

DI-BSCCO 線材の異方的熱伝導率

Anisotropic thermal conductivity of DI-BSCCO tape

内藤 智之, 藤代 博之 (岩手大); 藤上 純 (住友電工)

NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.); FUJIKAMI Jun (Sumitomo Electric Industries)

E-mail: tnaito@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

超伝導線材をコイルや電流リードとして用いる場合、設計段階で外部からの熱侵入量や内部発熱の排出量を見積もることが不可欠である。従って、熱伝導率は非常に重要なパラメータとなる。これまで、我々はDI-BSCCOテープ[1]単体や複数枚のDI-BSCCOテープをバンドルしたサンプルの熱伝導率を測定してきた[2]。また、前回の学会ではDI-BSCCOテープを用いて製作されたダブルパンケーキコイルの異方的熱輸送特性を報告した[3]。コイル半径方向の熱輸送を詳細に解析するためにはテープ厚さ方向のデータが必要となる。しかしながら、単体のテープ厚は0.22mm程度であることから定常熱流法での測定は困難であった。今回、DI-BSCCOテープを厚さ方向に積層したサンプルを作製し、その熱伝導率を測定した。また、同様の手法でテープ幅方向の熱伝導率も測定した。

2. 実験方法

Fig.1(a)および 1(b)に厚さ方向および幅方向積層サンプルの概略図をそれぞれ示す。積層サンプルは、DI-BSCCO テープのタイプ H を使用してハンダ接合にて作製された。黒色はBi2223フィラメント部分、灰色はAgシース部分をそれぞれ表す。 l はテープ長手方向、 w はテープ幅方向、 t はテープ厚さ方向をそれぞれ表す。熱伝導率は定常熱流法により 6-250 K の温度範囲で測定した。

3. 実験結果および考察

Fig.2に3方向の熱伝導率の温度依存性 $\kappa(T)$ を示す。 l 方向はタイプHテープ単体の $\kappa(T)$ [2]である。 w 方向の $\kappa(T)$ はほぼ l 方向の $\kappa(T)$ と一致した。これは、Bi2223フィラメント部分の熱伝導への寄与が無視出来るほど小さく、 w 方向の熱伝導も l 方向と同様にAgシース部分が担っていることを示している。 t 方向の $\kappa(T)$ は250Kから50K付近までは及び w 方向の $\kappa(T)$ とほぼ同様の振る舞いであった。しかしながら、20K付近で観測された低温ピークは非常に小さかった。また、 t 方向の $\kappa(T)$ の絶対値は及び w 方向に比べて一桁程度小さかった。Fig.2挿入図に200Kの κ 値で規格化した熱伝導率の温度依存性 $\kappa(T)/\kappa(200K)$ を示す。50~250Kの温度領域で3者は良い一致を示した。従って、この温度領域では t 方向でも与えた熱流はAgシース部分を通っていると考えられる。但し、50K以下で t 方向の $\kappa(T)/\kappa(200K)$ は及び w 方向の $\kappa(T)/\kappa(200K)$ から大きくずれており、熱伝導機構が異なる可能性がある。

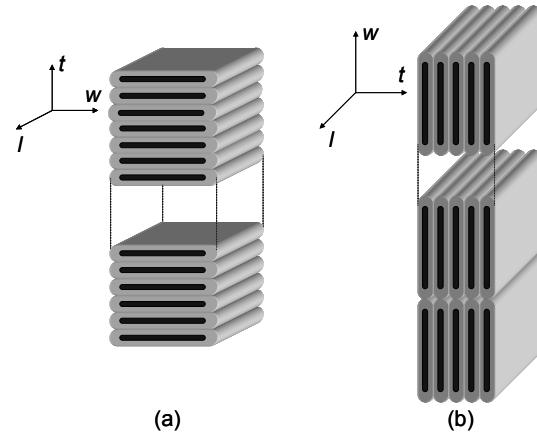


Fig.1 Schematic view of the stacked DI-BSCCO tapes along (a) the thickness [t] direction and (b) the width [w] direction. l represents the length direction. Black and gray regions represent the Bi2223 filaments and Ag region, respectively.

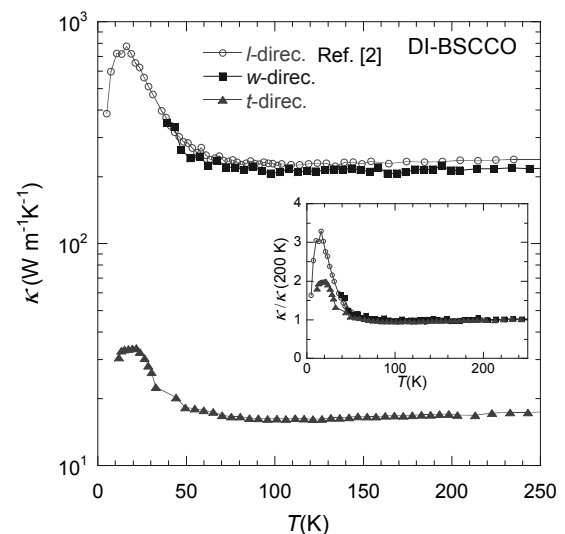


Fig.2 Temperature dependence of the thermal conductivity of the single DI-BSCCO tape (l -direction) [2] and the stacked DI-BSCCO samples (w - and t -directions). Inset shows the temperature dependence of the reduced thermal conductivity $\kappa(T)/\kappa(200K)$ of the same samples shown in the main panel.

参考文献

1. N. Ayai *et al.*: Physica C **468** (2008) 1747.
2. T. Naito *et al.*: Cryogenics **49** (2009) 429; IEEE Trans. Appl. Supercond. **19** (2009) 3034.
3. T. Naito *et al.*: Abstracts of CSJ Conference **81** (2009) 84.

バリア入り Bi2223 線材における垂直磁界下での交流損失低減化

Reduction of AC losses in Bi2223 tapes with resistive barriers in a perpendicular magnetic field

稲田 亮史, 奥村 康裕, 牧原 知秀, 太田 昭男 (豊橋技科大); 李 成山, 張 平祥 (西北有色金属研究院)
 INADA Ryoji, OKUMURA Yasuhiro, MAKIHARA Tomohide, OOTA Akio (TUT); LI Chengshan, ZHANG Pingxiang (NIN)
 E-mail: inada@ee.tut.ac.jp

1. はじめに

我々は、超電導フィラメント間に酸化バリアを導入した低損失 Bi2223 線材の開発に関する研究を進めている。過去の研究により、SrZrO₃ (加工性改善のため Bi2212 を少量混合) バリアを導入しツイスト長 L_t を 5~6 mm 程度に狭小化することで、77 K、垂直磁界下での結合周波数 f_c ($= 1/2\pi\tau_c$, τ_c : 結合時定数) を 300 Hz 以上に向上できることを確認している^[1]。しかしながら、 $L_t < 10$ mm とした際に線材中のフィラメント形状が大きく乱れ、臨界電流密度 J_c が数 kA/cm^2 に低下してしまう問題がある。

本研究では、 L_t の狭小化による J_c 低下を抑制した上で商用周波数よりも十分に高い f_c を得ること目的として、線材作製時のバリア導入厚、線幅の狭小化およびツイスト加工に関する改良を試みた。作製したバリア線材の通電 J_c を過去の線材と比較すると共に、垂直磁界下での損失低減効果を評価した。

2. 実験および結果

Powder-in-tube 法により SrZrO₃ (Bi2212 を 20wt% 混合) をバリア材とする 19 芯線材を作製した。横断抵抗の向上には、バリア材をある程度厚く導入し、完成試料でのバリアの連続性を確保する必要がある。一方で、バリアが厚すぎると線材全体としての加工性が低下し、ツイストした際にフィラメント形状が大きく乱れ、深刻な J_c 低下を引き起こすと考えられる。本研究では、線材作製において①バリア塗付厚を従来の 100 μm から 50~60 μm 程度に低減、②線幅の狭小化 ($= 2.7$ mm)、③ツイスト加工時の中間熱処理の導入、といった対策を試みた。

作製したバリア線材 (断面寸法 2.7 mm \times 0.24 mm) の J_c (77 K、自己磁界下) のツイスト長 L_t 依存性を Fig. 1 に示す。比較のため、過去に作製したバリア線材 (線幅 3.1 mm、バリア塗付厚 100 μm) の結果を合わせて示す^[1]。 L_t の大小に関係なく、 J_c は従来試料よりも向上しており、非ツイスト試料で 18 kA/cm^2 、 $L_t = 4\sim 7$ mm のツイスト試料で 12~14 kA/cm^2 が得られた。断面観察の結果、従来試料で発生していたフィラメント形状の乱れやブリッジングが大きく抑制されていることが確認され、これが通電特性の向上に寄与していると考えられる。

$L_t = 4$ mm のバリア線材における、1 周期当たりの垂直磁界下での交流損失 Q_m の周波数依存性 (77 K、5 mT) を Fig. 2 に示す。図より、損失中に含まれる結合損失 Q_c が極大を示す結合周波数 f_c は 260 Hz 程度と見積もられる。これまでの Bi2223 線材の交流特性向上に関する研究において、 $f_c > 250$ Hz (垂直磁界下) と $J_c > 10^4$ A/cm² を同一試料で達成した報告は我々の知る限り皆無であり、重要な結果と考える。Fig. 3 には、45 Hz にて測定した規格化損失 Q_m/I_c の垂直磁界振幅依存性を示す。比較のため、線幅 3.7 mm および 2.7 mm の非ツイスト線材の測定結果を合わせて図中に示す。 $f_c = 260$ Hz の達成に伴い、 $L_t = 4$ mm のバリア線材の損失は、5 mT 以上の範囲において同一線幅 (2.7 mm) の非ツイスト試料と比較して 40~50% 程度低減されている。更に、3.7 mm 幅試料と比較した場合、線幅低減の効果が重畳することで、10 mT 以上の範囲において 55~65% 程度と顕著な損失低減が確認された。

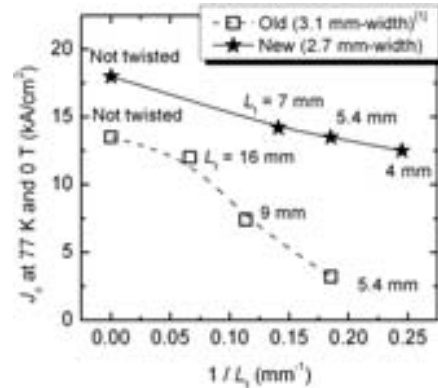


Fig. 1. Critical current densities J_c at 77 K and 0 T for barrier tapes plotted against the inverse of twist pitch lengths L_t .

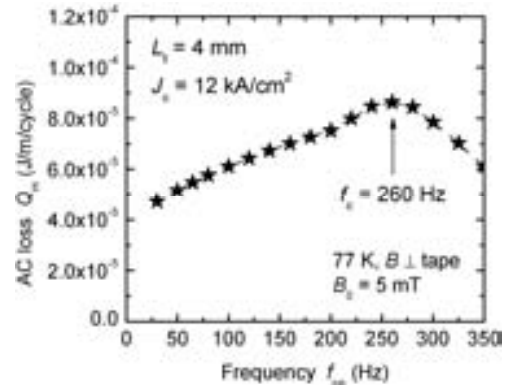


Fig. 2. Frequency dependence of AC losses Q_m at 5 mT for barrier tape with $L_t = 4$ mm.

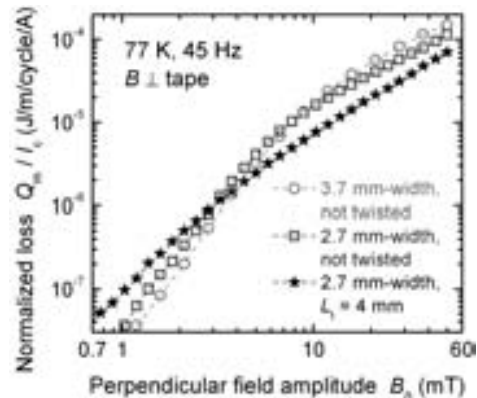


Fig. 3. Normalized AC losses Q_m/I_c at 45 Hz for barrier tape with $L_t = 4$ mm. The data for non-twisted tapes with their widths of 3.7 mm and 2.7 mm are also shown for comparison.

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 (No. 20686020, No. 22560270)、(財)東電記念科学技術研究所研究助成および(財)中部電力基礎技術研究所研究助成 (No. R-20302) の支援により実施された。

参考文献

[1] R. Inada, et al.: Supercond. Sci. Technol. **22** (2009) 085014.

加圧焼成法によって作製された Bi-2223/Ag テープ材の 長手方向均一性と E - J 特性との対応

Correlation between Longitudinal Homogeneity and E - J Characteristics in Bi-2223/Ag Tape Fabricated by CT-OP Process

川口 鉄平, 東川 甲平, 井上 昌睦, 木須 隆暢(九大);

菊地 昌志, 小林 慎一, 中島 隆芳, 林 和彦, 佐藤 謙一(住友電工)

KAWAGUCHI Teppei, HIGASHIKAWA Kohei, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);

KIKUCHI Masashi, KOBAYASHI Shin-ichi, NAKASHIMA Takayoshi, HAYASHI Kazuhiko, SATO Ken-ichi (SEI)

E-mail: t_kawaguchi@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

ビスマス系高温超伝導線材は、加圧焼成法の確立により、その電流容量と歩留まりが飛躍的に向上している^[1]。一方、同線材に関しては、材料性能の観点からは更なる性能向上の可能性が残されており、その知見を得る上で臨界電流制限因子の解明が重要な課題となっている。そこで本研究では、走査型ホール素子磁気顕微鏡システムを用いて、異なる仕様の Bi-2223 線材に対して電流分布評価を行い、四端子法で得られる E - J 特性との関係について検討した。

2. 実験

測定対象とした線材の諸元を Table 1 に示す。表中の I_c と n 値は、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ を電界基準として 77 K 自己磁界下で四端子法により得られたものである。どの線材も同程度の I_c 値を有しているが、 n 値が若干異なっていることに注意を要する。これらの線材に通電した際の自己磁界分布を走査型ホール素子顕微鏡によって測定し、ビオ・サバール則の逆変換によって電流分布をシート電流密度分布として評価した。

3. 結果と考察

測定温度 80.5 K において 100 A 通電した際に得られたシート電流密度分布を Fig. 1 に示す。なお、 x 軸が線材の長手方向、 y 軸が線材の幅方向に対応している。これまでに報告してきたように^[2]、どの線材に関しても線材幅方向には分布が存在するが、長手方向にはかなり均一な電流分布が得られている。一方、上記電流密度ベクトルの向きをプロットしたものを Fig. 2 に示す。すなわち、同図は x 軸を基準とした電流密度ベクトルの角度の分布であり、電流の迂回成分を表現している。上記では線材間で同様に見えた長手方向の均一性も、実は線材ごとに電流の迂回の頻度がかかなり異なっていることがわかる。ここで注目すべき点は、電流迂回の頻度が低い線材ほど、 E - J 特性における n 値が高くなる傾向が見られることである。従って、四端子法で得られている I_c 値は線材断面内の各位置における超伝導フィラメントの結晶性だけでなく、長手方向の局所不均一性の影響を反映した結果であり、本研究によればその両者を切り離して臨界電流の制限因子を議論することができる。これらは、線材の更なる高 I_c 化の指針を決定する上で極めて有用な情報であると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構 (JST) の戦略的イノベーション創出推進事業 (S-イノベ) における研究課題「次世代鉄道システムを創る超伝導技術イノベーション」の支援を得て行ったものである。

参考文献

- [1] N. Ayai et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 17 (2007) pp. 3075-3078.
[2] Y. Honda et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 81 (2009) p. 81.

Table 1 Specifications of the samples

	I_c (@1 $\mu\text{V}/\text{cm}$, 77 K, s.f.)	n -value
Sample 1	178 A	18.5
Sample 2	186 A	18.4
Sample 3	189 A	19.6
Sample 4	177 A	20.4

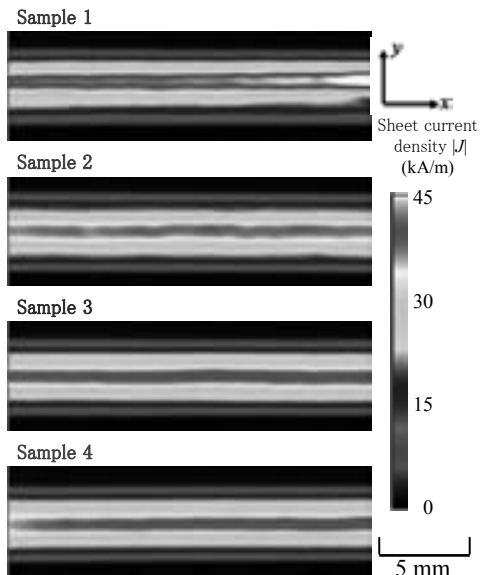


Fig. 1. Absolute value of sheet current density.

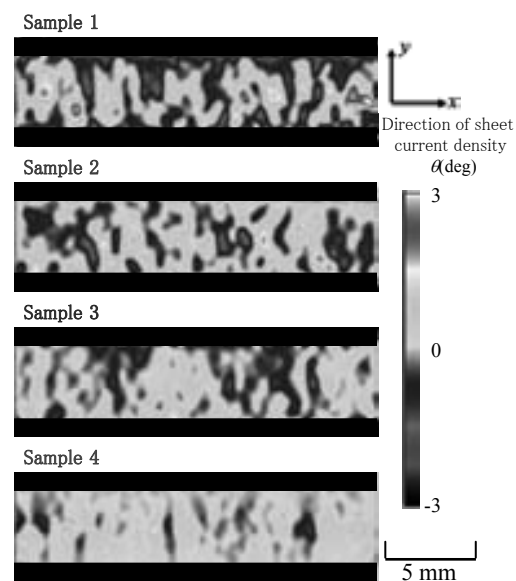


Fig. 2. Direction of sheet current density.

600A/cm-w 級厚膜化 GdBCO/IBAD コート線材の空間均一性と磁場中電流輸送特性

Spatial homogeneity and in-field current transport properties in 600 A/cm-w class thick GdBCO/IBAD coated conductors

木須 隆暢、井上 昌睦、東川 甲平、Arkadiy Matsekh, Rene Fuger (九大); 飯島 康裕、柿本 一臣、齋藤 隆(フジクラ); 淡路 智、難波 雅史、渡辺 和雄 (東北大); 和泉 輝郎 (ISTEC)

KISS Takanobu, INOUE Masayoshi, HIGASHIKAWA Kohei, MATSEKH Arkadiy, FUGER Rene (Kyushu Univ.); IJIMA Yasuhiro, KAKIMOTO Kazuomi, SAITO Takashi (Fujikura Co.); AWAJI Satoshi, NAMBA Masafumi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); IZUMI Teruo (ISTEC)
E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系高温超伝導線材の実用化のためには、磁場中での高い臨界電流 (I_c) 値の実現と共に、低交流損失化のための細線化加工に耐え得る優れた均一性の実現が不可欠である。電流量増大のためには臨界電流密度 (J_c) の向上と共に、超伝導層の厚膜化による有効断面積の増大が重要な因子となる。しかしながら、従来手法では、厚膜の増大と共に J_c 値は低下し、従って I_c 値の増大は飽和することが知られている。フジクラの Iijima 等のグループは、パルスレーザ蒸着法による成膜条件の改善により、この厚膜時の J_c 劣化の問題を改善することに成功し、 $2.5\mu\text{m}$ の GdBCO 膜を有するコート線材を R2R 方式により長尺に亘って安定して製造できることを示した^[1]。本線材の 77K、自己磁場中の I_c 値は 600 A/cm-w 程度の値を有する。

本研究では、本線材の臨界温度ならびに臨界電流密度の空間均一性を μm スケールの空間分解能を有する低温レーザ顕微鏡法によって評価した。

2. 実験結果及び考察

1cm幅の IBAD 基板上に堆積させた $2.5\mu\text{m}$ 厚の GdBCO 層を有する高温超伝導テープ線材中に、幅 $100\mu\text{m}$ 長さ 1mm のマイクロブリッジを形成し、測定試料とした。77K 自己磁界におけるブリッジの臨界電流値を四端子法によって測定した結果、 620 A/cm-w (1cm 幅の換算値) であった。

Fig. 1 に、室温で得られたレーザスポット照射に伴うゼーベック電圧応答の 2次元像を示す。均一な応答が得られており、局所欠陥等は存在しないことが分かる。紙面の都合上グラフは掲載できないが、位相応答も一定の値を示しており、ブリッジ全体で単一ドメインを有する、均一な組織を有する事が確認できた。

Fig. 2 に超伝導転移領域での低温レーザ顕微鏡像を示す。一定電流バイアス時のレーザ照射に伴う微小温度変動 (ΔT) に対する、電圧応答 (ピーク電圧値で規格化) を示す。即ち、レーザ照射位置での抵抗の温度微分係数 $\Delta R/\Delta T$ の温度依存性: 温度に対して積分すれば局所的な $R-T$ 転移曲線を得る。Inset はブリッジ中の観測位置を示す。臨界温度 T_c の差異は 0.2K 以下であることが分かる。

Fig. 3 に 84K 、 1T の外部磁界下における磁束フロー損失のバイアス電流依存性を、低温レーザ顕微鏡により可視化した結果を示す。磁束フローは試料内でほぼ均一に発生しており、臨界電流の面内分布が均一であることを示している。

3. まとめ

本研究では、 620 A/cm-w の臨界電流値を有する GdBCO 厚膜線材の超伝導特性の空間均一性ならびに高磁場下の臨界電流特性を、それぞれ低温レーザ顕微鏡ならびに四端子法によって調べた。臨界温度の空間分布を調べた結果、面内の T_c 分布は 0.2K 以内の優れた均一性を有していることが示された。また、高磁場下の磁束フロー損失分布を観測した結果、従来法に比べ I_c の空間均一性も飛躍的に向上しており、細線化加工に問題となる電流阻害因子の頻度が大きく減少している事が明らかとなった。当日は、 27T までの高磁場領域、 $20\sim 77\text{K}$ の温度範囲における、四端子法による電流輸送特性の測定結果についても紹介する。

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。

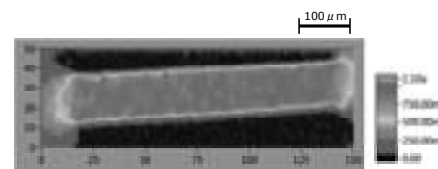


Fig. 1. Laser induced thermoelectric (LITE) image showing homogeneous crystal structure in the bridge.

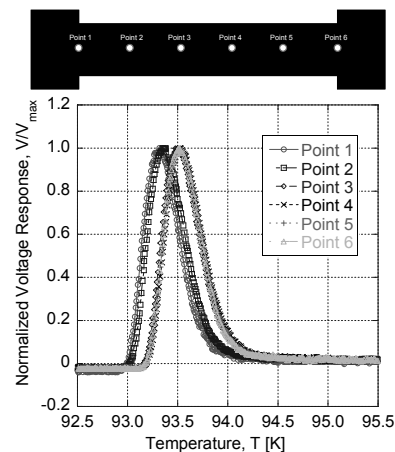


Fig. 2. Temperature dependence of normalized $\Delta R/\Delta T$ around superconducting transition obtained by the low temperature laser scanning microscopy (LTLSM). Inset shows measured points in the bridge.

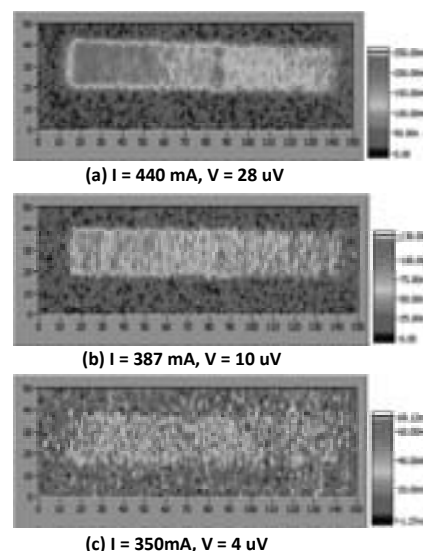


Fig. 3. Spatial distribution of flux flow dissipation obtained by the transport LTLSM at 84 K and 1 T of external field.

参考文献

- [1] 柿本一臣ほか、第 81 回 2009 年度秋季低温工学・超電導学会、2B-a02、2009 年 11 月。

直流ならびに交流通電時における RE-123 線材銀拡散接合部の 3次元電流分布評価

Three-Dimensional Current Distribution at Silver Diffusion Joint of RE-123 Coated Conductor Carrying DC and AC Transport Current

東川 甲平, 本田 貴裕, 井上 昌睦, 木須 隆暢 (九大); 筑本 知子, 坂井 直道, 和泉 輝郎 (ISTEC); 岡元 洋 (九州電力)

HIGASHIKAWA Kohei, HONDA Yoshihiro, INOUE Masayoshi, KISS Takanobu (Kyushu Univ.);
CHIKUMOTO Noriko, SAKAI Naomichi, IZUMI Teruo (ISTEC); 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) 線材の機器応用に際しては、その規模やメンテナンスを考慮すると線材間の接続技術の確立が不可欠となる。一方、同技術の確立のためには、線材接続部の電磁現象の把握が不可欠であり、線材面内の電流分布のみならず特に線材間の電流トランスファーまで評価する必要がある。そこで本研究では、銀拡散接合法によって接続された RE-123 線材を対象に、上記のような 3 次元電流分布を直流通電時ならびに交流通電時に対して評価した。

2. 方法

測定対象となる試料の写真を Fig. 1 に示す。同試料は、5 mm 幅と 2 mm 幅の GdBCO 線材が銀拡散接合法^[1]によって接続された構成となっている。同試料に通電した際の自己磁界分布を走査型ホール素子顕微鏡を用いて測定し、Biot-Savart 則の逆問題を解くことで同試料内の電流分布を 2 次元シート電流密度分布として評価した。また、得られたシート電流密度分布に含まれる情報から線材間の電流トランスファーを評価した。

3. 結果・考察

試料温度 80 K, 25 A の直流通電時において得られたシート電流密度分布を Fig. 2 に示す。なお、同分布は両線材の電流分布の重ね合わせに対応する。一見、5 mm 幅の線材から 2 mm 幅の線材への電流遷移は 5 mm 幅線材の終端付近で集中して行われているように見受けられる。一方、同分布では $y = \pm 1$ mm 付近において起伏が存在し、その起伏が x 方向に進むに従って大きくなっていることに注意を要する。実は、予め行っている理論解析によれば、両線材の電流分担割合によってこの起伏の大きさが変化することがわかっている^[2]。すなわち、この原理によれば、両線材の電流分担割合を線材長手方向の各位置において評価することができる。その結果を Fig. 3 に示す。5 mm 幅線材に流れていた電流が接合部において 2 mm 幅線材に線形的に遷移しており、両線材間の電流のやり取りが接合長のほぼ全長を通して均一に行われていることがわかる。また、別途 3 次元有限要素法による数値解析も行っており、その結果を Fig. 4 に示す。両線材の電流分布の重ね合わせが Fig. 2 に示す実験結果を上手く表現できており、また両線材間の電流トランスファーについても上述の状況が再現されていることがわかる。以上から、本研究によって本試料における線材間接続が良好であることがわかり、またその電磁現象を議論するためのモデルを構築することに成功したと言える。発表当日には、交流通電時の結果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] J. Kato et al.: Abstracts of CSJ Conference, Vol. 73 (2005) p. 241.
[2] K. Higashikawa et al.: The 2010 Annual Meeting Record I.E.E. Japan, No. 5 (2010) p. 144.

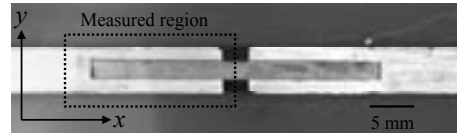


Fig. 1. Optical micrograph of the sample.

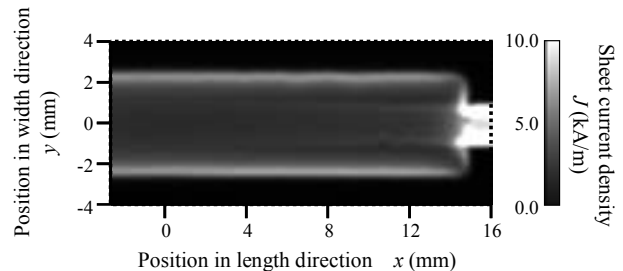


Fig. 2. Sheet current density distribution obtained by scanning Hall-probe microscopy at the transport current of 25 A.

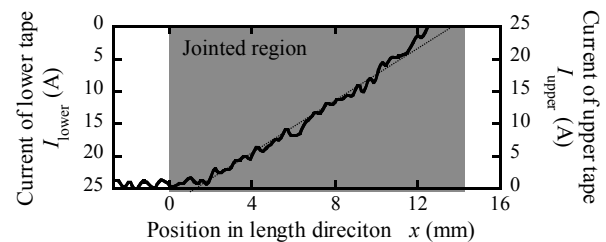


Fig. 3. Current transfer between the two tapes estimated by the sheet current density distribution shown in Fig. 2.

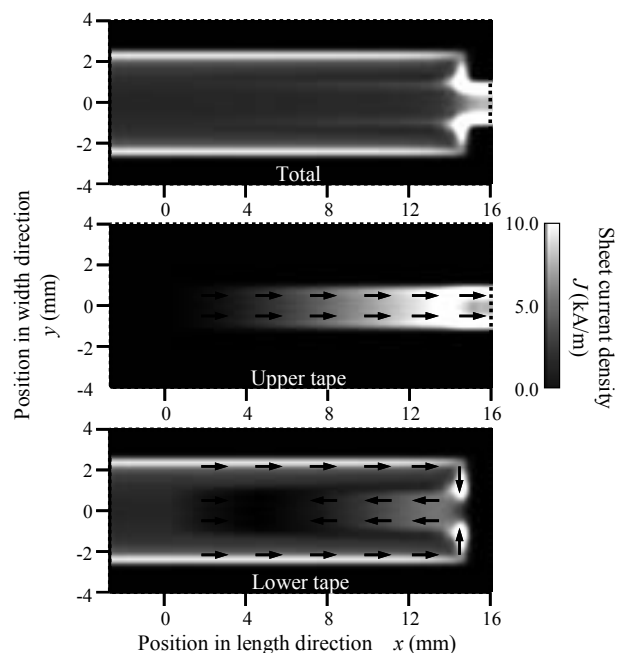


Fig. 4. Sheet current density distributions in total, upper tape and lower tape obtained by 3D finite element method.

永久磁石法による YBCO テープ線材の J_c 分布測定

Measurement of critical current density distribution of YBCO coated conductors by permanent magnet method

服部一輝 梅津一也 山田博信 斎藤 敦 大嶋 重利 高山彰優 神谷淳 (山形大学) 生野壮一郎 (東京工科大)
 HATTORI Kazuki, UMETSU Kazuya, YAMADA Hironobu, SAITO Atsushi, OHSHIMA Shigetoshi (Yamagata Univ.)
 TAKAYAMA Teruo, KAMITANI Atsushi (Yamagata Univ.) IKUNO Soichiro (Tokyo Univ. Tech.)

E-mail: ohshima@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

YBCO テープ線材は現在、超伝導応用の主力材料として、世界的に研究開発がおこなわれている。すでに、幅 1cm の長尺テープ線材で、臨界電流が 300A を超えるものが報告されている。このような長尺のテープ線材を市場に出すときには、長尺線材の J_c を保障しなければならない。その保障のためには、非破壊で、長尺線材の J_c を評価することが必要である。現在、磁化測定法やホール効果法が利用されているが、測定時間や精度等で問題がある。我々は、永久磁石法で超伝導薄膜の J_c を評価できることを報告してきた。今回は、YBCO テープ線材の J_c を非破壊で精度よく測定できることを確認したので報告する。

2. 装置の概要

Fig.1に測定原理を、Fig.2 に装置の写真を示す。原理は、極めて単純で、永久磁石を超伝導テープ線材に近づけ、その時磁石に働く力を測定すればよい。そうすると、図1(b)のようなグラフが得られる。磁石と超伝導体の距離がゼロとなるところの力を求めると、その値が J_c に依存する[1-2]

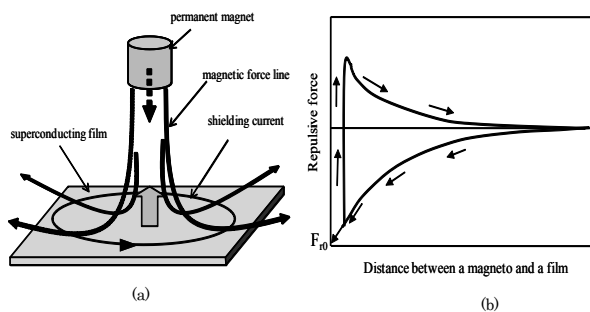


Fig.1. Schematic drawing of J_c measuring method using a permanent magnet. (a) model (b)Magnetic force vs. distance between a permanent magnet and HTS film surface.

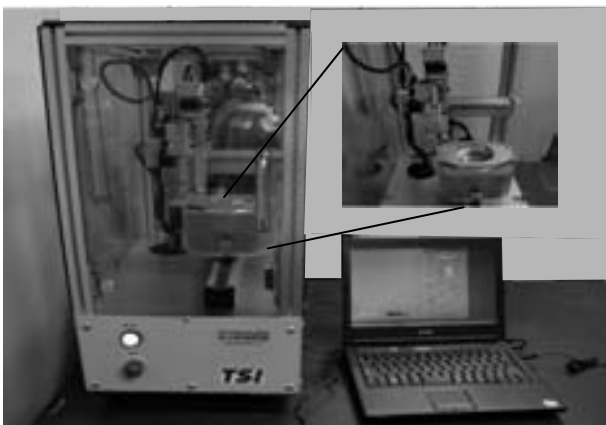


Fig.2. Photo of the permanent magnet method system

3. 実験結果

Fig.3 に、Super Power 社の幅 12mm,長さ 50mm の YBCO テープ線材の J_c 測定結果を示す。超伝導層は、厚み 1ミクロンの YBCO であり、 I_c は公称300A である。 J_c に変換すると $2.5\text{MA}/\text{cm}^2$ である。測定間隔を 10mm,20mm,50mm と変えて測定したが、結果はほとんど同じであった。テープ線材の大部分の領域の J_c は、 $3.3\text{MA}/\text{cm}^2$ 以上であるが、一部 J_c の小さい領域($2.6\text{MA}/\text{cm}^2$ 以下)がある。これがテープ線材の J_c を律則しているものと思われる。尚、0~5mm,45~50mm の測定領域において、 J_c が小さくなるように見えるのは、端部効果によるもので、本質的ではない。

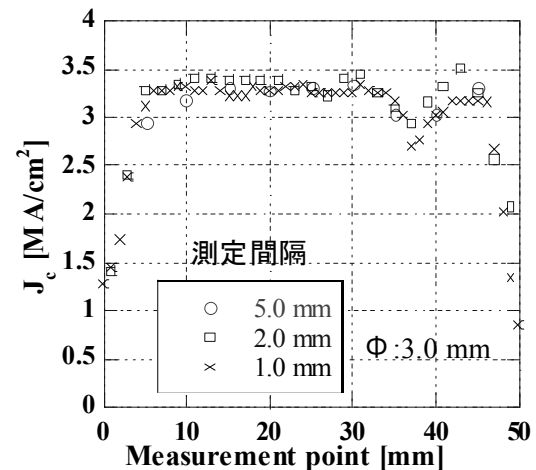


Fig.3 J_c distribution of HTS coated conductor measured by permanent magnet method.

4. まとめ

永久磁石を用いた J_c 評価法を用いて、YBCOテープ線材の J_c 分布を測定した。その結果、YBCOテープ線材の J_c を測定できること、また、 J_c の小さい領域を検出できることが明らかとなった。現在は、磁石を上下させて力を測定後、試料を移動するという手法を用いているので、測定スピードはそれほど速くない。しかし、磁石をテープ線材上に固定し、テープを移動しながら力を測定する手法が可能ならば、より早い測定が可能となる。その検討については、当日報告する。

参考文献

1. S.Ohshima, K.Takeishi, A.Saito, M.Mukaida, Y.Takano, T.Nakamura, T.Suzuki, M.Yokoo." A Simple Measurement Technique for Critical Current Density Using a Permanent Magnet" IEEE Trans. Appl. Super. 15 (2005) 2911-2914
2. S.Ikuno, T.Takayama, A. Kamitani, K.Takeishi, A.Saito, S..Ohshima," Analysis of Measurement Method for Critical Current density by Using permanent Magnet" IEEE Trans. Appl. Super. 19 (2009) 3750-3754

ピックアップコイル群によるマルチフィラメント HTS 模擬線材の電流分布測定 Measurement of AC current distributions in multifilamentary HTS model tapes by a pickup coil array

宮原 和矢, 永田 広大, 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)
 MIYAHARA Kazuya, NAGATA Koudai, HIRAYAMA Tadashi, KAWABATA Shuma, KAWAGOE Akifumi,
 SUMIYOSHI Fumio (Kagoshima University); IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (SRL-ISTEC)
 E-mail:k2590086@kadai.jp

1. はじめに

交流用高温超伝導機器の実用化のためには、機器の巻線に使用される HTS 線材の低損失化が必要であり、そのためにスクライビング加工によるマルチフィラメント 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、この低損失加工された 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場分布を測定し、その結果から数値計算により電流分布を求める[1]。今回は電流算出プログラム的高速化による電流算出精度の向上を試みた。また、電流算出精度の向上のために、ピックアップコイル群の校正精度の改善やピックアップコイル群のコイル構成についても検討した。

2. マルチフィラメント HTS 模擬線材とピックアップコイル群

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 Cu テープ線材または 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 μ 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 ϕ 40 μ m の絶縁 Cu 線で紙製のポピ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う。

3. 測定磁場分布からの電流算出方法

本測定法では、測定磁場分布を使って、電流分布を以下に示す手順で求める。まず、線材断面を幅方向に分割し、次に、分割したこれらの線材に電流分布を与え、それぞれの電流分布パターンに対する磁場分布を計算する。計算した磁場分布と測定した磁場分布とを最小二乗法を用いて比較して電流分布を求める。今回は電流分布パターンの発生方法を変更して計算の高速化を図り、より細かな電流分布パターンまで計算できるようにすることで電流算出精度の向上を試みた。

4. 計算結果および測定結果

Fig.1 は 5 本のフィラメントから成る HTS 模擬線材の磁場分布を誤差なしで測定できたと仮定した場合の電流算出結果を示したものである。フィラメント内の電流分布も得られるように、この計算ではフィラメント毎に電流要素を 3 個配置した。横軸は電流値分割数であり、分割数が大きいほど発生させる電流分布を細かく表現できることに対応している。縦軸は数値計算により算出した各電流要素の電流値と、電流要素に事前に与えた電流値(設定電流値)との誤差である。プロット点は算出した電流要素の電流値のうち設定電流値との誤差が最大のものを

の 4 つの通電パターン毎に表示したものである。電流算出プログラムの改良により、プログラムによる算出誤差はこれまでの 10%程度から 2%程度にまで低減した。

Fig.2(a)は、2mm 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.2(b)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。同図より測定誤差は 10%程度であることがわかる。現状の測定精度を向上させるために、ピックアップコイル群の校正精度の改善やコイル群の形状についての検討を現在進めている。

謝辞

本研究は「イットリウム系超伝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.81(2009) p.6

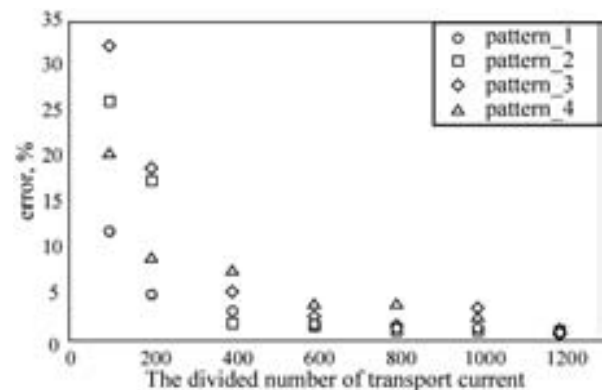


Fig. 1 Calculated results of current distributions.

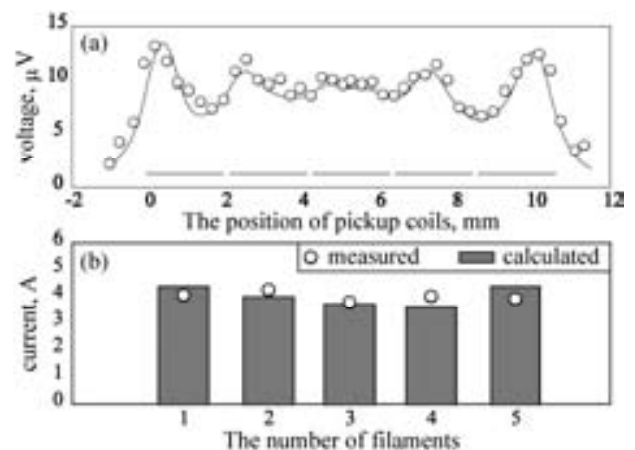


Fig. 2 Measured field distributions and calculated current distributions.

Magnetoscan 法による超伝導バルクの臨界電流密度分布測定

 J_c profile measurement on superconducting bulk by Magnetoscan method

菊池康晃、半田拓也、内藤智之、藤代博之(岩手大)

KIKUCHI Yasuaki, HANDA Takuya, NAITO Tomoyuki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ)

E-mail: y.k.changemysself@hotmail.co.jp

1.はじめに

超伝導バルクの臨界電流密度(J_c)は磁化測定によって決定するのが一般的だが、バルク体の切断が必要となる。Eistererらにより提案された Magnetoscan 法は、ホールセンサと永久磁石を使用して非破壊でバルク表面近傍の相対的な J_c 分布を調べることができる[1]。本研究では Magnetoscan 法の装置を立ち上げ、装置及び測定条件の最適化を行ったので報告する。さらに、パルス着磁後の超伝導バルクの捕捉磁場分布と Magnetoscan 信号との比較を行い議論する。

2.実験方法

図1に装置のセンサ部の概念図を示す。直径6mm、高さ10mm、磁束密度430mTのNdFeB永久磁石と、active area 0.05mm×0.05mmのホールセンサを使用した。図2に示すように直径45mm、高さ1.3mmの半円形超伝導バルクに欠陥を模擬するため、幅0.8mm深さ1.3mmの溝をV字型に入れた。液体窒素でバルクを冷却後、センサ部の永久磁石がホールセンサより先行するようにピッチ0.5mmでXY面内をスキャンした。永久磁石の中心からホールセンサの中心までの距離をX、ホールセンサからバルクまでの距離をZとし(図1)、最適条件を検討した。X、Zの最適条件を決定した後、捕捉磁場分布の分かっている厚さ5mmの超伝導バルクに対して Magnetoscan を行いパルス着磁分布との比較を行った。

3.結果と考察

図2に、最適条件X=6.4mm、Z=0.25mmでの77Kにおける信号分布と(上)と各Y値における Magnetoscan 信号のX依存性(下)を示す。上図において、V字溝の形状を確認することが出来た。下図において、ピークになっているところが、 J_c が低い場所であり、バルクのエッジでは本質的に J_c が低いためピークが存在する。V字擬欠陥では、Zehetmayer らの論文[1]で示されたように、欠陥にピークとディップが存在した。

図3に直径45mm、厚さ5mmの超伝導バルクに比較的弱いパルス磁場(2.8T)印加した場合の捕捉磁場分布と Magnetoscan 信号分布を示す。Magnetoscan 信号が強いほど J_c が弱いことを示しているが、成長時に種をセットした部分の信号が強くと J_c が低いことを確認した。このバルクは選択的に磁束が侵入・捕捉した左上部が J_c が低いことが予測されるが、Magnetoscan 信号との対応は今のところ認められない。この原因は、Magnetoscan 信号はバルク表面下0~1mmからの信号であるため、さらに深い位置のピン止め中心が磁場捕捉に効いているためと思われる。現在、2つの超伝導体ブロック間に gap

を挟み、Magnetoscan 信号の発生形状の測定を行っており、講演ではそれらの結果も併せて報告する予定である。

参考文献

- [1] M Zehetmayer, M Eisterer and H W Weber *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **19** (2006) S429-S437.

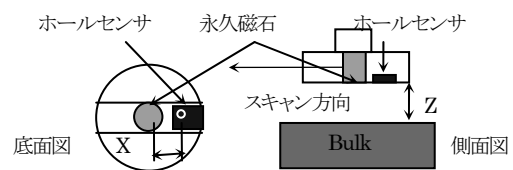


Fig. 1 Setting of Hall sensor and permanent magnet for the Magnetoscan technique.

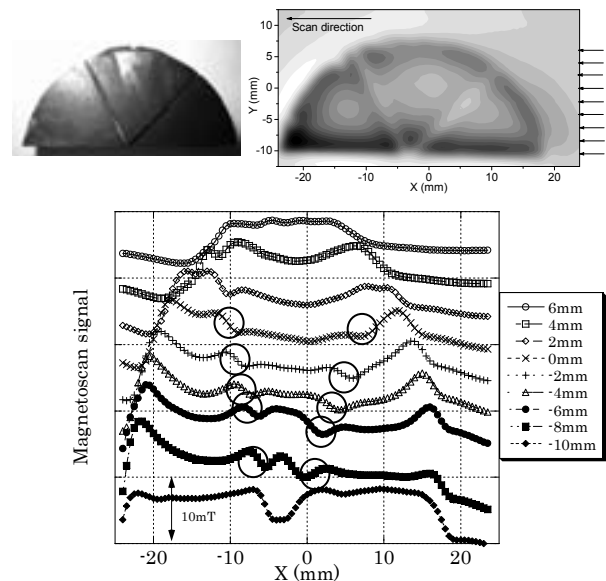


Fig. 2. Magnetoscan profiles at 77 K on the superconducting bulk with V-shaped ditch.

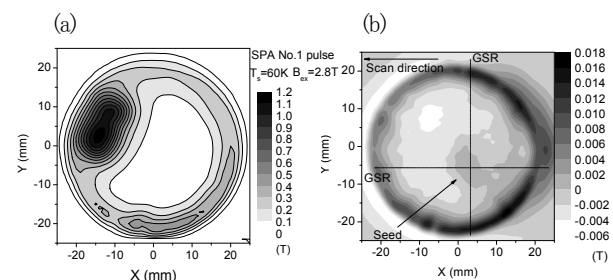


Fig.3. (a) The trapped field profile on the superconducting bulk 5 mm in thickness after applying pulse field of 2.8 T at 60 K. (b) Magnetoscan profile for the same bulk at 77 K.

二層超電導電力ケーブルにおける交流損失の解析的モデル

Analytical model of the ac losses in power cables with two-layer superconducting tapes

馬渡 康徳(産総研); Alexis P. Malozemoff (AMSC)
 MAWATARI Yasunori (AIST); MALOZEMOFF Alexis P. (AMSC)
 E-mail: y.mawatari@aist.go.jp

1. はじめに

高温超電導テープ線材を用いる電力ケーブルは、多数の超電導テープ線材が円筒フォーマの周囲に多層に並列して配置された構造をもつ。このような多層超電導電力ケーブルにおける交流損失の振舞を理解するためには、多層に巻かれた超電導テープ線材における層同士の電磁相互作用を説明することが重要である。

本研究では、このような二層超電導電力ケーブルの交流損失を解析するための簡単なモデルを考案した。外層と内層の電磁相互作用について簡単な仮定を設けて、二層電力ケーブルの問題を単層電力ケーブルの問題に帰着させ、超電導テープ線材に生じる交流履歴損失について臨界状態モデルを基に理論的考察を行った。

2. 二層超電導電力ケーブル状導体の断面積

Fig. 1 に、二層電力ケーブルを模擬したモデル導体の断面図を示す。超電導テープ線材は平坦で、簡単のため長手(紙面垂直)方向には直線状で無限に長いとして、螺旋巻の効果を無視する。導体は内層と外層の二層に配置した超電導テープ線材で構成される。内層におけるパラメータは、線材が接する円筒面の半径を R_1 、超電導テープ線材の幅を $2w_1$ 、線材数を n_1 、線材エッジ間の距離(ギャップ)を $2g_1$ 、線材の超電導層の厚みを d_1 、および臨界電流密度を j_{c1} とする。外層におけるパラメータも同様に、それぞれ R_2 、 $2w_2$ 、 n_2 、 $2g_2$ 、 d_2 、および j_{c2} とする。これらの構造パラメータは幾何学的な制約により全てが独立ではなく、 $n_k \gg 1$ の場合に $2g_k \approx 2\pi R_k/n_k - 2w_k$ を満たす。線材内の超電導層の厚み d_k は、 R_k 、 $2w_k$ 、および $2g_k$ に比べて十分小さいものとする。臨界電流密度 j_{ck} は一定とする臨界状態モデルに基づいて、超電導層の履歴損失による交流電流損失を求めた。

内層、外層に流れる交流輸送電流の振幅をそれぞれ I_1 、 I_2 とし、内層、外層における交流損失をそれぞれ Q_1 、 Q_2 とすると、二層ケーブル状導体全体に流れる交流輸送電流振幅は $I = I_1 + I_2$ 、導体全体の交流損失は $Q = Q_1 + Q_2$ で与えられる。

3. 二層超電導電力ケーブル状導体の解析モデル

Fig. 1 のような二層超電導電力ケーブル状導体における電流・磁場分布を考えるには、内層と外層の電磁相互作用を考慮しなければならない。一般に、中空円筒状導体に流れる電流により、導体の外側に磁場が生じる。二層電力ケーブル状導体においても同様に、内層に流れる電流 I_1 による磁場により外層は大きな影響を受けるが、外層に流れる電流 I_2 が内層に及ぼす影響は比較的小さいと考えられる。

そこで、内外層の電磁相互作用を単純化して、次のようなモデルを考える。すなわち、内層電流 I_1 により生じる磁場を導体中心軸においた線電流 I_1 による磁場とみなして、内層が外

層に及ぼす影響を考慮するが、外層が内層に及ぼす影響は無視する。このモデルは、内外層が十分離れていれば良い近似となると考えられるが、実際の多層超電導電力ケーブルにおいて層間の距離は導体半径に比べて十分小さいので、このモデルの妥当性は慎重に検証しなければならない。

4. 二層超電導電力ケーブル状導体の交流損失

このモデルによれば、内層における交流損失 Q_1 は、外層の存在を無視して電流 I_1 を運ぶ単層電力ケーブル状導体の交流損失として求められる。一方、外層における交流損失 Q_2 は、中心軸にある線電流 I_1 の影響を考慮しつつ、電流 I_2 を運ぶ単層電力ケーブル状導体の交流損失として求められる。こうして、二層電力ケーブル状導体の問題が、文献[1-3]で解析された単層電力ケーブル状導体の問題に帰着され、交流損失 $Q = Q_1 + Q_2$ が解析的に求められる。

文献[1]の解析手法を用いて輸送電流が臨界電流より十分小さい場合の損失を求めた結果、外層の損失 Q_2 は、外層電流 I_2 を見かけの電流 $I_{2,app} = I_2 + c_{21} I_1$ と置き換えた単層ケーブル状導体の損失と等価であることがわかった。ここで c_{21} は、外層の構造パラメータで決まる係数で、一般に $0 < c_{21} < 1$ の範囲にある。輸送電流が臨界電流より十分小さい場合の交流損失は電流振幅の 4 乗に比例するので、内層の影響を考慮する場合($I_1 = I_2$)の外層における損失 Q_2 は、内層の影響を無視する場合($I_1 = 0$)に比べて $(1 + c_{21})^4$ 倍となる。

本研究の一部は、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] Y. Mawatari and K. Kajikawa, Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 012504
- [2] A.P. Malozemoff, G. Snitchler, and Y. Mawatari, IEEE Trans. Appl. Supercond. **19** (2009) 3115
- [3] Y. Mawatari, A.P. Malozemoff, T. Izumi, K. Tanabe, N. Fujiwara, and Y. Shiohara, Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 025031.

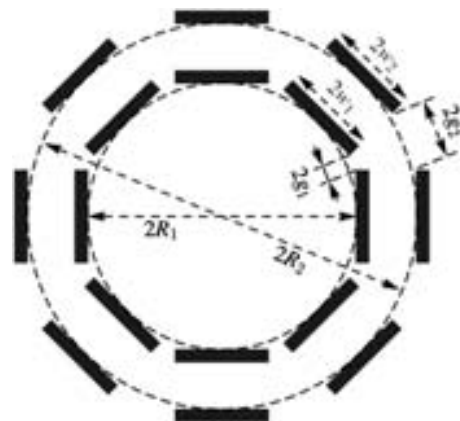


Fig. 1: Schematic of the cross sections of a power cable with two layers of superconducting tapes.

不均一磁界中での YBCO 積層導体の交流損失特性

AC loss properties of assembled YBCO coated conductors exposed to inhomogeneous magnetic fields

桐原 裕紀, 平山 斉, 川越 明史, 川畑 秋馬, 住吉 文夫(鹿児島大学)
式町 浩二, 平野 直樹, 長屋 重夫(中部電力)

KIRIHARA Yuki, HIRAYAMA Tadashi, KAWAGOE Akifumi, KAWABATA Shuma, SUMIYOSHI Fumio(Kagoshima University);
SHIKIMACHI Koji, HIRANO Naoki, NAGAYA Shigeo (Chubu Electric Power Co)
E-mail: k3959743@kadai.jp

1. はじめに

近年、電力系統安定化用などの高温超伝導電力貯蔵装置(SMES)の開発研究が盛んに行われている。現在開発中の SMES コイルは、パンケーキ形状に巻線された要素コイルを複数個トロイド配置した構造をしている。このために、この要素コイルの巻線用導体に印加される磁界は、1ターンの間でも導体長手方向にわたって変化している。本研究の目的は、このような不均一な磁界分布が導体の交流損失に及ぼす影響を明らかにすることである。そのために、長手方向に捻った試料導体を準備し、この導体の一様磁界中での交流損失特性を調べた。

2. YBCO 線材の導体化と測定条件

交流損失の測定に使用した YBCO 線材の諸元を Table.1 に示す。線材幅 10mm、厚さ 0.13mm の YBCO 線材を 300mm に切り出し、4 枚積層したものを試料導体とした(以後 4 枚積層導体とよぶ)。また比較のために 1 枚のものも測定試料とした(以後 1 枚導体とよぶ)。導体幅広面に垂直に印加される磁界を導体長手方向に変化させるために、Fig.1 に示すように導体の両端を $\pm \theta/2$ (deg)捻った試料導体を準備し、これを一様磁界空間に挿入して交流損失測定を行った。このときの θ を導体の捻り角度とする。今回準備した試料導体は 1 枚導体および 4 枚積層導体ともに捻り角度が 0, 45, 90, 180, 360 deg のものである。なお、捻り角度を 360 deg とした場合でも、臨界電流の低下は 2%であった。測定は、周波数 0.04Hz~10Hz、磁界振幅 1mT~90mT の交流横磁界を印加し、ピックアップコイル法を用いて液体ヘリウム中で行った。

3. 不均一磁界中での交流損失の捻り角度依存性

測定した 1 枚導体と 4 枚積層導体の交流損失の捻り角度依存性をそれぞれ Fig.2(a), (b)に示す。横軸は導体の捻り角度 θ である。縦軸は、測定した導体単位体積当りの交流損失を捻り角度が 0 deg のときの損失で規格化した規格化損失である。図中の実線は、捻った試料導体の導体幅広面に印加される垂直磁界成分による損失を導体全長にわたって積分して求めた計算値である。なお、このとき、捻り角度 0 deg の導体で測定した損失は、1 枚導体の場合は印加磁界の 2.64 乗に、4 枚積層導体の場合は印加磁界の 2.67 乗に比例したので、この関係を用いて計算した。

捻り角度を変化させた 1 枚導体、4 枚積層導体どちらの場合でも測定値に周波数依存性はなかったため、測定値は磁化損失のみであると考えられる。また Fig.2(a)からは、1 枚導体の測定値は計算値とよく一致していることがわかる。このことから、測定された損失は導体幅広面に垂直な磁界成分による磁化損失であり、1 枚導体では不均一磁界が交流損失に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方、4 枚積層導体の測定値は Fig.2(b)に示すように、印加磁界が 50mT と 90mT の場合は測定値と計算値がよく一致しているが、印加磁界が 1mT~20mT の場合には、捻り角度によっては計算値との差が大きくなっている。これより、50mT や 90mT といった線材の中心到達磁界近傍やそれ以上の印加磁界下においては、不均一磁界の交流損失に及ぼす影響は小さく、そのときの交流損失は導体幅広面に垂直な磁界成分による磁化損失から求められることがわかった。印加磁界が中心到達磁界より十分小さい場合に、測

定値と計算値が一致しない原因としては、不均一磁界による影響あるいは積層した試料線材の臨界電流分布特性のばらつきなどが考えられるが、これらの検討結果は当日報告する。

謝辞

本研究の一部は「イットリウム系超伝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。

Table. 1 Specifications of the YBCO coated conductor

width (mm)	10
thickness (mm)	0.13
length (mm)	300
I_c (A) @ 77K	194

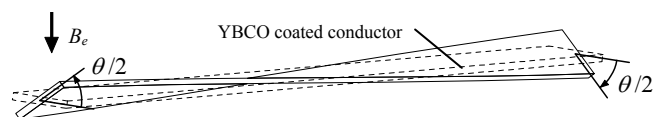


Fig. 1 Twisted sample tape

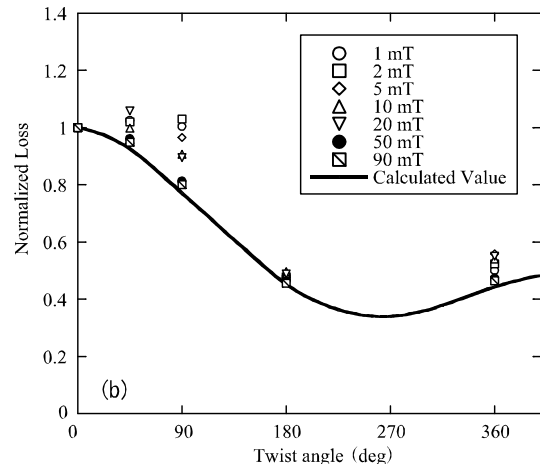
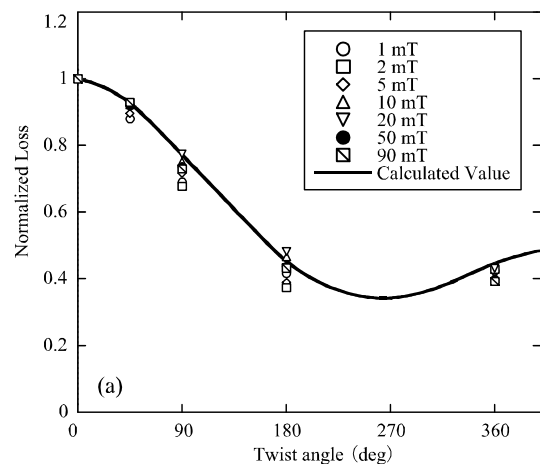


Fig. 2 Twist angle dependences of ac losses in YBCO coated conductors. (a)single tape, (b)stacked conductor

GdBCO コート線材のフープ力試験 Hoop Stress Test for GdBCO Coated Conductor

西島 元, 峯岸 一博, 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大学); 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC)
NISHIJIMA Gen, MINEGISHI Kazuhiro, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku University);
IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (ISTEC)
E-mail: gen@imr.edu

1. はじめに

我々は Coated conductor (コート線材) を強磁場高強度線材として扱っている。既に CVD-YBCO コート線材を 11 T, 4.2 K においてフープ応力印加試験を行い、 Hastelloy 基板を外側に巻いた場合に 1 GPa, 基板を内側に巻いた場合でも 777 MPa までのフープ応力印加が可能であることを示した[1,2]。しかしながら、導体をエポキシ樹脂で含浸したことに起因する擾乱、歪ゲージ接着不良、電極近傍における劣化と焼損等の課題も残った。

本研究では $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (GdBCO) コート線材の液体ヘリウム・強磁場中フープ応力試験を行い、短尺 I_c -歪特性実験結果と比較検討を行う。

2. 線材および試料コイル諸元

試料線材は ISTEC-SRL より提供された GdBCO 線材を用いた。諸元を Table 1 に示す。線材幅は 5 mm, 基板厚さと超伝導層厚さはそれぞれ 100 μm と 1.2 μm である。

この線材を GFRP 製溝付き巻枠 (幅 5 mm, 深さ 5 mm の角溝) に 1.5 ターン巻き付け、試料コイルとした。このとき、基板を外側に巻いた Coil A, 内側に巻いた Coil B の 2 種類を製作した。Fig. 1 に写真を示す。歪ゲージは巻線前に接着した。また、Coil B の電圧端子は巻線後に取り付けしたが、Coil A の場合は巻線前に取り付けた。

試験は液体ヘリウム中で行った。ハイブリッドマグネットの超伝導アウトサートにより外部磁場 11 T を印加した状態で試料コイル通電電流を変化させてフープ応力を印加した。

3. フープ応力試験結果

Fig. 2 に Coil A の 4.2 K, 11 T におけるフープ応力-歪曲線を示す。フープ応力は外部磁場・電流密度・コイル半径(BJR)で求めた。ここに、電流密度は、通電電流値を線材全断面積で除することによって求めた。

5 個の歪ゲージのうち、#1, #3, #4, #5 は良い一致を示した。また、最大印加フープ応力は 1250 MPa であり、このときの歪は最大 0.7% であった。最大印加フープ応力以下ではフープ応力-歪曲線は線形かつ可逆であることから、弾性域内であると考えられる。

得られたフープ応力-歪曲線の傾きから求めた弾性率は 192 GPa であった。この値は Osamura らによって得られた 77 K における弾性率[3]と同程度であるが、我々は 4.2 K での値を求めべく、実験を行っているところである。

Fig. 3 には Coil A の 4.2 K, 11 T における電圧-電流特性を示す。常伝導転移電圧は観測されなかった。今回は通電電流源の制限のため、470 A までの通電とした (最大フープ応力もこのために制限された) が、4.2 K, 11 T では 1250 MPa/0.7%歪下で 470 A 以上通電可能であることがわかった。

参考文献

[1] 西島他, 第 77 回 2007 年度秋季低温工学・超電導学会

講演概要集 p. 203

- [2] G. Nishijima, et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 18 (2008) 1131.
[3] K. Osamura, et al., Supercond. Sci. Technol. 22 (2009) 025015.

Table 1 Specification of GdBCO coated conductor

Stabilizer	Ag	10 μm
Superconducting layer	PLD-GdBCO	1.2 μm
Buffer	CeO ₂	0.5 μm
	LaMnO ₃	19 nm
	IBAD-MgO	4 nm
Substrate	Gd-Zr-O	110 nm
	Hastelloy C276	100 μm

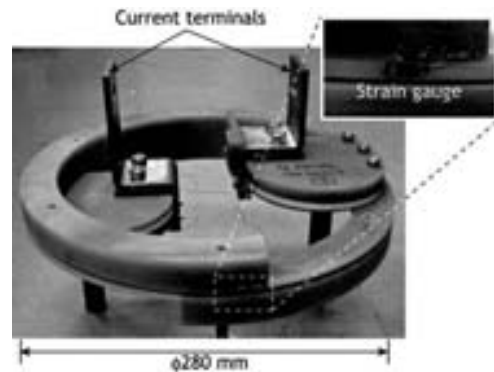


Fig. 1 Photograph of hoop stress test coil

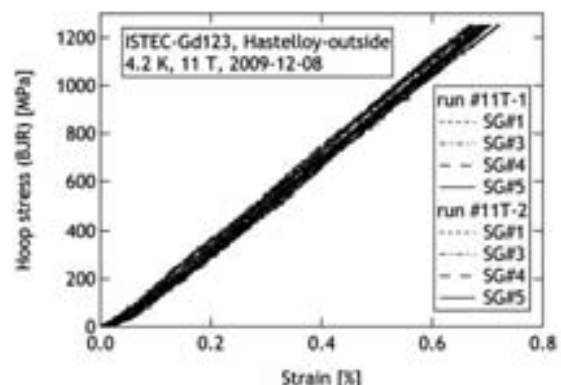


Fig. 2 Hoop stress - strain characteristic at 4.2 K, 11 T.

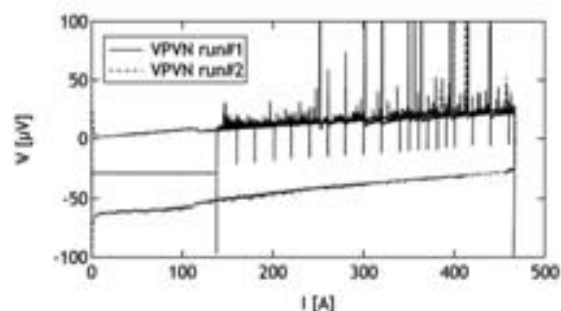


Fig. 3 Voltage-current characteristic at 4.2 K, 11 T.

GdBa₂Cu₃O_y コート線材の臨界電流の歪依存性

Strain dependence of critical current for GdBa₂Cu₃O_y coated conductor

峯岸 一博, 西島 元, 淡路 智, 渡辺 和雄 (東北大); 和泉 輝郎, 塩原 融 (ISTEC)
 MINEGISHI Kazuhiro, NISHIJIMA Gen, AWAJI Satoshi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.); IZUMI Teruo,
 SHIOHARA Yuh (ISTEC)
 E-mail: kazuhiro_m@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導体 REBa₂Cu₃O_y (REBCO、RE は Y または希土類元素) を線材化した REBCO コート線材は磁場中での臨界電流密度 (J_c) 特性に優れており、さらに Hastelloy など高強度材料を基板として用いているため、高い機械強度を持っている。

強磁場マグネットへの応用においては通電時、発生磁場と通電電流によって発生するローレンツ力により、線材にフープ応力と呼ばれる応力が加わる。フープ応力はマグネットが膨張する向きに印加され、このとき線材には引張り歪が加わる。

REBCO 線材の高い機械強度はこの点で有利であるが、実際にマグネットに応用するためには、線材の臨界電流に対する引張り歪の効果について調べる必要がある。

本研究では、REBCO 線材の中でも磁場中での特性が良い GdBCO 線材について、液体 N₂ 中、自己磁界下での臨界電流 (I_c) の引張り歪依存性を測定した。

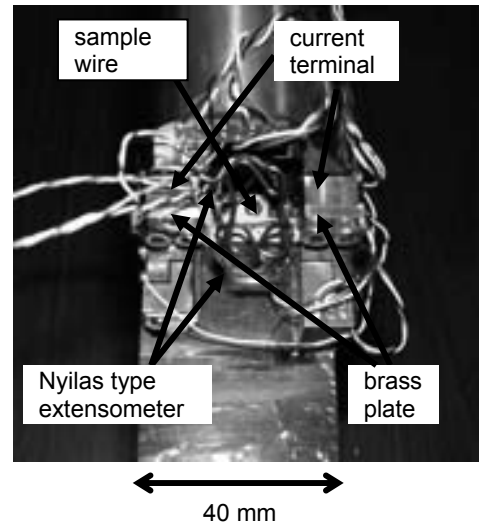


Fig. 1 Experimental set up for measurement of tensile strain dependence of I_c .

2. 試料緒元および実験方法

試料線材の緒元を Table 1 に示す。IBAD (Ion-Beam Assisted Deposition) 法により作製された MgO バッファ層を持つ Hastelloy 基板上に PLD (Pulse Laser Deposition) 法によって GdBCO 層が成膜されている。試料幅は 2 mm である。

Fig. 1 に測定装置の試料取り付け部の写真を示す。試料は電極にハンダ付けされ、片端の可動側電極が移動することにより引張り力を加えられる。ハンダ付けした試料の上から真鍮製のプレート電極をネジ止めし、試料を押さえつけることによって応力印加による膜面の剥離を防止する。

液体 N₂ 中、自己磁界下において試料に引張り力を印加しながら I_c 、引張り歪、線材に加わる応力を測定した。電圧端子間距離は 10 mm、 I_c 決定の電界基準は 1 μ V/cm とした。

引張り歪の測定は試料に接着した歪ゲージおよび低温で較正した自作の Nyilas 型伸び計を用いて行った。伸び計の評点間距離は 12.5 mm である。

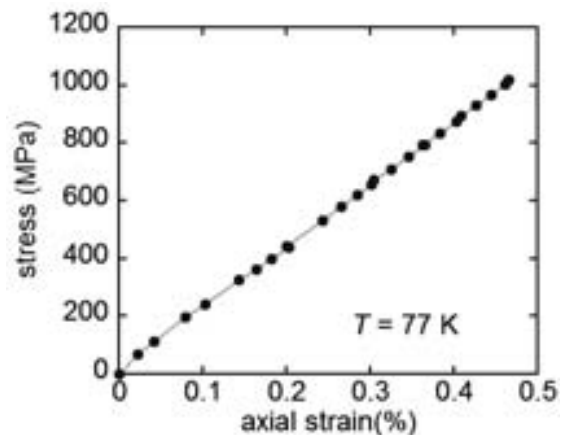


Fig. 2 Tensile stress-strain curve of GdBCO coated conductor at 77 K.

3. 実験結果

Fig. 2 に試料線材の 77 K における応力-歪曲線を示す。応力-歪曲線の傾きから求めた線材の Young 率は 214.6 GPa だった。

Fig. 3 に I_c の引張り歪依存性を示す。 I_c は引張り歪に対して単調に減少した。引張り歪 0.37% 以下での I_c 変化は可逆的であった。

当日は磁場中での測定結果についても報告する予定である。

Table 1 Specification of GdBa₂Cu₃O_y coated conductor

	material	thickness
Stabilizer	Ag	10 μ m
Superconducting layer	PLD-GdBCO	1.2 μ m
Buffer	CeO ₂	0.5 μ m
	LaMnO ₃	19 nm
	IBAD-MgO	4 nm
	Gd-Zr-O	110 nm
Substrate	Hastelloy	100 μ m

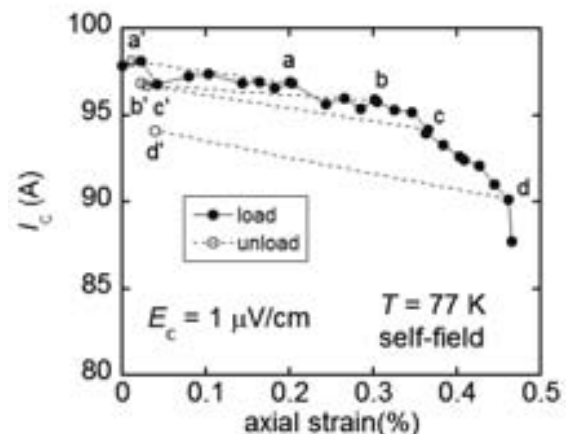


Fig. 3 Tensile strain dependence of I_c of GdBCO coated conductor at 77 K under self-field.

STO 単結晶基板上の YBCO 薄膜の輸送特性に及ぼすひずみの影響

Influence of strain on transport properties in YBCO film on STO single crystal substrate

菅野未知央 (京大); 松本要, 本田泰崇 (九工大)

SUGANO Michinaka (Kyoto Univ.);

MATSUMOTO Kaname, HONDA Yasutaka (Kyusyu Institute of Technology)

E-mail : sugano@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

Y 系線材では他の超伝導線材には見られない特異な臨界電流のひずみ効果が見出されている。過去の研究で明らかになった Y 系線材のひずみ効果の特徴は以下のようにまとめられる。[1][2]

①温度依存性

自己磁場下では、40~83 K の広い温度範囲で線材長さ方向に負荷した引張/圧縮ひずみに対して I_c が放物線的に変化する事が確認されている。 I_c が最大値をとるひずみ値 (ピークひずみ) は低温ほど圧縮側に移動する傾向が見られるが、これは YBCO 膜に蓄積される残留ひずみの温度依存性とは一致していない。また、低温ほど I_c のひずみ感度は小さくなる傾向にある。

②磁場依存性

同一温度であれば高磁場ほど I_c のひずみ感度は大きくなる傾向にある。ただし、磁場依存性は低温ほど顕著でなくなる。また、77 K 以上の高温で数 T 以下の比較的低磁場においては、 I_c のひずみ依存性に放物線的な関係が見られなくなり、圧縮/引張ひずみ領域にそれぞれピークを持つダブルピーク現象が観察されている。磁場の増大とともにピークひずみは移動することが確認されている。

類似の放物線的な I_c のひずみ依存性は A15 型超伝導線材でも確認されているが、この場合は超伝導体の結晶粒内の 3 次元的なひずみ状態が T_c や B_{c2} に影響を及ぼす結果と解釈されており、その結果としてピークひずみは磁場には依存しない。つまり、Y 系線材では I_c のひずみ効果がより複雑な微視的要因に支配されていると考えられる。特に Y 系線材は粒界、粒内の両方がマクロな輸送特性に寄与しているため、個々のひずみ効果を明らかにすることが重要である。

以上のような背景から、本研究ではまず最も単純な系である、単結晶基板上に成膜した YBCO 膜の I_c -ひずみ特性を実験的に明らかにすることを目指した。

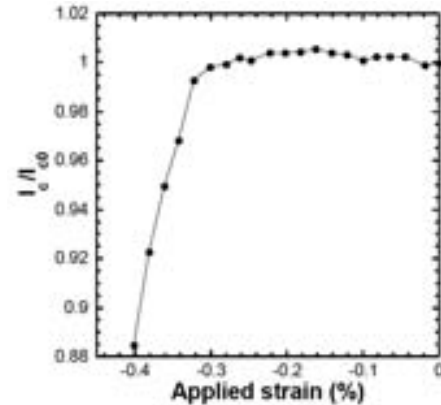
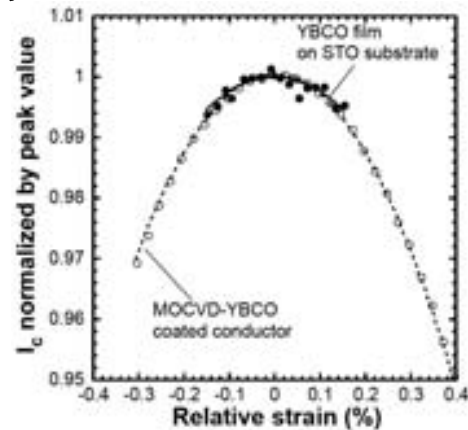
2. 実験方法

10 mm 角の STO 基板上に PLD 法により YBCO 膜を成膜した後、フォトリソグラフィーによって YBCO 膜を幅 0.3 mm のブリッジを有する 4 端子測定形状に加工した。

YBCO 薄膜へのひずみ負荷方法は van der Laan らにより報告されている 4 点曲げ法を採用した[3]。STO 基板を厚さ 3 mm の Cu-Be 板に接着し、基板側に圧縮ひずみが作用する方法に曲げ変形を与えた。ひずみゲージを STO 基板表面に取り付け、負荷ひずみをモニターした。輸送特性の測定は液体窒素中またはヘリウムガス雰囲気中で行い、1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ の電界基準で I_c を決定した。

3. 実験結果

Fig. 1 に液体窒素中、自己磁場下で測定した YBCO 膜の I_c -ひずみ曲線の一例を示す。負荷ひずみ-0.3%以下では

Fig. 1 I_c -strain curves for the YBCO film at 77 K in self field.Fig. 2 Comparison of I_c -strain curves between a coated conductor and the YBCO film on STO substrate.

-0.15%にピークを持つ放物線的な振る舞いが観察されている。一方、それ以上のひずみでは YBCO 膜における損傷発生に起因すると思われる I_c の急激な低下が観察された。

以前に同様の方法で測定した MOCVD-YBCO 線材と今回の結果の比較を Fig. 2 に示す。横軸はピーク値をゼロ点にシフトし、縦軸は最大値で規格化している。また、曲線は 2 次関数によるフィッティングを示す。YBCO/STO の低ひずみ領域でのひずみ依存性は線材の可逆領域の振る舞いとよく一致していることがわかる。

当日の発表では、YBCO 薄膜の磁場中でのひずみ依存性についても報告する予定である。

参考文献

1. Sugano et al, SUST, Vol. 21 (2008) 115019.
2. Sugano et al, SUST (2010) submitted.
3. D C van der Laan et al, SUST (2010) 014004.

RE123 系線材の応力 - ひずみ特性 (2) 線材製造プロセスと曲げひずみ特性

Stress-strain characteristics on RE123 wires 2

山田 雄一, 山田 穰, 藤原 昇, 和泉 輝郎, 塩原 融 (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, FUJIWARA Noboru, IZUMI Teruo, SHIOHARA Yuh (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

Y 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。

現在開発を行っている各種の RE123 系線材の曲げひずみ特性を Goldacker 方式により評価した。

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。線材の幅は比較のため、4~5mm とした。

3. 曲げ試験方法

“Goldacker 式”の曲げ試験装置[1] [2]を用いて、液体窒素中で連続的に曲げ(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った。それぞれ超電導線材は銀めっき等の保護層を施した超電導層側に銅板の電極を押さえつけ、電流を通電する構造である。

手順としては、直状で固定した線材を超電導層側を内側とする方向に曲げを加え、直径 10mm まで徐々に曲げながら臨界電流測定を行った後、直状に戻し、次に反対側に徐々に曲げながら臨界電流測定を行った。

4. 評価結果

Fig.1 に I-PLD 線材(銅めっきなし)の、Fig.2 に K-MOD 線材(銅めっきなし)の曲げ評価結果を示す。グラフの左半分が超電導層が内側、すなわち超電導層が圧縮を受ける方向で、グラフの右半分が超電導層が外側、すなわち超電導層が引張を受ける方向である。

超電導層を圧縮側に曲げた場合、直径 10mm の曲げまでではそれぞれ約 80%、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。一方、超電導層を引張側に曲げた場合、直径 20mm 前後で急激に臨界電流が低下した。2 種類の線材の比較では、I-PLD が圧縮方向に強く、K-MOD は引張方向に強かった。

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には十分な曲げ特性を有する。

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・黒田先生及び岩手大学・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。

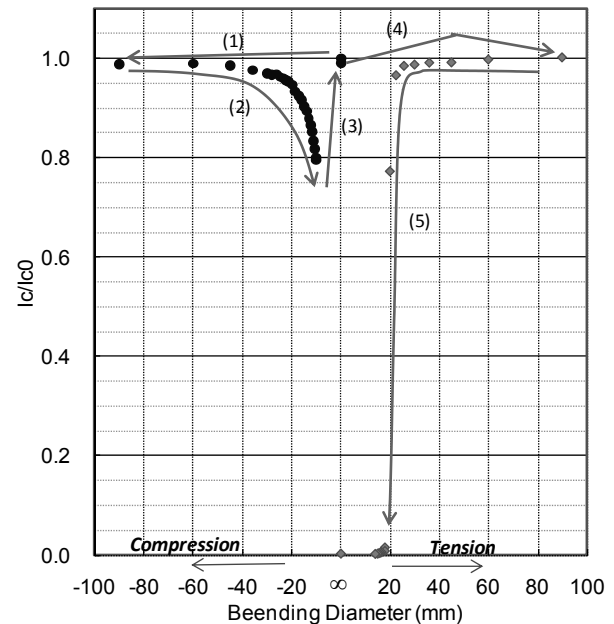


Fig. 1 Bending characteristics of I-PLD(bare)

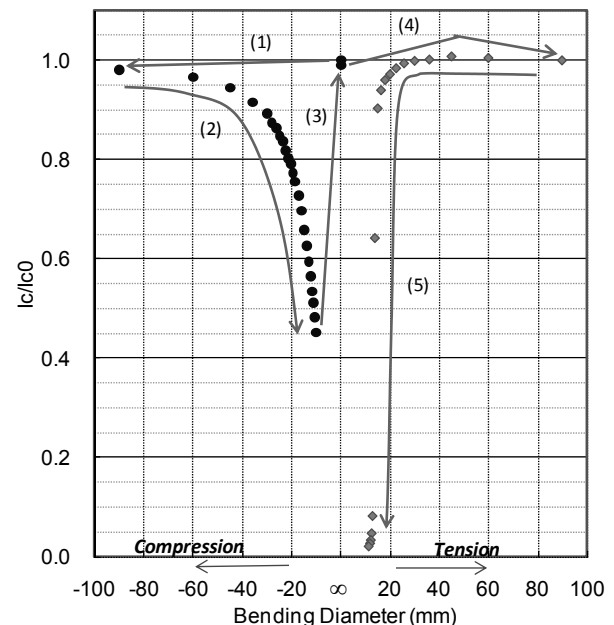


Fig. 2 Bending characteristics of K-MOD(bare)

参考文献

1. W. Goldacker, et al.: 2002 Adv. Cryog. Eng. Vol. 48 (2002) p.469
2. 山田他: 2009 秋季低温工学・超電導学会概要集 p.130

RE123 系線材の特性把握 (1) 過電流劣化と線材剥離に関する検討

Understanding of deterioration phenomenon for RE123 coated conductors

(1) Study on deterioration by over current and delamination behavior

坂井 直道, 中尾 公一, 波頭 経裕 (ISTEC-SRL), 王 旭東, 石山 敦士 (早大), 加藤 丈晴 (JFCC), 八木 正史 (古河電工), 青木 裕治 (昭和電線), セルゲイ・リー, 筑本知子, 市川 祐士, 藤原 昇, 田辺 圭一 (ISTEC-SRL)
 SAKAI Naomichi, NAKAO Koichi, HATO Yoshihiro (ISTEC-SRL), WANG Xudong, ISHIYAMA Atsushi (Waseda Univ.), KATO Takeharu (JFCC), YAGI Masashi (Furukawa Electric), (AOKI Yuji (SWCC Showa Holdings), SERGEY Lee, CHIKUMOTO Noriko, ICHIKAWA Yuji, FUJIWASRA Noboru, TANABE Keiichi (ISTEC-SRL)
 E-mail: nsakai@istec.or.jp

1. はじめに

近年、RE123 系線材を用いた各種機器開発が盛んに行われている。ここで、これら機器用の線材が、その使用環境において、特性変化するのかどうかを予め確認しておくことも重要である。我々は、機器用線材開発の一環として、各種ストレス（過電流、湿度、機械歪、熱歪、加熱）による線材の特性変化を調査している。このうち今回は、過電流に対する劣化と線材の剥離（層間密着力）に関する検討結果を報告する。

2. 実験方法及び結果

2-1 連続過電流試験； Ag安定化層付Y123 線材（幅 2.5mm）に交流過電流を印加し、その経時変化評価を行った。予備試験により無歪の状態では何ら変化が生じなかったことから、試料は、予め湿度劣化させ、さらに曲げ歪を印加することで、それらストレスの重畳効果も併せて確認することとした。 I_c を超えると電流は、Ag安定化層に分流しはじめ、限界電流値 (I_{limit}) 以上で完全にAgに乗り移る。ここで、 I_c 以上 I_{limit} 以下で長期間交流過電流を印加 ($I_c=11A$ に対し 55A印加) し、その変化計測を行った。図 1(a)及び(b)に実験に用いた試料の電流分流特性と試験前後のI-V曲線を示す。これより、 I_{limit} 以下の交流過電流試験ではI-V特性には変化が見られなかった。

2-2 パルス過電流試験； Cu/Ag安定化層付Y123 線材（幅 5mm）のパルス過電流劣化試験[1]は早稲田大学で実施し、その詳細は、本講演会(1P-p02)で報告している[2]。ここで、我々は、試験後に劣化した箇所をテープスターによる I_c 分布測定、磁気光学顕微鏡観察、SQUID非破壊検査、SEM観察などを行うことにより、どのような劣化が生じたのか調査を行っている。図2(a)に I_c 分布変化を示す。これより、初期に欠陥が検出された箇所と少し異なる箇所、材料の劣化が生じたことが分かる。また、図2(b)のSQUID検査結果の矢印部に剥離の可能性を示すシグナルが得られており、現在微細組織を確認中である。

2-3 剥離に関する検討； RE123 系線材は層状構造を有し、何らかの強烈なストレスにより材料間の剥離が生じることがある。しかし、剥離の原因はまだ明確にはなっていない。ここで、剥離を層間の密着力として捉え評価を行った。評価例として、PLD法で作製したGd123線材の層間密着性を4-point bending (4PB)法[3]で調べた結果を図3(a)に示した。試料1及び2はそれぞれ20m/hと60m/hで成膜した試料であり、試料1の方が試料の密着性が良好であった。また、図3(b)に剥離面のXPSによる同定結果を示す。これより、剥離位置は双方の試料ともGd123とCeO₂の界面近傍、数nm程度Gd123側であり、両者の密着性の差は、界面近傍でのGd123中の酸素量の違いを反映していると推測している。

3. まとめ

長期連続交流過電流試験及びパルス過電流試験より、過電流に対しては、フラックスフロー領域では劣化せず、

安定化層を流れる電流による発熱が原因で劣化した可能性が推測された。また、線材の剥離現象の理解のため、層間密着性の評価と剥離面の調査を行い、線材が剥離しやすいのは、RE123/CeO₂界面近傍の少しRE123側であることなどが分かった。本研究は「イットリウム系超電導電力機器技術開発プロジェクト」としてNEDOの委託により実施したものである。

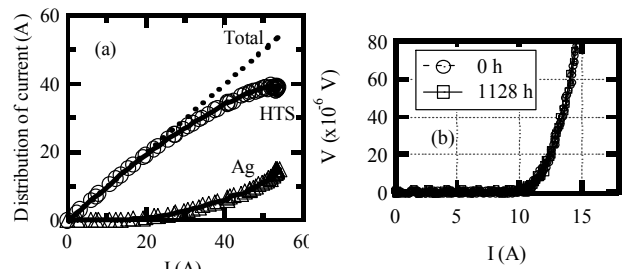


Fig.1 (a) I distribution during over-current experiment and (b) I-V curves of before and after continuous over-current experiment

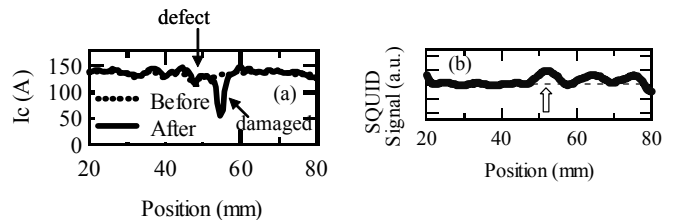


Fig.2 (a) I_c distribution before and after over-current experiment and (b) SQUID signal after over-current experiment

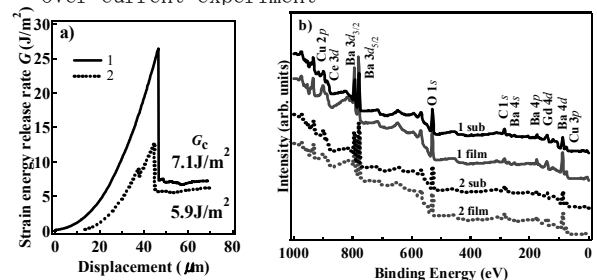


Fig.3 (a) Fracture energy measurement by 4PB and (b) XPS spectra of fracture surface.

参考文献

1. A.Ishiyama et al. : IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.19, No.3 (2009) pp.3483-3486
2. X. Wang et al., : Abstracts of CSJ Conference, (2010) spring, No. 1P-p02
3. S.Abe, : Monthly (NISSAN ARC.LTD) Vol.18 No.9 and No.10 (2009)

YBCO Coated Conductor における局所歪と双晶構造の相関

Influence of twin structure with local strain exerted on YBCO layer in YBCO coated conductors

長村 光造(応用科学研)、町屋 修太郎(大同大学)、土屋 佳則(物材機構)、
 ハルヨ ステファン、鈴木 裕士、菖蒲 敬久、桐山 幸治(原子力機構)、菅野 未知央(京大)
 OSAMURA Kozo (RIAS), MACHIYA Shutaro (Daido Univ), TSUCHIYA Yoshinori (NIMS),
 HARJO Stefanus, SUZUKI Hiroshi and SHOBU Takahisa KIRIYAMA Koji (JAEA) and SUGANO Michinaka (Kyoto Univ)
 E-mail: kozo_osamura@rias.or.jp (9 point)

1. はじめに

Spring-8 の白色X線および J-PARC のパルス中性子を用いて、YBCO テープ中の YBCO 層に生ずる局所歪について詳しく調べた。測定された回折弾性定数および全伸びに関する異常な振舞いおよび回折ピーク強度の負荷応力依存性は双晶構造に密接に関連することが示唆されたので報告する。

2. 実験方法

供試料として Super Power 社製 YBCO を用いた。中性子では J-PARC 「匠」を、Spring-8 では BL28B2 にて、試料ステージに引張荷重装置を設置し、テープ長手方向に一定の引張荷重を負荷した状態で回折実験を実施した。

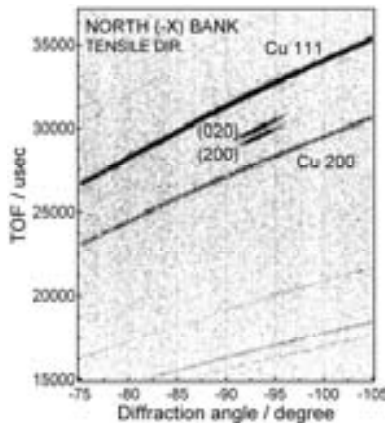


Fig.1 Two dimensional image of diffraction data at the north bank of TAKUMI station.

3. 実験結果および考察

テープの特徴は Hastelloy 基板上にバッファー層、厚さ約 1 μ m の YBa₂Cu₃O_{6+d} (YBCO) 層および Ag 層が積層し、その両面に銅がメッキされていることである。室温においては巨視的な降伏は 0.6%の伸びを越えると起こる。

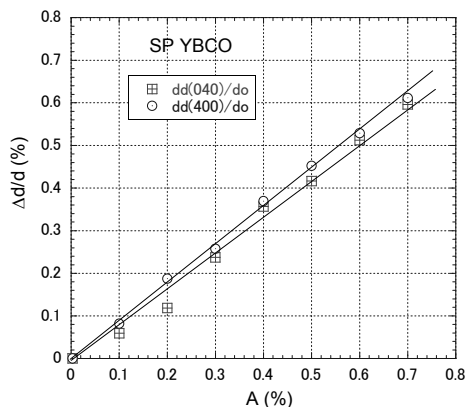


Fig.2 Diffraction strains from (040) and (400) as a function of applied strain.

Fig. 1 に示す「匠」の結果からは Cu(111), Cu(200) の回折線は全体に分布し、Cu のサブグレインは種々の方向を向いていることを示している。一方 YBCO 相 (020)、(200) 面方位はある範囲に限られている。1 チャンネルが $\theta = 0.041^\circ$ に相当するので、テープ軸を中心に $\theta = \pm 2.0^\circ$ の範囲に *a* 軸あるいは *b* 軸が配向していることがわかる。

Fig. 2 に YBCO の (040)、(400) 回折線から求めた回折歪の巨視的歪依存性を示す。このように常に 2 つの回折線が同時に観測されるのは、微小な双晶の集合に由来するものと考えられる。外部歪ゼロの状態を基準として、各格子面の歪を計算すると Fig. 2 のようになる。歪に直して微小な変化をみても巨視的歪が 0.7% まで直線的である。これらの直線の勾配をみると、(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。同様の解析を他の格子面についても行った結果を Table 1 に示す。ここで (300) の歪依存性が特異なのは、共存する Cu 成分の回折線が重なるためである。いずれの格子歪の巨視的歪にたいする勾配は 1 より小さい。(0*kl*) 面の勾配は (*h*00) 面の勾配より小さい傾向が明らかとなった。

Table 1 The slope of $\Delta d/d$ vs A for each (hk0)

hk0	Slope	hk0	Slope
030	0.826	300	-
040	0.826	400	0.870
050	0.813	500	0.891
060	0.813	600	0.843

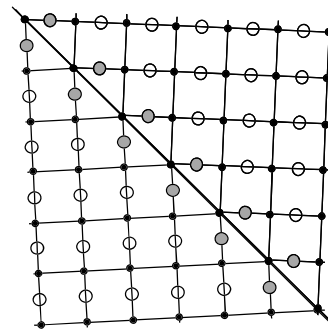


Fig.3 Ideal twin structure existing in YBCO.

(040)、(400) の回折線の強度の巨視歪依存性を調べると無歪で強度が大きく、一旦減少したあと、徐々に増加し、極大を経たあと減少に転ずる。2 つの回折線が同じ変化の傾向を示しており、その比はほぼ一定と考えられる。したがって当初予測していた応力誘起相変態が起こり、2 つの回折線の比が巨視的歪の増加とともに変化するという期待は実現していないことが明らかとなった。

双晶関係にある結晶が双晶面で完全に整合しているときに期待される回転角は 0.96° であるが、実際にはどの程度回転するか調べた結果については、2 つの分布のそれぞれにガウス関数で fitting し、その中心値を求めるとそれぞれ 1.38° 、 1.44° となり、その差は 0.06° となった。

重イオン照射した Er123 における c 軸相関ピンとランダムピンの協調現象

Cooperative behavior of the random and correlated pinning in Er123 films with columnar defects

淡路 智, 難波雅史, 渡辺和雄(東北大金研), 甲斐英樹, 向田昌志(九大工), 岡安悟(原子力機構)

AWAJI Satoshi, NAMBA Masafumi, WATANABE Kazuo (Tohoku Univ.), KAI Hideki, MUKAIDA Masashi (Kyushu Univ.), OKAYASU Satoru (JAEA)

E-mail: awaji@imr.tohoku.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y(RE123, RE; 希土類)コート線材 (Coated conductor) の開発において, 人工ピンの導入が精力的になされている. 人工ピンには大きく分けて, ランダムピンと相関ピンがあり, それぞれ磁束ピンニング機構が異なっている. これらは, 磁束状態の違いも関係しており, その機構は複雑で, 十分な理解が得られているとは言い難い. 今回は, 代表的な c 軸相関ピンとして重イオン照射欠陥を導入した Er123 膜の J_c 特性結果を元に, c 軸相関ピンとランダムピンの共存したモデルを構築し, その磁束ピンニング特性について議論する.

2. 実験方法

用いた試料は, PLD 法によって SrTiO₃ 単結晶基板上に作製した Er123 膜である. これに, 200MeV-Au¹³⁺ を照射した. 照射量は, マッチング磁場 $B_\phi = 0.1, 1.0$ T となるように照射時間を制御した. ただし, これらの欠陥量を TEM によって調べた結果, それぞれ $B_\phi = 0.3, 1.7$ T であった. これらの試料に対して, 4端子法を用いて磁場, 温度, 磁場印加角度依存性を詳細に測定した.

3. 結果と議論

図1に, $B_\phi = 0.1$ T 試料(CD0.1T)の 70K における J_c の角度依存性を示す. 多くの c 軸相関ピンの場合に見られるように, $B//c$ 方向に c 軸相関ピンに起因したピークが現れている. このピークは低磁場領域で非常に大きく現れているが, 磁場の増加に伴って相対的に減少し, ある中間磁場領域で極小となった後, さらなる磁場印加とともに増加する傾向を示す. 次に, いくつかの温度に対する規格化した磁束ピンニング密度 F_p を示す. $B_\phi = 0.1$ T 試料においては, F_p 曲線に2つのピークが現れるので, その低磁場側のピーク, すなわちマッチング磁場で規格化した. その結果, マッチング磁場以下の低磁場領域では, ほぼスケールするが, それ以上では温度低下に伴って F_p が相対的に増加した. これらの結果は, マッチング磁場以下の低磁場では, c 軸相関ピンが支配的となっているが, 高磁場領域でも, c 軸相関ピンに起因した J_c の角度依存性に現れるピークが存在する一方で, F_p 曲線はランダムピンのみ見える. 従って, 2種類の磁束ピンニングのどちらか強い方が支配的になっているのではなく, 両者が共に働いていることが示唆される.

これらの結果を説明するために, ランダムピンと c 軸相関ピンのそれぞれのピンニングが共存し, 統計的な平均としてマクロな特徴が現れるように両者それぞれのピン力 F_p^{rand} と F_p^{corr} の2乗平均をとるモデルを次のように仮定する.

$$F_p = \sqrt{(F_p^{\text{rand}})^2 + (F_p^{\text{corr}})^2} \quad (1)$$

$$F_p^{\text{rand}} = A_{\text{rand}} b_{\text{rand}}^p (1 - b_{\text{rand}})^q \quad (2)$$

$$F_p^{\text{corr}} = \begin{cases} (A_{\text{corr}} f_p / B_\phi) b_{\text{corr}} & (B \leq B_\phi) \\ A'_{\text{corr}} (1 - b_{\text{corr}})^2 & (B > B_\phi) \end{cases} \quad (3)$$

ここで, $A_{\text{rand}}, A_{\text{corr}}, A'_{\text{corr}}$ はピンニングパラメータ, $b_{\text{rand}} = B/B_g^{\text{rand}}, b_{\text{corr}} = B/B_g^{\text{corr}}$ はランダムピンと c 軸相関ピンに対する磁束ガラス転移磁場による規格化磁場である. このモデルで

は, F_p^{rand} と F_p^{corr} の相対的な比によって, c 軸相関ピンの振る舞いが決定される. その結果, 図1で示したような c 軸相関ピンに起因した J_c の角度依存性に表れるピークの振る舞いや, 図2に示したような F_p 曲線の2つのピークが現れる場合と, そうでない場合があることなど, 複雑な挙動を原理的にすべて説明することが可能であることが分かった. 例えば, ランダムピンのパラメータを $p=1, q=2$ とし, ランダムピンと相関ピンの最大ピン力の比を 1.3 とした場合には, 2つのピークが現れるが, 2.0 の場合には1つのピークとなり, 図2の結果を定性的に再現できる.

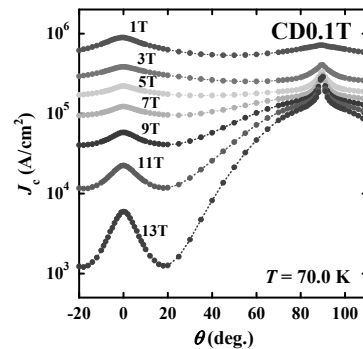


Fig. 1 Angular dependence of J_c for the CD0.1T sample at 70 K.

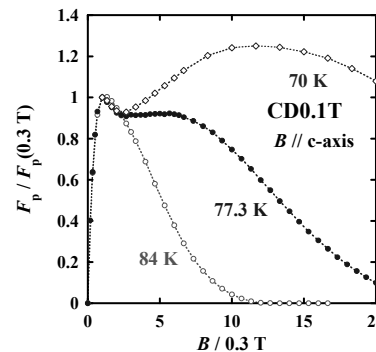


Fig. 2 Normalized F_p curves at various temperature for the CD0.1T sample.

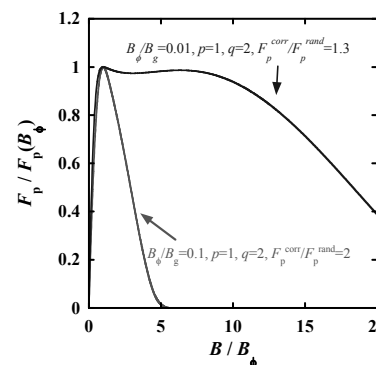


Fig. 3 Calculation results of F_p curves

YBCO 薄膜線材の熱伝導率

Thermal conductivity of YBCO coated conductor

内藤 智之, 菊池 康晃, 古田 大樹, 藤代 博之(岩手大); 岡元 洋, 林 秀美(九州電力);
五所 嘉宏, 藤原 昇, 塩原 融 (ISTEC)

NAITO Tomoyuki, KIKUCHI Yasuaki, FURUTA Daiki, FUJISHIRO Hiroyuki (Iwate Univ.);
OKAMOTO Hiroshi, HAYASHI Hidemi (Kyushu Electric Power Co.);
GOSHO Yoshihiro, FUJIWARA Noboru, SHIOHARA Yuh (ISTEC)
E-mail: tnaito@iwate-u.ac.jp

1. はじめに

YBCO線材は次世代超電導線材として大いに期待されており、現在も臨界電流密度の向上や長尺化の研究が精力的に行われている。変圧器やマグネットといった実用機器では熱的安定性が重要となる。本研究では機器設計において熱侵入および排出量の見積りに不可欠な熱伝導率を主に測定した。YBCO線材は、基板、中間層、YBCO層および安定化層からなる多層構造を有する。本研究では、安定化層であるAg層厚が異なるYBCO線材の熱伝導率を評価した。

2. 実験方法

YBCO線材はIBAD-PLD法により(株)フジクラで作製された。ハステロイ基板(厚さ100 μm)、中間層(1.7 μm)およびYBCO層(約1.5 μm)は共通で、Ag層厚が異なるサンプルを用意した。熱伝導率は一般的な定常熱流法で測定した。熱流はテープ面に平行に印加された。

3. 実験結果および考察

図1にAg層厚の異なる3つのYBCO線材の熱伝導率の温度依存性 $\kappa(T)$ を示す。Ag層厚20 μm 、35 μm および55 μm のサンプルをそれぞれYCC-Ag20、YCC-Ag35およびYCC-Ag55と呼ぶことにする。YCC-Ag20の $\kappa(T)$ は300Kから85K付近まで温度の低下とともに単調に減少し、その後緩やかな増加に転じた。50K以下で急激に増大し始め、その後20K付近でピークを示した。YCC-Ag35およびYCC-Ag55の $\kappa(T)$ はYCC-Ag20の $\kappa(T)$ とほぼ同様の振る舞いであった。 $\kappa(T)$ の絶対値はAg層厚の増加とともに増大した。図1挿入図に100Kにおける熱伝導率のAg層厚 t_{Ag} 依存性を示す。 $\kappa(T)$ のピーク温度はAg層厚の増加にともない高温側に移動した。観測された $\kappa(T)$ のピーク構造は、しばしば高純度金属の $\kappa(T)$ に特徴的な振る舞いである。従って、YBCO線材の熱伝導は主にAg層が担っていると考えられる。図2に200Kの κ 値で規格化した熱伝導率の温度依存性 $\kappa(T)/\kappa(200\text{K})$ を示す。60K以上の温度領域で3つのYBCO線材の $\kappa(T)/\kappa(200\text{K})$ は良く一致している。しかし、60K以下ではYCC-Ag35およびYCC-Ag55の $\kappa(T)/\kappa(200\text{K})$ がYCC-Ag20の $\kappa(T)/\kappa(200\text{K})$ に比べて小さい値となった。これは熱伝導へのAg層の寄与が厚さに対して単純に比例していないことを意味している。

講演では、YBCO線材の構成材料であるハステロイやAg等の $\kappa(T)$ と熱等価回路を用いて行ったYBCO線材の $\kappa(T)$ に対する解析結果も併せて報告する予定である。

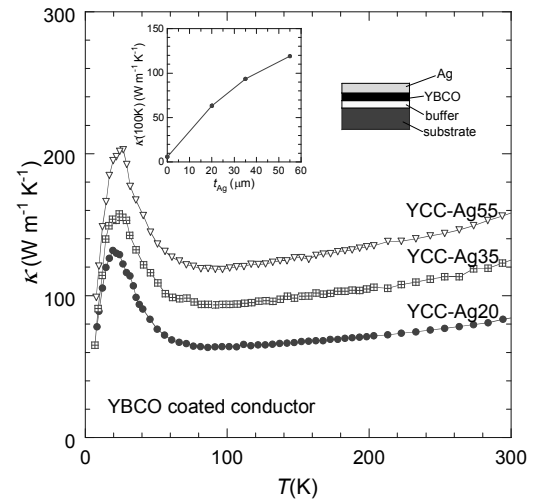


Fig.1 Temperature dependence of the thermal conductivity $\kappa(T)$ of YBCO coated conductors for three different Ag thickness t_{Ag} . Inset shows t_{Ag} dependence of the $\kappa(100\text{K})$ value.

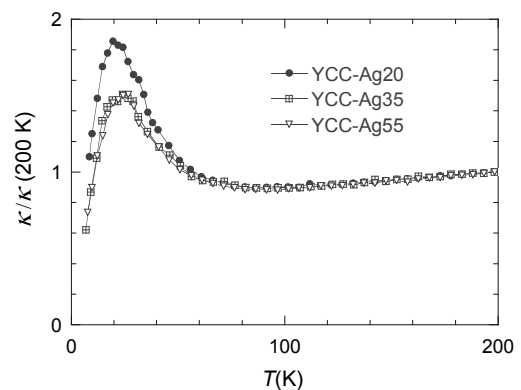


Fig.2 Temperature dependence of the reduced thermal conductivity $\kappa(T)/\kappa(200\text{K})$ of YBCO coated conductors which are the same samples shown in Fig. 1.

謝辞

本研究は、経済産業省プロジェクト「イットリウム系超電導電力機器技術開発(超電導変圧器技術開発)」の一環として、ISTECを通じてNEDOからの委託を受けて実施したものである。