

# マルチフィラメント HTS 模擬線材電流分布の電流振幅依存性

## Current dependence of AC current distributions in multifilamentary HTS model tapes

永田 広太, 宮原 和矢, 平山 斉, 川畑 秋馬, 川越 明史, 住吉 文夫 (鹿児島大・工); 和泉輝郎, 塩原 融 (SRL-ISTEC)  
 NAGATA Kodai, MIYAHARA Kazuya, HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma, KAWAGOE Akifumi,  
 SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University); IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL-ISTEC)  
 E-mail:k6527959@kadai.jp

### 1. はじめに

交流用高温超伝導機器を実用化するためには、機器の巻線に使用される HTS 線材を低損失化することが必要であり、そのためにマルチフィラメント化された HTS 線材の開発が進められている。この線材内の電流分布特性を定量的に把握することは重要であるが、その特性評価法は未だ十分には確立されていない。そこで本研究では、マルチフィラメント HTS 線材内の電流分布を非接触で定量的に評価できる測定法を確立することを目的としている。本測定法では、極小サイズのピックアップコイル群を試料線材に直接貼り付けて、試料線材表面付近の磁界分布を測定し、その結果から数値計算により電流分布を求める [1]。今回は、まず電流算出精度向上のために電流算出プログラムの高速化を行い、マルチフィラメント HTS 模擬線材を試料線材として、精度向上の程度について調べた。次に試料線材に低電流領域から臨界電流付近までの交流電流を通電したときの電流分布特性を測定できるように HTS 電流トランスを利用した測定システムを構築し、これを用いた測定を行なった。以上の結果について報告する。

### 2. マルチフィラメント HTS 線材を用いた測定精度の評価

本測定法の測定精度を評価するために、マルチフィラメント HTS 線材を模擬した試験導体を用いた。模擬線材は、線材幅が 1mm 程度の Gd 系線材を 5 本平行に並べたもので、線材間には絶縁のために約 100 $\mu$ m 径のテグスを挿入している。この短尺直線状の線材にピックアップコイル群を貼り付けて、線材周辺の磁場分布の周方向成分を測定する。各コイルは  $\phi$ 40 $\mu$ m の絶縁 Cu 線で紙製のポビンに巻線されている。その断面積は 4.46mm $\times$ 0.33mm、コイル長は 0.25mm、層数は 3、ターン数は 17 である。測定精度の評価は、模擬線材に通電した既知の電流と、ピックアップコイル群による測定磁場分布から算出した電流分布とを比較することによって行った。

Fig. 1(a), (b)は 1mm 幅の Gd 系線材 5 本から成る模擬線材に実際に通電したときの測定磁場分布を示したものであり、縦軸は測定電圧、横軸はピックアップコイルの位置である。Fig. 1(c), (d)はこの測定結果から算出した電流分布である。縦軸は電流値で、棒グラフは各フィラメントの算出電流値、プロット点はシャント抵抗で測定した電流値を示している。同図に示すように測定誤差は最大でも 10%未満であり、電流算出プログラムの改良により電流算出精度を向上させることができた。

### 3. マルチフィラメント HTS 線材の電流振幅依存性

Fig. 1 に示す測定結果は、試料線材の臨界電流  $I_c$  の 20% 程度の電流値に対する測定結果であるが、マルチフィラメント HTS 線材の各フィラメントの  $I_c$  が異なる場合において、通電電流の大きさによって電流分布特性がどのように変化するかを把握する必要がある。そこで試料線材に低電流領域から臨界電流付近までの交流電流を通電したときの電流分布特性を測定できるように HTS 電流トランスを利用した測定システムを構築した。Fig. 2 に測定回路を示す。HTS 電流トランスの使用により、数 100A 程度の交流電流を通電可能となり、必要とする特性を測定できる。Fig. 3 は試料線材に 11A~119A までの

電流を通電したときの測定結果の一例である。詳細については当日報告する。

### 謝辞

本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発」事業の一環として、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. K. Miyahara, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol.82 (2010) p.7.

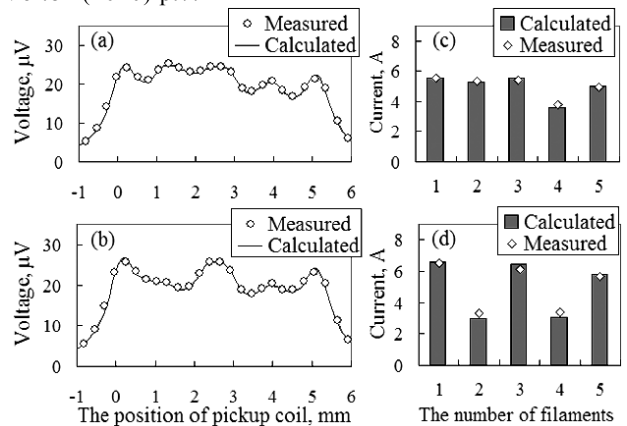


Fig. 1 Measured field distributions and calculated current distributions

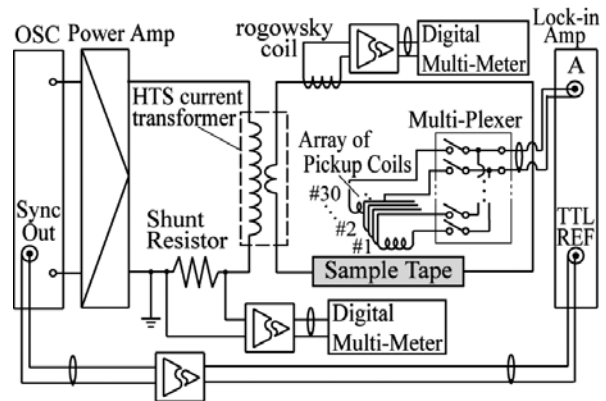


Fig. 2 The experimental circuit

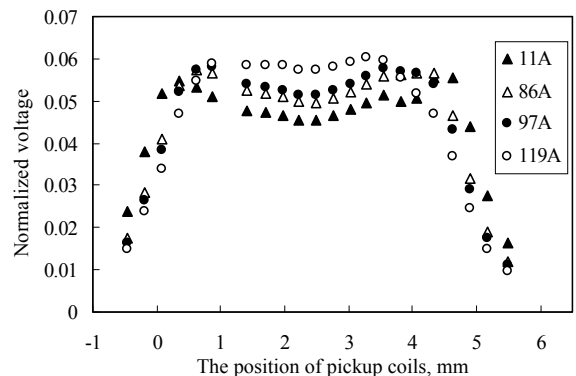


Fig. 3 Current dependence of measured field distributions

# 交流電力機器用 RE-123 加工線材の臨界電流密度分布評価

## Investigation of Critical Current Density Distribution in RE-123 Coated Conductors Processed for AC Power Applications

東川 甲平, 川口 鉄平, 塩原 敬, 井上 昌睦, 木須 隆暢 (九大);  
町 敬人, 筑本 知子, リー セルゲイ, 田辺 圭一, 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC);  
新海 優樹, 小西 昌也, 阿比留 健志, 大松 一也 (住友電工); 岡元 洋 (九州電力)

HIGASHIKAWA Kohei, KAWAGUCHI Teppei, SHIOHARA Kei, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);  
MACHI Takato, CHIKUMOTO Noriko, LEE Sergey, TANABE Keiichi, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC);  
SHINGAI Yuki, KONISHI Masaya, ABIRU Kenji, OHMATSU Kazuya (SEI); OKAMOTO Hiroshi (Kyushu Electric Power Co., Inc.)  
E-mail: kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

希土類系高温超電導 (RE-123) 線材は、その形状のアスペクト比を利用した交流損失の低減が見込まれると共に、特に細線化・マルチフィラメント化などの線材加工による交流損失低減が期待されている。一方、加工後の線材の特性は、加工前の線材の特性の不均一性や加工プロセスそのものによる影響を大きく受けるため、素線内の  $J_c$  分布やフィラメントごとの  $I_c$  値が設計どおりに実現されるかという点には十分に注意する必要がある。そこで本研究では、ホール素子顕微鏡を用いた  $J_c$  分布評価手法によって細線化線材ならびにマルチフィラメント線材の測定を行い、交流電力機器用加工線材の評価手法としての適用可能性を検討した。

### 2. 方法

Fig. 1 にマルチフィラメント線材のセットアップ例を示す。試料に用いたのは 5 mm 幅 5 分割の線材であり、図中には 2 つの試料を設置した例を示している。同試料は外部磁界印加用の Bi-2223 コイル内に設置されており、同コイルは液体窒素槽からの熱伝導によって冷却される (79 K)。試料に外部磁界を印加／印加後に除去した際の試料周辺の磁界分布を走査型ホール素子顕微鏡によって測定し、Biot-Savart 則の逆問題を解くことによって<sup>[1]</sup>、その際の試料内の電流分布を評価した。

### 3. 結果・考察

試料内に十分に磁界を侵入させた後に外部磁界を除去した際の残留磁界分布を Fig. 2 に示す。各フィラメントに磁束が捕捉されており、長手方向に若干の分布を持っている様子が得られている。また、同図には磁界分布から算出した電流分布をシート電流密度分布として示している。同電流密度の成分を見ると、それぞれのフィラメントに反時計回りの磁化電流が流れている様子がわかる。この時に流れる磁化電流の電流密度は臨界電流密度に対応することが分かっており、電流の向きの入れ替わるフィラメント中心軸付近以外では、臨界電流密度分布が 2 次元面内で得られていることになる。また、本結果を利用すれば、例えば幅方向に電流値を積算することにより、Fig. 3 に示すようなフィラメントごとの  $I_c$  の長手方向分布を評価することが可能となる。このように、 $J_c$  分布を高解像度 (100 ミクロン以下) で評価することが可能な本手法により、交流電力機器用加工線材の加工技術確立・品質管理に貢献できると期待している。発表当日には、集合導体の交流損失に多大な影響を与える<sup>[2]</sup>、細線化線材の幅方向の  $J_c$  分布についても報告する予定である。

### 謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施するとともに、日本学術振興会の科研費 (20360143, 20・1945) の助成を得て行ったものである。

### 参考文献

- [1] B. J. Roth et al., J. Appl. Phys., vol. 65, pp. 361-372, 1989.  
[2] N. Amemiya et al.: presented at CCA 2010, O-E07.

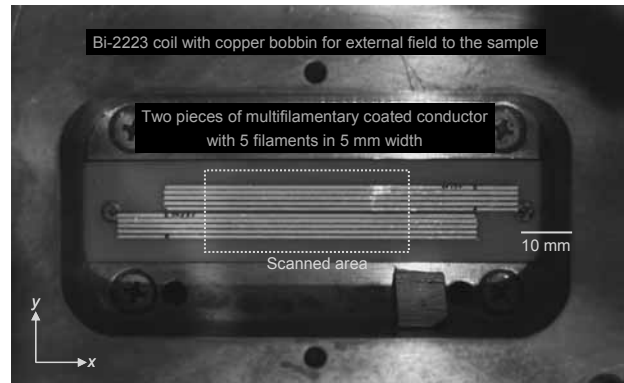


Fig. 1. Setup example of the multifilamentary samples.

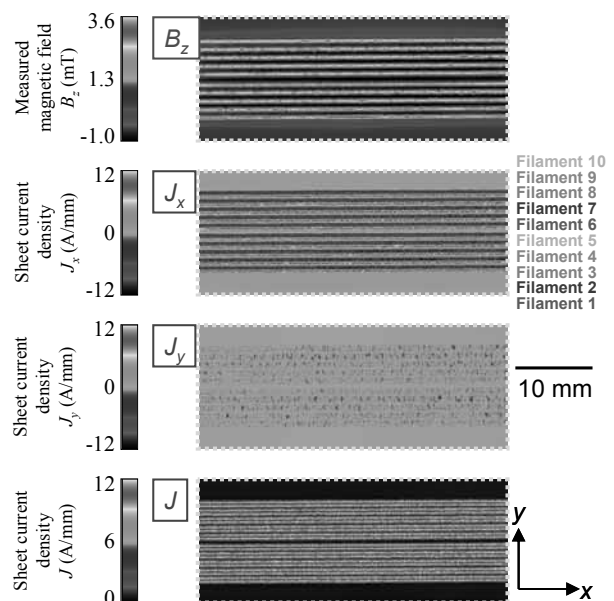


Fig. 2. Distributions of remanent magnetic field and the corresponding sheet current density in the sample.

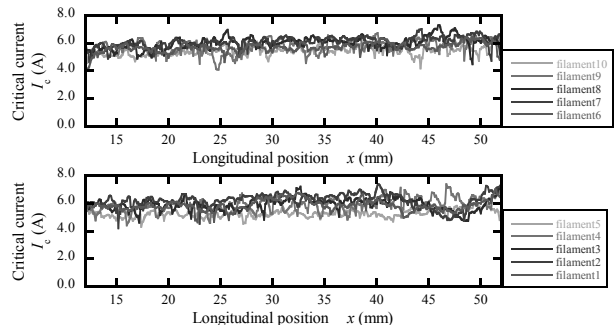


Fig. 3. Longitudinal distribution of critical current obtained for each filament of the sample.

# TFA-MOD 成膜プロセスへの迅速なフィードバックに向けた臨界電流特性の 複数試料マトリックス磁気顕微法による評価

## Multi-sample matrix measurement of critical currents by magnetic microscopy for rapid feedback to the fabrication processes of TFA-MOD film

塩原 敬, 東川 甲平, 川口 鉄平, 井上 昌睦, 木須 隆暢 (九大・シス情); 梶田 靖人, 寺西 亮(九大・材工);  
吉積正晃, 和泉 輝郎(SRL-ISTEC)

SHIOHARA Kei, HIGASHIKAWA Kohei, KAWAGUCHI Teppei, INOUE Masayoshi, KISS Takano (Dept. of Electrical  
System Engineering, Kyushu Univ.); MASUDA Yasuto, TERANISHI Ryo(Dept. of Material Engineering, Kyushu Univ.)  
YOSHIZUMI Masateru, IZUMI Teruo (SRL-ISTEC)  
E-mail: shiohara@super.ees.kyushu-u.ac.jp

### 1. はじめに

トリフルオロ酢酸塩/有機金属塩塗布熱分解(TFA-MOD)法により作製された  $Y_1Ba_2Cu_3O_{7.8}$ (YBCO)線材は非真空且つ、材料収率の良い線材プロセスであるため、低コスト・高特性線材を生産できる線材プロセスとして期待されている[1]-[2]。しかし、実用線材実現のためには、塗布、仮焼、本焼の各プロセスにおいて種々の作製パラメータの最適化による高均一且つ高臨界電流( $I_c$ )を有する安定した成膜技術の確立が必要である。実用上重要となる  $I_c$  の評価には、一般には四端子法や SQUID による磁化率測定の手法が広く用いられている。しかし、これらの評価方法からは平均化された  $I_c$  値のみしか得ることが出来ない。ここで、線材作製プロセスへのフィードバックの観点から考えると、局所的な  $I_c$  値から分かる欠陥の位置や試料不均一性に起因する空間分布についての情報は極めて有用となる。しかし、面内の二次元分布が評価可能な手法は未だ確立されていない。

本研究では、作製プロセスへの迅速なフィードバックを可能とする効果的な  $I_c$  の評価法として、非接触・非破壊という特徴を有する磁気顕微法(走査型ホール素子顕微鏡;SHPM)を基に、作製した試料の  $I_c$  並びにその局所分布を定量的に且つ、迅速に評価が可能な方法を報告する。

### 2. 実験方法

本研究では、Ion Beam Assisted Deposition(IBAD)により MgO 中間層の結晶粒を配向させ、さらに Cap 層としての  $CeO_2$  層を積層させた基板に Cu-ナフテン酸塩を用いるよりも作製速度の向上が見込める Cu-オクチル酸塩と Y, Ba-TFA 塩をアルコール系溶媒に溶解させた溶液を、塗布後熱処理を行い線材を作製した。

作製した TFA-MOD 法 YBCO 線材を SHPM の試料ステージ状にマトリクス状に配置し、伝導冷却により 79 K に冷却し、外部磁界を印加/除去した際の線材における磁界分布についてホール素子を試料表面にて走査することにより測定を行った。また、本測定で得た磁界分布に対して Biot-Savart 則の逆問題を解くことにより、線材内の電流分布を評価した [3]-[5]。

### 3. 実験結果及び考察

本測定には、線材成膜時の溶液塗布段階にて低湿度(30-35%)に制御したTFA-MOD法により作製された1 cm幅のYBCO線材を使用した。磁束が中心に到達する外部磁界以上に印加し、除去後の残留磁界の垂直成分( $B_z$ )を線材表面にてホール素子を二次元で走査し測定した。Fig.1に得られた  $B_z$  の像及び、この  $B_z$  像より、Biot-Savart 則の逆変換を用いて、線材表面のシート電流密度分布( $J$ )を導出した。長手方向成分  $J_x$ 、幅方向成分  $J_y$ 、シート電流密度  $J$  についても Fig.1 に示す。

以上の結果より、本試料については試料内に不均一分布が見受けられる。シート電流密度においては、最も高い部分に

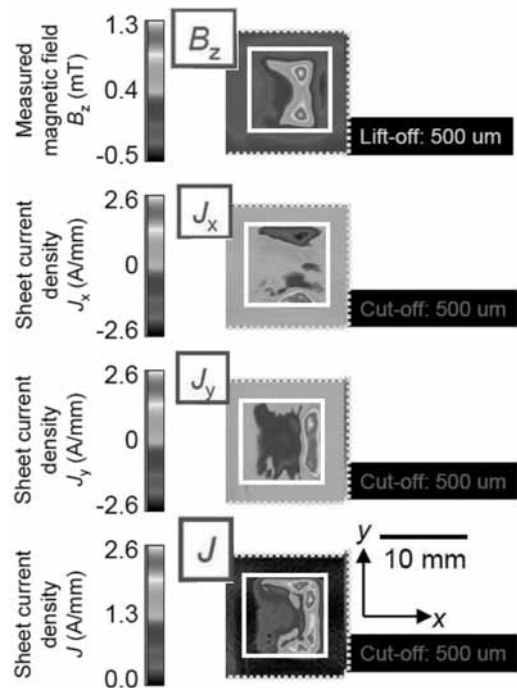


Fig.1 Perpendicular component of remanent field,  $B_z$ , measured by the SHPM, longitudinal component of sheet current,  $J_x$ , transverse component of sheet current,  $J_y$ , and amplitude of sheet current,  $J$ . White square line indicates the edge of sample.

おいては2.6 A/mm程度を示し、最も低い部分においては0.8 A/mm程度を示した。

この結果から、SHPMにより非接触・非破壊にて線材内の電流密度分布について確認することが出来、今後の線材作製プロセスへのフィードバックへの有効な測定となり得ることが分かった。

### 謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環としてISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施するとともに、日本学術振興会の科研費(20360143)の助成を得て行ったものである。

### 参考文献

1. T. Izumi, et al.: *Physica C*, Vol. 463-465, pp.510-514, 2007-5
2. Y. Shiohara, et al.: *Supercond. Sci. Technol.*, Vol. 21, p. 034002, 2008-2
3. T. Kiss, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, pp. 3211-3214, 2007-6
4. M. Inoue, et al.: *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 19, pp. 2847-2850, 2009-6
5. B. J. Roth, et al.: *J. Appl. Phys.*, vol. 65, pp. 361-372, 2001-1.

# 高温超伝導電流トランスを用いた高温超伝導大型導体の通電特性測定

## Measurement of transport characteristics in HTS conductors with large current capacities by using HTS current transformer

前原 一智, 平山 斉, 川畑 秋馬 (鹿児島大)

MAEHARA Kazutomo, HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma (Kagoshima University)

E-mail: k0620352@kadai.jp

### 1. はじめに

近年、高温超伝導導体の線材化技術の向上に伴い、低損失で大電流量の高温超伝導大型導体の開発研究が盛んに行われている。このような高温超伝導大型導体の交流損失や導体内の電流分布などの基礎電磁特性を種々の電磁環境下や幅広い温度領域で定量的に評価することは、超伝導機器の設計上非常に重要である。本研究では、高温超伝導大型導体の種々の特性評価が可能なコンパクトな装置を開発し、その電磁特性の把握することを目的としている。ここでは、既に作製している高温超伝導電流トランスを利用して種々の高温超伝導大型導体の通電特性を測定できるように、電流トランスに試料導体を低抵抗で、かつ簡便で繰り返し接続可能な接続方法について要素実験により検討した。さらに、得られた結果を実際の電流トランスに適用し、試料導体の通電特性を測定した。以上の結果について報告する。

### 2. 電流トランスと試料導体との接続方法

試料導体への通電に用いる電流トランスは、1次側、2次側ともに Bi-2223 線材を巻線に用いており、50A 程度の小容量電源で 77K において 1kA 級の交流電流を通電することができる [1]。電流トランスの概観写真を Fig.1 に示す。1次側巻線は、線材 1 本を用いて 133 ターン巻線しており、2次側巻線は、16 本の線材から成る並列導体を用いて、2 ターン巻線したものである。Fig.1 に示すように、これまでは電流トランスの 2 次側巻線を引き伸ばして試料導体として使用していたが、種々の導体の特性評価を行うためには、電流トランスと資料導体との接続方法についての検討が必要である。

接続部の満たす要件としては、(1)特性評価が十分行えるだけの低抵抗の接続抵抗であること、(2)繰り返し導体を接続できること、(3)簡便な接続方法であること、などが挙げられる。そこでこのような要件を満たすために、半田接続の代わりに、バーク板で試料導体を挟みネジ留めする圧力による接続方法の採用を検討した。

### 3. 要素実験結果及び検討

接続部に印加する適切な面圧を得るために、まず面圧と臨界電流の関係を測定した。2 枚の Bi-2223 線材を 20mm 長オーバーラップさせて、バーク板で挟み、ネジ締めして面圧を印加した。面圧はネジ締めはトルク管理することにより行った。線材間の接触状況や印加された実際の面圧については、面圧シートを用いて確認した。測定の結果、線材の臨界電流は 40MPa を少し越えた値から減少し始めることがわかったため、印加する面圧は 40MPa とした。

電流トランスの 2 次側線材は 16 本の Bi-2223 線材からなるため、短尺直線状の Bi-2223 線材を 16 本用いた並列導体を作製し、40MPa 印加したときの接続抵抗を測定した。その結果、特性評価を行う上で十分な  $2\mu\Omega$  の接続抵抗が得られた。

### 4. 要素実験結果の電流トランスへの適用

要素実験により得られた接続条件を実際の電流トランスに適用した。Fig. 2 に示すように電流トランスに近い側の 2 次側コイル引き伸ばし部分を切断した。切断後の導体間に Fig. 2 に示すように 100 $\mu$ m 厚のインジウムシートを挟んだ後、上下からバーク板で押さえてネジ留めした。接続長は要素実験と同

じ 20mm とした。面圧はネジ締めをトルク管理することによって行い、要素実験で得られた面圧を印加した。

Fig. 3 に切断前後の電流トランスの 2 次側電流の周波数依存性を示す。Fig. 3 の縦軸は 1 次側電流に対する 2 次側電流の値であり、横軸は周波数である。図中の点線および実線は電流トランスや試料導体のパラメータを用いて得られた計算値である。フィッティングパラメータとして接続部の接続抵抗を使用した結果、接続部の抵抗値は約  $2\mu\Omega$  となり、要素実験での結果と良い整合性が得られた。接続長を変化させたときの測定結果等については、当日報告する。

### 参考文献

1. S. Kawabata, Y. Nakahama, A. Kawagoe, and F. Sumiyoshi, "Development of a Compact HTS Current Transformer for evaluating the Characteristics of HTS Conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 18, no. 2, pp. 1147-1150, June, 2008.

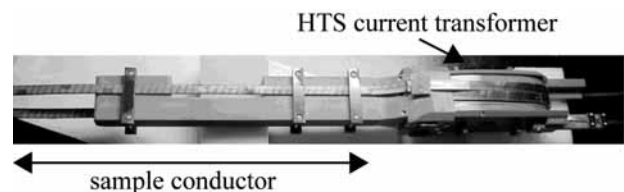


Fig. 1. Overview of the HTS current transformer

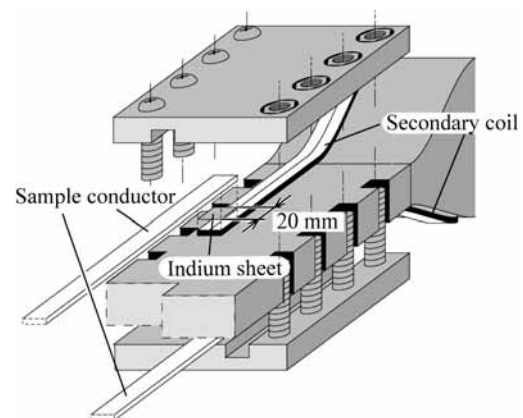


Fig. 2. The schematic diagram of the joint section between HTS-CT and sample conductor.

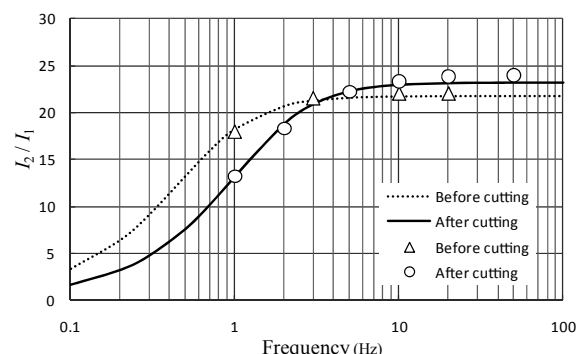


Fig. 3. Current ratio of Superconductor transfer by joint length

# ポインティングベクトル法による高温超伝導線材の交流損失特性評価 —測定子のマルチ配置による多点同時測定—

AC Loss properties estimation of high temperature superconducting wires  
- Multipoint measurement by multi-arrangement of measuring sensors -

八重山 洋平、羽生 大仁、川越 明史、住吉 文夫 (鹿児島大・工)

HAEYAMA Youhei, HABU Kisato, KAWAGOE Akifumi, SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University)

E-mail: k3058588@kadai.jp

## 1. はじめに

高温超伝導線材で発生する交流損失は機器の効率を低減させるため、実機の条件下で交流損失を精度良く測定し、その特性を定量的に明らかにすることが重要である。そこで我々は、外部磁界と輸送電流について制約条件の少ない交流損失測定方法として、「ポインティングベクトル法」を提案し、その有効性を実証している<sup>[1,2]</sup>。本測定方法は、短尺直線形状サンプルのみならず、多層ソレノイドコイルや疎巻コイル、また様々な断面形状の導体で作ったコイルに至るまで測定できるという特長も持っている。しかしながらこれまで、測定センサーを2セット配置してそれらを移動させながら数十点の測定を行うことや、極低温環境下で測定センサーを動かすために、その駆動機構に不具合が生じるなどして、一条件の測定データを得るために長い時間が必要であった。そこで今回は、サンプル周囲に測定センサーを多数配置すること(マルチ配置)により測定時間を短縮し、測定を簡易化することを目的としている。本発表では、測定センサーをマルチ配置しても測定可能であることを確認するために行った単層疎巻コイルの交流損失測定の結果を報告する。

## 2. 本測定装置と測定方法

ポインティングベクトル法では、電界測定用ポテンシャルリードと磁界測定用ピックアップコイルを用いて電界と磁界を測定し、それらの外積からポインティングベクトルを求める。交流損失を精度良く測定するには、ポテンシャルリード電圧に含まれる大きな誘導性電圧をキャンセルする必要があり、これには、ピックアップコイルの電圧を用いる。

今回はまず、単層ソレノイドコイル状長尺サンプルの交流損失測定装置について、マルチ配置の検討を行った。Fig.1 と Fig.2 は、ピックアップコイルとポテンシャルリードの概略図である。複数のポテンシャルリードをサンプルに取り付けるためには、それぞれのポテンシャルリードを全てサンプルに半田付けする必要があると考えられている。しかしながら、多数の半田付けを一箇所に行くとサンプルの劣化を引き起こす危険性がある。そこで本研究では、線材軸方向の電磁界の均一性に着目し、サンプルコイルに半田付けして引き出したリード線にそれぞれのポテンシャルリードを半田付けする方法を考案した。この方法であれば、サンプルに直接半田付けする数は、従来の方法と変わらない。今回は、サンプルコイルの内側と外側にポテンシャルリードとピックアップコイルのペアを7セット配置した。

## 3. Bi-2223 長尺多芯テープ線材を用いた交流損失測定

Table1にサンプルコイルのパラメータを示す。巻線に用いた線材は、幅4.2mm、厚み0.2mmの銀シースBi-2223多芯テープ線材である。長さ3mの線材を10mmピッチで12ターン巻いた単層疎巻ソレノイドコイル(直径80mm)をサンプルコイルとした。サンプルコイルの臨界電流 $I_c$ は103Aでn値は18.5であった。測定結果については当日報告する。

## 参考文献

- [1] 住吉文夫 他, 低温工学, vol. 35, No.12, p575, 2000  
[2] Y. Kasahara, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond. 14 (2004) 1078

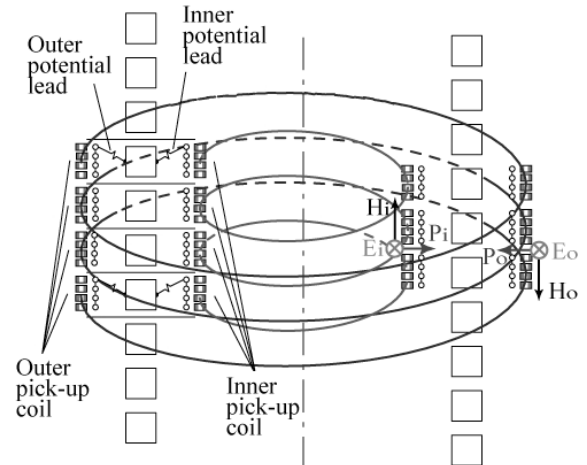


Fig.1 Configuration of pick-up coils

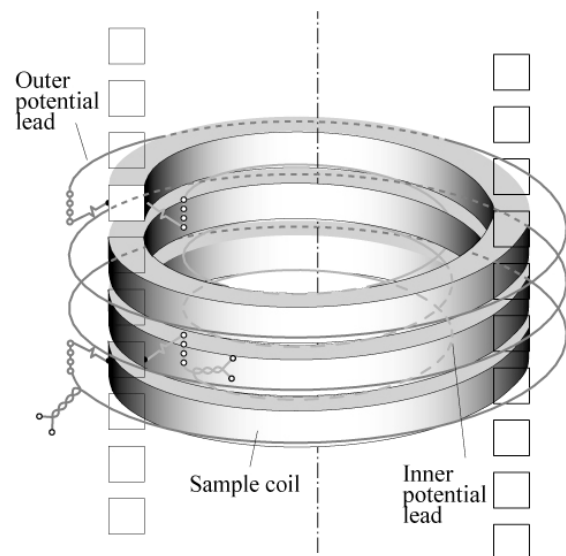


Fig.2 Configuration of potential leads

Table1 Parameter of sample coil

total tape length	3m
total number of turns	12
number of measured turns	2
coil diameter	80mm
coil length	180mm
one pitch length	10mm

# HTS 線材の通電電流と位相が異なる外部磁界下での交流損失特性に関する研究

## AC loss of HTS tape under external field different from transport current phase

星野 健, 津田 理, 濱島 高太郎 (東北大)  
 HOSHINO Ken, TSUDA Makoto, HAMAJIMA Takataro (Tohoku Univ)  
 E-mail: hoshino@ecei.tohoku.ac.jp

### 1. はじめに

将来的に実用化が期待されている超電導ケーブルは冷却コストや大電流量化の観点から交流損失低減が必要不可欠となる。そのなかでも三相同一軸ケーブルは低損失、コンパクトな電力ケーブルとして現在研究が行われている[1]。このケーブルでは通電電流と位相が異なった隣の相からの磁界にさらされることとなるので、本研究では、超電導線材に通電電流と位相が異なる外部磁界が印加された場合の交流損失について、電気的測定法を用いて実験的に評価した。

### 2. 実験内容

交流損失は電流通電することによる損失である通電損失と、外部磁界が原因となっている磁化損失の和で近似する。それぞれの測定は通電損失分を四端子法で行い、磁化損失分をピックアップコイル法で行う。磁化損失測定においては、通電電流のみによるピックアップコイルからの出力成分をオフセットとし、これを通電電流と外部磁界が同時に存在するときのピックアップコイルの出力成分から差し引いて磁化損失とした。また通電損失測定においても同様に、外部磁界のみによる電圧タップ間の出力成分をオフセットとして、通電電流と外部磁界が共に存在するときの出力から差し引いて通電損失とした。これらの磁化損失と通電損失の和を全交流損失とした。

今回の測定に用いた磁化損失測定回路を Fig.1 に示す。ここではオフセットを測定するためにロックインアンプへ入力する参照信号用の回路を分離している。測定に用いたサンプルは臨界電流値 57A, 幅 4mm, 厚み 0.24mm の Bi-2223 線材である。実際の磁化損失測定では、初めに HTS 線材へ通電しその時の出力をオフセットとし、その状態へ外部磁界を加えた時の出力との差を取ることで損失成分としている。

### 3. 測定結果

以上の測定によって得られた磁化損失と通電損失の和を全交流損失として Fig.2 に示す。横軸は通電電流に対する外部磁界の位相の進みとし、縦軸は単位長さあたり、1 サイクルの全交流損失としている。図中で  $\beta$  は外部磁界  $B_e$  を中心到達磁界  $B_p$  で規格化した値、 $i$  は通電電流  $I_t$  を臨界電流値  $I_c$  で規格化した値である。損失は  $180^\circ$  の周期をもっているので、初めの部分を示した。図から  $\beta$  の増加、すなわち、外部磁界が大きくなるとそれに伴って損失も増加することが分かる。これは次のビーンモデルを用いた解析式の傾向と一致する[2]。

$$Q = \frac{B_p^2}{24\mu_0} [b_m^3 (5 - 3 \cos 2\omega t_1) + b_m'^3 \{5 - 3 \cos 2(\omega t_1 - \phi_0)\} + b_m^2 b_m' \{-4 \cos \phi_0 + 3 \sin(\omega t_1 + \phi_0) - \sin(3\omega t_1 - \phi_0)\} + b_m b_m'^2 \{-3 - \cos 2\phi_0 + 3 \sin(\omega t_1 - 2\phi_0) - \sin(3\omega t_1 - 2\phi_0)\} + b_m'^2 (6 + 6 \cos 2\omega t_1) + b_m'^2 \{6 + 6 \cos 2(\omega t_1 - \phi_0)\}]$$

$b_m$  と  $b_m'$  は  $B_p$  で規格化したスラブ左右それぞれの表面磁界であり、 $\phi_0$  はスラブ左右の表面磁界の位相差である。

また上式から  $B_e$  が変化すると、損失  $Q$  が最大または最小となる位相差も変化する。Fig.2 中にその傾向を破線の矢印で示す。詳しく見るために、Fig.3 に最大・最小となる位相差と外部磁界の関係を示す。ここで、縦軸は損失が最大、最小となる位相差を表している。また、測定は  $15^\circ$  ごとに行ったため、測定値には  $\pm 15^\circ$  のエラーバーをもたせた。この図より解析結果

において損失が最大となる位相差は  $90^\circ$ 、最小となる位相差は  $180^\circ$  へ漸近していることが分かる。本測定においても外部磁界が大きくなるにつれて損失が最大、最小となる位相差が変化していく傾向が表れていることが分かる。

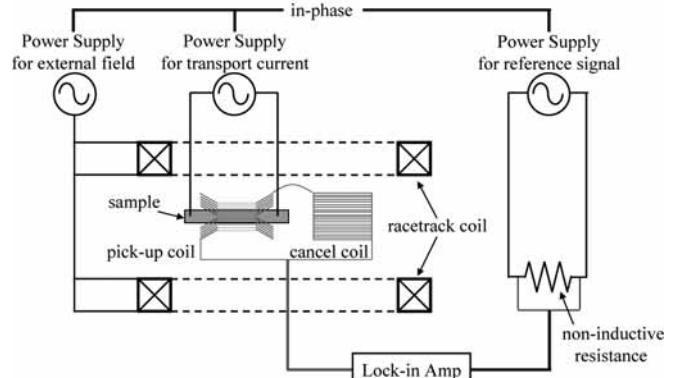


Fig.1 Magnetization loss measurement circuit

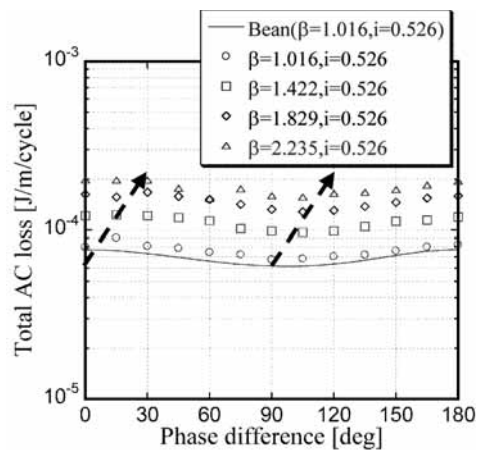


Fig.2 Total AC loss vs. phase difference between external magnetic field and transport current

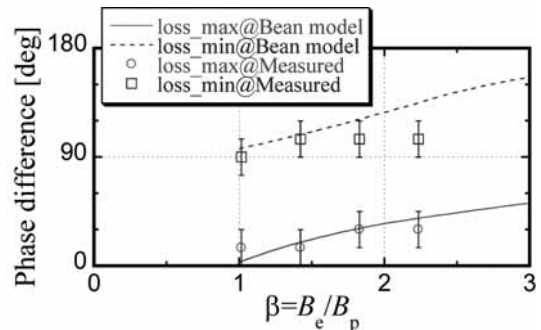


Fig.3 External field dependent phase difference

### 参考文献

1. T. Hamajima, et al.: Journal of Physics : Conference Series, Vol. 97 (2008) conference 1
2. K. Aoyagi, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77 (2007) p.231

# 横磁場中の超電導管状線材における交流損失

## AC losses in superconducting tubular wires in transverse magnetic fields

馬渡 康徳 (産総研)

MAWATARI Yasunori (AIST)

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

### 1. はじめに

最近 Nexans 社により、平坦な金属基板を丸い管状に成形して高温超電導膜を作製した、超電導層が肉薄の中空円筒の形状をもつ高温超電導線材が開発されている[1]。このような超電導管状線材に輸送電流を流す場合の交流電圧損失[2]は、平坦な超電導テープ線材の通電損失よりも桁違いに小さいことが知られている。一方、管状線材の中心軸に垂直な横磁場を印加する場合の電流・磁場分布は極めて複雑であり、またその場合の交流損失も明らかではない。

本研究では、超電導層の厚さが線材半径より十分小さい超電導管状線材に横磁場を印加した場合の電流・磁場分布および交流損失について、臨界状態モデルを基に理論解析を行った。超電導管状線材の損失と平坦な超電導テープ線材の損失について比較した。

### 2. 超電導管状線材

Fig. 1 に、超電導管状線材における超電導層の断面図(xy 面)を示す。超電導層の厚さ  $d$  は、線材半径  $R$  に比べて十分小さく( $d \ll R$ )、線材は長手方向( $z$  方向)に直線状で無限に長いものとする。この線材に対して、線材中心軸に垂直な方向( $y$  方向)に横磁場  $H_a$  を印加したときの電流・磁場分布に関して、臨界電流密度  $j_c$  は一定とする臨界状態モデルに基づいて理論解析を行った。この超電導管状線材の臨界電流は  $I_c = 2\pi j_c R d$  で与えられる。

横磁場中の超電導管状線材における磁場分布は、無限に広い超電導膜の近くに線状の磁気双極子を置いた場合の磁場分布[3]に等価であり、文献[3]の手法を用いて横磁場中の超電導管状線材における電流・磁場分布を解析的に求めることができる[4]。

### 3. 横磁場中の超電導管状線材への磁場侵入

横磁場  $H_a$  をゼロからゆっくり単調に増加させるとき、超電導管状線材への磁場侵入の様子は、次の(i)、(ii)のように  $H_a$  が閾値  $j_c d/2$  を超えるかどうかによって大きく異なる[4]。

(i)  $0 < H_a \leq j_c d/2$  の場合、磁場は超電導層の外表面付近

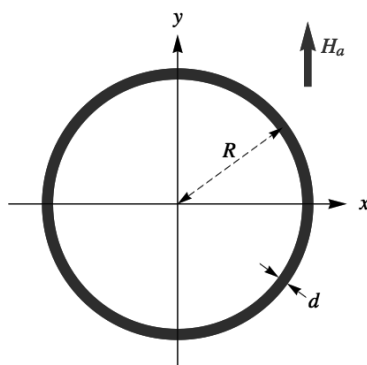


Fig. 1: Cross section of a superconducting layer in a superconducting tubular wire.

にのみわずかに侵入し、超電導層の外表面における磁場はほとんど平行成分  $H_\theta$  のみで、管状線材の中空部分の磁場はゼロである。超電導層における面電流は  $x = \pm R$  で最大であり、その値は  $j_c d$  より小さい。線材外部の磁場分布および線材の磁気モーメントは、横磁場中の中空でない超電導円柱が Meissner 状態にある場合とほぼ同じで、 $H_a$  に比例する。

(ii)  $H_a > j_c d/2$  の場合、 $x = \pm R$  付近で、超電導層における面電流が上限値  $j_c d$  に達するとともに垂直磁場成分  $H_\rho$  が現れ、管状線材の中空部分へも磁場が侵入する。この場合の電流・磁場分布および磁気モーメントはかなり複雑で、 $H_a$  に対して非線形である。

### 4. 横磁場中の超電導管状線材における交流損失

超電導管状線材が振幅  $H_0$  の横磁場中にあるときの交流損失  $Q_{\text{tube}}$  についても解析的な表式が得られ[4]、その結果を Fig. 2 に示す。比較のため、平坦な超電導テープ線材の損失(平行磁場中の損失  $Q_{\text{tape},\parallel}$  および垂直磁場中の損失  $Q_{\text{tape},\perp}$ )も示した。 $Q_{\text{tube}}$  vs  $H_0$  の振舞の概要は次のとおりである。

(i)  $0 < H_0 \leq j_c d/2$  の場合、 $Q_{\text{tube}}$  は  $Q_{\text{tape},\parallel}$  と同程度(1.70 倍)であり、 $Q_{\text{tape},\perp}$  に比べて桁違いに小さい。

(ii)  $H_0 > j_c d/2$  の場合、 $H_0$  が  $j_c d/2$  を超えると  $Q_{\text{tube}}$  は急激に増大し、 $H_0 \gg j_c d$  では  $Q_{\text{tape},\perp}$  と同程度(0.405 倍)になる。

本研究は、ISTEC を通じて NEDO からの委託を受けて実施したものである。

### 参考文献

- [1] P. Odier et al., Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 125024.
- [2] G. Vellego and P. Metra, Supercond. Sci. Technol. **8** (1995) 476.
- [3] Y. Mawatari and J.R. Clem, Phys. Rev. B **74** (2006) 144523.
- [4] Y. Mawatari, Phys. Rev. B, submitted.

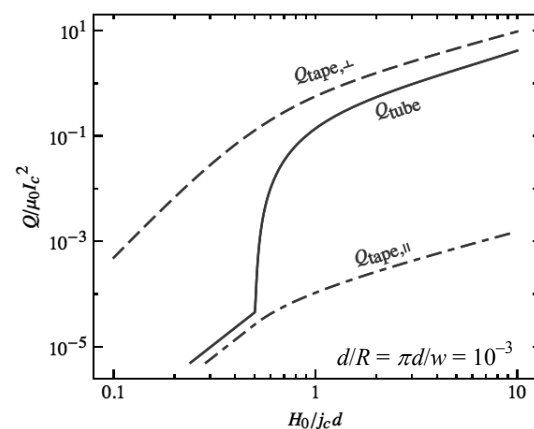


Fig. 2: AC losses as functions of the field amplitude  $H_0$ :  $Q_{\text{tube}}$  of a superconducting tubular wire in a transverse field (solid),  $Q_{\text{tape},\perp}$  of a flat superconducting tape in a perpendicular field (dashed), and  $Q_{\text{tape},\parallel}$  of a flat superconducting tape in a parallel field (chained).



## RE123 系線材の応力 - ひずみ特性 (3) 不可逆曲げひずみ

## Stress-strain characteristics on RE123 wires 3

山田 雄一, 山田 穰, 大熊 武 (ISTEC);

齊藤 隆 (フジクラ); 青木 裕治 (昭和電線); 大松 一也 (住友電工); 八木 正史 (古河電工)

YAMADA Yuichi, YAMADA Yutaka, OKUMA Takeshi (ISTEC);

SAITO Takashi (Fujikura Ltd.); AOKI Yuji (SWCC); OMATSU Kazuya (Sumitomo Electric); YAGI Masashi (Furukawa Electric)

E-mail: yamada-yuichi@istec.or.jp

## 1. はじめに

“イットリウム系超電導電力機器技術開発”において、実用線材として期待できる各種の製造プロセスで RE123 系線材の開発を行っている。製造プロセスによって予歪量などが異なり、使用上重要な曲げひずみ特性が変化すると考えられる。

今回は、一般に使用限界の目安である  $I_c$  が 95% になる点に加えて、巻線等の機器製作プロセスにおける曲げ戻しを考慮して不可逆曲げひずみを評価した。ここで、可逆の限界 (不可逆) 点として曲げ戻しで当初  $I_c$  の 99% になる点とした。

## 2. 評価線材

I-PLD (ISTEC 製、PLD-GdBCO/IBAD-MgO 中間層/ハステロイ)、F-PLD (フジクラ製、PLD-GdBCO/IBAD-MgO 中間層/ハステロイ)、K-MOD (昭和/フジクラ製、TFA-MOD-YBCO/IBAD-GZO 中間層/ハステロイ) 及び S-PLD (住友製、PLD-GdBCO/配向金属基板) の 4 種類の線材と、それらに K-MOD は古河電工にて、I-PLD 及び S-PLD は住友電工にて銅めっきを施したものを評価対象とした。

## 3. 曲げ試験方法

低温中で連続的に曲げ (戻し) を加え、所定の各ひずみ状態における臨界電流測定を行う。この評価には、いわゆる“Goldacker 式”の試験装置 [1] を用いた。

## 4. 評価結果

Fig.1 に F-PLD 線材 (銅めっきなし) の Fig.2 に K-MOD 線材 (銅めっきなし) の超電導層を外側にして曲げた (引張方向) 結果を示す。ここで、所定の直径に曲げた状態での  $I_c$  を“Bending”、それを直状に戻した際の  $I_c$  を“Bend-back”とした。比較として、直状に戻さず、徐々に曲げた場合の  $I_c$  を“Simple Bending”として示した。“Bending”と“Simple Bending”はほぼ同様の値をとり、95% にまで低下する点と不可逆点はほぼ同じで直径 15-20mm 近辺である。

一方、超電導層が内側、すなわち圧縮側に曲げた場合、直径 10mm の曲げまででは F-PLD は低下せず、K-MOD は約 45% まで徐々に臨界電流が低下したが、直状に戻すと、ほぼ当初の臨界電流に復帰した [2]。これより、F-PLD 以外では圧縮方向では不可逆点と 95% 維持点に大きな差が見られる。

また、磁場中での曲げひずみ特性は当日報告する。

## 5. 結論

RE123 線材には各種の製法が採用されているが、機械的特性が異なる。しかし、いずれもイットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクトの中で目指している応用上の曲げに対して問題はないことが確認された。また、巻線時等の曲げ戻しにも本結果を参考に工程設計が可能である。

## 6. 謝辞

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施したものである。Goldacker 式試験装置につ

いては KIT・Goldacker 先生、NIMS・黒田先生及び富山大学・笠場先生のご協力を頂きました。ここにお礼申し上げます。

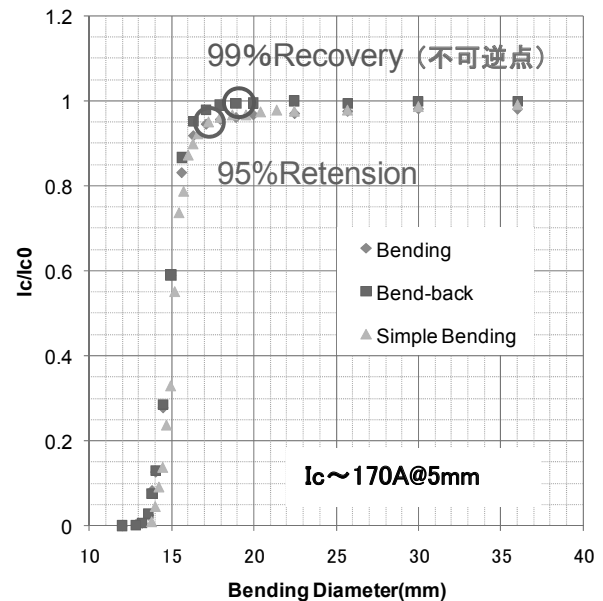


Fig. 1 Bending characteristics of F-PLD (bare)

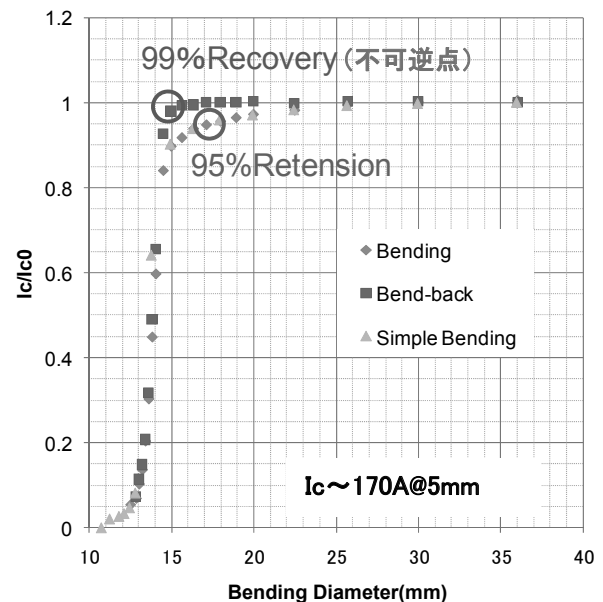


Fig. 2 Bending characteristics of K-MOD (bare)

## 参考文献

1. W. Goldacker, et al.: 2002 Adv. Cryog. Eng. Vol. 48 (2002) p.469
2. 山田他: 2010 春季低温工学・超電導学会講演概要集 P14



# コイル化に向けたイットリウム系線材の剥離特性評価

## Delamination characteristic of coated conductor

戸坂 泰造, 岩井 貞憲, 宮崎 寛史, 田崎 賢司, 花井 哲, 浦田 昌身, 井岡 茂, 石井 祐介 (東芝)

TOSAKA Taizo, IWAI Sadanori, MIYAZAKI Hiroshi, TASAKI Kenji,  
HANAI Satoshi, URATA Masami, IOKA Shigeru, ISHII Yusuke (Toshiba)  
E-mail: taizo.tosaka@toshiba.co.jp

### 1. はじめに

焼損に至る可能性が高い熱暴走現象のクライテリアを正確に予測できることは、高温超電導コイルにとって最も重要な課題である[1]。そのためには、コイルの電流-電圧特性を正確に予測する必要があるが、イットリウム系(Y系)線材を用いて含浸コイルを試作し、液体窒素中で電流-電圧特性を測定したところ、Fig.1に示すように、線材の超電導特性から予測される電流-電圧特性から大きく劣化する結果が得られた。この原因として、冷却によりコイル内部で線材のテープ面垂直方向に熱応力が発生し、機械的な破壊(剥離)が起こったことが推定されたため、この応力が極力小さくなるようにしてコイルを試作したところ、計算値と一致する電流-電圧特性が得られるようになった[2]。一方で、冷却によりコイル内部に発生する応力を構造解析で評価したところ、テープ面垂直方向に働く応力は最大で11MPa程度であり、線材メーカーから公表されている値(40MPa以上)と大きく乖離していることがわかった。この原因を究明するため、巻線で使用した残線を用いてテープ面垂直方向の応力による剥離特性の評価をおこなった。

### 2. 剥離試験方法

試験に用いたY系線材の構成をFig.2に、試験構成をFig.3に示す。Y系線材の基板側のテープ面をベースに半田で固定し、超電導層側のテープ面に半田でブロック(Anvil)を取り付けた。ブロックをテープ面垂直方向に引っ張ることで線材に剥離応力を与えた。なお、試験は室温で実施した。

### 3. 試験結果と考察

試験結果をFig.4に示す。サンプル数14で得られた破壊応力は、ばらつきが大きいものの、最小値は26MPaであり、構造解析で得られたコイル内部に発生する応力11MPaよりも高い値であることがわかった。

このばらつきの原因としては、測定方法に起因することも考えられるが、実力としてばらつきがあると考え、コイルに使用した線材の一部では、剥離応力が小さい部分が存在する可能性がある。そこで、Fig.1に示した含浸コイルの場合について、統計的な評価をおこなった。コイルに使用した線材の長さ24mは、測定に使用したブロックの長さ4mmに対して6000倍の長さとなる。Fig.3に示す破壊応力が、ワイブル分布に従っていると仮定し、6000回分の試験を実施したことを想定すると最も低い剥離応力は7MPaとなることがわかった。

### 4. まとめ

剥離試験結果を統計的に解釈すれば、構造解析で得られたテープ面垂直方向の応力11MPaよりも弱い部位が存在することが、含浸コイルの電流-電圧特性が劣化した原因として説明できる可能性を示した。

今回実施したY系線材の剥離応力の評価方法は、室温で実施していることや試験方法に起因するばらつきが評価できていない等の改善すべき要因があるものの、安定した品質の超電導コイルを製作するためには、Y系線材の剥離応力を統計的に評価すべきことを示唆していると考えられる。

また、剥離応力やそのばらつきは、線材の製法、構造、材質、製造ロットなどで変わる可能性があり、剥離応力の評価や

評価方法の標準化等については、業界を挙げての幅広い取り組みが望まれる。

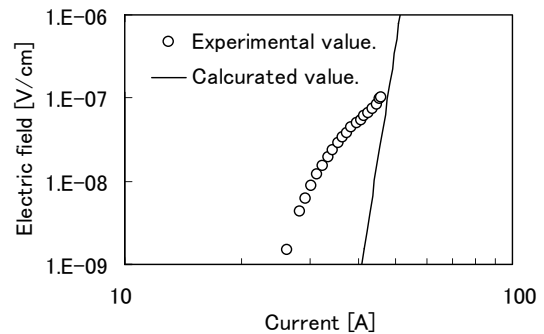


Fig.1 V-I characteristics of an impregnated coil

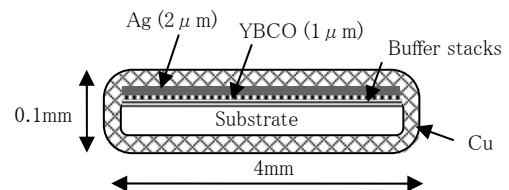


Fig.2 Cross section of the tested YBCO tape

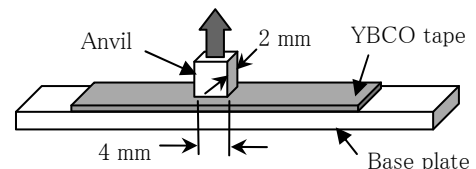


Fig.3 Configuration of the delamination test

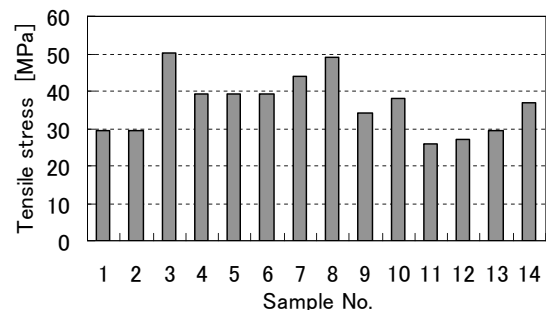


Fig.4 Delamination test results

### 参考文献

- H. Miyazaki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.197
- S. Iwai, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.204

# 放射光を用いた Y 系線材の引張および曲げ内部測定

## Internal strain measurement of YBCO coated conductor using synchrotron radiation

菅野未知央 (京大) ; 町屋修太郎 (大同大) ; 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫 (中部電力) ; 長村光造 (応科研)  
 SUGANO Michinaka (Kyoto Univ.); MACHIYA Shutaro (Daido Univ.);  
 SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power); OSAMURA Kozo (RIAS)  
 E-mail : sugano@kuee.kyoto-u.ac.jp

### 1. はじめに

Y 系線材の機械的特性において、曲げひずみ特性は最も基礎的なデータのの一つとして評価されている。実験的には、線材を曲げ半径 ( $R$ ) に変形した状態で臨界電流 ( $I_c$ ) が測定されるが、異なる線材の特性を比較するためには曲げ半径を曲げひずみに換算する必要がある。曲げひずみ ( $\epsilon_b$ ) は、中立軸からの距離 ( $y$ ) を用いて、 $\epsilon_b = y/R$  の関係から求められる。従って、各線材において中立軸の位置を決定することが必要である。非対称な積層構造を有する Y 系線材においては、中立軸は基板の中心には位置していない。また、全ての構成要素が弾性変形状態のときには、中立軸の位置は一定であるが、構成要素の一部で塑性変形が起ると中立軸の位置は曲げ半径に依存して移動する。従って、構成要素の応力-ひずみ関係を考慮した中立軸位置の決定方法を確立することが重要である。本研究では、Y 系線材に曲げ変形を与えた状態で YBCO 膜の内部ひずみを放射光で実測した。また塑性変形を考慮した応力-ひずみ関係に基づく応力のつり合い条件から異なる線材構造を有する Y 系線材の中立軸位置を数値計算により決定し、これによって求めた曲げひずみと実測値を比較した。

### 2. 実験方法

Cu 安定化層の有無の違いによる 2 種類の Y 系線材を用いた。いずれも、Ag(10  $\mu\text{m}$ )/YBCO(1  $\mu\text{m}$ )/CeO<sub>2</sub>(0.4  $\mu\text{m}$ )/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(1  $\mu\text{m}$ )/Hastelloy(100  $\mu\text{m}$ )という構造は共通であり、Cu 複合化線材では厚さ 100  $\mu\text{m}$  の Cu テープが Ag 側にハンダ付けされている。

大型放射光施設 SPring-8 において、Y 系線材に一軸引張または曲げ変形を与えた状態で YBCO 膜の内部ひずみを測定した。いずれの測定においても、透過配置によって負荷方向と平行な線材長さ方向の  $b$  軸の格子定数から、内部ひずみを直接測定した。また、 $I_c$  の引張、曲げひずみ依存性を 77 K、自己磁場で測定した。曲げひずみ測定には、Goldacker 型の曲げ装置 (最小曲げ径 6 mm) を用い、液体窒素中で連続的に曲げ半径を変化させた。

### 3. 結果および考察

中立軸の位置は以下の計算により推定した。構成要素を厚さ 0.1  $\mu\text{m}$  の要素に分割し、要素内でのひずみは一定とする。一定の  $R$  について、中立軸のある位置に仮定し、各要素における曲げひずみを計算する。実験または文献値による構成要素の応力-ひずみ曲線から各要素での応力が求められ、これらを断面全体にわたって足し合わせる。ここでは、体積分率が大きく、中立軸位置に与える影響が大きい Hastelloy と Cu に関して、非線形な加工硬化を考慮した。この計算を中立軸位置を Hastelloy 基板内で移動させながら繰り返し、応力のつり合いが成り立つ条件から中立軸位置を決定した。この手順を  $R$  を変化させながら繰り返し  $R$  に依存した中立軸位置を決定した。

Fig. 1 に放射光により実測した内部ひずみの変化と計算値の比較を示す。実測値と計算値が概ね一致していること

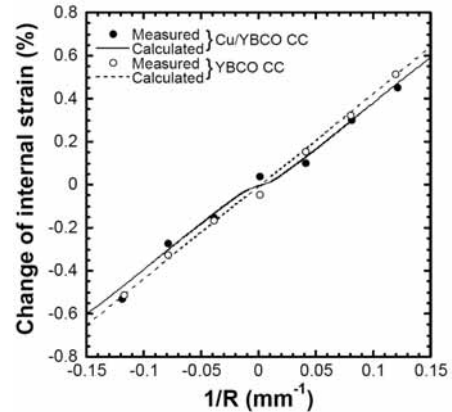


Fig. 1 Comparison between measured and calculated bending strain.

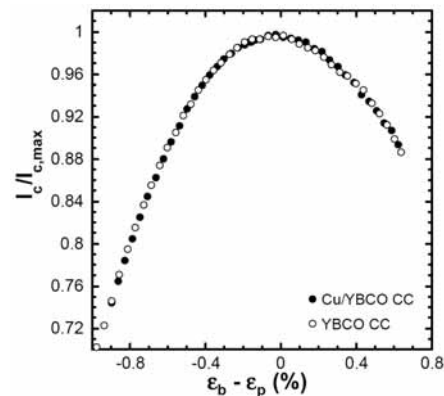


Fig. 2  $I_c$  as a function of bending strain for coated conductors with and without Cu stabilizing layer.

がわかる。線材中の超伝導体の曲げひずみを直接測定したのは本結果が初めての例であり、実測値との比較により本計算手法の妥当性が確認された。

2 種類の線材について  $I_c$  の曲げ半径の逆数に対する依存性を比較すると、いずれも放物線的な振る舞いではあるが、Cu 複合化 YBCO 線材の方が緩やかな変化を示した。前述と同様の手法で 77 K の応力-ひずみ関係を用いると、 $I_c$  を測定した  $R$  に対応した中立軸位置および YBCO の曲げひずみを求めることができる。これをさらに  $I_c$  の最大値で規格化した結果を Fig. 2 に示す。 $I_c$  の曲げひずみ依存性が非常に良く一致しており、曲げ変形の逆数に対してプロットしたときの差は、線材構造に起因する中立軸位置の違いによるものであることが明らかになった。

以上の結果から、Y 系線材において曲げひずみを求める手法を確立することができた。

### 謝辞

本研究は、NEDO の委託事業「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。

# REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> コート線材の臨界電流に対する歪効果における温度・磁場の影響 Influence of temperature and magnetic field on strain effect for critical current of REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> coated conductor

峯岸 一博, 小黒 英俊, 淡路 智, 渡辺 和雄(東北大); 西島 元(NIMS); 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTEC);  
井上 至, 坂本 久樹, 安永 紳也, 劉 勁(古河電工)

MINEGISHI Kazuhiro, OGURO Hidetoshi, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); NISHIJIMA Gen (NIMS);  
IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC); INOUE Itaru, SAKAMOTO Hisaki, YASUNAGA Shinnya, RYU Jinn (Furukawa Electric)  
E-mail: kazuhiro\_m@imr.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

高温超伝導体 REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(REBCO、RE は Y または希土類元素)を超伝導層に用いた REBCO コート線材は、磁場中での高い臨界電流密度( $J_c$ )特性を持つ。また、Hastelloy など高強度材料が基板として用いられているため、高い耐力力特性を持っている。

強磁場超伝導マグネットへの応用においては、磁場中で線材に大電流を通電する必要があり、その際発生する電磁力により線材に引張り歪が加わる。このため、REBCO コート線材の  $I_c$  に及ぼす引張り歪の効果を調べることが必要となる。特に、マグネット応用においては磁場中での  $I_c$  の歪依存性が重要となるが、磁場が、REBCO コート線材の  $I_c$  に対する歪効果に及ぼす影響については、十分に明らかになっていない。また、強磁場マグネット応用においては、液体 He 温度 4.2 K における歪効果について調べることが必要となる。

本研究では 77 K、および 4.2 K において、磁場中で REBCO コート線材の  $I_c$  の引張り歪依存性を測定し、 $I_c$  に対する歪効果に温度と磁場が及ぼす影響について調べた。

## 2. 試料諸元および実験方法

試料線材の諸元を Table 1 に示す。試料には PLD(Pulse Laser Deposition) 法によって超伝導層が作製された GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(GdBCO) 線材および CVD(Chemical Vapor Deposition) 法によって超伝導層が作製された YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(YBCO) 線材を用いた。いずれの試料も Hastelloy 基板を用い、試料幅は 2 mm である。

$I_c$  の引張り歪依存性の測定は、カム方式によって線材に引張り歪を加える装置を用いて行った。試料線材の両端をそれぞれ固定側と可動側の 2 つの電極にハンダ付けし、可動側電極を移動させることにより引張り力を印加する。試料の向きを変えることにより、印加磁場の方向が膜面に垂直な場合と膜面に平行な場合の両方で測定できる。

77 K(液体 N<sub>2</sub> 浸漬冷却)および 4.2 K(液体 He 浸漬冷却)、磁場中において、試料線材に引張り力を印加しながら  $I_c$ 、引張り歪、引張り応力を測定した。電圧端子間距離は 10 mm、 $I_c$  決定の電界基準は 1  $\mu$ V/cm である。線材表面に接着した歪ゲージにより、線材に加わる歪を測定した。

## 3. 実験結果

Fig. 1 に GdBCO 線材、および YBCO 線材の 77 K、 $B \leq 3$  T における  $I_c$  の引張り歪依存性を示す。 $I_c$  の値は引張り歪を加えない状態での  $I_c(I_{c0})$  で規格化している。磁場方向は膜面に垂直方向である。

GdBCO 線材においては引張り歪 0.40%、YBCO 線材においては引張り歪 0.50% までの  $I_c$  変化は可逆変化である。

YBCO 線材については、 $B \leq 0.3$  T において、引張り歪を加えることにより  $I_c$  が向上するピーク効果が見られたが、GdBCO 線材ではこのような効果は見られなかった。2 つの試料はともに Hastelloy 基板を用いており、熱収縮による残留歪に大きな違いはないと考えられるが、ピーク位置に差が現れた。先行研究でも、PLD 法により作製された試料では、磁場印加によりピーク効果が見られた例は報告されていない。

当日は、4.2 K での結果も合わせて議論する。

Table 1 Specification of REBCO coated conductor.

GdBCO coated conductor		
	material	thickness
Stabilizer	Ag	10 $\mu$ m
Superconducting layer	PLD-GdBCO	1.2 $\mu$ m
Buffer	CeO <sub>2</sub>	0.5 $\mu$ m
	LaMnO <sub>3</sub>	19 nm
	IBAD-MgO	4 nm
	GZO	110 nm
Substrate	Hastelloy	100 $\mu$ m

YBCO coated conductor		
	material	thickness
Stabilizer	Cu	19 $\mu$ m
	Ag	16 $\mu$ m
Superconducting layer	CVD-YBCO	1 $\mu$ m
Buffer	CeO <sub>2</sub>	0.2 $\mu$ m
	IBAD-GZO	0.5 $\mu$ m
Substrate	Hastelloy	100 $\mu$ m

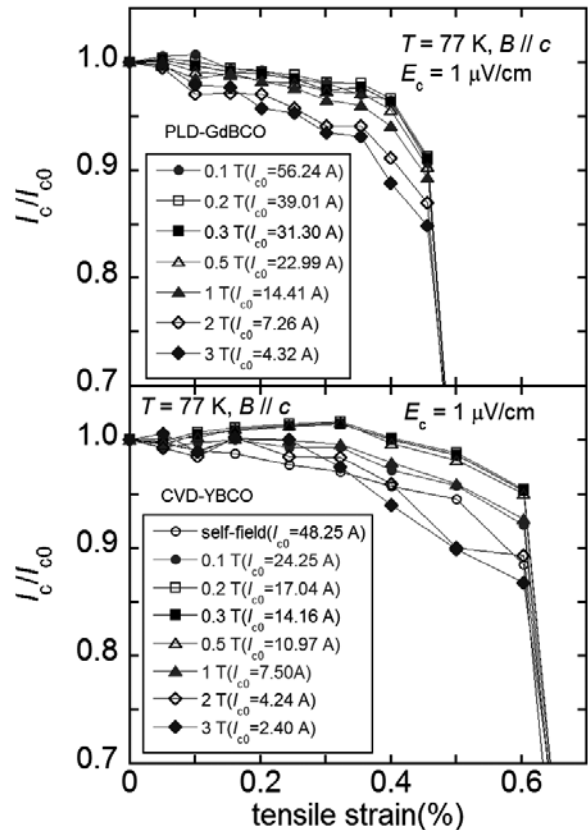


Fig. 1 Tensile strain dependence of normalized critical current for GdBCO and YBCO coated conductor at 77 K.

# Gd 系 123 酸化物超電導バルク体の緻密化と機械的特性に及ぼす影響因子

## Densification of Gd123 oxide superconducting bulks and influential factors on mechanical properties

藤本 浩之 (鉄道総研) ; 村上 明 (弘前大) ; 手嶋 英一, 森田 充 (新日鐵)  
 FUJIMOTO Hiroyuki (Railway Technical Research Institute); MURAKAMI Akira (Hirosaki Univ.);  
 TESHIMA Hidekazu, MORITA Mitsuru (Nippon Steel Corp.)  
 E-mail: fujimoto@rtri.or.jp

### 1. はじめに

液体窒素温度でも高い臨界電流密度、強い捕捉磁界、さらに強い磁気浮上力を有する希土類系酸化物高温超電導バルク材は、将来の超電導応用機器が期待されている。バルク超電導応用機器の実用化のためには、電磁気的特性はもとより、機械的特性の把握とその向上が非常に重要である。

一般に、希土類系超電導バルク材は大気中での熔融法で作製されるが[1]、プロセスに起因してバルク体内部に気孔が存在する。気孔は欠陥であり、機械的強度や信頼性向上のためには、何らかの対策が必要である。材料作製プロセスの観点からは、例えば、気孔密度の低減が考えられる。最近、酸素中熔融によって Sm 系、Dy 系や Gd 系の気孔密度を減少させ、機械的強度が改善することが報告されている。[2,3,4]

我々は、これまでに、気孔密度が低い銀添加 Gd 系バルク体(直径 30mm 及び 46mm)を作製し、従来(標準)材と比較した緻密化の効果を、機械的特性(曲げ強度、ヤング率など)の観点から報告してきた[5]。ここでは、同バルク体の機械的特性評価結果に及ぼす影響因子について、特に微細組織(気孔や銀粒子などの分布状況)の影響を検討した結果を報告する。

### 2. Gd-123 の作製方法と特性評価

本研究で評価した Gd 系バルク材は、Gd123 相:Gd211 相 = 3:1 の組成比に 0.5wt% の Pt と 10wt% の Ag<sub>2</sub>O を添加した原料粉を用い、試料内部の気孔密度を低減させるため酸素中で熔融させた後、大気中で結晶成長させるという二段階雰囲気調整熱処理法にて作製した。その結果、直径 30mm~46mm、厚さ 15mm 程度の超電導バルク体を得た[5]。ここでは、二段階雰囲気調整熱処理法にて作製したものを緻密材(Densified)、比較のため全て大気中で作製したものを標準材(Standard)と呼ぶ。

本研究での Gd 系バルク材の機械的特性評価は、ファインセラミックスの試験評価方法を参考に四点曲げ試験を 77K で実施した。試験片は、円柱状バルク体を上中下の三段以上にスライスし、主に JIS R 1601 (曲げ強度試験)に基づいた寸法・形状(2.8×2.1×25 mm<sup>3</sup>)に切断・研削加工して得た。そして試験片の表面をラッピングフィルムなどで鏡面仕上げして、光学顕微鏡、レーザ顕微鏡により組織を観察し、気孔率、銀分布、211 相分布を測定した。

### 3. Gd-123 の機械的特性等評価結果

図 1 に、標準材と緻密材の酸素アニール後試験片表面の光学顕微鏡による組織観察結果を示す。これまでの報告[5]で、標準材では数十 μm 程度の気孔が多数存在する(気孔率 15%程度)が、緻密材では気孔がほとんど存在しない(気孔率 3%以下)ことが示されている。

Ag 粒子分布の曲げ強度への効果を図 2.1 (粒径)と図 2.2 (面積率)に示す。平均粒径が小さいほど、標準材・緻密材とも曲げ強度が高い傾向が見られる。一方、面積率と曲げ強度には明確な相関は見られない。図 3 に標準材の気孔分布の効果を示す。平均径が小さいほど、また、面積率が小さいほど、曲げ強度が上がる傾向が明確に見られる。緻密材の強度は図中の値より大きく(アニール:>120MPa、アニール処理なし:>80MPa)、緻密化の効果は明らかである。

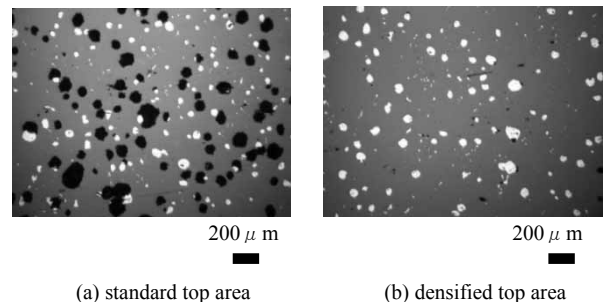


Fig. 1 Optical micrograph of the Gd123 Bulk; φ 30 mm, standard and densified bulks; annealed.

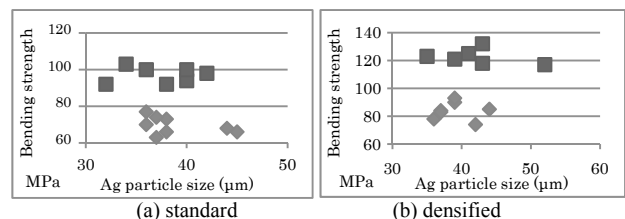


Fig. 2.1 Ag size dependence of bending strength at 77 K in Gd123 bulks. ■ Anneal ◆ As-grown

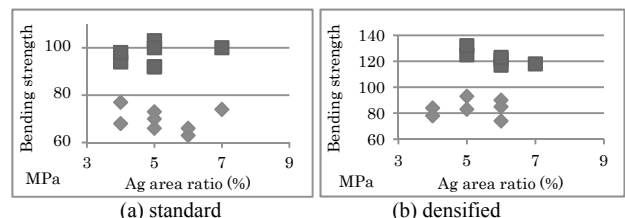


Fig. 2.2 Ag area dependence of bending strength at 77 K in Gd123 bulks. ■ Anneal ◆ As-grown

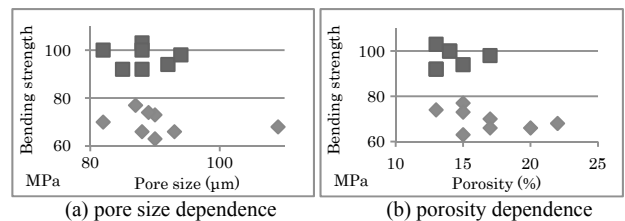


Fig. 3 Relation between pore and bending strength at 77 K in Gd123 bulks. ■ Anneal ◆ As-grown

### 参考文献

1. M.Morita et al.: Physica C 235-240 (1994) 209.
2. N.Sakai et al.: Supercond. Sci. Technol. 13-6 (2000) 770.
3. K.Tazoe, H.Ikuta et al.: Physica C, 357-360 (2001) 807.
4. H.Teshima et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 77, (2007), 2P-p13, p.158.
5. 例えば、H.Fujimoto et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 78, (2008), 2D-a04, p.145.

## NiめっきCu/SUS316貼合せテープ上へのYBCO厚膜の作製と特性評価

## Fabrication of YBCO thick film on Ni-electroplated Cu/SUS316 laminated tape and its property

土井 俊哉, 勝目 彬人, 魏 一, 宇田 達也, 白樂 善則(鹿児島大);

嶋 邦弘, 窪田 秀一(田中貴金属工業); 加藤 丈晴(JFCC); 鹿島 直二, 長屋 重夫(中部電力)

DOI Toshiya, KATSUME Akihito, GI Ichi, UDA Tatsuya, HAKURAKU Yoshinori (Kagoshima University);

SHIMA Kunihiro, KUBOTA Shuichi (TAMAKA KIKINZOKU K..K.); Takeharu Kato (JFCC);

KASHIMA Naoji, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co.)

E-mail: doi@eee.kagoshima-u.ac.jp

## 1. はじめに

Y系超伝導線材の基材テープには、配向金属テープを使う手法と、無配向金属テープ上にIBAD法により配向中間層を形成する手法が用いられている。現在、国内ではIBAD法を中心に開発が進められているが、低コスト化を考えた時には配向金属テープは熱処理のみで作製できるので魅力的である。我々は、圧延再結晶集合組織を有する金属テープを使って2軸配向した高温超伝導線材の研究開発を精力的に進めてきた[1]。最新タイプは、2008年に発表した{100}<001>集合組織CuテープをSUS316と貼合わせることで機械的強度を高めた複合テープ上に、CeO<sub>2</sub>/YSZ/CeO<sub>2</sub>/Ni パッファ層を介してYBCO薄膜を作製する断面構造を有しており、270 nm厚のYBCO薄膜層の $J_c$ は3 MA/cm<sup>2</sup>を越えることを報告した[1-5]。

今回は、YBCO層を1 μmとした厚膜を作製した結果について報告する。

## 2. 実験および評価方法

NiめっきCu/SUS316貼合せテープ上に、PLD法を用いてCeO<sub>2</sub>/YSZ/CeO<sub>2</sub>もしくはCeO<sub>2</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CeO<sub>2</sub>積層膜を形成し、その上に厚さ270 nmもしくは1 μm YBCO薄膜を作製した。パッファ層薄膜、YBCO薄膜の配向性を確認するためにX線回折(XRD)測定および極点図測定を行った。さらに電子線後方散乱回折法(EBSD)を用いてYBCO薄膜の結晶方位を確認した。また、試料表面及び断面構造を走査型電子顕微鏡(SEM)、透過型電子顕微鏡(TEM)により観察した。試料の臨界電流密度( $J_c$ )、臨界温度( $T_c$ )は直流四端子通電法で測定した。

## 3. 結果と考察

図1に、同様の条件で作製したYBCO厚膜(1 μm)と薄膜(270 nm)の表面SEM観察結果を示す。両試料の表面は平滑で、厚膜においてもa軸配向粒は全く観察されていないことが分る。X線回折およびEBSD観察の結果、どちらの試料についてもYBCO層の結晶配向度は、ピーク半値幅で6度であった。直流4端子法により、これらの試料の77K、自己磁場中の $J_c$ を測定したところ、薄膜は2.4 MA/cm<sup>2</sup>、厚膜は2.1 MA/cm<sup>2</sup>であった。

YBCO層の厚さを270 nmからほぼ4倍の1.0 μmとしても $J_c$ はほぼ同じ値を維持した。YBCO層厚を1.0 μmとして作製した試料の $I_c$ はテープ幅1 cmに換算すると210 A/cm幅になる。X線回折結果やSEM観察結果から、a軸配向粒生成の兆しは認められなかったことから、更なる厚膜化が可能であると考えられる。以上の結果から、配向Cu/強化金属テープを用いたY(RE)系超伝導線材は高 $J_c$ かつ高 $I_c$ であることが実証できた。今後は長尺化のプロセス

研究を進めることで、実用に供することが可能な線材が作製できると考えられる。

## 4. 参考文献

- [1] 特開平7-192546、1994年10月20日出願、優先権主張日1993年10月25日。
- [2] Makoto Tokudome, Toshiya Doi, Ryota Tomiyasu, Shinya Sato, Yoshinori Hakuraku, Shuichi Kubota, Kunihiro Shima, Naoji Kashima and Shigeo Nagaya, J. Appl. Phys. vol. 104, Nov. 2008, 103913.
- [3] Makoto Tokudome, Toshiya Doi, Ryota Tomiyasu, Manabu Daio, Yoshinori Hakuraku, Kunihiro Shima, Shuichi Kubota, Naoji Kashima, and Shigeo Nagaya, IEEE Trans. Appl. Supercond. vol.19, June 2009, pp.3287-3290.
- [4] N. Kashima, K. Shima, T. Doi, S. Kubota, T. Watanabe, M. Inoue, T. Kiss and S. Nagaya, IEEE Trans. Appl. Supercond. vol.19, June 2009, pp.3299-3302.
- [5] 富安亮太, 土井俊哉, 徳留誠, 大王学, 白樂善則, 窪田秀一, 嶋邦弘, 鹿島直二, 長屋重夫, 低温工学, vol.44, No.6, 2009年6月, pp.269-277.
- [6] 大王学, 土井俊哉, 白樂善則, 窪田秀一, 嶋邦弘, 鹿島直二, 長屋重夫, 低温工学, vol.44, No.11, 2009年11月, pp.488-495.

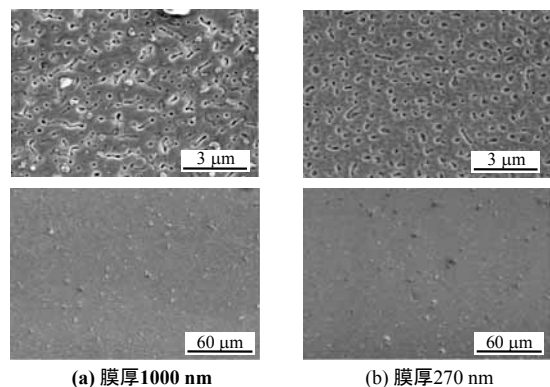


図1 YBCO厚膜と薄膜の表面SEM観察結果

# クラッド配向金属基板上に成膜した中間層の高性能化

## Improvement of buffer layer fabricated on clad-type textured metal substrate

本田 貴裕, 新海 優樹, 阿比留 健志, 小西 昌也, 大松 一也(住友電工)

HONDA Yoshihiro, SHINGAI Yuki, ABIRU Kenji, KONISHI Masaya, OHMATSU Kazuya(SEI)

E-mail: honda-yoshihiro@sei.co.jp

### 1. はじめに

希土類系高温超電導線材は、磁場中での臨界電流( $I_c$ )特性に優れており、電力ケーブルを始め、変圧器、SMES、超電導マグネット等、様々な応用機器への適用に関する研究が行われている。住友電工では、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、66 kV/5 kA、15 m 長の三芯一括構造を有する超電導電力モデルケーブルの開発と、そのための超電導線材の作製を行っている。モデルケーブルの開発には、長尺に亘って、400 A/cm( $I_{c4}$ >160 A)のような高  $I_c$ かつ均一な超電導特性を有する超電導線材が必要となる。特に、長尺に亘って 400 A/cm の  $I_c$  を有する超電導線材を安定して供給する場合、長手方向のばらつきを考慮して、400 A/cm よりも高い  $I_c$  を安定して作製できなければならない。このような超電導線材を作製するためには超電導層、中間層並びに基板それ自体の高性能化が不可欠である。本発表では、超電導線材の中間層の成膜工程において改善を行った結果、表面平滑性が数 nm オーダーとなり、また優れた(100)結晶性を示したので報告する。

### 2. 超電導線材作製工程

我々は 30 mm 幅のクラッド配向金属基板上に RF スパッタ法及び、Fig. 1 に示す装置を用いた Electron Beam(EB)法を用いて中間層の成膜を行った。その後、新しく導入した最大出力 300 W のエキシマレーザ[1]を用いた PLD 法により超電導層の成膜を行い、DC スパッタ法により、Ag の安定化層を成膜した。最後に酸素熱処理を行い、表面に銅めっき処理を施した。次に、30 mm 幅の超電導線材を、4 mm 幅に機械的にスリットした。最後に外観検査を行い、検査に合格したものを、モデルケーブルを作製するグループに供給している。

### 3. 中間層作製プロセスの改善による高性能化

超電導線材の製作工程の中間層の成膜工程において、RF スパッタ法と EB 法を、成膜温度や搬送速度などの条件をふり、最適な条件で成膜することにより、表面平滑性の優れた中間層が得られた。改善した作製プロセスにより得られた中間層を用いて超電導線材を作製し、 $I_c$  特性を評価した結果、短尺試料で 497 A/cm の特性を示した。中間層の作製プロセスの改善による  $I_c$  の推移を Fig. 2 に、また、改善した中間層を用いた、約 20 m の長尺に亘って  $I_c$ >400 A/cm の特性を示した 4 mm 幅の超電導線材の長手方向の  $I_c$  分布のグラフを Fig. 3 に示す。

今後は更なる高  $I_c$  化と長尺化が課題である。

### 4. 謝辞

超電導線材の作製にあたって、酸素熱処理を実施して頂きました山田雄一氏をはじめ、ISTEC の方々のご支援に感謝致します。

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術開発の一環として、独立行政法人新エネルギー・総合技術開発機構(NEDO)の委託を得て実施したものである。

### 参考文献

1. K. Abiru, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.105



Fig. 1 Photograph of electron beam evaporation system

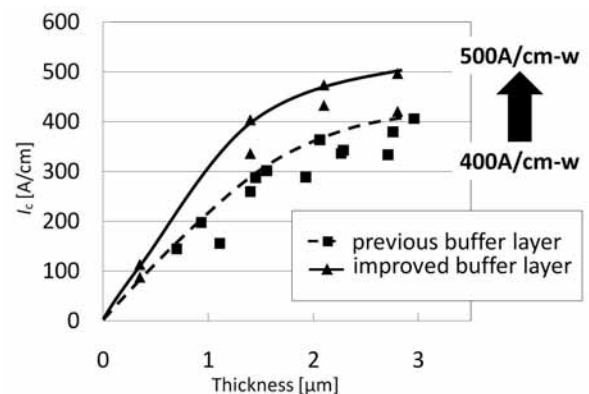


Fig. 2  $I_{c4}$  dependence of GdBCO film

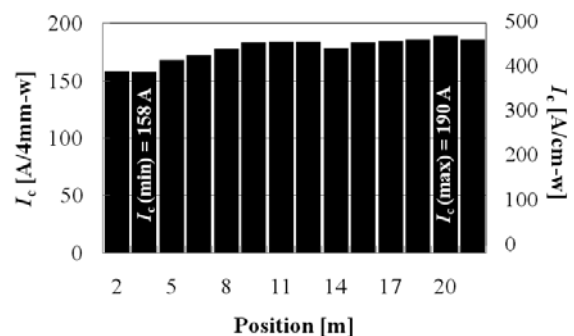


Fig. 3  $I_{c4}$  distribution in a longitudinal direction

# 大電流ケーブル用薄膜超電導線材の開発

## Development of coated conductors for the large current cable

小西 昌也、新海 優樹、阿比留健志、本田貴裕、大松一也 (住友電工)  
 KONISHI Masaya, SHINGAI Yuki, ABIRU Kenji, HONDA Yoshihiro, OHMATSU Kazuya (SEI)  
 E-mail: konishi-masaya@sei.co.jp

### 1. はじめに

薄膜超電導線材による大電流超電導ケーブルの開発を、NEDOプロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発」を受託して実施している[1]。この報告では、ケーブル開発に使用する超電導線材の開発・作製について報告する。

ケーブルの交流損失抑制のため、使用する線材は、基板に低磁性のクラッドタイプ配向金属基板[2]を用いた2mm幅又は4mm幅の線材である。安定製造技術開発・高 $I_c$ 化開発を実施した結果、4mm幅で $I_c$ が120-190Aの線材を、ケーブル開発のために作製した。

### 2. 線材作製プロセス

Fig.1に我々の線材構造と作製プロセスの概略を示す。30mm幅の配向金属基板上に、RFスパッタリングで中間層を形成し、超電導層はGdBaCuOをPLD法で形成している。Ag保護層を付けて酸素アニールの後、機械式スリッターで2mm幅又は4mm幅に分割し、電気めっきによってCu安定化層を周囲に形成したものである。

このようにして作製した線材は、リール to リール $I_c$ 測定装置で $I_c$ を測定し、線材外観に異常がないことをチェックして、ケーブル開発に使用している。

### 3. 線材の高 $I_c$ 化

次の2つのプロセス改善により、線材の高 $I_c$ 化を行なった。一つには、高出力レーザーの導入により超電導成膜の線速を高速化することで厚膜での高 $I_c$ 化が可能となった[3]。

二つめは、中間層 seed layer の膜厚と成膜条件の検討で、これにより表面が平坦化され、 $I_c$  向上につながっている。これらによって、 $I_c$  は 497A/cm (短尺データ,  $J_c=1.78A/cm^2$ ) に向上した。

### 4. 線材の $I_c$ 分布

Fig.2 にケーブルテスト用の線材(4mm幅)として総長200mを作製したときの $I_c$ の分布を示す。前述したように4mm幅線材は、30mm幅の基板上に各層を成膜した後、4mm幅に

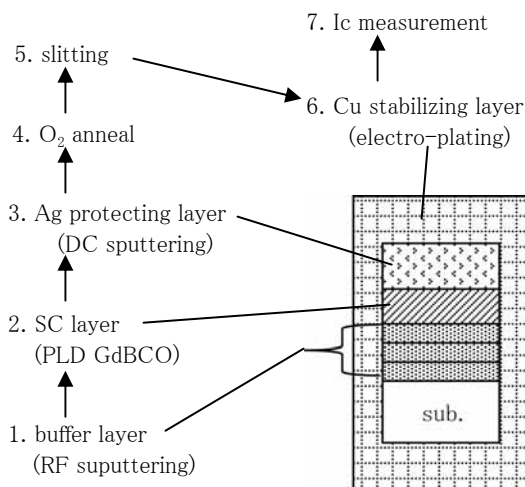


Fig.1 Structure and production process of the coated conductors for superconducting cable

スリットして作製しており、図には幅方向位置による $I_c$ 分布も示している。

作製した線材においては、最高で190A(4mm幅)の $I_c$ が得られたが、図のように、30mm幅で成膜した端からスリットした線材において、 $I_c$ が少し低い傾向が見られた。中間層の特性は、30mm幅にわたって均一な特性が得られていることから[4]、この原因は、超電導層のPLD成膜での基板温度・膜厚の不均一に起因していると考えており、今後の課題である。

### 謝辞

線材作製にあたり、酸素アニールを実施いただいた山田雄一氏をはじめ、ISTECの方々のご支援に感謝いたします。

本研究は、イットリウム系超電導電力機器技術研究開発の一環として、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. M. Ohya, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.27
2. K. Ohki, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.114
3. K. Abiru, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 82 (2010) p.105
4. H. Ohta, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.190

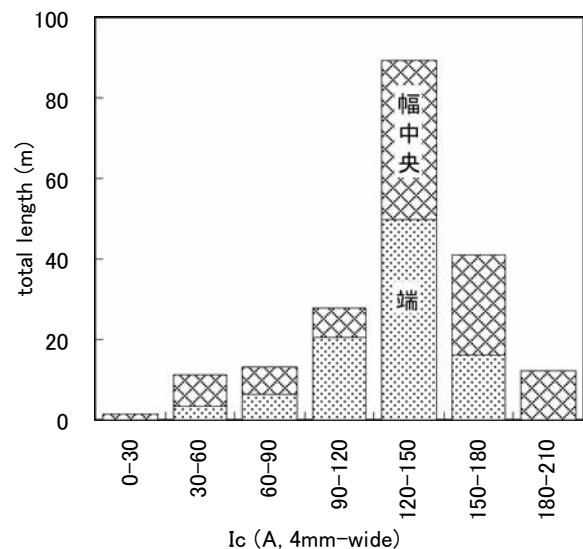


Fig.2  $I_c$  distribution of the 4mm-wide coated conductors for superconducting cable



# インプラーム Nd:YAG-PLD 法による IBAD-MgO 基板上への $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 膜作製

## $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ films prepared by in-plume Nd:YAG-PLD method on IBAD-MgO substrates

小野 郁朗, 一野 祐亮, 吉田 隆, 高井 吉明(名大); 吉積 正晃, 和泉 輝郎, 塩原 融(ISTERA)

ONO Ikuo, ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka, TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ. );

YOSHIKUMI Masateru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTERA)

E-mail: ono-ikuo10@ees.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

我々はこれまで、Nd:YAG レーザーを用いた PLD 法により作製した YBCO 薄膜がエキシマレーザーを用いた時と同等の超伝導特性を示すことを報告した[1]。Nd:YAG レーザーは初期コスト、ランニングコストが安価なため、工業应用到に有利であると期待されている。また、超伝導線材の実用化に向けて、省資源・高速での線材作製も重要である。そのため、本報告では線材作製における収率の向上を目的とし、インプラーム法を用いて YBCO 膜の作製を行った。更に、膜厚や超伝導特性の均一性を向上させるために、ターゲットを傾け、プルームを歳差運動させた成膜も行った。

### 2. 実験方法

YBCO 膜は Nd:YAG-PLD 法を用いて、 $10 \text{ mm}^2$  の  $\text{CeO}_2/\text{LMO}/\text{IBAD-MgO}/\text{GZO}/\text{Hastelloy}(\text{IBAD-MgO})$  基板上に作製した。基板温度は  $900^\circ\text{C}$  である。作製した薄膜はターゲット-基板間距離 ( $d_{t-s}$ )、酸素圧力 ( $P_{\text{O}_2}$ ) に対して、超伝導特性及び収率を評価した。

### 3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に  $d_{t-s}$ 、 $P_{\text{O}_2}$  に対する収率の変化を示す。我々のグループで得られている最適条件  $d_{t-s}=40 \text{ mm}$ 、 $P_{\text{O}_2}=40 \text{ Pa}$  で作製した YBCO 膜の収率は 7.69 % であった。本研究では、インプラーム法を用い  $d_{t-s}$  を 20 mm まで短縮することで収率は 12.12 % まで増加した。また、 $d_{t-s}=20 \text{ mm}$  の条件で  $P_{\text{O}_2}$  を増加させた場合、 $P_{\text{O}_2}=200 \text{ Pa}$  で収率は本研究で最も高い 18.96 % を示し、それ以上の  $P_{\text{O}_2}$  では収率は低下した。なお、XRD の結果から作製した全ての試料は、良好な 2 軸配向であることを確認した。

一方、作製した試料の  $T_c$ 、 $J_c(77 \text{ K, sf})$  は YBCO 膜の中央で  $80.1 \text{ K}$ 、 $0.13 \text{ MA/cm}^2$  で、端部では  $88.3 \text{ K}$ 、 $1.81 \text{ MA/cm}^2$  であった。また、端部の成膜レートは中央に比べ  $1/5$  であり、超伝導特性および膜厚が不均一であった。

この膜の不均一性を解決するためにターゲット法線を鉛直方向に対して傾けることでプルームを歳差運動させた。Fig. 2 にその概略図を示す。 $\theta$  は  $0^\circ \sim 15^\circ$  で変化させた。

Fig. 3 に  $\theta$  に対する膜厚分布を示す。 $d_{t-s}=20 \text{ mm}$ 、 $P_{\text{O}_2}=200 \text{ Pa}$ 、 $\theta=0^\circ$  ではサンプルの中央と端部での成膜レートの不均一性が大きい。が、 $\theta$  を増加させるに従い成膜レートが均一になった。 $\theta=15^\circ$  にしたとき  $T_c$ 、 $J_c$  は端部・中央共にそれぞれ  $86.8 \text{ K}$ 、 $1.62 \text{ MA/cm}^2$  を示し、端部の成膜レートは中央に比べ  $2/3$  程度まで改善した。しかし、この超伝導特性は最適条件での  $T_c=89.7 \text{ K}$ 、 $J_c=2.07 \text{ MA/cm}^2$  と比べ低い。今後、 $T_c$ 、 $J_c$  の向上のため、組成の最適化などを検討する予定である。

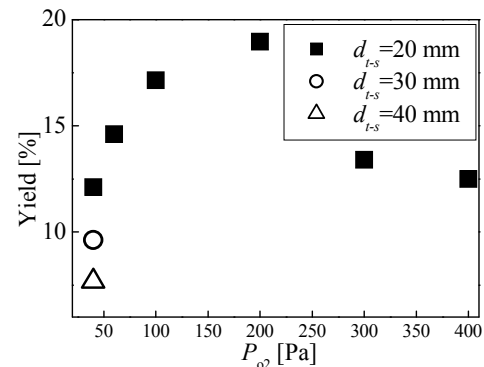


Fig. 1.  $d_{t-s}$  and  $P_{\text{O}_2}$  dependence of material yield.

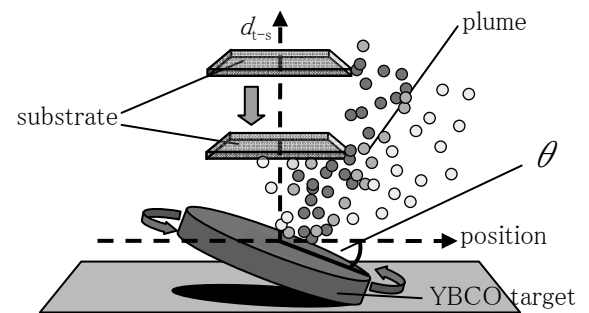


Fig. 2. Schematic drawing of in-plume Nd:YAG-PLD system and precession of the plume.

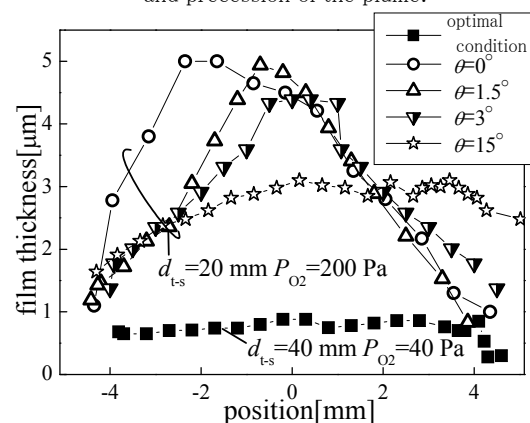


Fig. 3.  $\theta$  dependence of thickness distribution.

### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(19676005, 20686065)からの助成を受けると共に、希少金属代替材料開発プロジェクトの一環として独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)からの委託により実施したものである。

### 参考文献

1. Y. Ichino, et al. : Physica C, vol. 470 (2010) p. 1234

# コンビナトリアル Nd:YAG-PLD 法による新規磁束ピンニング材料の高速スクリーニング

## Rapid screening of new flux pinning materials by means of combinatorial Nd:YAG-PLD method

一野 祐亮, 吉田 隆, 吉村 拓也, 高井 吉明(名大); 鈴木 浩二, 竹内 稔晃, 喜多 隆介(静大)  
 ICHINO Yusuke, YOSHIDA Yutaka, YOSHIMURA Takuya, TAKAI Yoshiaki (Nagoya Univ.);  
 SUZUKI Koji, TAKEUCHI Toshiaki, KITA Ryusuke (Shizuoka Univ.)  
 E-mail: ichino@nuee.nagoya-u.ac.jp

### 1. はじめに

これまで、初期コスト、ランニングコストが安価な Nd:YAG レーザーを用いて YBCO 薄膜を作製し、エキシマレーザーと遜色ないことを明らかにしてきた[1]。また、コンビナトリアル Nd:YAG-PLD 法を用いることで、磁束ピン止め材料の最適添加量を高速に決定できることを報告した[2, 3]。現在、コンビナトリアル法を用いて新規人工ピン止めセンター(APC)の探索を行っている。

APC として、Ba を含みペロブスカイトに類縁の構造であるなどの特徴を持つ BaZrO<sub>3</sub> や BaSnO<sub>3</sub> などが報告されている。本研究では、これらと同じ特徴を持つ BaTbO<sub>3</sub> (BTO) と Ba<sub>3</sub>Cu<sub>3</sub>In<sub>4</sub>O<sub>12</sub> (334)に着目した[4]。コンビナトリアル法を用いて YBCO 薄膜にこれらの物質を添加し、添加量に対する超伝導特性の変化について検討を行ったので報告する。

### 2. 実験方法

4 倍波 Nd:YAG レーザー(波長 266 nm)を用いて、SrTiO<sub>3</sub> (100)単結晶基板の上に YBCO 薄膜を作製した。基板温度 900°C、酸素圧力 0.2 Torr、基板-ターゲット間距離 40 mm としてレーザーエネルギー密度 1.8 J/cm<sup>2</sup> で成膜を行った。コンビナトリアル法では、YBCO と APC 添加 YBCO ターゲットを用いた。BTO は 5vol%、334 は 4.4vol% と 9vol% を添加したターゲットを用いた。作製した薄膜の配向性・結晶性は X 線回折法(XRD)そして超伝導特性は磁場中直流四端子法を用いて評価した。また、YBCO 薄膜中の APC 添加量は SEM に付随したエネルギー分散型 X 線分光器(EDX)を用いて評価した。

### 3. 実験結果及び考察

コンビナトリアル法で BTO と 334 を添加した YBCO 薄膜を作製した。XRD パターンから、c 軸配向し面内で四回対称であることを確認した。また、添加物のピークは観察されなかった。Fig. 1 に APC 添加量に対する YBCO 薄膜の T<sub>c</sub> を示す。比較のため、コンビナトリアル法で作製した BSO 添加 YBCO 薄膜の T<sub>c</sub> もプロットしている[2]。図から、添加量に対して BTO がもっとも T<sub>c</sub> が低下しにくいことがわかった。また、334 はわず

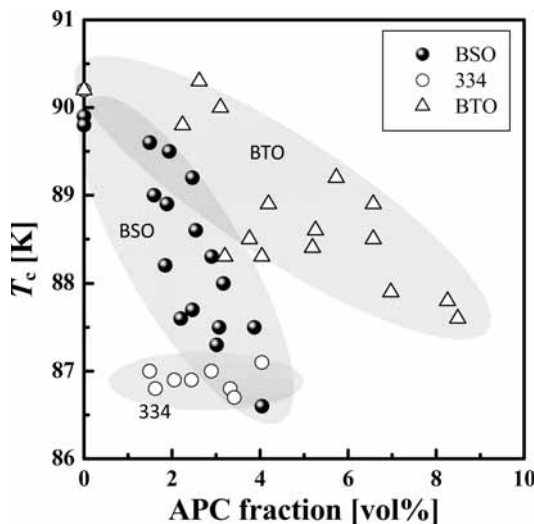


Fig.1 T<sub>c</sub> of YBCO films including APC materials as a function of APC volume fraction.

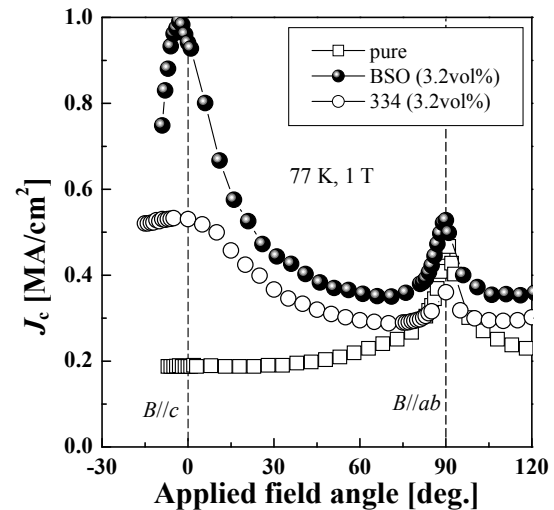


Fig.2 J<sub>c</sub> of YBCO thin films at 77 K in 1 T as a function of applied field angle.

かな添加で T<sub>c</sub> が急激に低下したが、T<sub>c</sub> は添加量にほとんど依存しなかった。

J<sub>c</sub>-B 曲線の評価から、BSO では 3.2vol% でもっとも高い J<sub>c</sub>-B 曲線が得られたが、334 と BTO では添加量に対して大きな変化は見られなかった。Fig. 2 に 77 K、1 T における J<sub>c</sub> の磁場印加角度依存性を示す。BSO と同様に、334 添加 YBCO 薄膜でも B//c 方向で J<sub>c</sub> ピークが見られた。BTO 添加 YBCO 薄膜には J<sub>c</sub> ピークは確認されなかった。334 添加 YBCO 薄膜には何らかの c 軸相関ピンが生成している可能性がある。添加量に対する T<sub>c</sub> の変化もほとんどないことから、334 などの In 系化合物をさらに詳細に検討することは新規 APC 探索において有用であると考えられる。

### 4. まとめ

コンビナトリアル Nd:YAG-PLD 法を用いて新規 APC 材料の探索を行った。334 と BTO に関して、添加量に対する超伝導特性を評価した。BTO は BSO よりも添加量に対する T<sub>c</sub> の低下は少なかったが、334 は添加量に対して T<sub>c</sub> はほとんど変化しなかった。J<sub>c</sub> の磁場印加角度依存性から、334 添加 YBCO 薄膜では B//c で J<sub>c</sub> ピークが確認された。

### 謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金(19676005, 20686065)からの助成により実施したものである。

### 参考文献

1. Y. Ichino, et al.: Physica C, Vol. 470 (2010) p.1234
2. Y. Ichino, et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., submitted
3. 吉村拓也, 他: 2010 年秋季第 71 回応用物理学学会学術講演会、15a-T-2、長崎大学、2010 年 9 月
4. R. Kita, et al.: Physica C, Vol. 470 (2010) p.1198

# In-plume PLD 法で作製した GdBCO 線材の磁場中 $I_c$ 特性と BaSnO<sub>3</sub> 添加効果

## Effect of BaSnO<sub>3</sub> addition on the in-field $I_c$ characteristics of GdBCO coated conductors prepared by in-plume PLD method

筑本 知子, セルゲイ・リー (ISTEC); 加藤 丈晴, 平山 司 (JFCC); 田辺 圭一 (ISTEC)

CHIKUMOTO Noriko, LEE Sergey (ISTEC), KATO Takeharu, HIRAYAMA Tsukasa (JFCC); TANABE Keiichi (ISTEC)

E-mail: chiku@istec.or.jp

### 1. はじめに

我々は、基板-ターゲット間距離を短くして成膜する in-plume PLD 法の開発を行っており、GdBCO 系において  $I_c$  値が 200 A/cm-w 以上の均一長尺線材 (>50m) を再現性良く得られるまでになっている[1]。なお、ここで  $I_c$  値は製造速度により線材の膜厚を変えることで、制御可能である[2]。

一方、SMES や超電導磁石等の機器応用においては、磁場中  $I_c$  の向上及び  $I_c$  の磁界角度依存性の低減が必要不可欠である。 $I_c$  値の向上については(1)厚膜化や(2)ピン止め中心の導入が有効である。そこで、本研究では、厚膜化による磁場中  $I_c$  の向上を図るとともに、BaSnO<sub>3</sub> (BSO) の添加によりピン止め中心の導入を図ったので、その結果について報告する。

### 2. 実験方法

成膜には CeO<sub>2</sub>/LaMnO<sub>3</sub>/IBAD-MgO/ハステロイ基板 (IBAD-MgO 基板) ( $\Delta\phi=4-5^\circ$ ) を用いた。GdBCO 層は XeCl エキシマレーザ (レーザーパワー: ~650mJ) を用いて、in-plume 条件でマルチプルーム-マルチターン (MPMT)-RTR 成膜を行なった。なお、酸素分圧、温度は一定とし、基板の搬送速度 (線速) を 20~100m/h の範囲で変化させた。またターン数については、5ターン成膜と6ターン成膜の2種類行なった。

成膜には Gd:Ba:Cu=1:1.8:3 の組成比のターゲットを用いた。得られた膜の Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) 法による分析組成は線速によらず、ほぼ Gd<sub>1.1</sub>Ba<sub>1.9</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> であった。また、BSO の添加はターゲット組成 GdBa<sub>1.8</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> に対して 5mol% の BaSnO<sub>3</sub> を混合することによって行なった。作製したテープは Ag を 10  $\mu$ m 程度スパッタ蒸着後、酸素気流中でアニール処理を行なった。磁場中  $I_c$  測定は液体窒素冷却下四端子法で行い、磁場はスプリットコイルを用いて印加した。 $I_c$  値は 1  $\mu$ V/cm の電圧基準により決定した。

### 3. 実験結果

#### (1) $I_c$ 特性の膜厚依存性

Fig. 1 に 5 ターン成膜及び 6 ターン成膜時の自己磁場中及び 3T ( $B_a // c$ ) における  $I_c$  値の膜厚依存性を示す。なお、膜厚については、数種類の条件で成膜した試料の断面 TEM 観察結果をもとに外挿して求めた値を用いた。

どちらの場合も膜厚とともにほぼ直線的に増加するが、3  $\mu$ m の膜厚では傾きがやや小さくなっており、それ以上の膜厚では飽和傾向にあることが示唆される。

#### (2) BaSnO<sub>3</sub> 添加効果

Fig. 2 に GdBCO 試料と BSO 添加 GdBCO 試料の 77K における  $I_c$  の磁界角度依存性を示す。BSO 添加試料については、製造時の線速を変えた 2 種類の試料についての特性を比較のために示した。なお、いずれの試料も製造速度 (線速÷パス数) は 30m/h で同じであり、膜厚はほぼ同じである。

まず 30m/h、1 パス成膜の試料を比較すると、GdBCO 試料は磁場を ab 方向に印加した時 ( $\Theta=90^\circ$ ) に  $I_c$  のピークをとり、c 軸方向に磁場を傾けて行くに従い、ほぼ単調に減少するのに対し、BSO 添加試料では、 $\Theta=90^\circ$  のピークがなくなり c 軸方向に磁場を印加した時 ( $\Theta=180^\circ$ )

にブロードなピークがあらわれている。TEM 観察の結果、BSO 添加試料においては、直径約 5nm のナノロッド状に BSO が析出していることが確認されており、それが c 軸相関ピンとして効いているためと考えられる。

また BSO 添加試料について、30m/h、1 パス成膜と 90m/h、3 パス成膜では、 $I_c$  の磁場依存性が異なり、後者の方がより  $I_c$  の磁界角度依存性が低減していることがわかる。このことから線速が早い方がより等方的なピンが導入されていることが示唆される。

### 4. 謝辞

本研究は新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託により「イットリウム系超電導電力機器技術開発」の一環として実施したものである。なお、本研究で用いた IBAD-MgO 基板の提供いただきました、ISTEC の線材研究開発部の皆様に感謝致します。

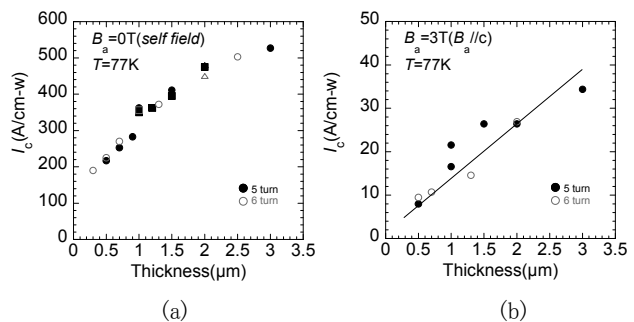


Fig.1 Thickness dependence of  $I_c$  for (a) self field and (b)  $B_a=3T$  ( $B_a // c$ ) for GdBCO tape processed by RTR in-plume PLD method..

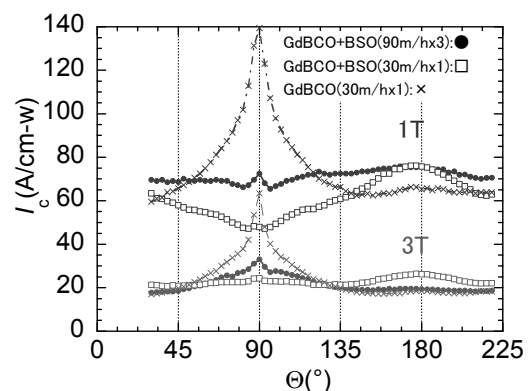


Fig.2 Effect of BSO addition on the field angular dependence of  $I_c$  at 77 K for GdBCO tape processed by RTR in-plume PLD method.

### 参考文献

1. N. Chikumoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 80 (2009) p.116
2. N. Chikumoto, et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p.14

# Y系超電導線材のレーザースクライビング加工の歩留り向上

## Progress in multifilamentary process for coated conductors

町 敬人, 中尾公一, 田辺圭一(超電導工学研究所)  
 Takato MACHI, Koichi Nakao, Keiichi TANABE (SRL-ISTEC)  
 E-mail: machi@istec.or.jp

### 1. はじめに

coated conductors を交流電力機器に応用するためには、マルチフィラメント化により交流損失を低減しなければならない。これまで報告したように、我々は従来のレーザースクライビング法を改良して、Shallow laser scribing (浅いレーザー照射) および 2 段階エッチングにより、フィラメント間抵抗を確保しつつ、溝幅 100-250 $\mu$ m, エッチング時間約 1/10, 加工による  $I_c$  の低下率は 10-25% という技術を開発した。

今回は、長尺線材の加工を可能とするために歩留りを向上するための改良を行った結果および 100m 長を越える加工の結果を報告する。

### 2. 実験方法

加工実験に用いた超電導線材は 5mm 幅で、ハステロイ基板に GZO (IBAD)-CeO<sub>2</sub> (PLD) のバッファ層上に形成された PLD 線材あるいは TFA-MOD である。

スクライビングの歩留りを向上するために、これまでの改良型のレーザースクライビングに、洗浄工程を追加した。マスクテープの貼付けですきまが生じるとオーバーエッチングの危険性が高まる可能性があるため、マスクテープの貼付け工程の前にアセトンの超音波洗浄の工程を追加した。次に、レーザー照射後の溝内にマスクテープの粘着材が残留しているとエッチング不良が生じる可能性があるため、界面活性剤による超音波洗浄を追加した。さらに、エッチング後およびマスクテープの除去後にも洗浄工程を追加した。その結果、図 1 に示すような工程となった。

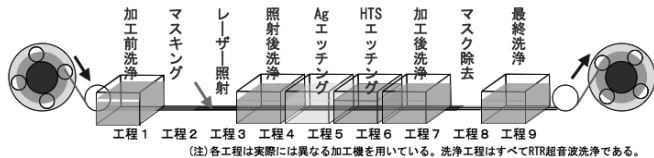


図 1 歩留り向上のためのレーザースクライビングの工程

### 3. 実験結果と考察

各工程後に光学顕微鏡による観察を行った結果、レーザー照射後の各工程後に光学顕微鏡による観察を行った結果、レーザー照射後の界面活性剤による超音波洗浄により溝内に残留した粘着材が減少し、エッチング不良によるフィラメント間絶縁の不良が低減できた。

図 1 の新しい工程によって 50m 長の PLD 線材のレーザース

クライビングを行った結果を図 2 に示す。加工前の  $I_c$  が 95.1A と低い場合、フィラメント毎の  $I_c$  は低いが、フィラメント間抵抗は平均 0.63M $\Omega$ /cm となり、交流損失も図 3 に示すようにヒステリシス損失で五分の一以下に低減できた。同様のプロセスを用いて 50m から 120m までの長尺線材での加工を行った結果を表 1 に示す。これまでの歩留りは約 50% であったが、洗浄工程を追加した新しいプロセスにより約 70% まで向上することができた。

### 4. 謝辞

本研究は、新エネルギー産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託を受けて実施したものである。

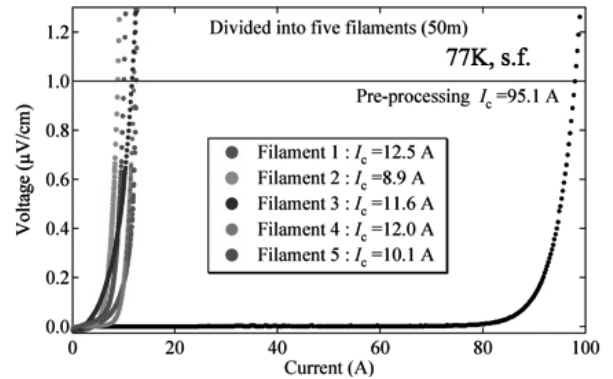


図 2 50m 長の PLD 線材のレーザースクライビング前後の  $I$

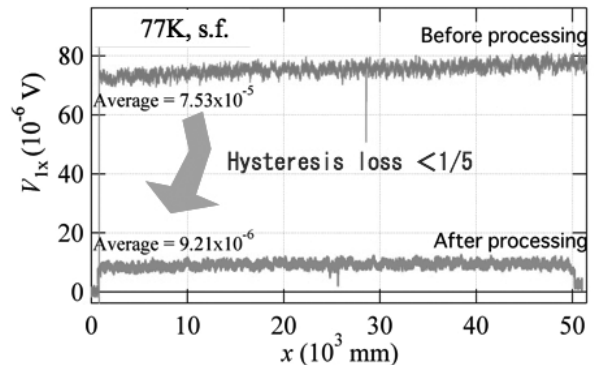


図 3 50m 長 5 分割 PLD 線材のヒステリシス損失の変化

表 1 長尺線材のレーザースクライビング加工の歩留り  
 PET: ポリエステル, PP: ポリプロピレン

線材種類	IBAD	長さ (m)	分割	$I_c$ (A)					最小 $I_c$ × 分割数 (A)	最小 $I_c$ 残留率 (%)	$I_c$ 残留率 (%)	F間平均抵抗 (M $\Omega$ cm)	マスク材	備考	合否	
				加工前	F1	F2	F3	F4								F5
PLD	MgO	11	3	208.5	26.5	14.8	42.6	-	-	44.4	21.3	40.2	6.70	PP	洗浄効果あり	△
PLD	MgO	120	3	105	17.7	33.6	18.2	-	-	53.1	50.6	66.2	1.04	PP	最初の100m越え	○
PLD	MgO	50	5	95.1	12.5	8.9	11.6	12	10.1	44.5	46.8	57.9	0.63	PP	AC-loss ~ (1/5)	○
PLD	MgO	120	3	149.6	15.4	8.3	3.65	-	-	10.95	7.3	18.3	0.80	PP	横断欠陥	×
PLD	MgO	110	3	-	27.7	49.3	51.6	-	-	83.1	55.5	86.0	0.83	PP	切出し後	○
PLD	MgO	50	5	260	-	-	-	-	-	-	-	-	-	PP	剥離により破壊	×
PLD	MgO	38	3	231.7	30.9	62.5	60.3	-	-	92.7	40.0	66.3	0.33	PP	問題なし	○
PLD	MgO	43	3	216.1	51.4	48.6	49.3	-	-	147.9	68.4	69.1	0.33	PP	問題なし	○
PLD	MgO	60	5	293	42.9	49.3	50.3	46.9	16.5	82.5	28.2	70.3	0.61	PP	F5はoriginal edge	○
MOD	MgO	50	5	113.5	25	22.8	18.4	12.2	7	35	30.8	75.2	0.24	PP	MOD長尺の成功	○

\*\*\* 最小  $I_c$  のフィラメント      \*\*\* 問題ある箇所      歩留り (%)      70.0

## TFA-MOD 法による YBCO 線材作製における結晶成長機構

Study on crystal growth of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  coated conductors derived from TFA-MOD method

中岡 晃一, 吉積 正晃, 薄井 友紀江, 和泉 輝郎, 塩原 融 (超電導工学研究所)  
 NAKAOKA Koichi, YOSHIKUMI Masateru, USUI Yukie, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL)  
 E-mail: knakaoka@istec.or.jp

## 1. はじめに

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-y}$  (YBCO) 線材作製法として, 出発原料にトリフルオロ酢酸 (TFA) 塩を用いた金属有機酸塩堆積法 (TFA-MOD 法) は, 非真空プロセスで比較的容易に高い臨界電流密度特性を得ることが可能なため, 線材作製の低コスト化が期待できる手法である。我々は, TFA-MOD 法による YBCO 線材作製において, 原料溶液組成を従来の Y : Ba : Cu = 1.0 : 2.0 : 3.0 (Stoichiometric) から Y : Ba : Cu = 1.0 : 1.5 : 3.0 (Ba-deficient) にすることにより, 臨界電流密度特性の向上およびプロセスウィンドウを広げること成功した [1]。

本研究では TFA-MOD 法において, 原料溶液組成が超電導特性を変化させるメカニズムを明らかにするために, YBCO の結晶成長過程について調べた。

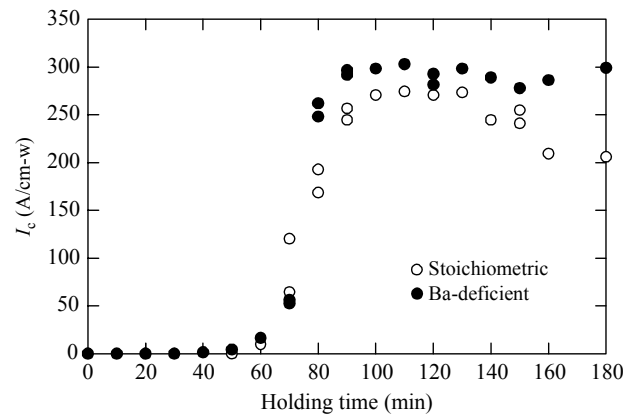
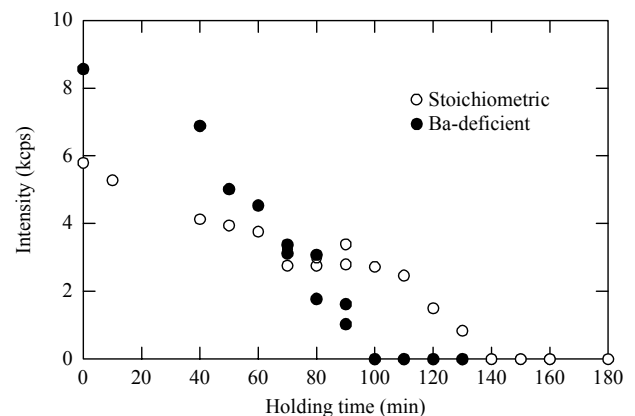
## 2. 実験

Y-, Ba-トリフルオロ酢酸, Cu-2-エチルヘキサン酸を Y : Ba : Cu = 1.0 : 2.0 : 3.0 (Stoichiometric) および Y : Ba : Cu = 1.0 : 1.5 : 3.0 (Ba-deficient) のモル比で有機溶媒に溶解させたものを原料溶液とした。この原料溶液をスピコートにより  $\text{CeO}_2$  (PLD) /  $\text{LaMnO}_3$  (RF スパッタ) /  $\text{MgO}$  (IBAD) /  $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  (イオンビームスパッタ) / ハステロイ™ 金属基板 ( $10 \times 20 \text{ mm}^2$ ) に塗布し, 酸素雰囲気下,  $5^\circ\text{C}/\text{min}$  の昇温速度で,  $300^\circ\text{C}$  から水蒸気 ( $P(\text{H}_2\text{O}) = 3 \text{ kPa}$ ) を導入しつつ  $500^\circ\text{C}$  まで加熱することで Y-Ba-Cu 前駆体膜を成膜した。また, スピコートおよび仮焼成の操作を 5 回繰り返すことで  $0.8 \mu\text{m}$  の膜厚 (YBCO) を得た。この 5 層からなる前駆体膜を  $P(\text{H}_2\text{O}) = 12 \text{ kPa}$ ,  $P(\text{O}_2) = 0.1 \text{ kPa}$  に調整したアルゴン雰囲気下において,  $760^\circ\text{C}$  で本焼熱処理することで YBCO 膜を得た。本研究では, YBCO の結晶成長過程を観察するため, 本焼熱処理時に所定の保持時間で急冷 (クエンチ) 操作を行うことによりクエンチ膜を作製した。

## 3. 結果

本焼熱処理時の保持時間とクエンチ膜の臨界電流 ( $I_c$ ) 特性との関係を図 1 に示す。Stoichiometric および Ba-deficient 原料溶液において, 保持時間 100 min で  $I_c$  値はほぼ最高値に達し, それぞれ 270 および 298 A/cm-w を示した。Stoichiometric 原料溶液を用いた場合, 保持時間をさらに増加させると  $I_c$  特性の著しい低下が見られた。クエンチ膜の XRD 測定 ( $\theta-2\theta$ ) を行い,  $\text{BaF}_2$  の (111) 面の回折強度を保持時間の関数としてプロットしたものを図 2 に示す。保持時間の増加に伴い  $\text{BaF}_2$  回折強度が減少しており, YBCO の形成が進行している分かる。Stoichiometric 原料溶液の場合,  $I_c$  値が最高値に達した 100 min においては, まだ  $\text{BaF}_2$  が存在しており反応途中であることが分かる。一方, Ba-deficient 原料溶液の場合, 同時点で  $\text{BaF}_2$  の回折ピークは消失している。以前の研究より, TFA-MOD 法での YBCO の結晶成長は, ① 未反応物 (酸化フッ化物) や空孔 (ポア) を取り込みながら, 基板からの layer-by-layer 様式でのエピタキシャル成長, ② 水蒸

気と未反応物および未反応物同士による固相反応の 2 段階を経ることが分かっている [2]。クエンチ膜の断面 SEM 観察により, エピタキシャル成長過程における YBCO の layer-by-layer 成長速度を Stoichiometric および Ba-deficient 原料溶液を用いた場合について比較した結果, 両者に違いはなかった。これより, Ba-deficient 原料溶液を用いた場合, エピタキシャル成長段階における未反応物の取り込みが減少するため固相反応過程が殆ど起こらないことが考えられる。また, Stoichiometric 原料溶液においてのみ, XRD 測定により固相反応過程で  $\text{BaCuO}_2$  が形成され,  $I_c$  特性低下に伴い増加する事が分かった。これから, 原料溶液組成により影響を受ける固相反応時には YBCO のみならず  $\text{BaCuO}_2$  相が形成され, これが  $I_c$  特性低下の原因の一つになると考えられる。

図 1. 本焼時の保持時間と  $I_c$  値との関係図 2. 本焼時の保持時間と  $\text{BaF}_2$  (111) 面の回折強度との関係

## 参考文献

1. K. Nakaoka, et al.: Physica C, Vol. 463-465 (2007) p.516
2. J. S. Matsuda, et al.: Physica C, Vol. 412-414 (2004) p.890

## 謝辞

本研究は新エネルギー産業技術開発機構 (NEDO) の委託により実施したものである。