

研究成果報告書

超伝導複合線材の力学的見地からの 高臨界電流確保要件の解明

平成14年度～16年度文部科学省科学研究費補助金

(基盤研究(B)(2))

(課題番号 14350360)

京都大学図書



1050572133

落合庄治郎氏寄贈

附属図書館

研究代表者 落合庄治郎

京都大学 国際融合創造センター

平成17年3月

研究成果報告書

超伝導複合線材の力学的見地からの 高臨界電流確保要件の解明

平成14年度～16年度文部科学省科学研究費補助金

(基盤研究(B)(2))

(課題番号 14350360)

研究代表者 落合庄治郎

京都大学 国際融合創造センター

平成17年3月

IV. 研究発表

[A] 論文発表

I. はじめに

超伝導複合線材は作製・巻き取り中に引張・曲げ応力や構成材間の線膨張係数の差に起因する熱残留応力が、使用中には、例えば、実験用磁場発生装置、磁気浮上列車や医療用断層撮影機器などで見られるように、ローレンツ力により静的および繰り返し応力が連続あるいは断続的に負荷される。そのため、超伝導複合線材の変形・破壊挙動とその超伝導特性に及ぼす影響を明らかにし、もって超伝導特性確保要件を把握することは重要な課題である。

このような背景から、現在まで、負荷ひずみと超伝導特性の関係が調べられてきている。しかしながら、現在まで、試料全体の平均的なひずみと臨界電流の関係が実験的に求められているのみで、複合材内部で生じる損傷形成過程にまで踏み込んだ臨界電流予測法の開発には至っていない。

本研究では、フィラメントが脆性的な $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x/\text{Ag}$ (以下 Bi2223/Ag と略称)、 $\text{Nb}_3\text{Al}/\text{Cu}$ およびフィラメントが延正的な Nb-Ti/Cu 複合線材を対象として、【実験的に、複合線材中のフィラメントのひずみや破壊の発生・成長・集積と臨界電流の相関を把握】し、その結果を基に、【応力環境下で高臨界電流を確保するための要件を把握】することを試みた。

II. 研究組織

研究代表者：落合庄治郎 (京都大学・国際融合創造センター・教授)
研究分担者：北條正樹 (京都大学・工学研究科・教授)
研究分担者：奥田浩司 (京都大学・国際融合創造センター・助教授)
研究分担者：田中基嗣 (京都大学・工学研究科・助手)

III. 交付決定額 (配分額)

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 14 年度	6,600	0	6,600
平成 15 年度	5,400	0	5,400
平成 16 年度	4,800	0	4,800
総計	16,800	0	16,800

IV. 研究発表

[A] 論文発表

1. S. Ochiai, Y. Oki, F. Sekino, M. Hojo, M. Tanaka, H. Okuda, H. Moriai, S. Sasaki and K. Watanabe:
Fracture of Filaments and Its Influence on Critical Current and Residual Strength of Fatigued Nb-Ti/Cu Superconducting Composite
Cryogenics Vol.43, (2003)45-51
2. S. Ochiai, F. Sekino, T. Sawada, H. Ohno, M. Hojo, M. Tanaka, H. Okuda, M. Koganeya, K. Hayashi, Y. Yamada, N. Ayai and K. Watanabe:
Fatigue Damage Evolution and Damage-induced Reduction of Critical Current of Nb₃Al Superconducting Composite
Superconductor Science and Technology, Vol.16, No.9, (2003)1071-1076.
3. S. Ochiai, T. Nagai, H. Okuda, S.S.Oh, M. Hojo, M. Tanaka, M. Sugano and K. Osamura:
Tensile Damage and Its Influence on Critical Current of Bi2223/Ag Superconducting Composite Tape
Superconductor Science and Technology, Vol.16, No.9, (2003)988-994.
4. M. Hojo, M. Nakamura, T. Matsuoka, M. Tanaka, S. Ochiai, M. Sugano and K. Osamura:
Microscopic Fracture of Filaments and Its Relation to the Critical Current under Bending Deformation in (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ Composite Superconducting Tapes
Superconductor Science and Technology, Vol.16 No.9, (2003)1043-1051.
5. M. Hojo, T. Matsuoka, S. Nakaoka, M. Tanaka, S. Ochiai, M. Sugano and K. Osamura:
Bending Deformation and Its Influence on Critical Current in Bi2223 Composite Superconducting Tapes
Physica C: Superconductivity and Its Applications, Vol.392-396, (2003)1156-1161.
6. S. Ochiai, H. Okuda, M. Hojo and M. Tanaka:
Fracture Damage Evolution and Its Influence on Critical Current of Nb₃Al/Cu and Nb-Ti/Cu Superconducting Composite Wires
Recent Research Developments in Materials Science 4(2003)333-353.
7. S. Ochiai, N. Miyazaki, D. Doko, T. Nagai, M. Nakamura, H. Okuda, S. S. Oh, M. Hojo, M. Tanaka and K. Osamura:
Damage Evolution under Bending and Tensile Stresses and Its Influence on Critical Current of Bi2223/Ag Superconducting Composite Tape
Journal of Nuclear Materials, Vol. 329-333, (2004)1585-1589.

8. 落合庄治郎, 宮崎暢, 永井崇, 土工弾, 奥田浩司, S. S. Oh, 北條正樹, 田中基嗣, 長村光造:
多芯 Bi2223/Ag/Ag-Mg 超伝導複合テープの引張および曲げ破壊挙動とその臨界電流に及ぼす影響
日本金属学会誌 第 68 卷 第 9 号, (2004)681-687.
9. H. Okuda, K. Morishita, S. Ochiai, D. Dokoh, M. Matsui, H. Fujimoto and M. Sato:
In Situ Strain Measurements of in Multifilament Bi2223 Superconducting Filamentary Ag-sheathed Bi2223 Superconducting Tapes,
Physica C, Vol.411, (2004)114-119.
10. M. Hojo, T. Matsuoka, M. Nakamura, M. Tanaka, T. Adachi, S. Ochiai and K. Miyashita:
Investigation of Mechanical Behavior of Copper in Nb₃Sn Superconducting Composite Wire,
Physica C, Vol.412-414, (2004)1261-1266.
11. D. Doko, N. Miyazaki, M. Nakamura, S. Ochiai, H. Okuda, S. S. Oh, M. Tanaka, M. Hojo and K. Osamura:
Bending damage evolution and its influence on critical current and n-value of Bi2223/Ag superconducting composite tape
Materials Science Forum, Vol.475-479, (2005), pp.933-936.

[B] 口頭発表

[B-1] 国際会議

1. S. Ochiai, F. Sekino, T. Sawada, H. Ohno, M. Hojo, M. Tanaka, H. Okuda, M. Koganeya, K. Hayashi, Y. Yamada, N. Ayai and K. Watanabe:
Fatigue Damage Evolution and Damage-induced Reduction of Critical Current of Nb₃Al Superconducting Composite
2nd Workshop on Mechano-Electromagnetic Property of Composites Superconductors (MEM03), March, 2003.
2. M. Hojo, M. Nakamura, T. Matsuoka, M. Tanaka, S. Ochiai, M. Sugano and K. Osamura:
Microscopic Fracture of Filaments and Its Relation to the Critical Current under Bending Deformation in (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ Composite Superconducting Tapes
2nd Workshop on Mechano-Electromagnetic Property of Composites Superconductors (MEM03), March, 2003.

3. S. Ochiai, N. Miyazaki, D. Doko, T. Nagai, M. Nakamura, H. Okuda, S. S. Oh, M. Hojo, M. Tanaka and K. Osamura:
Damage Evolution under Bending and Tensile Stresses and Its Influence on Critical Current of Bi2223/Ag Superconducting Composite Tape
11th International Conference on Fusion Reactor Materials, December, 2003.
4. S. Ochiai, H. Okuda, M. Hojo, M. tanaka and K. Watanabe:
Influence of Static and Fatigue Damages on Critical Current of Multifilamentary Nb-Ti and Nb₃Al Superconducting Composite Wires
International Workshop on Progress of Nb-based Superconductors, February, 2004.
5. S. Ochiai, H. Okuda, M. Hojo, M. Tanaka and K. Watanabe:
Relation of Functionality to Mechanical Behavior of Metal Matrix Composites: Applied Stress-induced Change of Superconducting Critical Current of Bi2223/Ag, Nb-Ti/Cu and Nb₃Al/Cu Composites
5th Joint Canada-Japan Workshop on Composites, September, 2004.
6. D. Doko, N.Miyazaki, M. Nakamura, S. Ochiai, H. Okuda, S. S. Oh, M. Tanaka, M. Hojo and K. Osamura:
Bending damage evolution and its influence on critical current and n-value of Bi2223/Ag superconducting composite tape
5th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing (PRICM-5), November, 2004.
7. M. Hojo, M. Nakamura, M. Tanaka and S. Ochiai:
Effect of Bending Deformation on Critical Current in Bi2223/Ag/Ag-alloy Composite Superconducting Tapes
11th European Conference on Composite Materials, September, 2004.
8. M. Hojo, M. Nakamura, M. Tanaka, T. Adachi, M. Sugano, S. Ochiai and K. Osamura.
Influence of Delamination Location on Mesoscopic Stress State and Critical Current under Bending Deformation in Bi2223/Ag Superconducting Composite Tapes
17th International Symposium on Superconductivity, November, 2004.

[B-2] 国内会議

1. 落合庄治郎, 澤田武洋, 北條正樹, 田中基嗣, 奥田浩司
微細フィラメントの強度分布計測に基づく超伝導複合線材の強度シミュレーション

第 46 回日本学術会議材料連合講演会(2002 年 9 月).

2. 北條正樹, 松岡朋枝, 中岡真一, 田中基嗣, 落合庄治郎, 菅野未知央,
長村光造
Bi2223 超伝導複合材料の変形挙動と超伝導特性の相関
日本機械学会材料力学部門講演会(2002 年 10 月).
3. 落合庄治郎, 沖祐一郎, 関野文昭, 北條正樹, 田中基嗣, 奥田浩司, 森合純,
酒井修二, 渡辺和雄
Nb-Ti/Cu 超伝導複合線材の疲労損傷とその臨界電流・残留強度に及ぼす
影響
日本金属学会秋季(第 131 回)大会(2002 年 11 月).
4. 落合庄治郎, 澤田武洋, 田中基嗣, 北條正樹, 奥田浩司
FRM および超伝導複合線材の強度の信頼性に関する検討
日本金属学会秋季(第 131 回)大会(2002 年 11 月).
5. 阪本智仁, 北條正樹, 田中基嗣, 落合庄治郎
銅の力学的特性および幾何学的因子が Nb-Ti 超伝導複合線材のマルチプル
ネッキング発生条件に及ぼす影響
日本機械学会関西支部第 78 期定時総会講演会(2003 年 3 月).
6. 中村光宏, 北條正樹, 田中基嗣, 落合庄治郎, 菅野未知央, 長村光造
Bi2223 超伝導複合材における曲げ変形が超伝導特性に及ぼす影響
日本金属学会春期(第 132 回)大会(2003 年 3 月).
7. 阪本智仁, 北條正樹, 田中基嗣, 落合庄治郎
銅の力学的特性および幾何学的因子が Nb-Ti 超伝導複合線材のマルチプル
ネッキング発生条件に及ぼす影響
日本機械学会関西支部第 78 期定時総会講演会(2003 年 3 月).
8. 土工弾, 宮崎暢, 落合庄治郎, 奥田浩司, 中村光宏, 北條正樹, 田中基嗣,
長村光造, S.-S. Oh
Bi2223/Ag/Ag 合金超伝導複合テープ材の臨界電流に及ぼす曲げ変形の
影響
日本金属学会秋期(第 133 回)大会(2003 年 10 月).
9. 中村光宏, 北條正樹, 田中基嗣, 落合庄治郎, 菅野未知央, 長村光造

曲げ変形を受ける Bi2223 超伝導複合材におけるフィラメントの損傷と超伝導特性の相関

日本金属学会秋期（第 133 回）大会(2003 年 10 月).

10. 落合庄治郎, 永井崇, 宮崎暢, 土工弾, 中村光宏, 奥田浩司, S.-S. Oh, 北條正樹, 田中基嗣, 長村光造

酸化物超伝導複合線材の引張損傷とその臨界電流に及ぼす影響

日本金属学会秋期（第 133 回）大会(2003 年 10 月).

11. 落合庄治郎, 永井崇, 奥田浩司, S.-S. Oh, 北條正樹, 田中基嗣, 菅野未知央, 長村光造

Bi2223/Ag 超伝導複合テープの引張変形挙動とその臨界電流に及ぼす影響

第 47 回日本学術会議材料研究連合講演会(2003 年 10 月).

12. 落合庄治郎, 関野文昭, 北條正樹, 田中基嗣, 奥田浩司, 小金谷正伸, 渡辺和雄

Nb₃Al/Cu 超伝導複合線材の強度分布および長さ依存性

第 43 回銅及び銅合金技術研究会講演大会(2003 年 11 月).

13. 落合庄治郎, 沖裕一郎, 北條正樹, 田中基嗣, 奥田浩司, 小金谷正伸, 森合英純, 酒井修二, 渡辺和雄

Nb₃Al/Cu および Nb-Ti/Cu 超伝導複合線材の疲労破壊挙動とその臨界電流に及ぼす影響

日本金属学会春期（第 134 回）大会(2004 年 4 月).

14. 土工弾, 宮崎暢, 落合庄治郎, 奥田浩司, 中村光宏, 北條正樹, 田中基嗣, 長村光造, S.-S. Oh

Bi2223/Ag 超伝導複合テープ材の曲げ変形における圧縮側の挙動とその臨界電流に及ぼす影響

日本金属学会春期（第 134 回）大会(2004 年 4 月).

15. 六角広介, 土工弾, 森下浩平, 石田友信, 落合庄治郎, 奥田浩司, 長村光造

超伝導 Bi2223 フィラメントの破壊挙動のモンテカルロシミュレーション

日本金属学会秋期（第 135 回）大会(2004 年 9 月).

16. 土工弾, 六角広介, 落合庄治郎, 奥田浩司, 長村光造

Bi2223/Ag 超伝導テープ材の曲げ変形下での不均一破壊とその臨界電流

に及ぼす影響

日本金属学会秋期（第135回）大会(2004年9月).

IV. 主な成果

[A] 静的応力による損傷と臨界電流の相関

(1) フィラメントの引張破壊ひずみは、Bi2223で約0.09-0.13%、 Nb_3Sn で約0.5-1.2%、 Nb_3Al で約0.6-1.0%、Nb-Tiで約2%である。

(2) 圧縮破壊ひずみはBi2223では約0.5%と引張破壊ひずみに対して約5倍高い。

(3) フィラメントが延正的なNb-Tiは、複合材中では単独の場合と異なる挙動を示す。単独の場合は1カ所でネッキングが生じれば破壊に至るが、複合材中ではフィラメントのネッキングは安定化銅の加工硬化により、特にフィラメント体積率が低い場合は、抑制される。

(4) フィラメントが脆性的なA15型化合物 (Nb_3Sn , Nb_3Al) では、引張軸にほぼ垂直な破壊が生じる。複合材中では、強度のばらつきのため、弱いフィラメントから破壊するが、ただちに複合材全体の破壊にはつながらず、破壊が一定程度集積すると複合材全体の破壊が生じる。

(5) Bi2223/Ag複合線材では、引張応力下では、フィラメントが長手方向に対して直角に破壊するTransverse cracking, 長手方向に対して平行に破壊するLongitudinal cracking, フィラメントと銀の界面がはく離するInterfacial debondingが生じた。Longitudinal crackingはa-b面に平行に生じた。

(6) Bi2223/Ag複合線材は、曲げ応力下では、上記に加えて、a-b面に垂直に結晶粒を横切って破壊するTransgranular cracking, および曲げひずみの大きな場合には圧縮側で座屈(Buckling)が生じた。

(7) A15型フィラメント材 (Nb_3Al/Cu) では、静的応力下では複合材破壊ひずみの約70-80%で弱いフィラメントの破壊が生じ、その結果、初期損傷状態では超伝導電流輸送面積の原因が主原因で臨界電流低下が引き起こされた。

(8) Bi2223/Ag複合線材では、フィラメントの線膨張係数が安定化銀のそれより低い場合、長手方向に圧縮の残留応力が生じた。この残留応力は、引張応力下で

のフィラメント破壊を遅らせる効果があった。その結果、臨界電流は、残留ひずみと破壊ひずみの和に達するまで保持されたが、いったんフィラメントが破断し始めると急激には低下した。これらの実験結果の解析から、フィラメント損傷は引張軸にほぼ垂直な短範囲の長さ領域で引張軸に垂直な方向に広がり、その後試料全体に広がることが確認された。

(9) Bi2223/Ag複合線材の臨界電流の曲げひずみ依存性は、これまで引張側の損傷で生じるとして説明されてきた。本研究では(6)に述べたように、圧縮側でも損傷が観察されたことから、引張側・圧縮側の両方で損傷が生じ、曲げひずみの増加とともに損傷が広がるモデルを提案し、臨界電流の曲げひずみ依存性の定量評価を試みた。このモデルにより、実験結果をよく説明できた。

(10) 以上の結果から、高臨界電流を確保するための力学的要件として以下が挙げられる。(a)(1)で述べたようにフィラメントの引張破壊ひずみは、Bi2223で約0.09-0.13%、 Nb_3Sn で約0.5-1.2%、 Nb_3Al で約0.6-1.0%、Nb-Tiで約2%である。臨界電流を損なわない負荷ひずみの限界はフィラメントがこれらのひずみに達しない条件である。フィラメント強度にはばらつきがあるので、上記で述べた値の下限值に達しないような応力負荷条件が、高臨界電流確保要件となる。(b)負荷応力方向の圧縮の熱残留応力を導入することにより、複合材中でのフィラメント破壊を遅らせることができる。この方法は特に破壊ひずみの低いBi2223複合線材に有効である。本研究で用いたBi2223試料の例では、引張では負荷されるひずみ限度を破壊ひずみの下限と圧縮残留ひずみの和である0.25%程度、曲げでは曲げひずみを0.4%程度以下に押さえることが高臨界電流を確保するには有効である。

[B] 繰返応力（疲労）による損傷と臨界電流の相関

繰返し応力の影響については、フィラメントが延正的なNb-Ti/Cuと脆性的な Nb_3Al /Cuで調べた。

(11)疲労損傷は、一定以上の応力（下限界値）で生じる。下限界値はフィラメントの種類と体積率に依存する。

(12)下限界値以上の負荷応力でも、 Nb_3Al フィラメント自体の疲労は生じない。Nb-Tiフィラメントは体積率が高い場合は実質上疲労損傷しない。体積率が高い場合で勝つ負荷応力レベルが高い場合はフィラメント自体の疲労が生じる。

(13) Nb_3Al /Cu複合線材およびNb-Tiフィラメント体積率が高いNb-Ti/Cu複合線材では、外周にクラッドした安定稼働で疲労き裂が発生し、それがフィラメントと安定化材の存在するコア部に進展する。

(14)上記複合線材でコア部にまで疲労き裂が進展するのは、疲労寿命の約70-90%の応力サイクル数である。つまり、疲労寿命の後期で生じる。

(15)上記の複合線材では、コア部に疲労き裂が達すると臨界電流が低下する。コア部の損傷面積が少ない場合（例えば、Nb-Ti/Cuでは全フィラメントのうち約20%以下の破壊の範囲）、臨界電流は生き残ったフィラメント数に比例する。

(16) Nb-Tiフィラメント体積率が低いNb-Ti/Cu複合線材では、負荷応力レベルが低い場合は体積率が高い場合と同様に外周にクラッドした安定稼働で疲労き裂が発生し、それがフィラメントと安定化材の存在するコア部に進展する。負荷応力レベルが高い場合はフィラメント自体の疲労が生じる。後者の場合は、フィラメントそれ自体のネッキングひずみを越える大変形モードとなり、その損傷は著しいフィラメントのマルチプルネッキング現象で特徴づけられる。

(17)上記の複合線材では臨界電流の低下はフィラメントのマルチプルネッキングによる電流輸送断面積の現象で生じる。

(18)脆性的なNb₃Alフィラメントを含む複合線材では、疲労き裂先端の応力拡大係数が臨界値に達すると破壊する。延性的なNb-Tiフィラメントを含む複合線材では、リガメント部（疲労き裂が達していない部分）の応力が静的引張強度に達した時点で破壊する。

(19)上記の結果を利用して、Paris則とき裂先端の応力拡大係数から、疲労寿命を予測する式を提案した。これにより、実験で得られたNb₃Al/CuのS-N曲線（負荷応力と破壊が生じる応力サイクル数の関係）がよく記述できた。

(20)上記の結果から繰返応力下における高臨界電流を確保するための力学的要件として以下が挙げられる。(a)疲労の生じない下限界値以下の応力下で用いる。本研究の試料でフィラメント体積率が40-50%のNb₃Al/CuやNb-Ti/Cuでは下限界値は約150MPaである。(b)コア部に疲労き裂が到達する応力サイクル数内で用いる。破壊が生じるサイクル数の約70%以下のサイクル数がそれに該当する。

V. 添付資料

本研究で出版した論文の主なものを添付する。