

GdBCO 線材における臨界電流に及ぼすひずみ印加方向の影響

Influence of applied strain direction on critical current for GdBCO coated conductor

¹ 東北大学・金研, ² 物材機構, ³ 超電導工研

諏訪友音¹, 小黒英俊¹, 淡路智¹, 渡辺和雄¹, 西島元², 町敬人³, 和泉輝郎³

¹Institute for Materials Research, Tohoku University

²National Institute for Materials Science

³Superconductivity Research Laboratory, International Superconductivity Technology Center

T. Suwa¹, H. Oguro¹, S. Awaji¹, K. Watanabe¹, G. Nishijima², T. Machi³, T. Izumi³

1. はじめに

REBCO 線材 (RE=Y or Rare earth) は磁場中でも高い臨界電流密度 J_c を維持できること, 高強度基板を用いているため高い耐応力特性を持つことから, 強磁場超伝導マグネットへの応用が期待されている. REBCO 線材をマグネットへ応用する場合, 磁場中において大電流を通电した際に, コイル円周方向に引張り応力 (フープ応力) が発生する. これは, 線材の長手方向に作用するので, 長手方向にひずみを印加した状態での臨界電流 I_c は超伝導マグネット設計の際に重要な特性となる. 一般的に 77 K, 外部磁場 0 T (自己磁場下) ではひずみの 2 乗に比例して, I_c が変化する様子が多く報告されている [1]. しかし, REBCO 線材の I_c のひずみ依存性の起源は, まだ明らかにされていない.

REBCO は c 軸方向の J_c が a, b 軸方向の J_c に比べて小さく, また, Cooper 対のコヒーレンス長が短いため, 粒界において J_c が大きく低下する. そのため, 線材化するにあたって線材長手方向に a または b 軸, 垂直方向に c 軸が配向する, 2 軸配向した線材を作製する必要がある. 超伝導層を配向化させるプロセスの代表的なものに, 無配向金属基板上に配向層を成膜する IBA (Ion Beam Assisted Deposition) 法や ISD (Inclined Substrate deposition) 法がある. この時, 基板には Ni 基耐熱合金の Hastelloy C-276 が主に用いられる. Hastelloy C-276 は, ヤング率が約 200 GPa, 0.2% 耐力が約 700 MPa と機械特性が優れてい

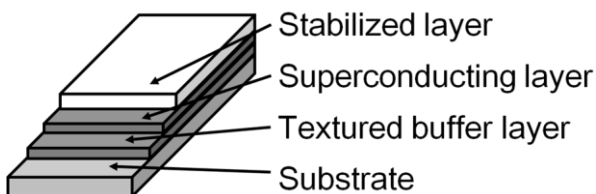
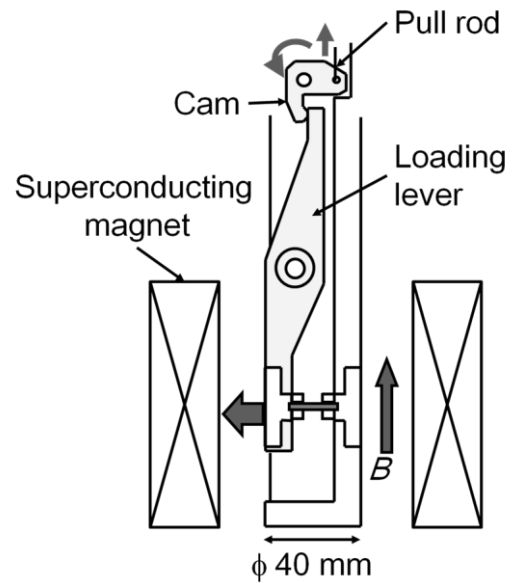
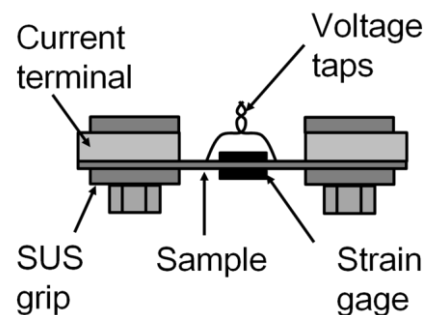


Fig. 1 The structure of a coated conductor.

る. そのため, 基板に Hastelloy を用いた REBCO 線材は優れた耐応力特性を持っている. このようにして REBCO 線材は超伝導層を 2 軸配向させているが, 最近の研究で, 線材長手方向に超伝導層が [100] 配向している線材と [110] 配向している線材で, I_c のひずみ依存性が異なることが報告されている [2,3]. 本研究では, GdBCO 線材の超伝導層の



(a)



(b)

Fig. 2 The schematic view of (a) the cam type strain measurement apparatus and (b) the sample stage of that device.

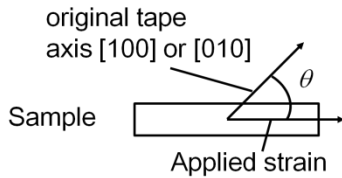


Fig. 3 The schematic view of samples.

結晶方位が、 I_c のひずみ依存性に与える影響を調べることを目的としている。

2. 実験

Fig. 1 に、試料として用いた GdBCO 線材の構造を示す。基板に Hastelloy, 配向層には IBAD 法で作成された MgO, 超伝導層には PLD 法で作成された GdBCO, 安定化層には Ag が用いられている。

GdBCO 線材に対する、77 K, 外部磁場 0-3 T における I_c の引張りひずみ依存性を、カム式ひずみ印加装置を用いて測定した。装置の概略図を Fig. 2(a) に示す。この装置は、荷重を最大 1000 N まで印加することができ、応力測定も可能である。Fig. 2(b) に示すように、安定化層を電極にはんだ付けした後に、試料を挟み込むようにステンレスの板で押さえつけて試料は固定されている。電極間は 7 mm, 電圧端子間距離は 5 mm とした。 I_c は通電法によって測定し、1 μ V/cm の電界基準を用いて、 I_c を決定した。ひずみはひずみゲージによって測定した。試料の両面である安定化層と基板にひずみゲージを貼ることで、たわみ成分を除去した長手方向のひずみを測定した。東北大学金属材料研究所強磁場超伝導研究センターの 10T 無冷媒超伝導マグネットを使用し、液体窒素浸漬冷却下で測定を行った。

任意の結晶方位に引張り応力を与えられる試料を得るために、Fig. 3 に示すように、長手方向に対して θ だけ傾いた方向に GdBCO 線材から切りだした試料を作製した。試料作製に用いた線材は、線材長手方向に超伝導層の GdBCO が [100] または [010] 方向に配向している。試料の切断にはレーザーを用いた。線材長手方向を $\theta = 0^\circ$ として、 $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ の試料を切り出した。 $\theta = 0^\circ$ の試料を S0, $\theta = 45^\circ$ の試料を S45 とする。

3. 実験結果および考察

負荷ひずみ 0% の時の I_c を $I_c(0)$ とし、Table. 1 に自己磁場下における値を示す。S0 に比べ、

S45 の I_c が低いのが、これは、試料作製の際に、試料が劣化したためと考えられる。Fig. 3 に GdBCO 線材の磁場中における $I_c / I_c(0)$ の引張 Table. 1 Parameters of the equation (1).

	θ	$I_c(0)$ at 0T	a at self filed
S0	0°	79.3 A	~ 0.34
S45	45°	46.6 A	~ 0.14

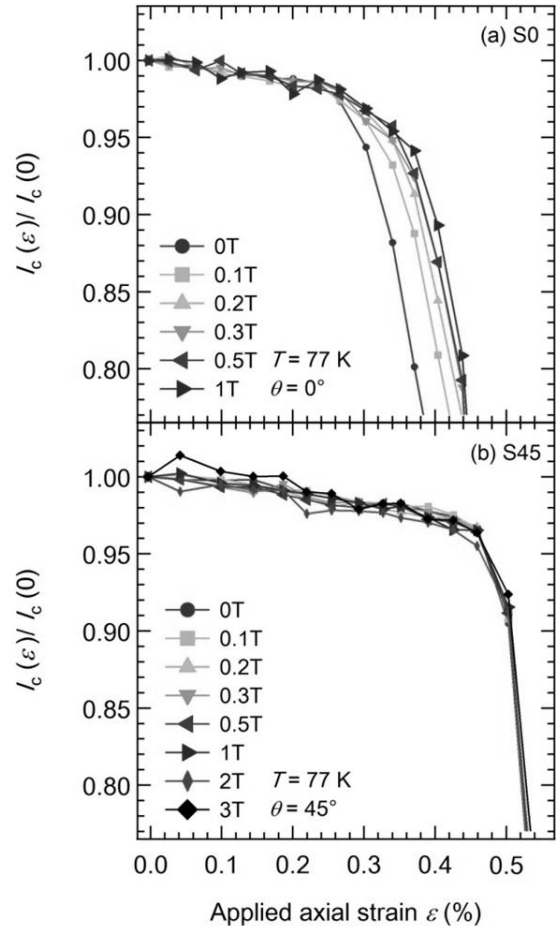


Fig. 4 Normalized I_c as a function of applied strain at 77 K and $B//c$ for the GdBCO coated conductor. The applied strain angle θ are (a) 0° and (b) 45° to the longitudinal direction of the coated conductor.

りひずみ依存性を示す。異なる磁場中における I_c のひずみ依存性を比較するために、 I_c は $I_c(0)$ で規格化した。REBCO 線材の圧縮および引張りひずみ可逆領域における、 I_c のひずみ依存性は、

$$I_c(\epsilon)/I_{c,\max} = 1 - a|\epsilon - \epsilon_m|^b \quad (1)$$

と表わされる、べき乗則に従うことが経験的

に分かっている[1]. ここで, $I_{c,max}$ は I_c の最大値, ε は負荷ひずみ, ε_m は $I_{c,max}$ となるひずみである. a , b はひずみ感受性とよばれ, ひず

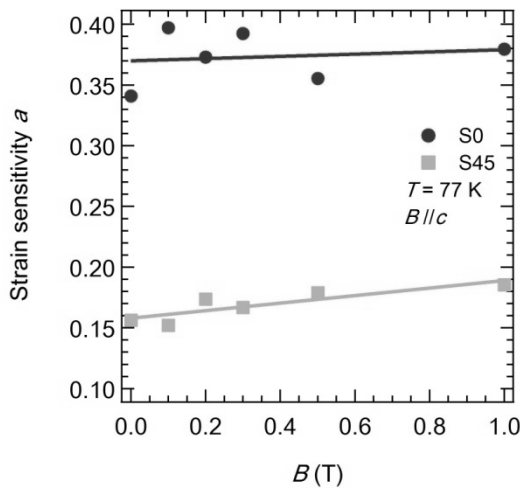


Fig. 5 Strain sensitivity a as a function of magnetic field.

み依存性の大きさを表すパラメータである. 今回, 圧縮領域のひずみ依存性の測定は行っていないため, I_c のピークが観測されなかった. そのため, $\varepsilon_m = 0\%$, $I_{c,max} = I_c(0)$ と仮定した. また, van der Laan らによると YBCO 線材の場合, $b = 2.2$ なので[1], 本研究では簡略化のため $b = 2$ と仮定した. (1) 式でフィッティングを行った結果より求めた a の磁場依存性を Fig. 5 に示す. GdBCO 線材において, I_c のひずみ依存性は磁場の増加とともに単調に増加する傾向が観察された.

Fig. 4 に示すように, S45 は S0 に比べて I_c のひずみ感受性が小さいことが分かった. ひずみ依存性に及ぼす結晶方位を考察すると, [110] 方向にひずみを印加した試料の方が, [100] または [010] 方向にひずみを印加した試料に比べて, 同じひずみに対する I_c の変化が小さいことが分かった. van der Laan らによって, (Y, Gd)BCO 線材で同様の関係がみら

れることが報告されており[3], GdBCO 線材も (Y, Gd)BCO 線材と同じ振る舞いをすることが分かった.

4. まとめ

本研究では, GdBCO 線材中における超伝導層の結晶方位と I_c のひずみ依存性の関係を考察するために, 任意の結晶方位に対してひずみを印加できる試料を作製し, 77 K, 磁場中における I_c のひずみ依存性の測定を行った. [100] または [010] 方向にひずみを印加した試料に比べて, [110] 方向にひずみを印加した試料のひずみ依存性が小さいことが分かった. 今後, $\theta = 15^\circ, 30^\circ$ の試料の I_c のひずみ依存性を測定し, GdBCO 線材における I_c のひずみ依存性とひずみを印加する結晶方位の関係を明らかにしていく予定である.

謝辞

本研究は, イットリウム系超電導応用基盤技術研究開発業務の一環として, 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託により実施したものである.

参考文献

- [1] D. C. van der Laan and J. W. Ekin, Appl. Phys. Lett. **90** (2007) 052506
- [2] M. Sugano, S. Machiya, H. Oguro, M. Sato, T. Koganezawa, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, T. Izumi and T. Saitoh, Supercond. Sci. Technol. (to be published)
- [3] D. C. van der Laan, D. Abraimov, A. A. Polyanskii, D. C. Larbalestier, J. F. Douglas, R. Semerad and M. Bauer, Supercond. Sci. Technol. **24** (2011) 115010