

一般セッション(口頭講演) | 11 超伝導：11.3 臨界電流，超伝導パワー応用

2025年3月16日(日) 9:00 ~ 10:45 皿 K206 (講義棟)

[16a-K206-1~6] 11.3 臨界電流，超伝導パワー応用

馬渡 康徳(産総研)、元木 貴則(青学大)

9:00 ~ 9:15

[16a-K206-1]

高温超伝導線材における直列した球状照射欠陥の磁束ピン止め効果

○末吉 哲郎¹、松井 浩明²、尾崎 壽紀³、坂根 仁⁴、西寄 照和¹ (1.九産大理工、2.産総研、3.関学大工、4.住重アテックス)

9:15 ~ 9:30

[16a-K206-2]

ツイストしたRE系コート線材の縦磁界下における臨界電流の評価

○濱田 凌輔¹、濱本 拓郎¹、木内 勝¹ (1.九工大情報工)

9:30 ~ 9:45

[16a-K206-3]

SDMG法REBCOバルクの臨界電流密度と捕捉磁場に関する考察

○元木 貴則¹、遠藤 淳¹、國本 慧太¹、浅古 諒¹、松永 直也¹、下山 淳一¹ (1.青学大理工)

10:00 ~ 10:15

[16a-K206-4]

常伝導層を介した超伝導線材の接合抵抗に及ぼす超伝導層の抵抗の影響

○馬渡 康徳¹ (1.産総研)

◆ 奨励賞エントリー

10:15 ~ 10:30

[16a-K206-5]

REBCO線材のCu-Cu、Ag-Cu安定層間の音波接合における支配因子と接合材料の影響に関する考察

○世良 真也¹、鈴木 賢次²、呉 澤宇¹、東川 甲平¹、木須 隆暢¹ (1.九大院シス情、2.鉄道総研)

◆ 奨励賞エントリー

10:30 ~ 10:45

[16a-K206-6]

高速磁気顕微鏡観察と機械学習によるREBCO線材内の局所不均一性の自動検出結果における空間解像度の影響に関する検討

○呉 澤宇¹、今村 和孝¹、東川 甲平¹、木須 隆暢¹ (1.九大院シス情)

高温超伝導線材における直列した球状照射欠陥の磁束ピン止め効果

Flux Pinning Effect of Spherical Irradiation Defects Arranged in Serial

in High- T_c Superconducting Tapes

九産大理工¹, 産総研², 関学大工³, 住重アテックス(株)⁴

○末吉哲郎¹, 松井浩明², 尾崎壽紀³, 坂根仁⁴, 西寄照和¹

Kyushu Sangyo Univ.¹, AIST², Kwansai Gakuin Univ.³, SHI-ATEX Co., Ltd.⁴

○Tetsuro Sueyoshi¹, Hiroaki Matsui², Toshinori Ozaki³, Hitoshi Sakane⁴, Terukazu Nishizaki¹

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 特性は、ピン止め点の形状や分散状態に大きく影響を受け、その最適化は理論的限界値に近づける上で1つの鍵と考えられる。柱状のピンは、特定の磁場方向でのみ強いピン力を示し、球状のピンはピン止め力は比較的弱い、全磁場方向で J_c 増加に寄与する。ここで、一般に試料中の球状のピンはランダムな配置であるが、低いエネルギーの重イオン照射によってビーム方向に沿った直列した球状ピンを形成できる[1]。直列した球状ピンでは、複数の量子化磁束に対し等方的なピン止めに加えて、量子化磁束1本に対し集中的な強いピン止めを期待できるが、そのピン止め特性についての報告例はほとんどない[2]。

本研究では、高温超伝導薄膜に対して直列した球状欠陥を形成する 44 MeV Au イオン[1]を用いて、人工ピン入り/無し的高温超伝導線材における磁場中の臨界電流密度特性に与える影響について調べた。

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 がドーパされた 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。44 MeV Au イオン照射は、筑波大学 6MV タンデム加速器にて行った。照射方向は、膜面に垂直 (c 軸方向に平行) である。照射量は、 $2.42 \times 10^{10} \sim 4.84 \times 10^{11}$ ions/cm² (マッチング磁場 $B_\phi = 2 \sim 10$ T) である。 J_c の磁場依存性は、SQUID 磁束計を用いて c 軸方向の磁場での磁化特性から評価した。

Fig.1 に、10~77 K における J_c の磁場依存性を示す。GdBCO 超伝導線材においては、77 K の 2 T 以上の磁場で、 $B_\phi = 2$ T の照射試料が未照射試料より高い J_c 値を示しているが、その他

の温度、磁場においては、未照射と同程度または下回っている。一方、ピン入りの YBCO 超伝導線材においては、全ての照射試料において低磁場から高磁場まで未照射試料の J_c 値より高い値を示している。これは、ピン入り、ピン無し線材間の照射による T_c の減少の違いが原因の1つとして考えられ、これまで報告してきたイオン照射効果とほぼ同じ傾向を示している[3]。特にピン無し線材では、 T_c の減少が大きいことに加えて、導入したピン止め点の体積が小さいために、 J_c 特性を増加するまでに至らなかったと考えられる。これに対し、 T_c の減少が小さいピン入り線材においては、照射量に対して J_c は増加する傾向を示している。

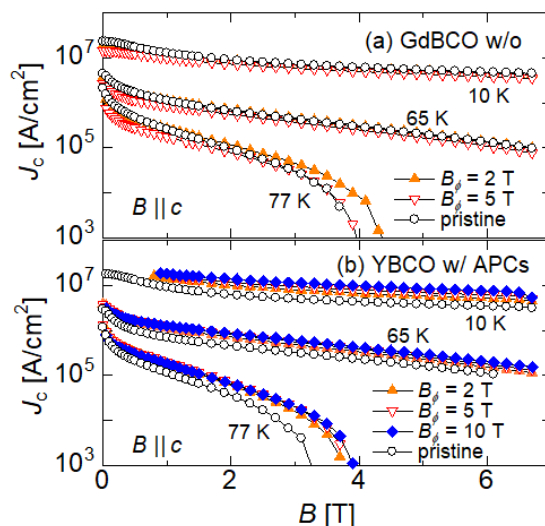


Fig.1 Magnetic field dependence of J_c at 10 K and 77 K for (a) YBCO CCs w/ APCs and (b) GdBCO CCs w/o APCs, where 44 MeV Au ions were employed.

謝辞

本研究の一部は、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] Matsui *et al.* JJAP **61** (2022) 043001.
- [2] Strickland, *et al.* IEEE TAS **33** (2023) 8000205.
- [3] 末吉ら, R5 秋季応用物理学会 21a-C301-1

ツイストした RE 系コート線材の縦磁界下における臨界電流の評価

Evaluation of Critical current in longitudinal magnetic field of twisted RE conductors

九工大情報工¹, [○]濱田 凌輔¹, 濱本 拓郎¹, 木内 勝¹Kyushu Inst. of Tech.¹, [○]Hamada Ryosuke¹, Hamamoto Takuro¹, Kiuchi Masaru¹

E-mail: hamada.ryosuke348@mail.kyutech.jp

1. はじめに

超伝導線材の電流 I の通電方向に対して平行に磁界 B を加えた縦磁界 ($B \parallel I$) では、垂直に B を加えた横磁界 ($B \perp I$) よりも臨界電流密度 J_c が増加する。現在応用機器への利用が期待される RE 系コート線材でも臨界電流 I_c の増加が報告されている。ただし、その増加率は小さく、原因として自己磁界の影響や酸化物超伝導体の 2 次元的な電流の流れが考えられている。

これまでに市販されている複数の RE 系コート線材にツイストを加えて電流の流れを 3 次元的に変化させることで、縦磁界下での I_c が増加することを報告した [1]。そこで本研究では、RE 系コート線材に異なるツイストピッチ長を加えた場合の縦磁界下での I_c 特性へ与える影響を調査した。また、ツイストによる線材へのひずみと、電流と磁界の平行度を考慮したモデルと比較し、その影響も調べた。

2. 実験方法

本研究で使用した線材は Faraday Factory Japan 製の 4 mm 幅 RE 系コート線材で、自己磁界での臨界電流 I_c は 250 A 程度である。線材へのツイストは、1 ピッチの線材長さであるツイストピッチ (TP=[mm]) として、TP=200、175、150 とした。ツイストの方向は、電流通電による自己磁界の方向を考慮して Z 巻き方向に加えた。また、比較のために未ツイストの Flat 線材も準備した。

I_c は電界 E -電流 I 特性は直流四端子法を用いて測定し、 1.0×10^{-4} V/m の電界基準で決定した。磁界は線材のツイスト軸に対して平行に Bi2223 超伝導コイルを用いて 0.3 T まで加えた。全ての実験は液体窒素中で行った。

3. 測定結果と解析

Fig.1 に TP=200、175、150 および Flat の I_c の縦磁界特性を示す。Flat は縦磁界下でも I_c の自己磁界からの増加はないが、ツイストしたすべての線材では 0.07 T 近傍で自己磁界 I_c から 1.0 % の I_c の増加が見られた。また磁界を増加させるとそれぞれの TP において、 I_c の磁界特性が変化し、TP の減少に伴って I_c の磁界特性は向上する傾向が見られた。以上から TP=175 程度のツイストは、 I_c の劣化なく増加することがわかった。

得られた結果に対して、ツイストによって線材に加わるひずみ [2] による I_c の劣化と、電流と磁界の

平行度の変化を考慮したモデルで解析した。Fig. 2 に TP=200 と TP=150 における解析結果と実験結果の比較を示す。TP=200 の 0.3 T 近傍での多少の違いがあるが、解析結果との一致はよい。したがって、ツイストによる I_c の増加は、電流と磁界の平行度の向上によるものと考えられる。解析の詳細は発表当日に行う。

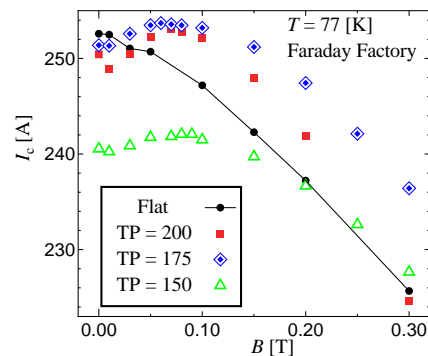


Fig. 1 Longitudinal magnetic field dependence of I_c for TP=200, 175, 150 and Flat at 77 K.

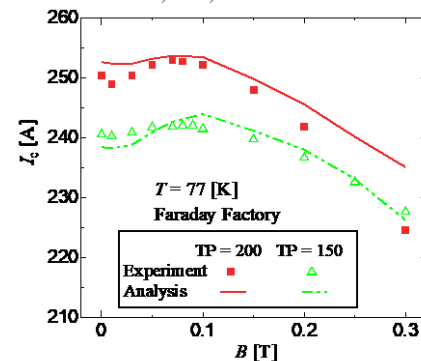


Fig. 2 Comparison of experimental result and analysis result for TP=200, TP=150 at 77 K.

謝辞

本研究の一部は、日本学術振興会の科研費 (21H01872) の助成により実施したものである。

参考文献

- [1]. 濱本他：応用物理学会 2024 年春季大会 23a-12N-4
- [2]. Makoto Takayasu *et al.*, Supercond. Sci. Technol. 25 (2012) 014011

SDMG 法 REBCO バルクの臨界電流密度と捕捉磁場に関する考察

Study on critical current density and trapped field for SDMG-processed REBCO bulks

青学大理工¹ ◯元木 貴則¹, 遠藤 淳¹, 國本 慧太¹, 浅古 諒¹, 松永 直也¹ 下山 淳一¹

Aoyama Gakuin Univ.¹ ◯Takanori Motoki¹, Jun Endo¹, Keita Kunimoto¹, Ryo Asako¹,

Naoya Matsunaga¹, Jun-ichi Shimoyama¹

E-mail: motoki@phys.aoyama.ac.jp

1. はじめに

REBCO 溶融凝固バルクは、小型でも強磁場を捕捉できるため強力超伝導磁石としての応用が期待されている。従来の溶融凝固バルクは、バルク上面に設置した小型の種結晶を起点とする溶融凝固法で育成されている。一方、これまでに我々は全体が単一結晶成長領域からなる溶融凝固バルクの作製が可能な Single-Direction Melt Growth (SDMG) 法を開発し報告してきた^{[1][2]}。REBCO バルクの応用として、液体窒素浸漬(77 K)での磁気浮上などに加え、NMR 等に向けた 60 K 以下の中低温での強磁場応用が想定される。本研究では小片試料の臨界電流密度 J_c を温度、磁場の関数として定量的に評価し、中低温捕捉磁場特性との対応について考察した。

2. 実験方法

日本製鉄社製 EuBCO バルク (Eu-QMG[®]) を板状に切り出して seed plate とし、SDMG 法を用いてその上に全体が c 軸成長領域から成る YBCO 溶融凝固バルクを育成した。原料は TEP 社製混合粉末 (RE123:RE211 = 7:3) に包晶温度を低下させるため 10 wt% の Ag_2O を、RE211 の微細化のため 0.5 wt% の CeO_2 をそれぞれ混合したものをを用いている。得られたバルクについて後熱処理により酸素量を制御した後、小片試料を切り出した。VSM を用いて最大 9 T までの外部磁場下で磁化測定を行い、拡張 Bean モデルを用いて 40–77 K における J_c - B 特性を評価した。別に用意したリングバルクのリング中心における中低温捕捉磁場特性を評価し、小片の J_c 特性と捕捉磁場特性の対応について考察した。

3. 結果と考察

Fig. 1 に SDMG 法で作製した YBCO バルクの 40–77 K における J_c の磁場依存性と次式^[3]を用いてフィッティングした曲線を合わせて示す。

$$J_c(B) = J_{c1} \exp(-B/B_1) + J_{c2}(B/B_2) \exp\{(1/k)(1 - B/B_2)^k\}$$

J_{c1} , J_{c2} , B_1 , B_2 , k がフィッティングパラメータであり、例えば、40 K のデータについてはそれぞれ 2.7×10^5 A cm⁻², 1.8×10^5 A cm⁻², 0.56 T, 6.6 T, 0.236 と推定された。このフィッティングにより磁場の高磁場側への外挿を含めて実際の $J_c(B)$ 特性を適切に表現できていると考えられる。

さらに、これらのフィッティングカーブを用いて $J_c(B, T)$ の 2 次元マップを推定したものを Fig. 2 に示す。図中の等高線は 10^4 A cm⁻² 間隔の等 J_c 面を表しており、40–50 K 程度の中温域では磁場中の J_c が向上している様子が確認できる。当日は、Fig. 2 の J_c マップを元に、捕捉磁場特性の温度依存性を推定し、実測の捕捉磁場との対応について考察する。

[1] T. Motoki et al., *APEX* **13** (2020) 093002. [2] T. Motoki et al., *SuST* **35** (2022) 094003. [3] S. Namba et al., *SuST* **32** (2019) 125011.

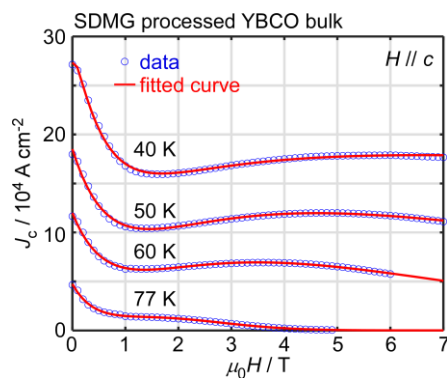


Fig. 1. YBCO バルク小片の 40–77 K における J_c の磁場依存性と各フィッティング曲線

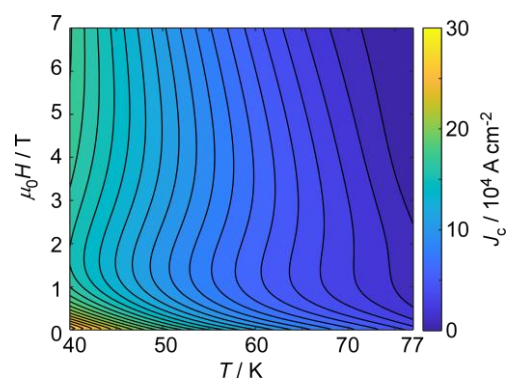


Fig. 2. フィッティング曲線の内挿により推定した YBCO の $J_c(B, T)$ マップ

この成果は、NEDO 未踏チャレンジ 2050 (22M1C01Y) の委託業務の結果得られたものです。

常伝導層を介した超伝導線材の接合抵抗に及ぼす超伝導層の抵抗の影響

Effects of the resistance of superconducting layers on the joint resistance of superconducting wires through normal layers

産総研 ○馬渡 康徳

AIST, ○Yasunori Mawatari

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

安定化材やはんだ等の常伝導層を介した超伝導テープ線材の接合において、超伝導層の電気抵抗がゼロであれば、接合抵抗は、単に常伝導層の抵抗(あるいは接触抵抗)で決まり、接合の長さ(面積)に反比例すると考えられる。一方で、接合長さがある閾値を超えると、接合抵抗が接合長さに依存せず一定となることが実験的・数値的に示されている[1,2]。また、接合長さが十分長い場合や通電電流が大きい場合などにおいて、超伝導層の抵抗が接合全体の抵抗にどのような影響を及ぼすか明らかではない。

本研究では、安定化材や常伝導層を介した超伝導テープ線材の接合のモデルとして、Fig. 1のように、常伝導層を挟んで 2 枚の超伝導層の端部を重ねた接合を考え、一次元分布定数回路モデルを用いて接合部分の電流および電位分布を解析した。安定化材の抵抗、常伝導層の抵抗、およびそれらの界面の接触抵抗などを考慮し、均質化した単一の常伝導接合層としてまとめて扱うモデルを用いた[2]。簡単のため、線材の幅方向および厚さ方向の依存性を無視し、電流および電位分布は線材の長手方向(x 方向)にのみ依存する一次元モデルを考えた。長さ a の接合が $0 < x < a$ にあり、常伝導層の単位長さあたりのコンダクタンス G_j と超伝導層の単位長さあたりの抵抗 R_s を考慮し、上下の超伝導層における電流および電位分布について、分布定数線路モデルに基づく回路方程式を導いた。ここで、 G_j は一定とし、 R_s は通電電流の乗乗に比例する乗乗則(n 値)モデルを仮定した。その回路方程式より接合の特徴的長さ $b = (2G_j R_s)^{-1/2}$ が定義され、接合長さ a と特徴的長さ b との大小により、常伝導接合層を通過する電流の分布や接合全体の抵抗 R_j は、おおよそ次のようになることがわかった。短い接合 $a \lesssim b$ の場合、超伝導層の抵抗は無視することができ、常伝導接合層を通過する電流分布は一様であり、接合抵抗は $R_j = 1/(G_j a)$ で与えられる。一方、長い接合 $a \gg b$ の場合、超伝導層の抵抗の影響により、接合層の通過電流は接合の縁付近($x \sim 0, \sim a$)に集中し、接合抵抗 R_j は接合長さ a に依存しない。

本研究は JSPS 科研費 20K05314 の助成を受けて行われた。

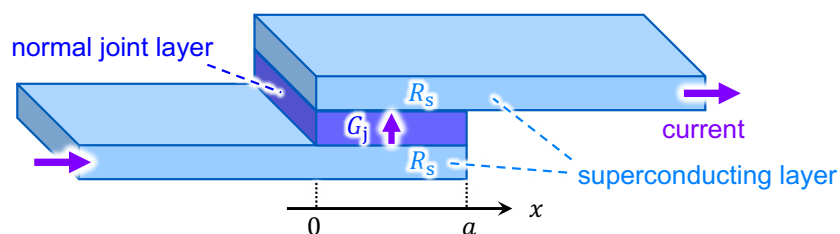


Fig. 1: Schematic of two superconducting layers with a normal joint layer in between.

[1] Y. Pan et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **27**, 6601905 (2017).

[2] Y. Pan et al., Supercond. Sci. Technol. **31**, 095004 (2018).

REBCO 線材の Cu-Cu、Ag-Cu 安定層間の音波接合における支配因子と接合材料の影響に関する考察

Governing Factors and Effect of Bonding Materials in Sonic-Welding between Cu-Cu, Ag-Cu Stabilization Layers of REBCO Coated Conductors

九大院シス情¹, 鉄道総研² ○世良 真也¹, 鈴木 賢次², 吳 澤宇¹, 東川 甲平¹, 木須 隆暢¹
Kyushu Univ.¹, RTRI.², °Shinya Sera¹, Kenji Suzuki², Zeyu Wu¹, Kohei Higashikawa¹, Takanobu Kiss¹
E-mail: s.sera@super.ees.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

希土類系 (REBCO) 高温超伝導線材の低抵抗接合技術の確立は、REBCO 線材の応用のための基盤技術として不可欠であり、迅速かつ再現性に優れる手法の確立が求められている。そこで音波接合が注目されている。音波接合はワーク上に重ね合わせた試料に対し Horn で加圧しながら高周波振動を印加し、接合界面に拡散接合を形成する手法であり、1 s 程度で接合界面に金属結合を形成できる。しかし、従来法では低抵抗の接合実現には、半田や In 箔の併用が不可欠であった[1],[2]。これに対し、我々はプロセス条件を精査することで REBCO 線材の金属安定化層同士を半田フリーで低抵抗に接合できることを報告した[3]。本研究では、音波接合の接合抵抗率の支配因子についてプロセスパラメータの影響を調査すると共に、その挙動を記述する解析モデルを提案し、実験結果との比較によりその妥当性について検討した。

2. 実験方法

本研究では、20 μm 厚の Cu 安定化層を有する 3 mm 幅の PLD 法による REBCO 線材と、Cu 層を堆積せず最表面に 2 μm 厚の Ag 層のみの 4mm 幅 REBCO 線材の 2 種類を用いて、入力パワー、エネルギーを変化させて Cu-Cu、Ag-Cu 接合試料を作製した。このとき、超伝導層同士を向かい合わせてラップジョイントを形成し、荷重 1750 N 下で 15 kHz の音波振動を印加した。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に異なるパワーで作製した Cu-Cu 接合の接合抵抗率 ρ_j のエネルギー依存性を示す。接合抵抗率はエネルギーに対して指数関数的に減少し、十分なエネルギーを投入すればある一定値に収束した。また、パワーの増大により、 ρ_j の収束に要するエネルギーが小さくなる傾向を示した。我々は、界面での接合形成確率に関する考察を基に、次式による解析モデルを提案する。

$$\rho_j(E, P) = \frac{\rho_0(1 + \alpha)}{1 + \alpha - \exp\left[-\frac{E}{U(P)}\right]}$$

ここで、 ρ_0 は接合抵抗率の飽和値、 $\alpha(1+\alpha) \approx \alpha$ は加圧のみによる接触割合 ($0 < \alpha \ll 1$)、 $U(P)$ は界面の金属原子間の結合エネルギーを示す。本モデルでは、接合割合が結合エネルギー $U(P)$ と投入エネルギー E の比で記述されるアレニウスの式に従うと考えた。Fig. 1 の実線は本モデルを実験結果に対して、 α 、 $U(P)$ を Fitting パラメータとして Fit した結果であり、よく再現していることが分かる。その際の結合エネルギー U は図内に示すとおりであった。Ag-Cu 接合も同様の振る舞いを示す一方で、Ag-Cu 接合における接合抵抗率は Cu-Cu 接合に比べ 3 倍程度大きくなった。Fig. 2 に Cu-Cu 接合と Ag-Cu 接合における結合エネルギーの変化を示す。両者の違いは結合エネルギーの差異に起因すると考えられる。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 JP19H05617 ならびに JP24H00320 の助成を受けて実施したものである。

参考文献

- [1] H. Shin et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 26, 6601704 (2016).
- [2] S. Ito et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 29, 6600405 (2019).
- [3] 世良ら, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集(2024 春) 23a-12N-8.

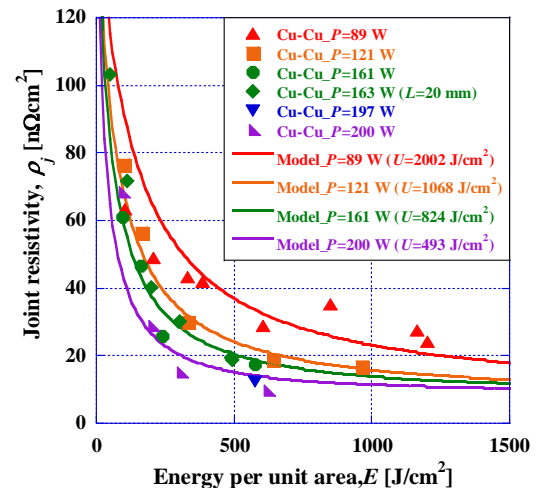


Fig. 1 Comparison between experimental result and fitting curve for Cu-Cu joint. Assuming $\rho_0=10$, $\alpha=0.0679$ and U were fitted by the least squares method as fitting parameters.

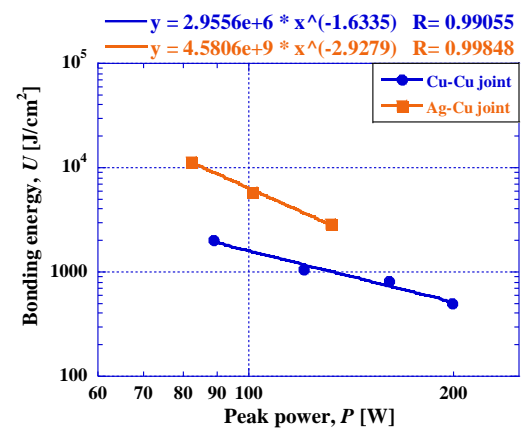


Fig. 2 Comparison of the bonding energy U in Cu-Cu and Ag-Cu joints as a function of input peak power.

高速磁気顕微鏡観察と機械学習による REBCO 線材内の局所不均一性の自動検出結果における空間解像度の影響に関する検討

Influence of Spatial Resolution in Machine-Learning Based Automatic Detection of Local Homogeneity 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

長尺希土類系高温超伝導 (REBCO) 線材の臨界電流 I_c の空間均一性は最も重要な要求仕様の一つである。我々は高速磁気顕微鏡観察に機械学習を適用することにより局所欠陥の自動検出に成功した[1]。前報において、リール式磁気顕微鏡観察によって得られた異なる空間解像度のテープ面内の2次元磁化電流分布画像に、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]。しかし、計測時の空間解像度の影響は未だ十分に明らかとなっていない。本研究では、検出画像の解像度による局所不均一性の解析結果の影響について検討を行った。

2. 実験方法

測定には、PLD 法による線幅 5 mm の REBCO テープ線材を用いた。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 分布を長手方向 0.6 mm と高い解像度で取得し、カットオフ波長 1.0 mm の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。物体検出モデルの学習は、高解像度と低解像度 2 種類 J 低下領域の画像を教師データとして独立に行い、高解像度と低解像度用のモデル 2 つを作成した。モデルを教師データと同じ解像度の画像に適用し、局所不均一性の検出と解析を行った[2]。

3. 実験結果及び考察

Fig. 1 に同じ線材位置の異なる解像度 J マップおよび、対応するモデルを用いた検出結果を示した。先行研究[2]により、モデルの教師データと検出画像の解像度が同じにもかかわらず、低解像度の場合は電流障害領域として検出できない原因は、サイズの小さい Isolated obstacle は解像度を落としたことで周囲の空間情報に埋もれてしまったと考えられる。Fig. 2 に異なる空間解像度による Isolated obstacle のサイズ分布の解析結果を比較した。解像度が低下したことで、カットオフ波長 1.0 mm 付近よりサイズの小さい obstacle が検出されなくなった。それ以上の obstacle はおおよそ同じであった。さらにサイズの大きい Cluster タイプの obstacle 数も高解像度の場合 942 個検出されたのに対して、低解像度の場合には 1154 個と同程度であることが分かった。

以上の知見により、小さい電流障害領域が大きな危害を及ぼす検出が必要な場合は高い解像度を維持し計測する必要があるが、大きい電流障害領域のみ注意する必要がある応用では本提案手法である2次元電流分布計測と物体検出の組み合わせが適用可能であった。

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 応用物理学会秋季大会予稿集, 19a-C31-11.

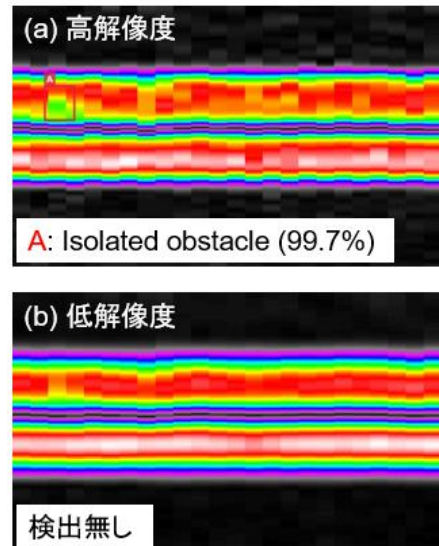


Fig. 1 Comparison of sheet current density J -map and detecting results of obstacles by an object detection models trained by different teaching data with J maps of spatial resolution.

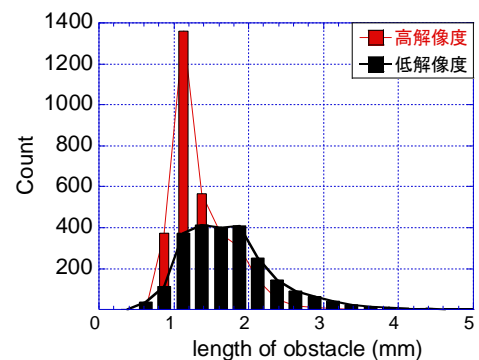


Fig. 2 Comparison of the size distribution of isolated obstacle under the difference of spatial resolutions.