

## 実用超電導複合体における臨界電流の応力・歪効果

Stress/strain effect on critical currents of engineering composite superconductors

長村 光造<sup>1)</sup> 鈴木 裕士<sup>2)</sup> 町屋 修太郎<sup>3)</sup> 土屋 佳則<sup>4)</sup> 菅野 未知央<sup>5)</sup>

Kozo OSAMURA Hiroshi SUZUKI Shutaro MACHIYA Yoshinori TSUCHIYA Michinaka SUGANO

<sup>1)</sup>応用科学研究所 <sup>2)</sup>原子力機構 <sup>3)</sup>大同大学 <sup>4)</sup>物質・材料研究機構 <sup>5)</sup>京都大学

### (概要)

実用超電導複合体Nb<sub>3</sub>Sn線材、BSCCOおよびYBCO高温超電導線材の臨界電流の応力・歪問題を統一的に理解し、解決するため、低温における引張荷重下での局所歪の挙動を明らかにすることは重要である。そこで世界でも最も高性能な中性子回折測定用低温引張試験機を開発し、それにより数種の実用超電導線材中の超電導層に負荷される局所歪を精密に測定し、force free strain等の重要な知見を得た。

**キーワード**：複合超電導体，臨界電流，局所歪，可逆歪，機械的性質

### 1. 目的

超伝導材料の応用に関して、臨界電流が応力・歪に敏感であることが工学上、大きな問題となっている。例えば、ITER計画で用いられるNb<sub>3</sub>Sn超伝導素線については、製造過程で生ずる残留応力、強磁場中でのフープ力等により、その歪量が増加し、容易に臨界電流が不可逆に変化する危険域まで達することである。さらに実用化が期待されているYBCOなどの高温超伝導線材においても、セラミックスである脆性的な超伝導層の保持のため金属基材と複合した線材（テープ材）の形がとられるが、熱誘起残留応力、フープ力による臨界電流の劣化の問題となり、その定量的解明が緊急の課題となっている。このように臨界電流の応力・歪問題は実用上大きな問題となっているが、学問的見地からも、真性歪効果の解明等、まだ統一的な理解がなされていない研究課題がある。

Nb<sub>3</sub>Sn超伝導素線では臨界電流の歪依存性は可逆領域と不可逆領域に分けられる。可逆限界歪以上ではNb<sub>3</sub>Snフィラメントが破断してしまうため、どのようにすれば可逆限界歪を大きくし、フィラメントの破断を避けるかが、工学的見地から大きな研究課題となっている。

高温超伝導線材においても特有な臨界電流の歪依存性がある。YBCO系では、可逆歪領域内で歪依存性に極大が出現する。BSCCO系では、引張歪に対して、臨界電流は単調に減少する。このように、物質により歪効果の挙動が異なることが明らかになってきている。

本申請では、広く核融合プロジェクトにおいて、さらなる高性能化が求められているNb<sub>3</sub>SnおよびNb<sub>3</sub>Al線材、高温超伝導材として実用化段階に入ってきているBSCCO線材、YBCOおよびReBCO線材における、臨界電流の応力・歪問題を統一的に理解し、解決するため、その歪依存性に関する挙動を温度依存性も含めて、詳細に明らかにすることを目的とする。

### 2. 方法

平成21年度までにRESA-1に構築した低温残留歪測定装置の改良とともに、同装置による低温での歪測定を行った。すなわち線径の細い試料用の引張試験用チャックの作製、装置の低温安定性を増加させるためのチタン合金製主軸の導入、冷凍機コールドヘッドとチャック間の熱導伝帯の増強等を行った。改良した本装置により5Kから100K

の温度範囲において一軸引張応力下における線材中の残留歪、変形挙動の評価を行った。またオイラークレドールを装備した RESA-2 で実用超電導線中の超電導層の集合組織について測定した。

### 3. 研究成果

#### 中性子回折測定用低温引張試験機の改良[5]

中性子回折法では複合材の構成要素毎のひずみを評価できることから、特に超伝導多芯線材の各構成要素に生じるひずみを、分離して観測することが可能である。動作温度環境で超伝導線材に加わる応力と導体に発生するひずみの関係を明らかにすることを目的として、中性子回折測定用低温引張試験機を開発してきた。本試験機は日本原子力研究開発機構の研究用原子炉 JRR-3 に設置された中性子応力測定装置 RESA-1 に同架できる設計とし、GM 冷凍機と真空容器、応力負荷・制御機構から構成されている。本年度は(1) 線径の細い超伝導線に対して試料チャックでの最低到達温度 5K 以下を実現できるように改良し、(2) 引張主軸からの熱浸入を防ぐため、チタン製のシャフトに交換すること、(3) 冷凍機コールドヘッドとチャック間に高純度アルミニウムブレードを用いた熱導伝帯の増強等を行った。本装置の性能試験のため、平行部長さ 31mm、直径 3mm の SUS316 鋼引張試験片に 5K、100K、および室温で弾性限内の引張応力を負荷して、(111)、(200)、(220)の各面について中性子回折測定を実施した。得られた SUS316 鋼の 5K での回折弾性定数を従来の参考値と比較し、よい一致が見られた。さらに本装置を用いて下記の成果を得た。

#### YBCO C.C.の低温引張と中性子回折による内部歪変化のその場測定 [1,2,3]

本低温引張試験機を用いて、5K~77Kの温度範囲で YBCO coated conductors について引張試験を行うと同時に中性子回折により YBCO 超電導層、金属基板、ラミネート層の局所歪を測定した。一方、同一試料について引張荷重下で臨界電流測定を行った。得られた結果を整理し、負荷歪に対する各成分中の局所歪がどのように変化するかを明らかにした。試料は Cu を電着した YBCO coated conductor で、Hastelloy 基板上にバッファ層を介して厚さ約 1 $\mu$ m の YBCO 層、さらに Ag 層が積層した構造をしており、ここでは幅 4mm (SCS4050) を用いた。液体窒素温度で臨界電流の歪依存性の測定を行うとともに、中性子回折測定用低温引張試験機を用いて、低温において一軸引張荷重下における局所歪の測定を行った。77K で一軸引張応力を与えて YBCO の (020) および (200) 回折ピークを測定した。種々の温度における (020) 面間隔の歪依存性に関しては、測定した歪範囲では面間隔は印加した歪に比例し、温度とともに面間隔は増加することがわかった。同一試料について室温測定では YBCO 層に 0.20% の圧縮歪が存在することを明らかにした。また YBCO の熱膨張係数を 9.2 ppm/K とすると 77K での標準状態の (020)、(200) 面間隔の値を室温でのテープ材が無歪にあった時の測定値から推定することができる。77K で YBCO テープ中には圧縮の残留歪が存在し、引張歪の増加とともに、圧縮歪は小さくなり、force free strain ( $A_{ff}$ ) は 0.26% となり、理論的な予測値の 0.26% に一致した。一方臨界電流の最大は  $A=0.035\%$  に存在し、従来の臨界電流最大は force free strain に一致するという考え方は成立しないことが明らかとなった。さらに (020) 面の格子歪は (200) 面の格子歪より小さく、さらに両者は外部歪に対する割合より小さいという事実が確認された。これは微細な双晶構造に関連することが推定された [1]。

#### BSCCO 線材の集合組織 [8]

BSCCO の超伝導特性には結晶の配向の状態が影響すると考えられている。しかしながら Labo-X 線では、侵入深さの問題から表面から数ミクロンしか評価できず、また、フィラメント評価するためには分解せねばならず、膜厚

方向全体で評価することはできない。高エネルギーX線を用いれば、膜厚方向全体の平均を評価できるが、評価領域の大きさと試料セッティングの自由度の高さの点から、中性子回折を用いた評価がもっとも優れている。そこで、本実験では、中性子線を用いた配向の評価を試みた。用いたBi-2223の試料は、ラミネート強化をしていない素線を用いた。幅4.2 mm、厚さは約0.22 mmであり、背反する2枚を張り合わせたものを1セットとし5組10枚として、中性子散乱実験を行った。 $l_c$ は184 Åから150 Åの間の特性が異なる6種の試験片の測定を行った。オイラークレドールを装備したRESA-IIでの測定は、Axial方向セットアップと、Lateral方向セットアップの2種類の試料セットアップを用いた。用いた回折は220と0014である。用いた波長は約0.2 nmであった。 $c$ 軸まわりの配向を評価するために、RESA-IIにて0014を用いて第一象限のみ $c$ 軸まわりの2軸スキャンを行ったところ、 $c$ 軸の回転による依存性はなく、また集合組織の角度依存性もなく、典型的な $c$ 軸配向のパターンが得られた。次に、6種の試験片にてロッピングカーブ測定を行い、その半価幅の測定を行った。得られた半価幅と $l_c$ と $n$ 値との相関を調べたところ、ばらつきはあるものの、 $l_c$ と $n$ 値どちらにも、右下がりの相関があることが明らかとなった。

#### 4. 結論・考察

極低温での応力下中性子回折測定を可能にする低温引張試験機がほぼ完成し、超伝導線材の応力—ひずみ効果の検証が可能となる環境が整備された。本試験機は無冷媒で任意の温度設定が可能なることから、様々な材料の低温特性評価、研究に利用可能であることを示した。

本研究を通して、広い低温領域で実験的に明らかにした、臨界電流、局所歪、弾性定数、熱膨張係数等を総合して、定量性のある機械—電磁気特性解析モデルの構築を試み、さらに可逆限界歪および応力の推定が可能となるような、線材の工学的設計手法を完成して行きたい。

#### 5. 引用(参照)文献等

- 1) Kozo Osamura, Shutaro Machiya, Yoshinori Tsuchiya, Stefanus Harjo, Hiroshi Suzuki, Takahisa Shobu, Kouji Kiriya, and Michinaka Sugano, Unusual Internal Strain Behavior Exerted on YBCO Layer in the Surround Cu Stabilized YBCO Coated Conductor, IEEE Transaction on Applied Superconductivity .20 (2011) in press.
- 2) Kozo Osamura, Shutaro Machiya, Yoshinori Tsuchiya, Hiroshi Suzuki, Internal Strain and Mechanical Properties at Low Temperatures of Surround Cu Stabilized YBCO coated conductor, IEEE Transaction on Applied Superconductivity .20 (2010) 1532-1536.
- 3) Kozo Osamura, Shutaro Machiya, Yoshinori Tsuchiya, Hiroshi Suzuki, Force free strain exerted on a YBCO layer at 77 K in surround Cu stabilized YBCO coated conductors, Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 045020-045026
- 4) Hidetoshi Oguro, Satoshi Awaji, Gen Nishijima, Kohki Takahashi, Kazuo Watanabe, Shutaro Machiya, Hiroshi Suzuki, Yoshinori Tsuchiya, Kozo Osamura Residual strain measurement using neutron diffraction for practical Nb<sub>3</sub>Sn wires under a tensile load, Supercond. Sci. Technol. 23 (2010) 025034-025037.
- 5) Y Tsuchiya, H Suzuki, T Umeno, S Machiya and K Osamura Development of a cryogenic load frame for a neutron diffractometer, Meas. Sci. Technol. 21(2010)025904-025907
- 6) 高橋弘紀、小黑英俊、淡路智、渡辺和雄、町屋修太郎、鈴木裕士、西島元、土屋佳則、長村光造；中性子回折を用いたNb<sub>3</sub>Sn線材の低温における歪み測定、第83回2010年度秋季低温工学・超伝導学会講演概要集 239

7) 小黒英俊、淡路智、渡辺和雄、菅野未知央、町屋修太郎、菖蒲敬久、長村光造；放射光を用いた $\text{Nb}_3\text{Sn}$ 線材の残留ひずみ測定、第 83 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 185

8) 町屋修太郎、長村光造、ハルヨ ステファヌス、伊藤崇芳、鈴木裕士；パルスおよび定常中性子源を用いた BSCCO テープ線材の集合組織測定、第 83 回 2010 年度秋季低温工学・超電導学会講演概要集 149