

# 全方向磁界を印加した条件における Bi 系線材と Y 系線材の磁化損失のモデル化

## Modeling of magnetization loss in Bi and YBCO tapes exposed to all magnetic field directions

小川 純, 福井 聡(新潟大); 岡 徹雄(芝浦工大); 閻 盼盼, 金森 光紀(新潟大)

OGAWA Jun, FUKUI Satoshi (Niigata Univ.); OKA Tetsuo (SIT); YAN Panpan, KANAMORI Kouki (Niigata Univ.)

E-mail: ogawa@eng.niigata-u.ac.jp

### 1. はじめに

高温超伝導線に垂直に交流磁界を印加したときに生じる磁化損失は Brandt の磁化損失モデルと一致することが報告されており、線材面回転方向における損失モデルについても鎖交する磁界をもとに損失を導出する方法が提案されている。線材に対し垂直でない磁界(斜め磁界)による磁化損失のモデルは提案されておらず、本研究では実験値をもとにした簡易的に損失を推定するためのモデルについて検討を行った。

### 2. 磁化損失を推定するための式

はじめに磁界の印加角度の定義として、線材面と磁界のなす角度を  $\theta$ 、線材軸と磁界のなす角度を  $\phi$  と定義する。本研究は以下に示す条件で実験により調査を行い、このデータをもとに全方向からの磁界に対する損失を推定するモデルを提案する。基準となる磁界の印加方向における損失を以下のように定義する。

- 線材面に垂直, 線材軸に垂直  $\dots Q_m^{\theta \perp \phi \perp}(B_m)$
- 線材軸に平行, 線材軸に垂直  $\dots Q_m^{\theta \parallel \phi \perp}(B_m)$
- 線材軸に平行  $\dots Q_m^{\theta \parallel}(B_m)$

図1に臨界電流値 167.5A の Bi2223/Ag と臨界電流値 189.3A の YBCO 線のそれぞれの条件における損失特性を示す。YBCO 線の線材軸に平行に磁界を印加した条件において、損失が非常に小さくなることから、損失は無視できるものとした。図1の結果をもとに以下のモデル式を提案した。

超電導線軸に対して垂直な磁界で面回転方向は、

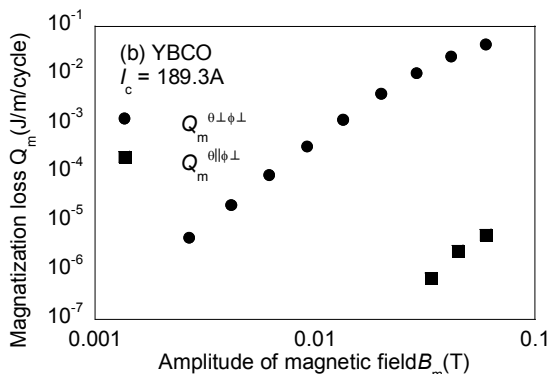
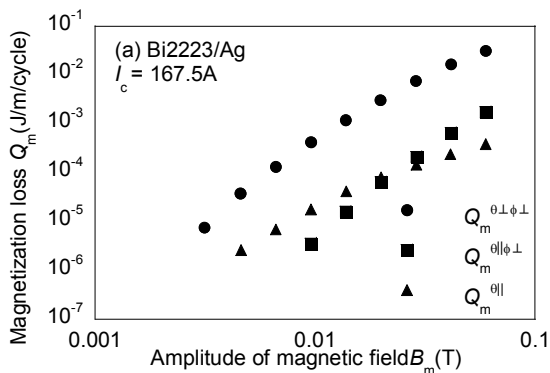


Fig. 1 Measured magnetization loss in Bi2223/Ag and YBCO tapes

$$Q_m(B_m, \theta) = Q_m^{\theta \perp \phi \perp}(B_m \sin \theta) + Q_m^{\theta \parallel \phi \perp}(B_m \cos \theta) \quad (1)$$

線材軸回転方向は、

$$Q_m(B_m, \phi) = Q_m^{\theta \perp \phi \perp}(B_m \cdot f(\phi)) + Q_m^{\theta \parallel \phi \perp}(B_m \cdot (1 - f(\phi)))$$

$$f(\phi) = \sin \phi \cdot \left( \frac{\phi}{\frac{\pi}{2}} - \sin^3 \phi \right) + \frac{\phi}{\frac{\pi}{2}} \quad (2)$$

この(1), (2)をもとに、面と軸を同時に回転させた場合のモデル式を次のように提案する。

$$Q_m(B_m, \theta, \phi) = Q_m^{\theta \perp \phi \perp}(B_m \cdot f(\phi) \cdot \sin \theta) + Q_m^{\theta \parallel \phi \perp}(B_m \cdot f(\phi) \cdot \cos \theta) + Q_m^{\theta \parallel}(B_m \cdot (1 - f(\phi))) \quad (3)$$

### 3. 実験値と提案モデルの比較

図2に  $\theta$ が 60度、 $\phi$ が 30, 60度するときの実験値と提案モデルより導出した磁化損失を示す。プロットが実験値、実線が提案モデルを表しており、よく一致していることが示されている。本研究で提案しているようなモデルを用いることにより、3条件のみを実験により測定することによりすべての方向からの損失を簡易的に推定することが可能となる。

### 参考文献

1. J. Ogawa, et al.: IEEE trans. on Appl. Supercond., Vol. 26, No. 4 (2016) Art. No. 8200204
2. J. Ogawa, et al.: IEEE trans. on Appl. Supercond., Vol. 26, No. 4 (2018) Art. No. 86708

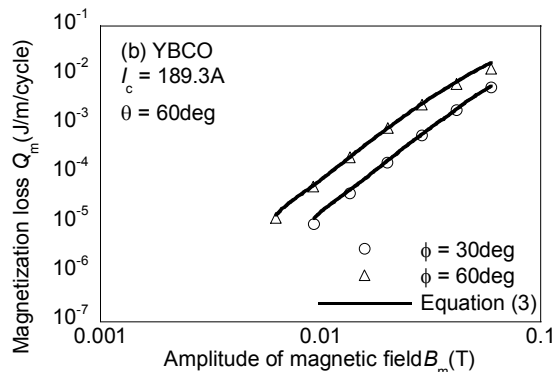
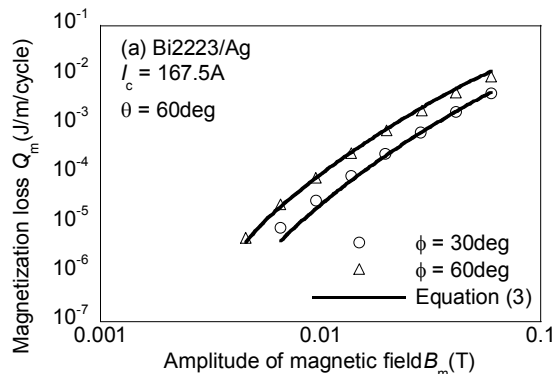


Fig. 2 Comparison of the experimental result and values from equation (3) based on the magnetization model

# ピックアップコイル法による 2 本 REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 並列導体の交流損失評価

## Experimental study by pick-up coil method on AC loss of two-strand parallel conductors composed of REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> tapes

三浦 峻, 沖 総一郎, 古川 琢馬, 岩熊 成卓 (九大)

MIURA Shun, OKI Soichiro, FURUKAWA Takuma, IWAKUMA Masataka (Kyushu Univ.)

E-mail: miura@sc.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々は REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(REBCO)超伝導テープ線材の低交流損失かつ大電流容量を満たす導体・巻線構成手法としてレーザースクライビング加工によるマルチフィラメントと転位並列導体の組み合わせを提案している。これまで電圧-電流( $V$ - $I$ )特性に臨界状態モデル( $n$  値  $\sim \infty$ )を仮定した理論表式により並列導体の交流損失を理論計算し、その結果 NbTi 線材で構成した並列導体の交流損失の実験値とよく一致した[1]。低温超伝導体と比較して、液体窒素温度域における REBCO 線材の  $n$  値は低い。そのため、 $n$  値  $\sim \infty$ と想定した理論表式では、正確に表現することは難しい。そこで最近、我々は  $n$  値を考慮した理論表式を提案した[2]。本研究では、その改善した理論表式の妥当性を明らかにすることを目的として、ピックアップコイル法により REBCO 線材で構成した 2 本並列導体の交流損失を評価した。

### 2. 実験方法

測定に用いた線材試料は SuperOx 社より購入した。線材幅は 2 mm で、安定化および保護層を含めた線材全体の厚さは約 107  $\mu\text{m}$  である。Fig. 1 にコイル試料(左図)と並列導体端部(Terminal)の模式図(右図)を示す。2 本の REBCO 線材はテープ面垂直方向に重ねて巻線し、線材の両端部は Fig. 1 右図のように超伝導線材を貼り合わせ、はんだにより接続した。コイル巻線部の内径は 39 mm であり、4.5 mm ピッチで 12 ターン巻いた。コイル試料の線材を巻線の途中で入れ替える(転位)ことで交流損失が低減するが、本研究では転位を施していない試料コイルを用意した。

均一な交流磁界空間中にコイル試料を配置し、コイル試料に対して十分長いピックアップコイルを同軸上に配置し、そのピックアップコイル側面上のポインティングベクトルを交流一周期にわたり積分することで交流損失 [ $\text{J}/\text{m}^3 \text{ cycle}$ ] を求めた。また理論計算に必要な臨界電流( $I_c$ )と  $n$  値は四端子法により評価した。

### 3. 実験結果及び考察

Fig. 2 に冷却温度 77.3 K における 2 本 REBCO 並列導体の交流損失の磁界振幅( $B_m$ )依存性を示す。磁界の振動周波数は 10 Hz である。実験値(Exp. results)、 $V$ - $I$  特性に臨界状態モデルを想定した理論計算値(Calculation 1)、および  $V$ - $I$  特性に  $n$  値を考慮し改善した理論計算値(Calculation 2)を示す。実験により得られた交流損失は、REBCO 線材と端部に流れる遮蔽電流に起因する付加的交流損失 (Additional AC loss)[1]と履歴損失が主に含まれる。しかし、線材テープ面の平行方向に磁界を印加しているため、付加的交流損失と比べて履歴損失は非常に小さい。そのため、実験により得られた損失はすべて付加的交流損失として扱った。

Fig. 2 より Calculation 1 と比較して、Calculation 2 は実験値と比較的良く一致した。特に  $B_m = 0.01$ - $0.03$  T において Calculation 1 と Calculation 2 は異なる挙動を示した。これは、Calculation 2 は  $n$  値を考慮することで、遮蔽電流が

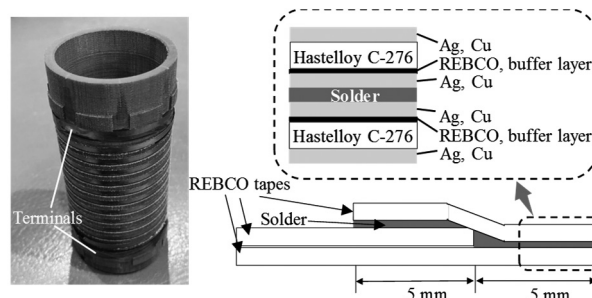


Fig. 1 Sample coil composed of REBCO superconducting tapes (left figure) and schematic drawing of joint at the terminal (right figure).

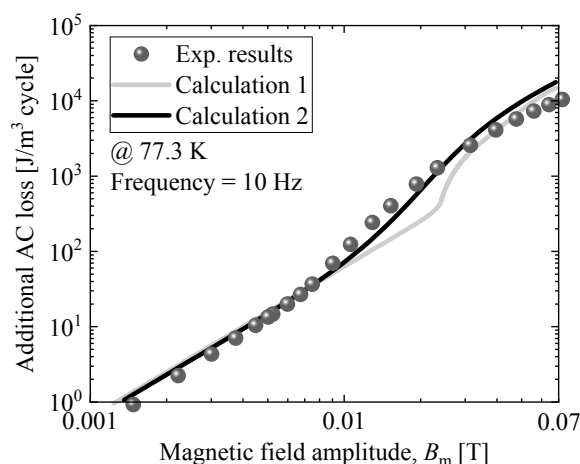


Fig. 2 Dependence of additional AC loss on magnetic field amplitude (10 Hz) at 77.3 K for two-strand parallel conductors composed of REBCO tapes. The red plots show experimental results. The solid lines are theoretical calculations. The green line is calculated by accounting for critical state model ( $n \sim \infty$ ). The black line is calculated by accounting for  $n$ -values.

$I_c$ 以下における領域で REBCO 線材内で発生する損失も表現されるためである。

以上より、改善した理論表式は妥当であることが示された。当日は付加的交流損失の周波数依存性についても議論する予定である。

### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 (17H06931, 26249042)、および JST-ALCA の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

1. M. Iwakuma *et al.*: Supercond. Sci. Technol. **15**, 1537 (2002).
2. S. Oki *et al.*: IEEE Trans. Appl. Supercond. **28**, 8201005 (2018)

## CORC wire の交流損失測定

### Ac loss measurements of CORC wires

雨宮 尚之, 豊本 竜希(京大)

AMEMIYA Naoyuki, TOYOMOTO Ryuki (Kyoto University)

E-mail: amemiya.naoyuki.6a@kyoto-u.ac.jp

#### 1. はじめに

CORC 導体は銅フォーマの上に薄膜線材をスパイラル状に多層に巻いた導体で、当初は導体径も大きく CORC cable と呼ばれていたが、最近は直径 3 mm 程度の CORC wire と呼ばれるものも作られている。CORC 導体は丸線であることからテープに比べてコイルに巻く際の取り扱いが容易であるほか、特に CORC wire は、素線に準ずるもののように扱いこれを撚り合わせ、大電流量の導体を作るということも考えられている。今回、我々は、77 K にて CORC wire の交流損失を測定した結果について報告する。交流損失は、対象の磁化を測定しているものであり、MRI その他のマグネットにおける遮蔽電流磁場への影響の目安となる。

#### 2. 測定対象の試料と実験方法

CORC wire は数十本の線材を撚り合わせたものも作られているが、あまり線材数が多いと通電時に大電流量の電源が必要になるため、ここでは 1 層あたりの線材数 2、層数 3 の CORC wire を測定対象の試料とした。線材の幅は 2 mm、CORC wire の外径は 2.9 mm である。この CORC wire の外観の写真を Fig. 1 に示す。

このような試料を大気圧液体窒素で浸漬冷却し、振幅最大 100 mT、周波数 26.62 Hz, 65.44 Hz, 112.5 Hz の交流磁界を wire 軸に垂直に印加し、試料鎖交型ピックアップコイルとよばれるピックアップコイルで磁化損失を測定した。オリジナルの CORC wire を 3L-2T (3 層、1 層あたり 2 テープの意味) とし、線材を剥ぎ取りながら磁化損失を測定していった。1L-1T は 1 層のみ、線材 1 本だけの試料である。また、3L-2T については、電圧タップ法で通電損失も測定した。さらに、交流磁界下で交流電流を通電した場合の磁化損失と通電損失の和として全損失も測定した。

#### 3. 実験結果

試料 3L-2T (オリジナルの CORC wire)、1L-1T の磁化損失を Fig. 2, Fig. 3 に示す。それぞれ、3 つの周波数で磁化損失を測定したが、3L-2T の全磁界領域、1L-1T の高磁界領域では、磁化損失に周波数依存性はほとんどみられておらず、ヒステリシス損失が支配的であることがわかる。1L-1T の低磁界領域で見られる周波数依存性は、別の実験の結果からも CORC wire の中心の銅コアの渦電流損失であると考えられる。Fig. 2 と Fig. 3 の比較から、線材 1 本あたりの損失は、オリジナルの CORC wire である 3L-2T の方が小さくなっていることがわかる。

Fig. 4 は交流磁界下・交流通電時の 3L-2T の損失である。全損失は低磁界の領域では通電損失で支配され、高磁界の領域では磁化損失により支配されている。

#### 謝辞

高温超電導実用化促進技術開発の一環として NEDO の支援のもと行われたものである。

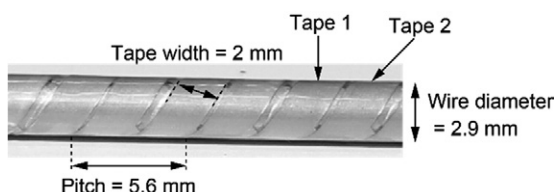


Fig. 1 Sample CORC wires for ac loss measurements.

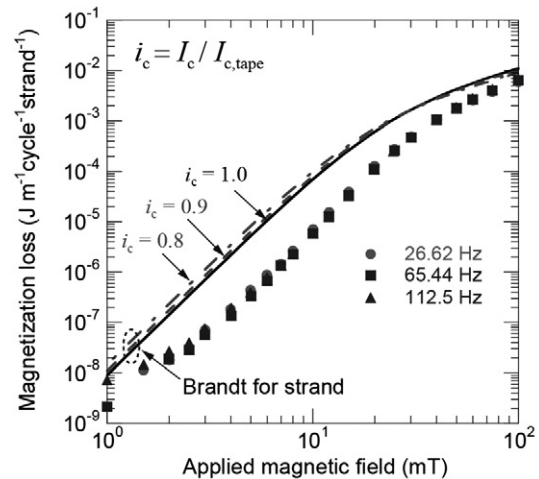


Fig. 2 Magnetization losses per unit length of strand (tape) of 3L-2T.

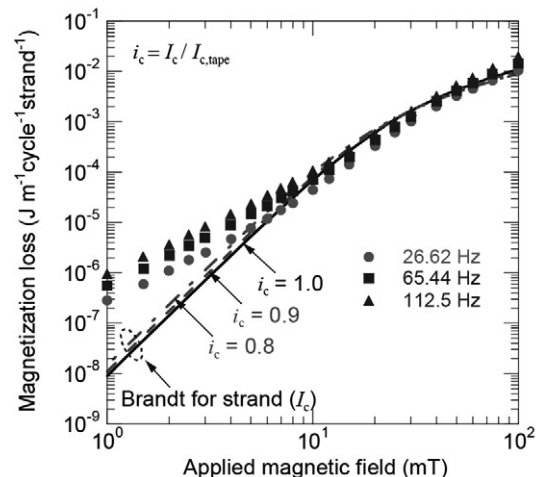


Fig. 3 Magnetization losses per unit length of strand (tape) of 1L-1T.

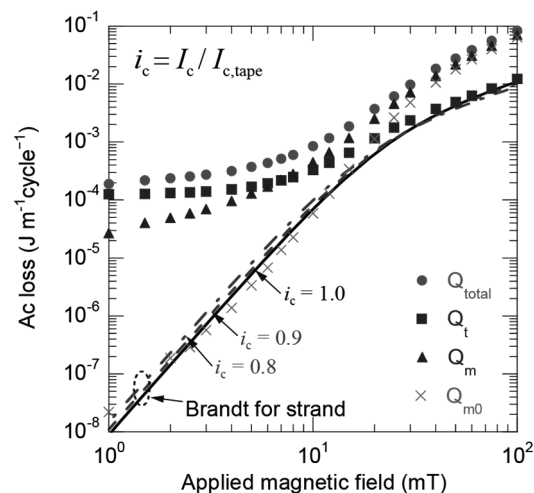


Fig. 4 Total ac losses per unit length of assembly of 3L-2T when current is 200 A, and frequency is 65.44 Hz.

# 中空円筒上の螺旋巻き超伝導テープにおける掃引磁場中の電磁応答 Electromagnetic response on a helically-wound superconducting tape on a hollow cylinder in a ramped magnetic field

東 陽一, 馬渡 康徳 (産総研)

HIGASHI Yoichi, MAWATARI Yasunori (AIST)

E-mail: y.higashi@aist.go.jp

## 1. はじめに

円柱コア上に銅酸化物超伝導体  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  コート線材を螺旋状に巻いた CORC 導体の研究が過去十年間に渡って行われてきた [1, 2]. CORC 導体は, 円柱コアに沿って自在に曲げることができるため, 高磁場マグネット応用のための超伝導ケーブルの有望な候補である. 実際, ピッチ長数十 mm, 数 mm 径の CORC 導体が現在市販されている. 高温超伝導テープ応用の候補として核磁気共鳴画像 (MRI) 装置用の超伝導コイルが挙げられる. twisted stacked-tape cable conductor [3] のような螺旋構造の高温超伝導テープ導体は MRI マグネットに応用された例はまだ存在しないが, 低損失のケーブル構造を追求するシミュレーション研究は応用上も有用である. 本研究では, MRI マグネットを励消磁する場合を念頭に掃引磁場中の定常状態における螺旋巻き超伝導テープの磁化損失を理論的に調べた.

## 2. 中空円筒上の螺旋巻き超伝導テープのモデル

中空円筒上の螺旋巻き超伝導テープ面を表す座標系として次のモデルを考える [図 1(右上)]:

$$\begin{cases} x = R \cos[(k\zeta - \xi/R)/\sqrt{1 + k^2 R^2}], \\ y = R \sin[(k\zeta - \xi/R)/\sqrt{1 + k^2 R^2}], \\ z = (\zeta + kR\xi)/\sqrt{1 + k^2 R^2} \end{cases}$$

ここで,  $k = 2\pi/L_p$  ( $L_p$ :螺旋導体のピッチ長),  $R$  は円筒半径である.  $0 \leq \xi \leq w_0$  ( $w_0$ :テープ幅) かつ  $0 \leq \zeta \leq L_{\text{tape}}$  で表される 1 ピッチ分のテープを考えている.  $L_{\text{tape}} = \sqrt{L_p^2 + (2\pi R)^2}$  は 1 ピッチ分のテープ長である.  $x$  方向の外部磁場下の定常状態における Faraday 則  $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \approx -\beta \hat{x}$  に薄膜近似を用いると, テープ面直の外部磁場成分への応答だけを考慮でき, 超伝導テープ面上の二次元の方程式を得る:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left( \rho_{\text{sc}} \frac{\partial g}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left( \rho_{\text{sc}} \frac{\partial g}{\partial \zeta} \right) = \beta \cos \left[ \frac{k\zeta - \xi/R}{\sqrt{1 + k^2 R^2}} \right], \quad (1)$$

ここで,  $\rho_{\text{sc}}$  は超伝導非線形抵抗率,  $\beta$  は磁場掃引速度である.  $g(\xi, \zeta)$  は電流の流線を表すスカラー関数である. (1) 式を数値的に解くことで, テープ面上の電流密度を  $J_\xi = -\frac{\partial g}{\partial \zeta}$ ,  $J_\zeta = \frac{\partial g}{\partial \xi}$  から計算することができ, 損失パワーが評価できる.

## 3. 数値計算結果

(1) 式を周期境界条件を課して解いた. 図 1(左) に電流の流線と  $g(\xi, \zeta)$  の分布を示す. 螺旋巻きによって,

電流ループが分断され有効テープ長が  $L_{\text{tape}}/2$  となっている. 図 1(右下) は螺旋導体を構成するテープの単位長あたりの損失パワー  $P$  の螺旋導体のピッチ長依存性である. CORC 導体に対応する, きつく巻いた場合 ( $L_p \ll 100$  mm) でも, 損失パワーのピッチ長依存性はほとんどないことがわかった. また, 損失パワーの値は長いピッチ長の撚線化テープにおける損失パワーの値にほぼ一致し, 平坦テープにおける値に比べ, 約  $2/\pi$  だけ小さくなる.

## 謝辞

本研究は, NEDO プロジェクトの一環として行われました.

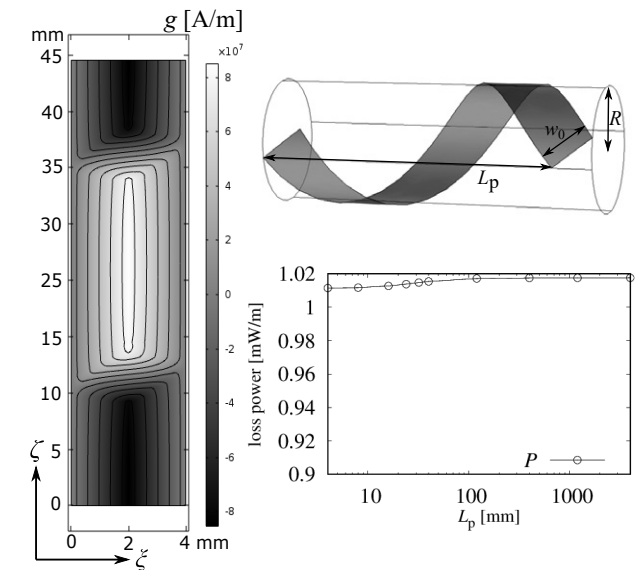


Figure 1: (left) Current flow lines and distribution of  $g$  on a helically-wound superconducting tape with the width  $w_0 = 4$  mm and the twist pitch  $L_p = 24$  mm for  $\beta = 4.69$  mT/s and  $R = 5$  mm. (upper right) Schematic figure of a helically-wound superconducting tape on a hollow cylinder (bottom right) Twist pitch dependence of the loss power per tape length.

## 参考文献

- [1] D. C. van der Laan, Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 065013.
- [2] J. D. Weiss *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **30** (2017) 014002.
- [3] M. Takayasu *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **25** (2012) 014011.

## 市販 REBCO 線材の臨界温度の比較

## Comparison of critical temperatures of commercial REBCO superconductors

西岡 美紀 (上智大); 土屋 清澄 (KEK); 菊池 章弘, 平田 和人, 有沢 俊一 (NIMS);

王 旭東 (KEK); 高尾 智明 (上智大); 一瀬 中 (電中研); 小黑 英俊 (東海大)

NISHIOKA Miki (Sophia Univ.); TSUCHIYA Kiyosumi (KEK); KIKUCHI Akihiro, HIRATA Kazuto, ARISAWA Shunichi (NIMS)

WANG Xudong (KEK); TAKAO Tomoaki (Sophia Univ.); ICHINOSE Ataru (CRIEPI); OGURO Hidetoshi (Tokai Univ.)

E-mail: kiyosumi.tsuchiya@kek.jp

## 1. はじめに

現在, 世界最大の円形加速器は欧州の LHC (衝突エネルギー14 TeV) である。しかしここ近年, LHC の約 7 倍のエネルギーである 100 TeV 領域での物理実験を可能とする超大型加速器 Future Circular Collider (FCC) の概念設計が始まっている。この加速器の主要 2 極マグネットとしては, 16T マグネット (Nb3Sn) と 20T マグネット (高温超電導体) が候補として検討されている。我々は, そのマグネット開発の第一歩として, 市販 REBCO 線材の特性を把握するため 4.2 K, 高磁場下での臨界電流や磁化の温度依存性 ( $M-T$  特性) の測定を行っている。本報では市販 REBCO 線材の  $M-T$  特性の測定から得られた臨界温度 ( $T_c$ ) の比較を行ったので, その測定の概略と, 現時点で得られている結果について報告する。

## 2. 実験方法

本研究では, Table 1 に示す 8 種類の REBCO 線材の磁化の温度依存性を測定した<sup>1)</sup>。線材のテープ面に対して垂直磁場を印加した状態での  $M-T$  特性を測るため, Fig. 1 に示すようにストローに切れ込みを入れ, そこに線材を挿入し固定した。このサンプルを固定したストローを, まず, Quantum Design 社製 MPMS (SQUID 磁化測定) 装置内に挿入した。挿入時にはサンプルが SQUID の中心に入るよう注意し, 測定の再現性を確認できるようにした。(Fig. 2 に測定装置の外観を示す。) 続いて, サンプルを 20 K まで冷却 (Zero Field Cooling) した後, 0.01 T を線材のテープ面に対して垂直に印加した。外部磁場を 0.01 T に固定した状態で, 温度を 20 K から 110 K まで上昇させて  $M-T$  特性の測定を行った。その後, 110 K から

20 K まで温度を下げて Field Cooling での  $M-T$  特性も測定した。

## 3. 測定結果

Table 1 に示した 8 個のサンプルの磁化測定から得られた  $T_c$  を Fig. 3 に示す。ここで  $T_{c \text{ onset}}$  はサンプルが超伝導状態に転移し始める温度であり,  $T_{c 50\%}$  はサンプルの磁化の大きさが低温時 (20 K) の 1/2 となる時の温度である。市販 REBCO 線材の  $T_{c \text{ onset}}$  がほぼ 90 K @ 0.01 T であることや, サンプルにより  $T_c$  が異なることが分かる。また, 本測定中で一番高い  $T_{c \text{ onset}}$  を持つ線材は Sumitomo 線材 ( $T_{c \text{ onset}} = 93.8$  K) であることも分かった。

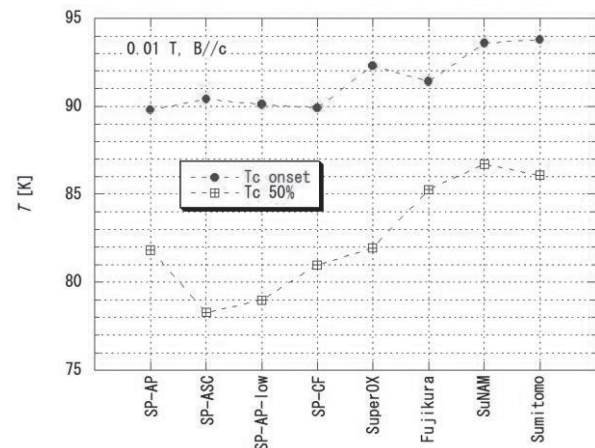


Fig. 3. Critical temperatures of commercial REBCO superconductors in the perpendicular field of 0.01 T.

Table 1. Specifications of REBCO

Conductor	Fabrication technology	Substrate thickness ( $\mu\text{m}$ )	Dimensions ( $\text{mm}^2$ )
SuperPower-AP	IBAD/MOCVD	50 (Hastelloy)	23.4
SuperPower-AP-ASC	IBAD/MOCVD	30 (Hastelloy)	23.4
SuperPower-AP-low	IBAD/MOCVD	50 (Hastelloy)	23.7
SuperPower-CF	IBAD/MOCVD	50 (Hastelloy)	21.5
SuperOX	IBAD/PLD	60 (Hastelloy)	20.8
Fujikura	IBAD/PLD	75 (Hastelloy)	24.3
SuNAM	IBAD/RCE	60 (Hastelloy)	20.6
Sumitomo	RABITS/PLD	119 (Ni, Cu, SUS)	23.3

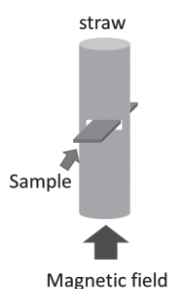


Fig. 1. Sample setting



Fig. 2. SQUID 磁化測定装置 (Quantum Design社製MPMS)

## 4. まとめ

市販 REBCO 線材の 0.01 T, B//c における  $M-T$  測定データから  $T_c$  を求めた。 $T_c$  は線材により多少異なるが, 市販 REBCO 線材の  $T_{c \text{ onset}}$  は 89.8–93.8 K,  $T_{c 50\%}$  は 78.3–86.7 K の幅の中にあることが分かった。 $T_c$  の違いが生じる原因としては, REBCO の組成や製法の違いが考えられる。

## 謝辞

サンプルを提供して頂いた Fujikura, Sumitomo, SuperPower, SuperOx, SuNAM 各社に御礼申し上げます。本研究は科学研究費補助金 (15H03667) の助成により実施した。

## 参考文献

1. M. McElfresh, S. Li and R. Sager, “Effects of Magnetic Field Uniformity on the Measurement of Superconducting Samples”, Quantum Design (San Diego), technical report (1996)

# BHOナノ粒子を添加した 極薄一回塗布膜厚MOD-REBCOコート線材における縦磁界効果

## Longitudinal magnetic field effects of ultra-thin-once-coating-thickness MOD-REBCO coated conductors with BHO nanoparticles

岡田 達典, 美齊津 英典, 淡路 智 (東北大); 中岡 晃一, 町 敬人, 和泉 輝郎 (産総研); 三浦 正志 (成蹊大)  
OKADA Tatsunori, MISAIZU Hidenori, AWAJI Satoshi (Tohoku Univ.);  
NAKAOKA Koichi, MACHI Takato, IZUMI Teruo (AIST); MIURA Masashi (SEIKEI Univ.)  
E-mail: tatsu.okada@imr.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

外部印加磁場と通電電流が平行 ( $B//J$ ) となる配置では、磁束の駆動力となる Lorentz 力が働かない。縦磁場配置においては (1) 臨界電流密度  $J_c$  の大幅な上昇 [1,2] や (2) 超伝導状態の磁化における常磁性モーメントの出現 [3] などの興味深い現象 (縦磁界効果) が報告されている。応用面に関しても、縦磁界効果を活用した縦磁界直流送電ケーブル [4] が提案され、実現に向けた基礎研究が精力的に行われている。

我々は、トリフルオロ酢酸有機金属堆積 (TFA-MOD) 法によって成膜された  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (RE: 希土類金属、REBCO) に着目している。TFA-MOD 法は、良好な超伝導特性を示す REBCO コート線材の低コスト成膜法として注目されており、 $\text{BaMO}_3$  (M: 金属元素) ナノ粒子添加による  $J_c$  特性の向上が報告されてきた。特に最近では、1 回の塗布膜厚を極薄化することでナノ粒子径を微細化する「極薄一回塗布膜厚 (ultra-thin-once-coating-thickness, UTOC) プロセス [5] が確立され、横磁場配置 ( $B \perp J$ ) における  $J_c$  特性の更なる向上が報告されている [6]。しかしながら、UTOC プロセスで成膜された TFA-MOD-REBCO コート線材に対する縦磁界効果については殆ど明らかになっていない。

本研究では、縦磁界送電ケーブルとしての運用領域を含む広範な温度・磁場下での臨界電流測定を通じ、上記コート線材に対する縦磁界効果の解明を目的とした。

### 2. 実験

UTOC 法 (一回塗布膜厚: 27 nm、膜厚: 540 nm) で成膜した (Y,Gd)BCO コート線材 (ピン止め中心となる  $\text{BaHfO}_3$  ナノ粒子を添加) を測定対象とした。臨界電流測定には東北大金研強磁場センター所有の 25T 無冷媒超伝導マグネット [7] 等を用い、24 T までの定常強磁場および 10 K-90 K の広範な温度範囲において、臨界電流密度の温度・磁場・磁場印加角度依存性を測定 (直流四端子法、電界基準:  $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ ) した。

### 3. 結果および考察

測定結果の一例として、縦磁場配置、横磁場 ( $ab$  面平行) 配置、横磁場 ( $ab$  面垂直) 配置における臨界電流密度の磁場依存性を Fig.1 に示す。

77.3 K, 50 K, 10 K のいずれにおいても、縦磁場配置でしばしば報告される  $J_c$  のピーク構造は観測されなかった。ピーク構造の非出現は、半径 5 nm-10 nm の RE215 相を含む YBCO 膜でも報告されており、電流がナノ粒子を迂回することで横磁場成分が生じたためではないかと考えられている [2]。

また、いずれの温度においても横磁場 ( $ab$  面垂直) 配置に比べて横磁場 ( $ab$  面平行)・縦磁場配置での  $J_c$  が大きく、面ピン (固有ピン・積層欠陥) が影響していると考えら

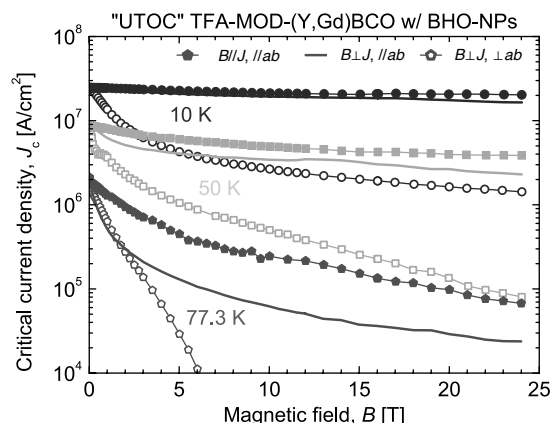


Fig.1 Magnetic field dependence of  $J_c$  measured under ( $B//J, //ab$ ), ( $B \perp J, //ab$ ), and ( $B \perp J, \perp ab$ ) conditions.

れる。特に高温 (77.3 K) においては、縦磁場配置での  $J_c$  は横磁場 ( $ab$  面平行) 配置での  $J_c$  よりも更になくなっており、縦磁界効果によるものと考えられる。他方、低温 (10 K) では両者の差異は小さくなっており、縦磁界効果はあまり効いていないように見える。低温ではナノ粒子径と磁束量子コア径が近づくため、ナノ粒子によるピンニングがより強く働くと期待され、縦磁場配置における  $J_c$  値の決定に強く影響している可能性がある。

### 4. まとめと展望

比較的高温域にて、縦磁場配置での顕著な  $J_c$  向上が観測された。一方で、低温では縦磁場配置による寄与は小さく見えた。またいずれの温度においても  $J_c$  のピーク構造は観測されなかった。ピーク構造が発生する磁場は通常 1 T 以下と微小なため、電流端子等の影響を受けている可能性もあり、異なるブリッジ形状・実験配置での検証を行う予定である。

講演ではこれらの結果について報告・議論したい。

### 謝辞

本研究は、産総研-東北大マッチング研究支援事業および日本パワーアカデミーからの支援を受けたものです。

### 参考文献

1. Yu.F. Bychkov, et al., JETP Lett. **9** (1969) 404., A. Tsuruta, et al., JJAP **53** (2014) 078003. 等
2. R. Kido et al., Phys. Proc. **81** (2016) 117.
3. M.A.R. LeBlanc, et al., PRL **14** (1965) 704. 等
4. T. Matsushita, et al., SuST **25** (2012) 125009.
5. T. Izumi, et al., IEEE TAS **27** (2017) 6601604., K. Nakaoka, et al., SuST **30** (2017) 055008., M. Miura, et al., NPG Asia Materials **9** (2017) e447.
6. T. Okada, et al., EUCAS2017, IMO1-05.
7. S. Awaji, et al., SuST **30** (2017) 065001.

# 高温超伝導テープ線材接合部の3次元磁場分布測定と電流密度分布解析 Investigation of current density profiles of spliced high- $T_c$ superconducting tapes based on the 3D magnetic field density measurements

筑本 知子, 山口 作太郎 (中部大学); シスキン・オレグ (ハリコフ大)

CHIKUMOTO Noriko, YAMAGUCHI Satarou (Chubu Univ.); SHYSHKIN Oleg (V.N. Karazin National University)

E-mail: nchiku@isc.chubu.ac.jp

## 1. はじめに

電力輸送におけるエネルギー損失の革新的な低減化を目指す高温超伝導ケーブルシステムの構築のためには、長尺の超伝導線材が安価で供給されることに加え、超伝導の性質を大きく損なわない低抵抗接続技術が必要不可欠である。超伝導線材の接続技術としては、現在のはんだを用いた手法が主流であるが、接続抵抗のばらつきが大きいなどの課題があるのが現状である。また、接続部での電流特性について詳細に評価した例はほとんどなく、信頼性の観点から、接合部分でどのように電流が乗り移るか等を調べていく必要がある。そこで、本研究では半田接合された BSCCO および RE123 について、3次元ホールプローブを用いた通電時の磁場分布評価とそれを用いた電流分布の解析を行ったので、その結果について報告する。

## 2. 実験方法

測定には住友電工製 BSCCO 線材 (DI-BSCCO® Type HT-CA) および SuperOx 製 GdBCO 線材 (4mm 幅、Cu plated) を用いた。BSCCO 線材については中部大学にて低融点のはんだを用いて接続を行った (ラップ長: 1cm)。一方、GdBCO 線材はメーカーにて接続を行った (ラップ長: 3 cm、使用はんだ: Pb39Sn61)。接続抵抗は試料を液体窒素に浸漬し、四端子法により測定した。また、磁場分布測定は試料を液体窒素に浸漬し、 $I_c$  値以下の電流を流した状態で、3次元ホールプローブ (AREPOC 社製) を用いて測定した。Fig.1 に BSCCO 接合試料の磁場分布測定時の試料配置と測定範囲を示す。試料の長手方向を  $x$ 、幅方向を  $y$ 、面に垂直方向を  $z$  とし、接合の中心位置を原点とした。測定は  $z$  方向の位置は固定とし、 $x$  位置を変えながら  $y$  方向にスキャンして行った。

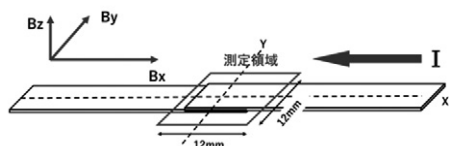


Fig.1 BSCCO 接合試料の磁場分布測定範囲

## 3. 磁場分布評価結果と電流分布の解析

本稿においては、BSCCO 接合試料についての測定結果について報告する。Fig.2 に 100A 通電時の BSCCO 接合試料の  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  分布を示す。接続のない線材においては、電流は  $x$  方向にのみ流れるため、それに発生する磁場は  $B_y$ ,  $B_z$  成分のみであり、 $B_x$  成分は現れない。図より  $B_z$  はほぼ接合部の中心近くで極大となっていることから、接合部で線材間に  $z$  方向の電流が流れた結果、 $B_x$  が現れたものと考えられる。これについて、さらに詳細に検討するために、3次元の磁場分布データより、電流分布を文献 1 による方法にて計算した。得られた電流分布を Fig.3 に示す。それぞれの矢印の長さが電流の大きさに対応しているが、接合部の中心付近で電流が上部の線材から下部の線材に乗り移っていることがわかる。

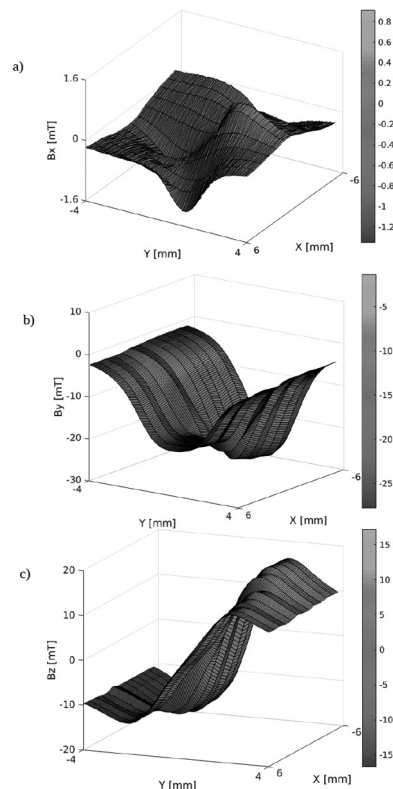


Fig.2 BSCCO 接合試料の 3次元磁場分布

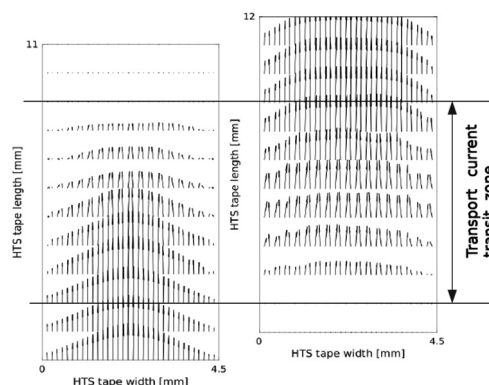


Fig. 3 BSCCO 接合試料での接合部での電流の乗移りの計算結果。

## 謝辞

磁場分布測定について、染川晃輝、鶴岡誠、領木勇太、横山智一、芳村幸治、岩田暢祐の各氏のご協力に感謝いたします。

## 参考文献

- O. A. Shyshkin, Y. G. Kazarinov, M. Tallouli, T. Famakinwa, and S. Yamaguchi, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 26 (2016) #9000404.

## REBCO 線材の長手引張特性に関するワイブル解析

## Weibull analysis of longitudinal tensile strength for REBCO coated conductors

武藤 翔吾, 藤田 真司, 佐藤 大樹, 飯島 康裕, 直江 邦浩 (フジクラ)

MUTO Shogo, FUJITA Shinji, SATO Hiroki, IJIMA Yasuhiro, NAOE Kunihiro (Fujikura Ltd.)

E-mail: shogo.muto@jp.fujikura.com

## 1. はじめに

REBCO 線材の機械強度には異方性があることが知られており, 実用マグネットに適用する上では各方向の強度をばらつきまで含めて正確に把握する必要がある. これまで我々はバルクセラミックスなどの脆性材料によく用いられているワイブル統計解析を REBCO 線材に適用し, 線材厚み方向における強度を体系的に評価してきた[1][2]. 今回は長手方向についても同様に統計的強度を評価することを目的とし, 我々が市販している標準線材を用い, 多数のサンプルについて液体窒素(LN<sub>2</sub>)中引張試験を実施した. その試験から得られた不可逆応力およびひずみに関してワイブル解析を実施することで統計パラメータの抽出を行った.

## 2. 実験方法

評価に使用した線材は, 75  $\mu\text{m}$  厚の Hastelloy®基板上に IBAD-MgO 層を含む中間層と, PLD による GdBCO 層, Ag 保護層, 片側 20  $\mu\text{m}$  厚の Cu めっき層を形成した 4 mm 幅の線材である. 今回はロット内の長手方向の引張強度のばらつきを評価するため同一線材(超電導層膜厚  $t = 1.9 \mu\text{m}$ )から切り出した 28 本に対して引張試験を実施した. 標点間距離が 160 mm となるようにサンプルを治具にセットし, LN<sub>2</sub> 浸漬中で試験を行った. 線材のひずみは超電導側の表面に貼り付けたひずみゲージで測定し, 応力は 10 kN のロードセルで測定した試験力を線材の全断面積で除算した値とした. 不可逆応力およびひずみは試験前の臨界電流値  $I_{c0}$  と除荷後(unload)の臨界電流  $I_{cu}$  に対する比  $I_{cu}/I_{c0}$  が 99%を下回ったときの値として定義した.

## 3. 実験結果

Fig. 1 に全サンプルの  $I_{cu}/I_{c0}$  の応力およびひずみ依存性を示す. いずれのサンプルも重なるようにプロットされており, 全体的にばらつきが少ないことがわかる. Fig. 2 に不可逆応力の 2 パラメータワイブルプロットを示す. 縦軸はサンプルの累積破壊確率  $F$  の対数表示である. 最小二乗法で求めたばらつき指標  $m$  値は 48 と非常に高い. これは線材厚み方向の  $m$  値が 3 程度[1][2]であったことと対照的であり, 長手方向の線材強度の均一性が高いことがわかる. また, 不可逆応力とひずみのワイブル平均  $\mu$  は, 793 MPa, 0.51%であり高い強度を有することがわかった.

## 4. まとめ

市販 REBCO 線材のロット内のばらつきを評価するため多数のサンプルについて引張試験およびワイブル解析を行い, 長手方向における引張強度を統計的に評価した.  $m$  値が非常に高く, 強度の均一性が非常に優れていることがわかった.

## 謝辞

この成果の一部は, 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られたものである.

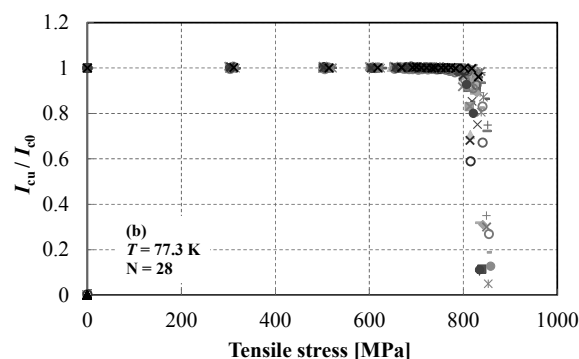
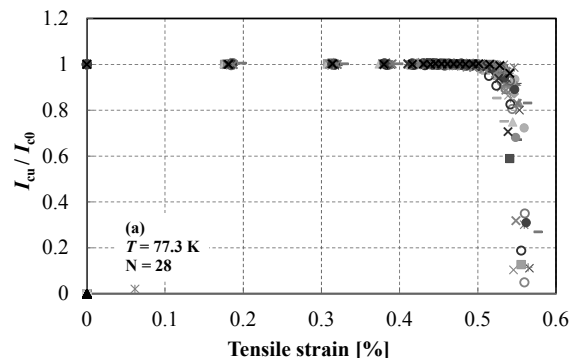


Fig. 1 Applied strain (a) and stress (b) dependences of normalized critical current  $I_{cu} / I_{c0}$  for commercial REBCO conductors of Fujikura at 77.3 K.

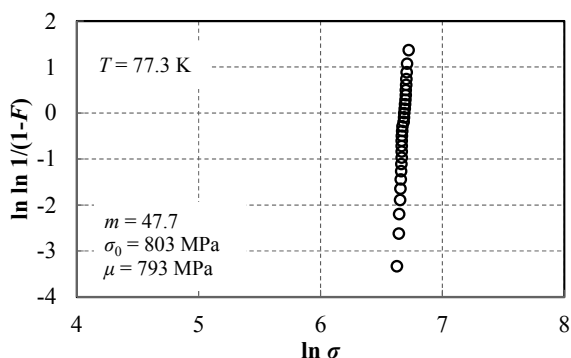


Fig. 2 Weibull plot of irreversible stress for commercial REBCO Conductors of Fujikura at 77.3 K.

## 参考文献

- [1] S. Muto, *et al.*, Abstracts of CSSJ Conference, Vol. 95 (2017) p.33.
- [2] S. Muto, *et al.*, IEE. Trans. Appl. Supercond. vol. 28, no. 4, (2018) pp. 1-4.