

**R<sub>E</sub>BCO(R<sub>E</sub>=Y, Dy and Gd)コーテッドコンダクターにおける  
微細双晶の定量構造解析と超伝導臨界電流との相関の解明**  
**Precise Structure Analysis of Micro Twins in REBCO (RE= Y, Dy and Gd)  
Coated Conductors and Its Correlation with  
Superconducting Critical Current**

長村 光造<sup>a</sup>, 菖蒲 敬久<sup>b</sup>, 桐山 幸治<sup>c</sup>, 河原 敏男<sup>d</sup>, 菅野 未知央<sup>e</sup>, 町屋 修太郎<sup>f</sup>, 土屋 佳則<sup>g</sup>  
 Kozo Osamura<sup>a</sup>, Takahisa Shobu<sup>b</sup>, Koji Kiriya<sup>c</sup>, Toshio Kawahara<sup>d</sup>, Michinaka Sugano<sup>e</sup>,  
 Shutaro Machiya<sup>f</sup>, Yoshinori Tsuchiya<sup>g</sup>

<sup>a</sup>(公財)応用科学研究所, <sup>b</sup>(独)日本原子力研究機構, <sup>c</sup>(一財)総合科学研究機構, <sup>d</sup>中部大学,  
<sup>e</sup>高エネルギー加速器研究機構, <sup>f</sup>大同大学, <sup>g</sup>(独)物質材料研究機構  
<sup>a</sup>RIAS, <sup>b</sup>JAEA, <sup>c</sup>CROSS, <sup>d</sup>Chubu University, <sup>e</sup>KEK, <sup>f</sup>Daido University, <sup>g</sup>NIMS

R<sub>E</sub>BCO コーテッドコンダクター中の微細双晶組織が弾性的性質に及ぼす影響を調べるため、放射光により超伝導層中の歪の精密測定を行った。超伝導層中の歪は熱残留歪( $A^T$ )と外部からの引張歪( $A$ )に回答する格子歪( $A_{400}$ ,  $A_{040}$ )の和として表される。微細双晶の<100>方向が引張方向に平行な場合には (a) 格子歪と引張歪の比つまり  $A_{400}/A$  は  $A_{040}/A$  より大きい、(b)  $A_{400}/A$  と  $A_{040}/A$  の両方とも 1 より小さい、(c) Poisson 比は理論から期待されるより大きな値となる等の興味ある結果が得られた。

キーワード： 超伝導、双晶、格子歪、白色 X 線

### 背景と研究目的：

本研究で対象とする R<sub>E</sub>Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6+d</sub>(R<sub>E</sub>BCO)複合コーテッドコンダクターにおいては高温での正方晶が冷却過程で斜方晶に相転移する際に、歪エネルギーを極小化するため micro twin (微細双晶)が発生し、双晶界面での結晶の乱れは量子磁束のピンニングに寄与するなど超伝導特性へ大きな影響があるため、その発生機構、形態等を定量的に予測する必要性に迫られている[1,2]。そこで今回は主として 2 種類のコーテッドコンダクターについて熱歪および引張荷重下における各成分の回折線から回折歪、回折弾性定数を求め、巨視歪 (伸び計の示す値) と回折歪の比、軸方向および幅方向の回折歪の比 (Poisson 比) を求め、考察を行った。

### 実験：

本実験で用いた試料は SuperPower の YBCO および KERI の SmBCO coated conductor であった。実験は BL28B2 ビームラインに引張試験装置を組み付け、テープ状試料に引張荷重を印加して、その状態で引張軸方向および横方向の超伝導層の格子定数の精密測定を行った。エネルギー範囲 30~150 keV の白色 X 線を  $2\theta = 8^\circ$  に配置した Ge 検出器で回折 X 線を計測した。試料から分離採取した YBCO および SmBCO 粉末からの格子定数を無歪での値として、テープ状試料からの格子定数との差から歪を算出した。

### 結果および考察：

SuperPower 社の YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6+d</sub>(YBCO)薄膜についての結果を図 1 に示す。印加した引張歪  $A=0$  のところで示される熱歪は圧縮性であることがわかる。(040),(400)の面間隔の印加歪依存性はテープ軸方向では印加歪 0.3%までほぼ直線であり、テープ横方向では 0.5%付近まで直線関係が保たれている。この直線部分の勾配つまり  $A_{hkl}/A$  を表 1 に示す。(040)の勾配は(400)の勾配より小さく、さらにどちらの勾配も 1 より小さい。一方横方向の勾配は-0.32 であった。このことより Poisson 比は 0.35~0.38 になった。KERI の SmBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6+d</sub>(SmBCO)薄膜についても表 1 に示すように同様な結果が得られた。

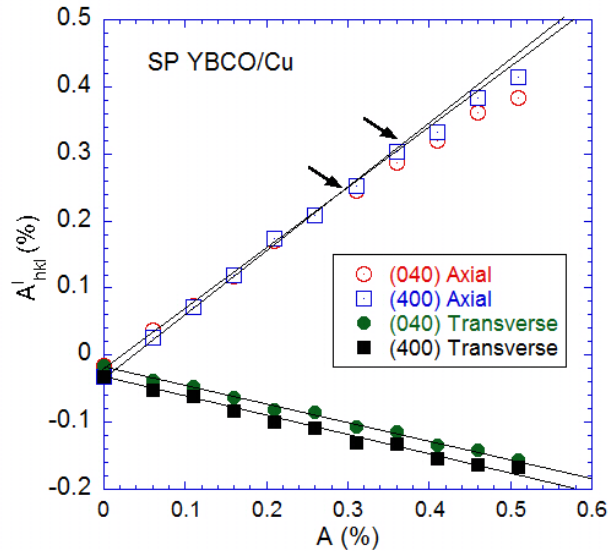


図1 SP YBCO/Cu テープにおける超電導層中の回折歪の引張歪依存性

テープ軸方向の勾配が 1 より小さいことが Y と Sm に系が変わっても同様であることが確認された。これらの試料では微細双晶の<100>軸がテープ軸に平行である。Reuss の条件でこの微細構造に対応する応力—歪の応答関係を定式化し考察したところ、双晶界面が力学的に軟らかい状態にあることが推定された。Poisson 比は実験的に 0.24 から 0.38 の範囲にあることが分かったが、本来 YBCO の Poisson 比は理論的に 0.12~0.14 であることが期待されている[3]。このことよりコーテッドコンダクターでは下地効果により変形が相当拘束されていることが推定された。

以上今回の実験で、熱歪を正確に評価すること、引張軸方向と横方向のデータを得ることにより、微細双晶を含む超電導層の力学状態を定量的に評価する足掛かりを得ることができた。

表1 各回折面から得られた回折歪と引張歪の比（初期勾配）と Poisson 比

	hkl	Initial Slope		Poisson Ratio
		Axial	Transverse	
KERI SmBCO	400	0.98	-0.24	0.24
	040	0.91	-0.24	0.26
SP YBCO/Cu	400	0.91	-0.32	0.35
	040	0.84	-0.32	0.38

#### 今後の課題：

本研究で対象とする  $R_EBa_2Cu_3O_{6+d}$  コーテッドコンダクターにおいては必然的に micro twin（微細双晶）の発生すること、その発生のメカニズム、形態等を定量的に予測出来るようにすることが目的である。本コーテッドコンダクターは金属基板上の配向性酸化物バッファー層に厚さ 1 ミクロンメートル程度の超伝導層を結晶成長させ、さらに薄い銀キャップ層が付けられているので、結晶成長後の冷却過程で超伝導層に発生する熱誘起残留歪は複合構造に依存して複雑である。この歪の 2 次元分布を正確に計測し、微細双晶に対するモデル計算で得られる歪分布の対応関係から双晶発生の機構を解明する。すなわち非常に薄い微細領域での歪測定が必要な本研究では高輝度の白色性の放射光の活用が不可欠の研究手法であり、今後本研究手法を発展させることは、歪の定量的評価と臨界電流の歪依存性の起源を探ることに大きく寄与するものと考えられる。この

ことは工業的観点からも定量的に「歪の評価」が可能になるので、「歪の管理」を厳密化することが可能となり、その工業的なメリットは極めて大きいと考えられる。

**参考文献：**

- [1] 長村光造、町屋修太郎、土屋佳則、ハルヨ ステファン、鈴木裕士、菖蒲敬久、桐山幸治、菅野未知央；YBCO Coated Conductor における局所歪と双晶構造の相関，第 82 回 2010 年度春季低温工学・超電導学会講演概要集 16, (2010).
- [2] K. Osamura, S. Machiya, Y. Tsuchiya, S. Harjo, H. Suzuki, T. Shoubu, K. Kiriyama and M. Sugano, “Internal Strain Behavior Exerted on YBCO Layer in the YBCO Coated Conductor”, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* Vol.20 pp3090-3093, (2011).
- [3] S. Machiya, K. Osamura, T. Shoubu, K. Kiriyama, M. Sugano and K. Tanaka, “Macroscopic Elastic Constant Analysis and Strain Behavior of Crystal on YBCO Layer in YBCO Coated Conductor” *TEION KOGAKU (J. Cryo. Soc. Jpn)* vol 45, pp 233 – 236, (2011)