

(論文内容の要旨)

高温超伝導複合材料は、作製・巻き取り・使用時に、熱的・機械的・電磁気学的応力が負荷され、その結果、超伝導特性が変化するので、本格的な実用化に向け、変形・破壊挙動と超伝導特性の相関把握は重要な研究課題となっている。本論文は Bi 系高温超伝導複合材料について、力学的挙動と超伝導特性の相関評価に関する研究成果をまとめたもので、8章からなっている。

第1章は序論であり、本研究の背景として、電力貯蔵、リニアモーターカー、無抵抗送電などへの実用化への期待がかかっている Bi 系超伝導複合材料の特徴とこれまでの研究で得られている知見を概説し、力学的挙動と超伝導特性の解明の必要性を示した上で、本研究の目的と概要について述べている。

第2章では、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi2212)系超伝導複合材料について、X線回折法により測定した室温での Bi2212 フィラメントの残留ひずみ、複合材の応力-ひずみ曲線、熱膨張曲線から、構成材であるフィラメント、銀、銀合金の弾性率および線膨張係数、銀、銀合金の降伏応力、フィラメントの引張破壊ひずみを求める方法を考案し、これらをはじめ定量的に求めている。また、冷却・加熱における各構成材の熱ひずみ変化を明らかにしている。

第3章では、 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Bi2223)超伝導複合材について、第2章とほぼ同様の手法と熱履歴にともなう各構成材のひずみ変化のモデリングから、残留ひずみ集積開始温度を同定し、熱処理温度(1100K)から 77K の温度域での熱ひずみ変化を明らかにしている。またこの手法で予測した 77K での Bi2223 フィラメントの残留ひずみと応力-ひずみ曲線と X 線回折結果から求めたフィラメントの破壊ひずみから、77K での引張負荷ひずみ下での臨界電流の耐ひずみ特性を予測し、実験により予測値が正しいことを確認している。

第4章では、Bi2223 超伝導複合材にステンレス鋼をラミネート複合した高強度型超伝導複合材料について、ラミネート化時に導入される力学的ひずみと温度履歴により導入される熱的ひずみを初めて分離評価することに成功している。さらに、臨界電流測定結果から、ラミネーション複合にはフィラメント破壊抑制効果があることを示し、臨界電流の耐ひずみ特性向上メカニズムについて破壊力学的見地から合理的な説明を与えている。

第5章では、引張／曲げ変形を受けた試料の臨界電流は、同一試料内においても位置により異なる現象について、長尺試料とそれを構成する複数の短尺試料の臨界電流測定を行い、引張変形下・曲げ変形下のいずれにおいても、長尺試料の臨界電流は短尺試料の臨界電流と n 値の分布から求められることを定量的に示している。

第6章では、局所的な応力－ひずみ曲線と臨界電流を同時に複数箇所測定する実験方法を開発し、同一負荷応力下で、長尺試料中での損傷の発生・集積の位置による差とその臨界電流に及ぼす影響を明確に捉えることに成功している。

第7章では、超伝導電流を輸送するフィラメントの損傷により、負荷電流が銀に迂回し、電圧が発生する現象について、発生電圧と負荷電流の関係をモデル計算により求め、そこから臨界電流と損傷サイズの関係を導いている。また、この手法を展開して、臨界電流変化を引張負荷ひずみの関数として定量的に表現できることを示している。

第8章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、Bi 系高温超伝導複合材料について、X線回折、力学試験、超伝導臨界電流測定およびモデリングにより、変形・破壊挙動と超伝導特性の相関について研究した成果についてまとめたものであり、得られた成果は次の通りである。

1. $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi2212)、ついで $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (Bi2223)超伝導複合材について、室温でのBi2212およびBi2223超伝導フィラメントの超伝導輸送方向の残留ひずみをX線回折法で評価し、複合材の応力-ひずみ曲線や熱膨張曲線測定結果と組み合わせて、構成材であるフィラメント、銀、銀合金の弾性率、銀、銀合金の降伏応力、フィラメントの引張破壊ひずみを求める方法を開発し、その結果を利用して加熱・冷却に伴う各構成材の熱的ひずみ変化を求める方法を考案して残留ひずみ集積過程を明らかにしている。
2. Bi2223超伝導複合材にステンレス鋼をラミネート複合した高強度型超伝導複合材料について、ラミネート時の力学的残留ひずみ導入と温度履歴による熱的残留ひずみ導入を分離評価することに成功し、その成果を用いて、残留ひずみが臨界電流の耐ひずみ特性に及ぼす影響を明らかにしている。
3. 引張/曲げ変形を受けた試料の臨界電流は、同一試料内においても位置により異なる現象について、長尺試料とそれを構成する複数の短尺試料の臨界電流測定を行い、長尺試料の臨界電流は短尺試料の臨界電流と n 値の分布から求められることを示すとともに、複数位置の局所的応力-ひずみ曲線と臨界電流を同時に測定する実験方法を開発し、長尺試料中での損傷の発生・集積の位置による差とその臨界電流に及ぼす影響を明確に捉えることに成功している。
4. フィラメントの損傷と電圧発生および臨界電流との関係をモデル計算から明らかにし、引張負荷ひずみによる臨界電流変化の定量表現に結びつけている。

以上要するに、本論文は、Bi 系高温超伝導複合材料の力学的挙動と超伝導特性の相関評価法を考案し、その応用により新たな数多くの知見を得たもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成20年8月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。