

超伝導複合材の内部ひずみと臨界電流のその場測定法の開発 および相関定量評価

Development of in-situ measurement method of internal strain and critical current of composite superconductors and their quantitative evaluation

落合 庄治郎 (Ochiai Shojiro)

京都大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

超伝導複合材の熱応力・外部応力による内部ひずみ変化とその超伝導特性との相関定量評価法の構築を目的として、実験室規模高強度高分解能 X 線回折 in-situ ひずみ測定法開発を進めるとともに、Bi 系複合材の残留ひずみ集積過程、臨界電流の曲げひずみ依存性、臨界電流の耐ひずみ特性に及ぼすラミネーション複合化効果などを解明・定量化した。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・複合材料・物性

キーワード：超伝導複合材料、残留ひずみ、X 線回折、モデリング、臨界電流

1. 研究開始当初の背景・動機

超伝導複合材は、作製・使用中に多様な熱履歴を受け、また機械的・電磁気学的応力環境に曝されるので、複合材内部の応力状態は変化し、その結果超伝導特性も変化する。高温超伝導複合材の実応用に向けては、熱履歴や応力環境における変形破壊挙動およびその超伝導特性に及ぼす影響の定量評価法の開発は急務となっている。

2. 研究の目的

さまざまな応力・温度環境におかれる多彩な超伝導複合材料を系統的に評価するためには、大型放射光施設の利用に加えて、実験室での評価を可能にする新実験手法が現実問題として必要である。本研究では、高精度集光光学系を搭載した実験室高強度高分解能 in-situ ひずみ測定 X 線装置の開発を行うとともに、残留ひずみ集積過程の解明、限られた構成材の限られた温度での内部ひずみ測定結果から熱的・応力的全履歴での全構成材の応力状態変化を評価する手法の提案、超伝導テープ材と高弾性金属フォイルとの複合化による残留ひずみ集積プロセスおよび超伝導臨界電流の耐ひずみ特性改善効果の定量評価、曲げひずみ下での臨界電流の負荷ひずみ依存性の解明などを

通じて、熱・応力環境に強い複合線材の最適材料設計や使用時の安全・信頼性確保に資することを目指している。

3. 研究の方法

実験室規模での高強度高分解能 X 線回折装置は、2次元曲面回折レンズ結晶を応用して高強度・高精度回折装置を開発し、それを購入した市販の高輝度微小焦点 X 線発生装置に搭載して構築する計画である。内部ひずみ測定は、応力負荷モードが引張と曲げの場合について、高温超伝導複合線材やテープを対象として、放射光(SPring8)X 線回折法で測定する。負荷ひずみ下での損傷挙動はデジタルマイクロスコップでその場観察する。複合材中の各構成材にかかるひずみの温度変化評価は、銀の降伏挙動、負荷ひずみの増加に基づく損傷発生・進展、ラミネーション時の各構成材への負荷応力とラミネーション後のひずみの再配分を組み合わせたモデルを提案し、このモデルと測定した残留ひずみを組み合わせて評価する。また、負荷ひずみと臨界電流の相関については、超伝導電流を輸送するフィラメントのひずみと損傷発生・進展と、曲げ負荷の場合はフィラメントが埋め込まれているコア部の形態を組み込んだモデルを構築し、実験結果と比較検討する。

4. これまでの成果

主な成果は以下のように要約される。

(1) 複合材中の内部ひずみの in-situ 測定のための実験室規模の高強度高分解能 X 線装置の開発に向けては、これまでに集光光学系の独自回折装置の設計組み立てと、湾曲結晶の加工精度とそれに依存する一様性と集光性能評価を進めた。これら一連の実験により加工精度と一様性については 1 次元についてはほぼ加工条件などの絞込みが完了しつつある。また集光性については、実験室 X 線発生装置において必須の条件である発散 X 線を集光モノクロメータ光学系により、約 1% の面積に絞り込むことに成功している。もう一息で実機に搭載できるところまで来た。

(2) 多様な熱的・応力的環境により変化する複合テープ材内部の応力状態を、限られた条件でのひずみ測定データを使って評価する方法を提示し、臨界電流の耐ひずみ測定を通じてその方法の有効性を証明した。Bi2223 複合テープをステンレススチールとラミネート複合したテープを例にとると、熱履歴およびラミネート前のテープとスチールへの負荷応力とラミネート後の応力緩和による機械的履歴において、鍵となる温度を組み込んで履歴中に生じる現象を定式化し、X 線回折実験で得られた室温残留ひずみの数値を使えば全履歴中での各構成材のひずみ変化が求められる手法を開発した。結果を図 1 に示す。

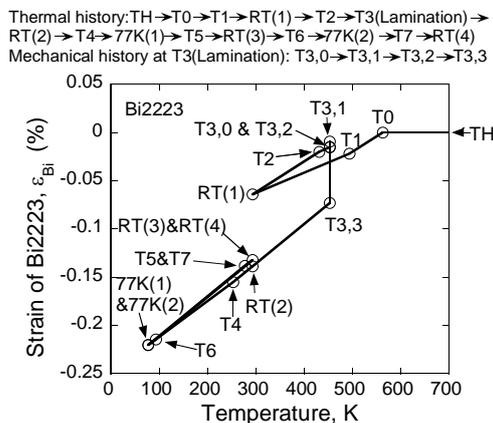


図 1. 本研究で提案した手法で求めた Bi2223 フィラメントのひずみ履歴

(3) 銀や銀合金は高温ではクリープ現象を生じ熱ひずみが解放されるため、高温では集積しない。残留ひずみが実質的に集積を始める温度の同定は極めて重要であるが、これまで評価例は無かった。本研究では、残留ひずみが実質的に集積を始める温度(図 1 の T0)を初めて同定した。

(4) 曲げ変形におけるシース近傍(25 μ m 以内)に位置するフィラメントの圧縮側と引張側でのひずみ計測を、最適な線吸収係数をもつ波長の X 線を利用して試料への侵入長制御をおこなうことで実現し、引張側と圧縮側の損傷挙動の非対称性を X 線ひずみ測定で初めて実証した。

(5) 信頼性評価の鍵となる臨界電流の不可逆ひずみは、これまで曲げ変形では経験的にしか評価できなかったが、フィラメントの残留ひずみ、破壊ひずみ、コア形状を組み込んで、精度良く合理的に同定するモデルと手法を構築した。また、不可逆ひずみ以上の曲げひずみ負荷における臨界電流変化を負荷ひずみの関数として定量化することにも初めて成功している。

5. これまでの進捗状況と今後の計画

研究はほぼ順調に進んでいる。今後は実験室高強度高分解能 X 線装置の組上げ・稼働、残留ひずみ状態に関するデータの系統的な取得実験、熱サイクルの影響把握、モデリング手法の精緻化、熱・応力環境に強い複合線材の最適材料設計や使用時の安全・信頼性確保に資する多様な条件でのシミュレーションを計画している。

6. これまでの発表論文等

(研究代表者は太字, 研究分担者には下線)

1) **S. Ochiai**, H. Rokkaku, K. Morishita, J. K. Shin, S. Iwamoto, H. Okuda, M. Hojo, K. Osamura, M. Sato, A. Otto, E. Harley and A. Malozemoff, “Thermally Induced Residual Strain Accumulation in Bi2223/Ag/Ag Alloy Composite Superconductor”, Superconductor Science and Technology, Vol.20, pp.202-210. (2007).

2) **S. Ochiai**, T. Matsuoka, J. K. Shin, H. Okuda, M. Sugano, M. Hojo and K. Osamura, “Modeling Analysis of Critical Current of Bent Bi2223 Composite Tape Based on the Damage Strain Parameter and Shape of the Core”. Superconductor Science and Technology, Vol.20, pp.1076-1083, (2007).

3) H. Okuda, J. K. Shin, S. Iwamoto, K. Morishita, Y. Mukai, H. Matsubayashi, **S. Ochiai**, A. Otto, E. J. Harley, A. Malozemoff and M. Sato, “Assessment of Strain of Bi2223 Filaments in Bent Ag-sheathed Superconducting Composites by Synchrotron Radiation”, Scripta Materialia, Vol.58, pp.687-690. (2008).

ホームページ :

<http://matdesign.iic.kyoto-u.ac.jp/>