

平成 21 年 5 月 21 日現在

研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19760476
 研究課題名（和文） 次世代超電導線材の応力効果と内部ひずみの直接間接測定によるひずみ特性決定要因解明
 研究課題名（英文） Study on mechanism of strain effect on I_c for YBCO coated conductor using direct and indirect internal strain measurement
 研究代表者 菅野 未知央
 (SUGANO MICHINAKA)
 京都大学・大学院工学研究科・助教
 研究者番号：30402960

研究成果の概要：最高 10 T の磁場を YBCO 膜の c 軸方向に印加し、温度可変で I_c の引張ひずみ依存性を測定可能な測定システムを確立した。これを用いて様々な磁場、温度で YBCO 線材の I_c -引張ひずみ特性を測定した。その結果、 I_c が最大となるひずみ（ピークひずみ）が熱残留ひずみとは無関係に、測定条件とともに変化することが明らかになった。これにより、YBCO 線材では、従来金属系超電導線材で提唱されていた、「ピークひずみは超伝導体の熱残留ひずみが解消される負荷ひずみで決定される」、という関係が成り立たないことを明らかにした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,300,000	0	2,300,000
2008 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	270,000	3,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：複合材料・物性

キーワード：YBCO、超伝導、臨界電流、ひずみ効果、放射光、熱残留ひずみ、内部ひずみ

1. 研究開始当初の背景

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ コーテッドコンダクター（以下、YBCO線材）は、金属テープ上に高温酸化物超伝導体を二軸配向薄膜として形成することにより、従来の金属系（NbTi、 Nb_3Sn ）、酸化物系（Bi2212、Bi2223）超伝導線材と比較して磁場中でも高い臨界電流を維持できるという優れた特性を有している。

一方、超伝導線材は使用環境においてさまざまな熱的、機械的、電磁氣的ひずみ（応力）

下にさらされる。特に、強磁場マグネットや超伝導電力貯蔵(SMES)などのコイル応用で問題になるローレンツ力はコイル径を拡張する方向に作用し、線材には円周方向に一軸引張応力が負荷される。このフープ応力は、近似的には電流密度、磁場、コイル半径の積で表されるため、強磁場を発生しようとするほど、また大きなエネルギーを蓄えるため大電流化するほど強大な電磁力に耐え得ることが要求される。したがって、線材の機械的特性

の把握はコイル設計のために不可欠であるが、現状ではごく限られた温度、磁場下でのデータしか得られておらず、経験的な知識に頼っている部分も多い。

また、超伝導線材には製造温度 (~1073 K) から使用温度 (4.2~77 K) への降温過程において構成要素の線膨張係数差による熱残留ひずみが生じる。さらに、従来から研究されてきた金属系、Bi系酸化物超伝導線材と本申請で対象とするYBCO線材との大きな違いは、非平衡な薄膜材料であることから超伝導膜の成膜過程でも内部ひずみが蓄積されている可能性が高いことである。このことは、バルクの物性値と複合則から計算される熱残留ひずみだけでは、超伝導体の内部ひずみが説明できないことを示している。

2. 研究の目的

本研究では温度磁場可変環境でのYBCO線材の応力効果測定のための新システムの構築と超伝導膜の内部ひずみを定量評価するための新手法の提案を行う。これによって、線材の電磁機械特性を決定している主要な要因を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) YBCO線材の実使用温度、磁場環境下での臨界電流の応力効果の評価

新規測定システムを構築し、YBCO線材のひずみ効果に関して5~77 Kの温度範囲、0~10 Tの磁場範囲での測定を実施する。これによって機器応用に必要な電磁機械特性のデータを得ることを目指す。

(2) YBCO超伝導体内に蓄積される残留ひずみの評価

放射光を用いた超伝導膜そのものの格子定

数変化測定から膜の内部ひずみを直接測定することを目指す。

(3) 残留ひずみが応力効果に及ぼす影響の解明

臨界電流の負荷ひずみに対する依存性が残留ひずみ量とどのような関係にあるのかを明らかにする。

4. 研究成果

最高 10 T の磁場を YBCO 膜の c 軸方向に印加し、温度可変で I_c の引張ひずみ依存性を測定可能な測定システムを確立した。Fig. 1 に本研究で用いた応力効果試験装置の模式図を示す。ブルロッドを上方に移動させることにより、2つのカムが回転し、カム2の下端で超伝導線材がハンダ付けされている Cu ブロックの片方を図の左側に移動させる。Cu ブロックはピンとブッシュで支持されており、水平移動が保証される仕組みになっており、これにより線材に一軸引張のひずみを負荷できる構造になっている。この装置の利点は、電極ブロック間の線材はフリーであるため、冷却中の熱ひずみにより線材に予ひずみが負荷されることが無い点である。温度コントロールはクライオスタットからのヘリウムガス粗い温調と電極部分での精密な温調を組み合わせることにより、 ± 0.1 K 以下の温度精度を実現した。ひずみは対称型の伸び計を用いた。

このような装置を用いて、まず 77 K (大気圧液体窒素中) で I_c -B-g 測定を行った。無負荷状態での I_c で規格化した I_c -ひずみ曲線を 0~3 T まで測定した結果を Fig 2 に示す。Fig. 2(a) に示す 0~0.2 T までの低磁場領域では、磁場の増加とともに I_c のひずみに対する変化が緩やかになる傾向が観察された。また、これ以上の磁場では、Fig. 2(b) に示すとおり、磁場の増加とともに I_c のひずみ依存性が顕著になる結果となった。このとき同時に I_c が最大となるときの負荷ひずみ (ピークひずみ) の移動が観察された。例えば、0 T では 0.1% 付近に存在した I_c のピークが、0.2 T では 0.3% まで移動していることが確認された。一方、それ以上の磁場では、ピークひずみが再び自己磁場の位置まで移動した。このようなピークシフトが磁場に依存する振る舞いは、従来金属系超伝導線材で提唱されていた、ピークひずみは超伝導体の熱残留ひずみが解消される負荷ひずみで決定される、という仮定からは説明できない結果である。

また、温度依存性に注目して、より低温領域を含む、20~83 K の温度範囲について自己磁場で I_c -引張ひずみ測定を行った。測定は、可逆なひずみ領域内である0.7%までのひずみ範囲において実施した。結果を Fig. 3 に示す。高温ほど I_c がひずみに強く依存して変化していることがわかる。得られた引張ひずみ領域の実験結果を2次関数でフィッティングすることにより、圧縮ひずみ領域での振舞いを推定した結果、低温ほどピークひずみが圧縮側に移動することが示唆された。YBCO 膜の熱残留ひずみは低温ほど圧縮側に大きくなるため、もし熱残留ひずみがピークひずみを決定しているのならば、ピークは低温ほど引張側に移動するはずであり、これは実験結果と矛盾している。このことから、自己磁場においても熱残留ひずみがピークひずみを決定しているのではない、という知見が得られた。

一方、YBCO 線材中の超伝導膜の内部ひずみを放射光を用いて直接測定した。実験は大型放射光実験施設 Spring-8 のビームラインにて実施した。Fig. 5 に示すような自作の手動式引張荷重負荷治具を多軸ゴニオメータにマウントして、ひずみ負荷状態での超伝導膜の軸方向ひずみを in-situ で測定した。測

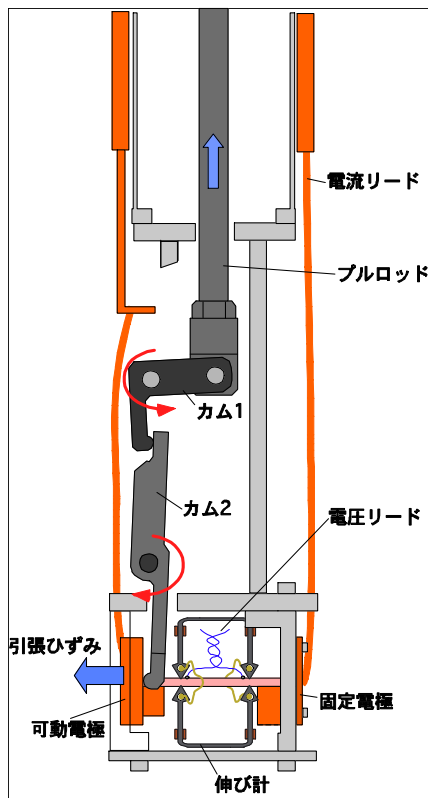


Fig. 1 本研究で使用した超伝導線材の温度磁場可変環境での応力効果試験装置

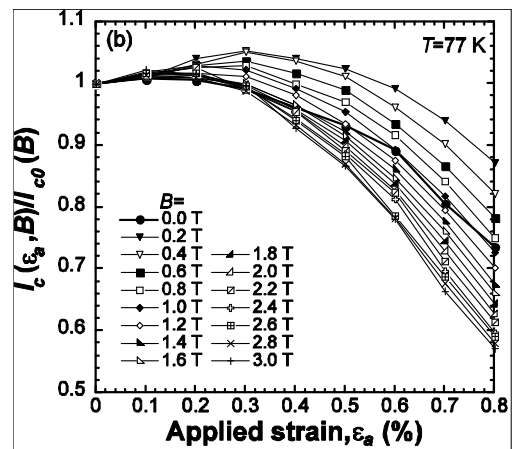
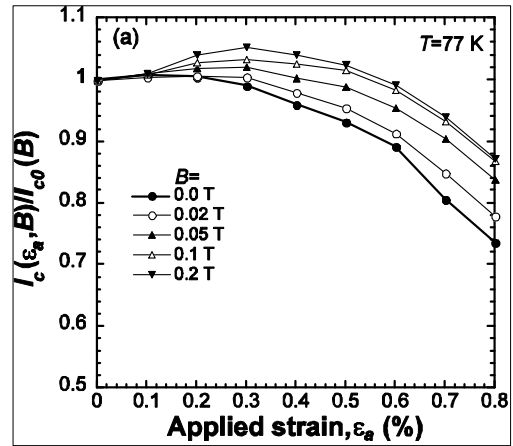


Fig. 2 T=77K で測定した YBCO 線材の I_c -ひずみ特性

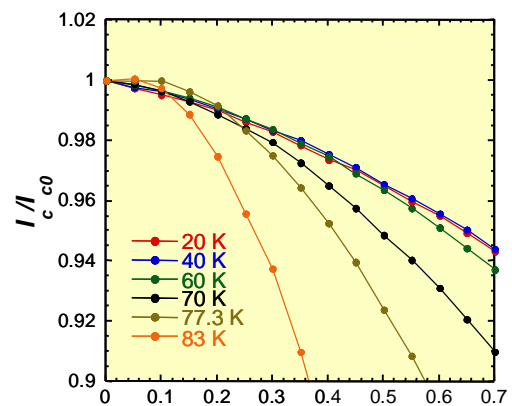


Fig. 3 自己磁場で測定した I_c -ひずみ特性の温度依存性

定には、透過配置を採用した。これは、散乱ベクトルがひずみの負荷方向に向くことにより、ポアソン比などの物性値を介さずに直接ひずみ負荷方向の格子面間隔の変化を測定するためである。

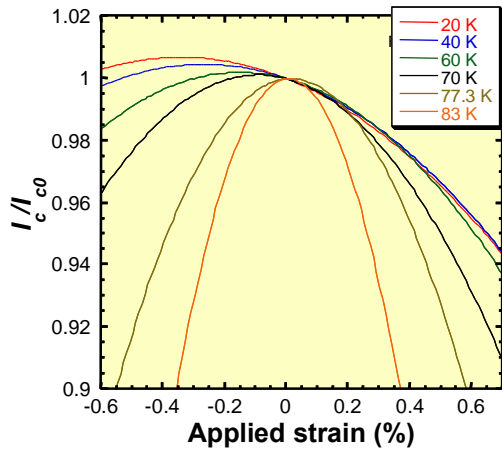


Fig. 4 I_c -ひずみ特性のフィッティング曲線

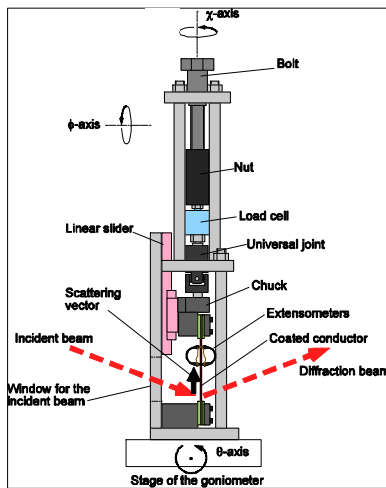


Fig. 5 超伝導膜の in-situ ひずみ測定装置

まず、ゼロひずみの格子面間隔を決定するために、線材から分離した膜を粉碎した粉末を用いて X 線回折測定を行った。Fig. 6 に示すとおり、(200)、(020)面の回折ピークが十分な強度を有して得られていることがわかる。次に、YBCO 線材を Fig. 5 の装置に取り付け、ひずみを段階的に増加させながら (020)面の回折ピークの移動を測定した。Fig. 7 に示すように、引張ひずみを負荷することにより、(020)面の回折ピークが低角側に移動することがわかる。この結果を元に、負荷ひずみと粉末をゼロひずみとした場合の膜の内部ひずみの関係を求めた結果を Fig. 8 に示す。このグラフの負荷ひずみゼロに対応する線材中の膜の内部ひずみから、室温での YBCO 膜の残留ひずみは-0.061%と決定された。負荷ひずみによる内部ひずみの変化に注目すると、両者の線形関係が負荷ひずみ 0.4%

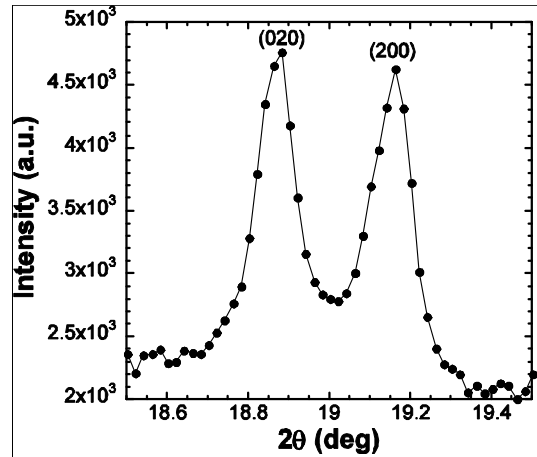


Fig. 6 線材から分離した YBCO 粉末から得られた回折パターン

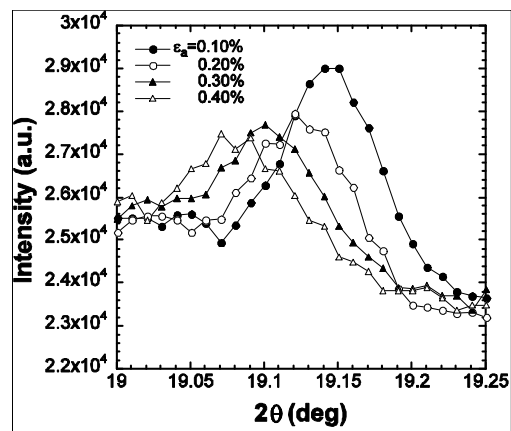


Fig. 7 線材中の YBCO 膜のひずみ負荷による (020) 回折ピークの移動

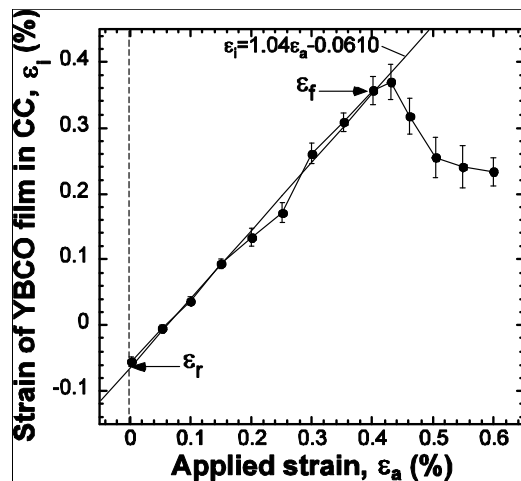


Fig. 8 線材中の YBCO 膜の内部ひずみと外部負荷ひずみとの関係

までは成り立つのに対して、それ以上のひずみでは膜のひずみが減少していることがわかる。これは、YBCO 膜にクラックが発生する

ことによって、膜中のひずみが緩和されることに起因していると考えられる。すなわち、線形関係から外れる負荷ひずみで、YBCO 膜の破壊が起こっていることを示唆している。このように、室温での複合線材中の超伝導膜のゼロひずみを初めて直接的に評価することに成功した。また微細損傷観察の結果、YBCO 膜の下地バッファ層である MgO 層により高密度のクラックが発生していることが確認された。このことから、YBCO 膜の破壊は超伝導膜直下の MgO バッファ層が起点となっていることが示唆された。

以上の結果から、ひずみ効果を特徴づける I_c -ひずみ曲線のピークが従来型超伝導線材とは異なり、熱残留ひずみ以外の要因を検討する必要があることが明らかになったことが、本研究の重要な成果である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

① M. Sugano, S. Machiya, K. Osamura, H. Adachi, M. Sato, R. Semerad and W. Prusseit,

Superconductor Science of Technology, Vol. 22 (2009) 015002 1-7,

“Direct evaluation of internal strain of biaxially-textured YBCO film in a coated conductor using synchrotron radiation”. 査読有

② M. Sugano, T. Nakamura, T. Manabe, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya,

Superconductor Science of Technology, Vol. 21 (2008) 115019 1-8.

“The intrinsic strain effect on critical current under a magnetic field parallel to the c-axis for MOCVD-YBCO coated conductor”. 査読有

[学会発表] (計 7 件)

① M. Sugano, T. Nakamura, K. Shikimachi, T. Watanabe, N. Hirano and S. Nagaya,

21th International Symposium on Superconductivity (ISS08), Tsukuba,

October 28, 2008,

“Reversible Strain Effect on Critical Current at Various Temperatures in YBCO Coated Conductors”.

② M. Sugano, T. Nakamura, T. Manabe, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya,

Applied Superconductivity Conference 08 (ASC08), Chicago, USA, Aug 22, 2008,

“Uniaxial Strain Dependence of Superconducting Properties for YBCO Coated Conductors under Perpendicular Magnetic Field”.

③ 菅野未知央, 中村武恒, 真鍋智之, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫,

低温工学・超電導学会, 明星大学, 2008 年 5 月 26 日

「MOCVD-YBCO 線材における臨界電流の可逆ひずみ特性に及ぼす温度および磁場の影響」.

④ 菅野未知央, 中村武恒, 真鍋智之, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫,

電気学会全国大会, 福岡工業大学, 2008 年 3 月 19 日,

「MOCVD-YBCO 線材の磁場中 I_c -ひずみ特性」.

⑤ 菅野未知央, 町屋修太郎, 足立大樹, 長村光造, Werner Prusseit, 佐藤真直,

低温工学・超電導学会, 宮城県民会館, 2007 年 11 月 22 日,

「放射光を用いた coated conductor 中の超伝導膜の内部ひずみ直接測定」.

⑥ 菅野未知央, 中村武恒, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫,

低温工学・超電導学会, 宮城県民会館, 2007

年 11 月 22 日,

「MOCVD-YBCO 導体の I_c -ひずみ特性における磁場効果」.

⑦ M. Sugano, T. Nakamura, T. Manabe, K. Shikimachi, N. Hirano and S. Nagaya,
20th International Symposium on Superconductivity (ISS07), Tsukuba, November 7, 2007,
“Influence on Magnetic Field on I_c -Strain Characteristics at 77 K in YBCO Coated Conductor”.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅野 未知央 (SUGANO MICHINAKA)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：30402960

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし