

Oral presentation | 11 Superconductivity : 11.3 Critical Current, Superconducting Power Applications

📅 Thu. Sep 19, 2024 10:30 AM - 12:00 PM JST | Thu. Sep 19, 2024 1:30 AM - 3:00 AM UTC 🏨 C31 (Hotel Nikko 3F)

[19a-C31-7~11] 11.3 Critical Current, Superconducting Power Applications

Tetsuro Sueyoshi(Kyushu Sangyo Univ.), Tatsunori OKADA(Tohoku University)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[19a-C31-7]

Inducing pinning center of crystal defects to YBa₂Cu₃O_y-pure thin film by using nanocomposite buffer layer

○Shin Okumura¹, Shunta Ito¹, Tomoya Horide¹, Ataru Ichinose², Yutaka Yoshida¹ (1.Nagoya Univ., 2.CRIEPI)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[19a-C31-8]

Flux Creep Properties in Heavy-ion Irradiated High-T_c Superconducting Tapes with Artificial Pinning Centers

○Tetsuro Sueyoshi¹, Toshinori Ozaki², Satoshi Semboshi³, Hitoshi Sakane⁴, Terukazu Nishizaki¹, Norito Ishikawa⁵ (1.Kyushu Sangyo Univ., 2.Kwansei Gakuin Univ., 3.Shimane Univ., 4.SHI-ATEX Co., Ltd., 5.JAEA)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[19a-C31-9]

Field angular dependence of critical current in REBCO iGS joints

○Yasuaki Takeda¹, Gen Nishijima¹, Takanori Motoki², Jun-ichi Shimoyama², Hitoshi Kitaguchi¹ (1.NIMS, 2.Aoyama Gakuin Univ.)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[19a-C31-10]

Domain control of REBCO coated conductors by bending strain and its impacts on superconducting properties

○Tatsunori Okada¹, Yuhi Shimamura¹, Satoshi Awaji¹ (1.IMR, Tohoku Univ.)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[19a-C31-11]

A Study on the Effects of Resolution, Sample Linewidth and Process-Dependence on Machine-Learning Based Auto-Detection of Local Heterogeneity in REBCO Wires by High-Speed Magnetic Microscopy

○Zeyu Wu¹, Kazutaka Imamura¹, Kohei Higashikawa¹, Takanobu Kiss¹ (1.Kyushu Univ.)

ナノコンポジットバッファ層を用いた
YBa₂Cu₃O_y-pure 薄膜への欠陥ピンニングセンターの導入
Inducing pinning center of crystal defects to YBa₂Cu₃O_y- pure thin film
by using nanocomposite buffer layer

名大工¹, 電中研², 奥村 慎¹, 伊藤 駿汰¹, 堀出 朋哉¹, 一瀬 中², 吉田 隆¹

Nagoya Univ.¹, CRIEPI², Shin Okumura¹, Shunta Ito¹, Tomoya Horide¹, Ataru Ichinose², Yutaka Yoshida¹

E-mail: okumura.shin.x4@s.mail.nagoya-u.ac.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (RE: Rare Earth) 薄膜において、磁場中臨界電流の向上のために、APC (人工ピンニングセンター) が導入されてきた。APC が REBCO 内に侵入した量子化磁束をトラップし、磁場中での臨界電流密度 (J_c) の低減が抑制される。APC として二次相を添加した REBCO 膜の J_c 特性向上は高温・低磁場で顕著である。しかし低温では結晶欠陥であるナノ歪み、結晶粒界、積層欠陥等が PC として強く働くと考えられている。

REBCO 薄膜中の結晶欠陥による PC について“基板誘起ピン”として表面のナノ突出物から、貫通転位を導入する方法[1]や格子不整合性を利用し転位点を増大させる方法[2]など様々な試みが行われてきた。どの手法も成長界面が REBCO 薄膜内に結晶欠陥を誘発し、磁場中 J_c 特性が向上した。

これまでに MgO 単結晶上に STO, CeO₂ が c 軸方向に cube-on-cube の配向で自己組織化すること及びバッファ層上の YBCO における磁場中 J_c 特性の変化及び結晶性等の観点から欠陥 PC の導入に最適な STO:CeO₂ の体積比率を報告した[3]。今回は YBCO 層の成長レートの変化及び STO 単相バッファ層との比較を行い、REBCO 薄膜における基板誘起の欠陥ピン導入に当たり、ナノコンポジットバッファ層の効果を検討した。

2. 実験方法

本研究では Pulsed Laser Deposition (PLD) 法により MgO (100) 単結晶上にバッファ層及び YBCO 層を作製した。ナノコンポジットバッファ層の作製

には PLD のターゲットに STO+CeO₂ を混合したものを使用した。また、Kr-F エキシマーレーザー ($\lambda = 248$ nm) の周波数を変化させることで YBCO 層の成長レートを変化させた。その際、同じ推定膜厚となるよう成膜時間を調整した。

3. 実験結果

図 1 に異なるバッファ層を用いて成長レートを変化させた YBCO 薄膜の 20 K, $B//c$ における磁場中ピンニング力 (F_p) を示す。STO 単結晶上 YBCO 薄膜については、格子整合性の良さから YBCO 層には欠陥 PC が入らず、9 T における F_p は最も小さい。YBCO/STO/MgO では STO と MgO の不整合度を若干量 STO 層が引継ぎ、YBCO 層の磁場中特性が向上している[2]。YBCO/STO+CeO₂/MgO では STO と CeO₂, MgO の 3 物質間の格子不整合度や結晶配向が転位点等を多量に YBCO 層に誘発し、磁場中で特性が向上した。さらに YBCO 層の成長レートにより F_p - B 特性が異なる。

図 2 に作製した YBCO/STO+CeO₂/MgO 薄膜の断面 STEM 像を示す。等間隔に YBCO 表面へ突き抜ける貫通転位が生じている。バッファ層と YBCO 界面でミスフィット緩和のために転位が導入されたと考えられる。また薄膜全体で面内方向に配列した Y₂O₃ 析出物も多量に存在し、等方的な PC として寄与していると推察される。

4. 謝辞

本研究の一部は JST-CREST (JPMJCR2336) の助成を受けて実施した。

5. 参考文献

- [1] B. Maiorov et al 2006 *Supercond. Sci. Technol.* **19** 891-895
- [2] P. Mele et al 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 2, 3713-3716
- [3] 第 71 回応用物理学会春季学術講演会、23a-12N-1、奥村 慎 他

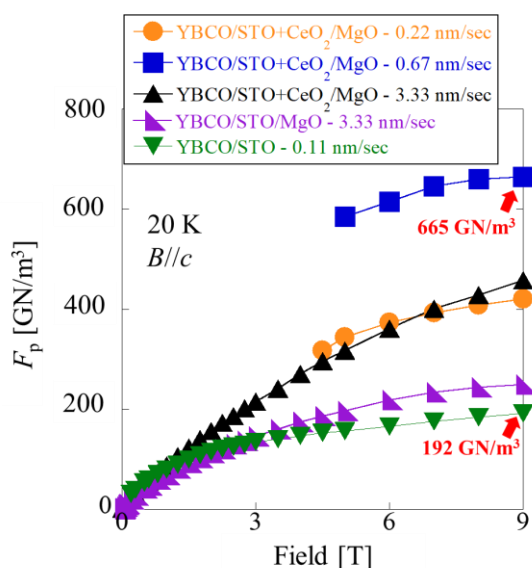


図 1 異なるバッファ層を用いて成長レートを変化させた YBCO 薄膜の 20 K, $B//c$ における磁場中ピンニング力特性

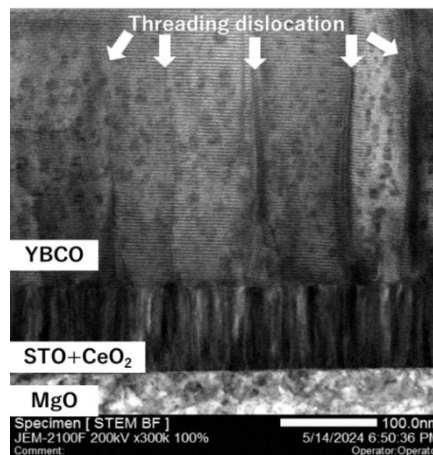


図 2 YBCO/STO+CeO₂/MgO 薄膜の断面 STEM 像

重イオン照射した人工ピン入り高温超伝導線材の 磁束クリープ特性

Flux Creep Properties in Heavy-ion Irradiated High- T_c Superconducting Tapes with Artificial Pinning Centers

九産大理工¹, 関学大工², 島根大³, 住重アテックス(株)⁴, 原子力機構⁵

○末吉哲郎¹, 尾崎壽紀², 千星聡³, 坂根仁⁴, 西崙照和¹, 石川法人⁵

Kyushu Sangyo Univ.¹, Kwansei Gakuin Univ.², Shimane Univ.³, SHI-ATEX Co., Ltd.⁴, JAEA⁵

○Tetsuro Sueyoshi¹, Toshinori Ozaki², Satoshi Semboshi³, Hitoshi Sakane⁴, Terukazu Nishizaki¹,

Norito Ishikawa⁵

E-mail: s.teturo@ip.kyusan-u.ac.jp

1. はじめに

高温超伝導体の磁場中の臨界電流密度 J_c を改善する方法の一つに、強いピン止め力をもつ柱状欠陥と補助ピン止め点となる球状欠陥を組み合わせたハイブリッド磁束ピン止めがある。この機能の一つとして、柱状欠陥間に生じる量子化磁束のダブルキंक励起による磁束クリープを球状欠陥が抑制し、より高い J_c 値を得られることが期待されている。これまで、我々は Y_2O_3 ナノ粒子を人工ピンとして含む高温超伝導線材 (Faraday Factory Japan (FFJ)) に対して重イオン照射により柱状欠陥を導入し、磁化緩和率への影響について報告している[1]。

今回の報告では、柱状欠陥を導入した FFJ 製の人工ピン入り/無しの高温超伝導線材の磁化緩和特性から磁束クリープの活性化エネルギー U^* の電流依存性を評価することで、ハイブリッド磁束ピン止め構造における磁束クリープ機構について系統的に議論を行う。

2. 実験および結果

本研究で用いた試料は、FFJ 製のピン無しの GdBCO 高温超伝導線材 (2019 年 5 月購入) と Y_2O_3 がドーピングされた Y 系高温超伝導線材 (2021 年 8 月購入) である。これらの線材から約 2 mm 角に試料を切り出し、照射や測定に用いた。200 MeV Xe 照射は、原子力機構のタンデム加速器で行った。照射方向は、膜面に垂直すなわち試料の c 軸方向に平行である。照射量は、 5.81×10^{11} ions/cm² (マッチング磁場 $B_\phi = 12$ T) である。 U^* の電流密度依存性は、磁化緩和特性から評価した。SQUID 磁束計を用いて c 軸方向の磁場での磁化の時間依存性の測定から、各温度 T での磁化緩和率 $S = -d \ln M / d \ln t$ を求めて $U^* = T / S$ を評価する。また、その温度での電流密度 J は測定開始の磁化から臨界

状態モデルを用いて求めた[2]。

Fig.1 に、1 T における重イオン照射した人工ピン入り/無し超伝導線材の U^* の電流密度依存性を示す。磁束クリープ機構は、 U^* の電流依存性を表す $U^* = U_0((J_c/J)^\mu - 1)$ における指数 μ を評価することで議論することができる (U_0 : 特性活性化エネルギー) [3]。ピン無しの線材においては、ハーフループ励起の磁束クリープ ($\mu = 0.85$) からダブルキंक励起 ($\mu < 0$) への遷移がみられる。一方、ピン入り線材においては $\mu = 0.85$ から可変領域ホッピング型の磁束クリープ ($\mu = 0.25$) へ遷移しており、 Y_2O_3 ナノ粒子がダブルキंक励起を妨げている影響が現れていると考えられる。

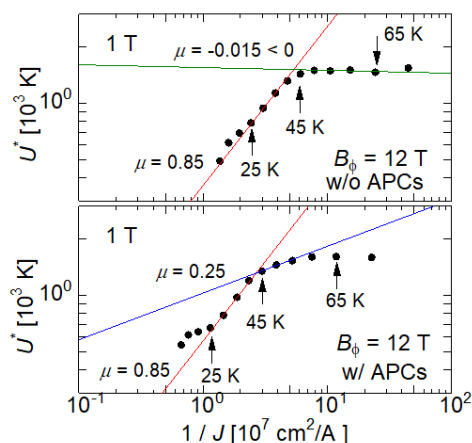


Fig.1 Normalized flux creep activation energy vs $1/J$ in double-logarithmic scales at 1 T.

謝辞

本研究の一部は、原研タンデム加速器施設供用利用制度および科研費 (22K04207) の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] 末吉ら, R6 春季応用物理学会 23a-12N-3
- [2] Miu, Phys. Rev. B **85** (2012) 104519.
- [3] Blatter, et al. Rev. Mod. Phys. **66** (1994) 1125.

REBCO iGS 接合における臨界電流の磁場印加角度依存性

Field angular dependence of critical current in REBCO iGS joints

NIMS¹, 青学大² ○武田 泰明¹, 西島 元¹, 元木 貴則², 下山 淳一², 北口 仁¹

NIMS¹, Aoyama Gakuin Univ.², ○Yasuaki Takeda¹, Gen Nishijima¹,

Takanori Motoki², Jun-ichi Shimoyama², Hitoshi Kitaguchi¹

E-mail: TAKEDA.Yasuaki@nims.go.jp

1. はじめに

REBa₂Cu₃O_y (REBCO) 永久電流マグネットにむけた超伝導接合の研究開発が進んでいる[1]。住友電工が開発した intermediate grown superconducting (iGS) 接合[2]は、高い接合臨界電流 (I_{cj}) と低い接合抵抗を示し、マグネット応用が期待されている。永久電流マグネットの運転電流は I_{cj} よりも低くするため、 I_{cj} 特性を理解することは重要である。我々は最近、超伝導接合を持つ閉ループの電流減衰から低電圧 (10^{-8} V) 基準の I_{cj} を評価しており[3]、iGS 接合の I_{cj} 評価も進めている[4]。本講演では iGS 接合における I_{cj} の磁場印加角度依存性を報告する。

2. 実験方法[3,4]

1本のREBCO線材からなり、iGS接合を持つ1ターンの閉ループ試料(直径100 mm, 自己インダクタンス (L) 0.47 μ H)を用いた。我々が開発した接合抵抗評価装置により50–77 Kで電流減衰測定を行った。ループ中心に配置した銅コイルでループ電流 (I_{loop}) を試料に誘導し、 I_{loop} の時間依存性 ($I_{loop}-t$) を調べた。得られた $I_{loop}-t$ から電圧 $V = -L(\Delta I_{loop}/\Delta t)$ を計算し、電圧基準 $V_c = 10^{-8}$ V の I_{cj} を評価した。スプリットマグネットで水平方向の磁場 (B , 0.1–2.0 T) を接合部に印加し、試料を回転させることで磁場印加角度 (θ) を制御した。 $\theta = 0$ および 90° はそれぞれ $B \parallel c$ および $B \parallel ab$ に相当する。2つの試料 (#A, #B) について、 I_{cj} の磁場印加角度依存性を評価した。

3. 結果と考察

#A および #B の 77 K 自己磁場における I_{cj} はそれぞれ 108 A および 47.5 A であった。Fig. 1 に 0.5 T における両試料の I_{cj} の磁場印加角度依存性を示す。全ての $I_{cj}-\theta$ は、 90° でピークを示し、人工ピンが導入されていない REBCO 線材の臨界電流 (I_c) の角度依存性[5]と似ていた。また、ピークの鋭さは温度や磁場、試料に依存した。実線は REBCO 線材で使われるモデル[6]によるフィッティング結果であり、実験結果とよく一致した。Fig. 2 にフィッティングパラメータ ω_1 と ω_2 の磁場依存性を示す。 ω_2 と比べて、 ω_1 は温度や磁場、試料に大きく依存した。REBCO 線材の $I_c-\theta$ を説明する物理モデル[7]を適用すると、ピークの鋭さは ω_1 で表現されることが考えられる。これは今回の結果とも整合する。以上のことから、iGS 接合の $I_{cj}-\theta$ は、線材の $I_c-\theta$ と同様に物理的に解釈できることが示唆された。当日はこの点を定量的に議論する。

謝辞 本研究は、JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A2 および科研費 22K14482 の支援を受けたものです。試料をご提供いただいたジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社の濱田様、および住友電気工業株式会社の大木様に感謝申し上げます。

参考文献 [1] Takeda *et al.*, *SuST* **35** (2022) 043002. [2] Ohki *et al.*, *SuST* **30** (2017) 115017. [3] Takeda *et al.*, *SuST* **36** (2023) 125010. [4] Takeda *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conf.* **107** (2024) 12. [5] Tsuchiya *et al.*, *IEEE TAS* **27** (2017) 6600205. [6] Muto *et al.*, *IEEE TAS* **34** (2024) 4603105. [7] Long *et al.*, *SuST* **21** (2008) 025007.

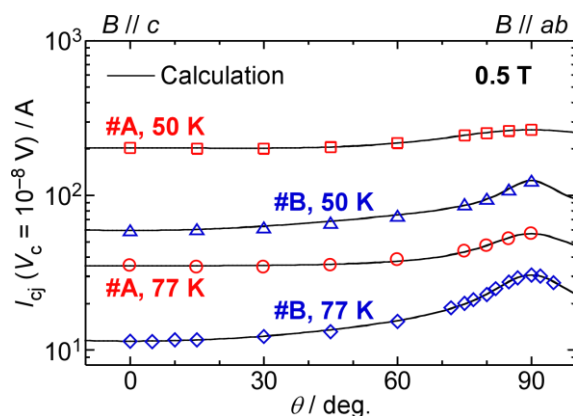


Fig. 1 Field angular dependence of I_{cj} at 50–77 K and 0.5 T

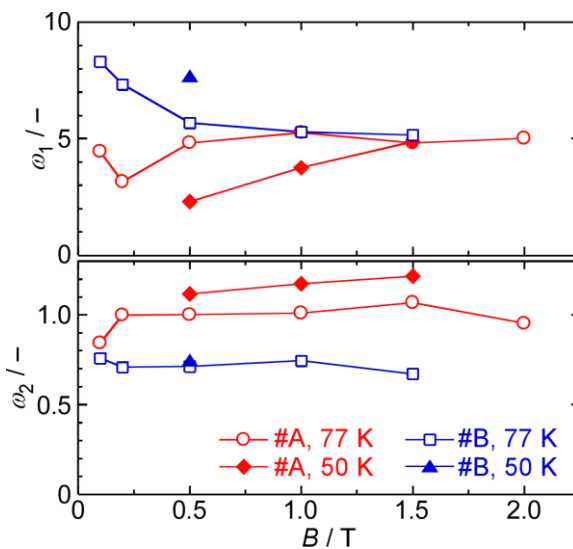


Fig. 2 Field dependence of fitting parameters ω_1 and ω_2 .

曲げひずみ印加による *REBCO* コート線材の面内ドメイン制御とその超伝導特性への影響

Domain control of *REBCO* coated conductors by bending strain and its impacts on superconducting properties

東北大金研¹ ○岡田 達典¹、島村 雄飛¹、淡路 智¹

IMR, Tohoku Univ.¹, ○Tatsunori Okada¹, Yuhi Shimamura¹, Satoshi Awaji¹

E-mail: tatsunori.okada.d8@tohoku.ac.jp

強磁場マグネット応用において、*REBa₂Cu₃O_{7-δ}* (*REBCO*、*RE* は希土類元素/Y) コート線材は巻線時の曲げひずみや、通電時の電磁力による一軸ひずみに曝される。直方晶の *REBCO* は面内に双晶構造を成し、*a* (*b*) 軸が通電電流方向に揃った A (B) ドメインは印加ひずみに対して異なる応答を示す^[1,2]。金研強磁場センターではこれまで、曲げひずみ^[3] や一軸伸長ひずみ^[2,4] 印加下での熱処理による面内ドメイン制御に取り組んできた。その過程で、*REBCO* コート線材を室温下で曲げたまま静置するだけで面内ドメインが変化することを見出した^[4]。これは、**コイル巻線後の *REBCO* のドメイン構造は短尺線材での状態から変化しており、コイル化した *REBCO* コート線材の超伝導特性が短尺線材での測定結果とは全く別物である可能性も示唆する。**よって、ドメイン分率変化が *REBCO* 線材の超伝導特性に与える影響の解明は重要である。

そこで本研究では、(i) 伸長/圧縮性の曲げひずみ ε_b 印加による SuNAM 製 GdBCO 線材の面内ドメイン制御、(ii) ドメイン分率評価のための X 線回折測定、(iii) ドメイン制御した *REBCO* コート線材に対する 15 T までの面内磁場下における直流輸送特性を評価した。但し、曲げひずみによってドメイン制御を施しても、ひずみを徐荷することでドメイン分率が制御前の値に向けて緩和していく^[5] ため、実験 (ii)・(iii) は実験 (i) と同じ曲げひずみ状態で行なった。

その結果、(200)・(020) 回折ピークの強度比・面積比から求めた A ドメイン分率 f_A が、 $-0.43\% \leq \varepsilon_b \leq +0.43\%$ の伸長 (圧縮) 曲げひずみにより線形に減少 (増加) することを確認した。つまり、**少なくとも $|\varepsilon_b| \leq +0.43\%$ の曲げひずみ領域において f_A を制御可能である。** ε_b に凡そ線形変化する f_A と対照的に、ゼロ磁場下の電気抵抗率から定めた超伝導転移温度 T_c は $|\varepsilon_b|$ に伴って減少した。一方で、磁場中電気抵抗率から定めた上部臨界磁場 $B_{c2}^{\parallel ab}$ (0K) (WHH モデル^[6] を適用) や不可逆磁場 $B_{irr}^{\parallel ab}$ (0K) (線形外挿) は $|\varepsilon_b|$ に依らず、TAFI 状態⁷ のピン止めポテンシャル $U_0(B\parallel ab, 77.3K)$ や臨界電流密度 $J_c(B\parallel ab, 77.3K)$ は $|\varepsilon_b|$ に応じて増大する傾向が見られた。すなわち、 **T_c の低下にも関わらず、面内磁場中での通電特性は向上した。**反射 XRD から *c* 軸長が $|\varepsilon_b|$ とともに増大する傾向が見られ、「キャリア供給層-Cu-O₂ 間距離の伸長によるキャリア数の減少」「Fermi 面の 2 次元化 (=有効質量異方性の増大) に伴う面間コヒーレンス長の縮小」と考えれば、 $|\varepsilon_b|$ に伴う T_c 低下と面内磁場中特性の向上を定性的に説明できそうであるが、より詳細な調査が必要である。

[謝辞] 本研究は、東北大学金属材料研究所における共同研究 (202211-HMKGE-0401、202312-HMKPC-0402) と JSPS 科研費 国際共同研究加速基金 (海外連携研究 23KK0073) の支援の下で実施しました。

1) U. Welp *et al.*, Phys. Rev. Lett., **69** (1992) 2130.

2) S. Awaji *et al.*, Sci. Rep., **5** (2015) 11156.

3) T. Suzuki *et al.*, IEEE TAS, **23** (2013) 8000104.

4) T. Suzuki *et al.*, IEEE TAS, **25** (2015) 8400704.

5) T. Okada *et al.*, IEEE TAS, **31** (2021) 6601006.

6) N.R. Werthamer *et al.*, Phys. Rev., **147** (1966) 295.

7) P.W. Anderson and Y.B. Kim, Rev. Mod. Phys., **36** (1964) 39.

高速磁気顕微鏡観察による REBCO 線材内の局所不均一性の機械学習自動検出における解像度、試料線幅、プロセス依存の影響に関する検討

A Study on the Effects of Resolution, Sample Linewidth and Process-Dependence on Machine-Learning Based Auto-Detection of Local Heterogeneity in REBCO Wires by High-Speed Magnetic Microscopy

九大院シス情 ○呉 澤宇, 今村 和孝, 東川 甲平, 木須 隆暢

Kyushu Univ. °Zeyu Wu, Kazutaka Imamura, Kohei Higashikawa, Takanobu Kiss

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

1. はじめに

長尺の希土類系 (REBCO) 高温超伝導材の応用における臨界電流 I_c の空間均一性は最も重要な要求仕様の一つであるが、その支配因子や統計事象を含む特性は未だ十分に明らかとなっていない。我々は、前報において、リール式磁気顕微鏡観察[1]によって得られたテープ面内の 2 次元磁化電流分布に、機械学習による物体検出を適用することで、一般的な 1 次元の I_c 分布の観察では検出が困難な、線材に内包される局所不均一性の自動検出が可能であることを報告した[2]。本研究では、さらに本解析における、検出画像の解像度、試料線幅などの計測条件ならびに線材作製プロセスの影響について検討を行った。

2. 実験方法

測定には、5 mm 幅の PLD 法、4 mm 幅の RCE-DR 法と、4 mm 並びに 2 mm 幅の MOCVD 法による REBCO テープ線材の 4 種類を用いた。リール式磁気顕微鏡観察によって面内の磁化電流密度 J の分布図を取得し、 J 低下領域の画像を教師データとして物体検出モデルの学習を行った[2]。 J を導出する際に、ローパスフィルタを適用することで空間解像度を調整した。

3. 実験結果及び考察

解析に用いる J マップ画像の解像度の影響について検討した。カットオフ波長 0.6 mm で得られた J 分布と、カットオフ波長を 1.0 mm とし解像度を下げた画像を用意した。高解像度の画像で検出モデルをトレーニングし、低解像度の画像に適用した場合、パフォーマンスを表す F1-score が 64%となり、検出精度が低いことが分かった。Fig. 1 にその一例を示す。低解像度の画像では、 J 低下領域を検出できていない。逆に低解像度の画像でトレーニングしたモデルを、高解像度画像に適用した場合も精度が低く、解像度のミスマッチにより検出精度が低下することを確認した。一方、モデルのトレーニングも解析画像も同じ 1.0 mm の解像度画像を用いることにより、Fig. 2 に示すように局所不均一性の領域および種類、線材作製プロセスの差異も含めて正確に検出できた。画像の解像度が下がるにつれて、プロセス依存の詳細情報が失われる傾向が見られるが、1.0 mm 程度の解像度においてプロセスの特徴を未だ捉えており、学習画像と検出画像の解像度を一致させることで、F1-score は 88%となり十分な精度の検出が可能であることが分かった。

線幅の違いによる影響も確認した結果、線幅の異なる学習データを用いたモデルによって、異なる線幅の試料の解析が可能であった。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 JP24H00320, JP23K13368 の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] K. Higashikawa et al., *SuST*, vol. 33, no. 6, 2020, Art. No. 064005.
[2] 呉ら, 2024 応用物理学会春季大会予稿集, 23a-12N-7.

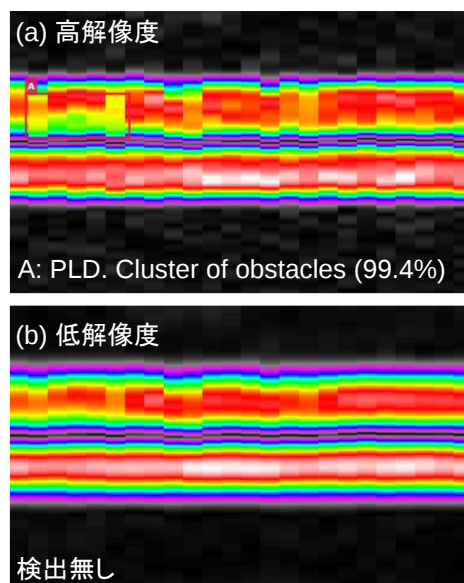


Fig. 1 Comparison of detecting obstacles under the difference of spatial resolution mismatched from the training, in the case of PLD.

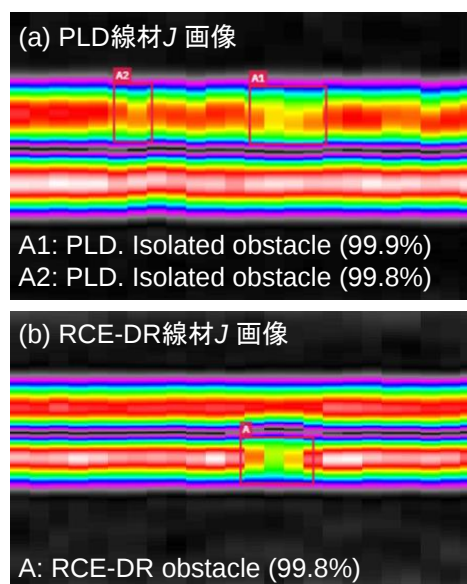


Fig. 2 Examples of successful detection of obstacles by using same image resolution of 1.0 mm for both training and detection. (a) PLD and (b) RCE-DR processed CC tape.