

人工ピンニングセンターを導入した高温超伝導体薄膜の内部ひずみ評価に基づく、高磁場中超伝導特性・高耐ひずみ線材の開発

Development of Coated Conductor with High Strain Tolerance and High In-field Critical Current Based on Internal Strain Evaluation for Artificial Pinning Centers Doped High Temperature Superconducting Film

吉田 隆^a, 宇佐美 貴史^a, 菅野 未知央^b, 町屋 修太郎^c, 小金澤 智之^d
Yutaka Yoshida^a, Takashi Usami^a, Michinaka Sugano^b, Shutaro Machiya^c, Tomoyuki Koganezawa^d

^a名古屋大学, ^b高エネルギー加速器研究機構, ^c大同大学, ^d(公財)高輝度光科学研究センター
^aNagoya Univ., ^bKEK, ^cDaido Univ., ^dJASRI

超伝導体における臨界電流のひずみ依存性は機器応用に向け重要な要素の一つである。本実験では、人工ピン添加高温超伝導線材に関して、外部ひずみに対する内部ひずみ評価を行った。その結果、人工ピン添加高温超伝導線材は、従来の高温超伝導線材と異なり臨界電流のひずみ依存性において、内部超伝導体のひずみ以外の要因が支配的であることを明らかになった。

キーワード： 人工ピン、内部ひずみ、 θ -2 θ

背景と研究目的：

REBCO は、他の材料と比べて一桁以上高い臨界電流を有しているため、機器の小型化やマグネットの高磁場化に有利である[1]。また、近年 REBCO 薄膜中に人工ピンニングセンターとして BaHfO₃ を導入することで、磁場中特性を飛躍的に向上させたという報告が多数存在し[2]、超伝導応用機器のより安定した運転及びより優れた性能を実現するために BaHfO₃ を導入することは非常に効果的である。

一方、線材を機器応用する際、超伝導体のひずみ特性を評価することは重要である。高温超伝導体はセラミックスであるため、脆性的で破断に至るまでの許容ひずみが 0.4%程度と小さく、わずかなひずみで臨界電流の低下を招く。さらに、破断以前の格子の弾性変形でも臨界電流が変化するため、機器設計上ひずみ管理が不可欠である[3]。これまで、BaHfO₃ 添加 REBCO は、無添加 REBCO 超伝導体と比較して、臨界電流のひずみ応答が異なることが明らかにしてきた[4]。特に、BaHfO₃ を添加することで臨界電流の最大値をとるひずみが大きく異なることを見出した。これまでの報告を参照するとこれらの変化は、内部ひずみ状態が変化したこと起因する可能性が高い。本実験では、BaHfO₃ 添加 GdBCO 線材を作製し室温環境で放射光を用いたひずみ測定を行うことを目指し、BaHfO₃ 添加 GdBCO 線材に関して初めての測定を実施した。

実験：

試料

試料には独自に作成した無添加 GdBCO 線材及び BaHfO₃ 添加 GdBCO 線材を用いた。それぞれの試料の詳細を以下に示す。

BaHfO₃ 添加量、形態の異なる以下の 4 種類の線材を作製した。超伝導体の組成は全て GdBa₂Cu₃O_{7-d}(RE は希土類金属)であり、膜厚は 200 nm 程度である。

- ① GdBa₂Cu₃O_{7-d} 無添加
- ② GdBa₂Cu₃O_{7-d}+BaHfO₃ : BaHfO₃ はナノロッドとして導入 添加量は 1.5 vol.%
- ③ GdBa₂Cu₃O_{7-d}+BaHfO₃ : BaHfO₃ はナノロッドとして導入 添加量は 2.2 vol.%
- ④ GdBa₂Cu₃O_{7-d} 無添加層と BaHfO₃ をナノロッドとして導入した層との積層構造 添加量は 0.7 vol.%

Hastelloy テープに 2 軸配向させた MgO 膜を中間層成膜した基板を用い、BaHfO₃ の添加量、形状のみを変えて REBCO 膜を成膜することで他の条件を揃えた。GdBCO 膜の成膜には、PLD 法を用いた。

実験条件：BL46XU

X線エネルギー：19.5 keV（波長：0.635367 Å）、入射 X 線形：0.2 mm×0.4 mm

使用装置 多軸回折装置

波長は CeO₂ 標準試料から算出

ビームラインの多軸ゴニオメーターの上に申請者らが独自に開発した自動化引張試験装置を設置し、GdBCO 線材の両端をつかみ具で固定した。まず、無負荷の状態では GdBCO 膜の *b* 軸の回折測定を行った。*b* 軸の測定は、 $\phi=0^\circ$ 、 $\chi=90^\circ$ に調整し、線材の長手方向 *b* 軸の格子定数を透過配置の θ - 2θ スキャンにより測定した。一方、無ひずみの格子定数は線材からはく離れた GdBCO 膜の回折測定により各結晶軸長を決定した。これらの結果から、残留ひずみを決定した。*b* 軸の格子定数の測定には GdBCO 020 のピークを用いた。

結果および考察：

図 1 に無添加 GdBCO 線材のひずみ率 0% における θ - 2θ 回折の結果を示す。各印加ひずみにおけるピーク位置から内部ひずみを決定している。表 1 に①から④までの各試料における残留ひずみ及び外部印加ひずみに対する内部結晶ひずみの変化の割合(ひずみ変化率)を示す。残留ひずみは上述したように、粉末試料の格子定数を用いて算出した。まず無添加 GdBCO 線材の残留ひずみは -0.1% であった。これに対して、②から④の線材の残留ひずみは -0.08% ~ -0.028% であった。この結果から、BaHfO₃ 添加試料では無添加の試料に比べてわずかに引張の残留ひずみが存在することが明らかになった。また、ナノロッド状の BaHfO₃ よりもパーティクル状の BaHfO₃ のほうがより大きな残留ひずみを与えることが確認された。ひずみ変化率は、図 2 に示す外部ひずみに対する内部結晶ひずみのグラフの勾配から算出した。その結果、無添加 GdBCO 線材では 0.91 であったのに対して、BaHfO₃ 添加線材は 0.88 ~ 0.85 という値を示した。本実験で得られた BaHfO₃ 導入による外部ひずみに対する内部ひずみの応答の変化は、臨界電流のひずみ依存性の結果から予想される内部ひずみの変化より小さい値であった。これは、BaHfO₃ 添加 GdBCO 線材の臨界電流のひずみ依存性は、内部ひずみ以外にも決定要因があることを示唆している。以上の結果より、BaHfO₃ 導入による GdBCO 線材について、これまで明らかになっていなかった内部ひずみの変化、及び臨界電流のひずみ依存性の変化に内部ひずみ以外の要因が存在するという新しい知見を得ることができた。

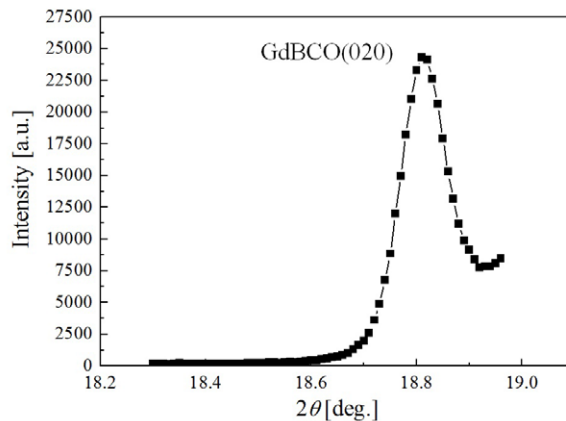


図 1. ひずみ率 0% における Sample①の 2θ プロファイル

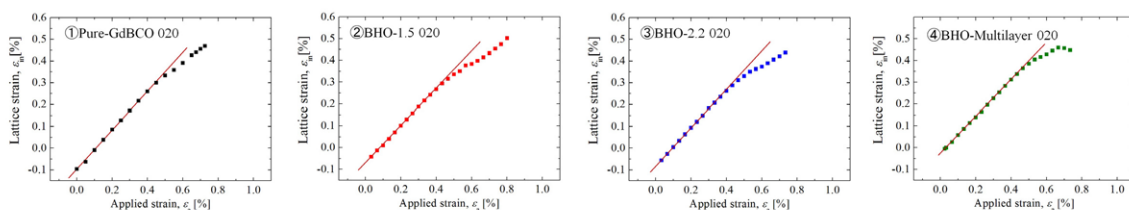


図 2. 外部印加ひずみに対する内部結晶ひずみ

表 1. 各試料における残留ひずみ及びひずみ変化率

	Sample①	Sample②	Sample③	Sample④
残留ひずみ	-0.1%	-0.07%	-0.08%	-0.028%
ひずみ変化率	0.91	0.86	0.88	0.85

今後の課題：

本実験では、室温における高温超電導体の面内ひずみに関して評価を行った。超伝導体は基本的に低温環境下で使用されるので、今後使用温度領域での内部ひずみ評価が必要である。

参考文献：

- [1] K. Shikimachi et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 2012-2018, **19** (2009).
- [2] P. Mele et al., *Supercond. Sci. Technol.*, 032002, **21** (2008).
- [3] C.C. Clickner et al., *Cryogenics*, 432–438, 433, **46** (2006).
- [4] T. Usami et al., *TEIONKOUGAKU* vol.50, **8**, 409 (2015).