: "DyBCO コーテッドコンダクターの臨界電流の耐ひずみおよび耐力特性に及ぼす被覆銅体積率の影響", 日本金属学会 2012年秋期 (第151回) 大会 (愛媛大学城北キャンパス, 2012年9月17日).

(2) 落合庄治郎, 奥田浩司, 菅野未知央, 他4名: "多芯 Bi2223 複合テープにおけるク

ラック部での迂回電流と臨界電流および  $n$  値との関係", 日本金属学会 2012年春期 (第150回) 大会 (横浜国立大学, 2012年3月29日)

(3) S. Ochiai, H. Okuda, M. Fujimoto, 他6名: "Analysis of Correlation between  $n$ -value and Critical Current in Bent Multifilamentary Bi2223 Composite Tape Based on Damage Evolution Model", 6<sup>th</sup> Workshop of Mechanical- Electromagnetic Properties of Superconducting Materials (MEM11) (December 5, 2011, Okinawa).

(4) 落合庄治郎, 奥田浩司, 新井貴博, 他5名: "DyBCO コーテッドコンダクターにおけるクラック部での電流迂回が臨界電流に及ぼす影響", 日本金属学会 2011年秋期 (第149回) 大会 (沖縄コンベンションセンター, 2011年11月9日)

(5) S. Ochiai, H. Okuda, A. Toda, 他4名: "Influences of Cracking of Coated Layer on Critical Current in Coated Composite Superconductor", THERMEC 2011 (7th International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials) August 1-5, 2011, Quebec City, Canada

(6) 落合庄治郎, 奥田浩司, 新井貴博, 他3名: "DyBCO 複合テープ材の超伝導臨界電流に及ぼす DyBCO 層クラッキングの影響", 第54回日本学術会議材料工学連合講演会, 2010年10月27日、ハートピア京都

(7) S. Ochiai, H. Okuda, M. Sugano, 他6名: "Analysis of Distribution of Critical Current of Bent-damaged Bi2223 Composite Tape" 3<sup>rd</sup> International Congress on Ceramics (ICC3), 2010年, 11月16日, 大阪グランドキューブ。

(8) H. Okuda, T. Arai, A. Toda, S. Ochiai, 他2名: "In-situ Strain Measurements of Superconducting Composites by Depth and layer Sensitive X-ray Diffraction Technique Utilizing Synchrotron Radiation", 23<sup>rd</sup> International Symposium on Superconductivity, 2010年11月2日, つくばエポカル。

[図書] (計1件)

(1) S. Ochiai and H. Okuda: Mechanical behavior and its Relation to Critical Current of Bi2223-Superconducting Composite Tapes", Book, "Superconductivity and Superconducting Wires", edited by D. Matteri and L. Futino, Chapter 1, pp.1-32, NOVA Science Publishers, New York, USA, (2010)

[その他]

ホームページ等

<http://mcmd.mtl.kyoto-u.ac.jp>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

落合 庄治郎 (OCHIAI SHOJIRO)

京都大学 大学院工学研究科・名誉教授

研究者番号：30111925

### (2) 研究分担者

奥田 浩司 (OKUDA HIROSHI)

京都大学 大学院工学研究科・准教授

研究者番号：50214060

### (3) 連携研究者 なし