解 説

高温超電導テープ線材の局所 J_c 分布評価技術

木須 隆暢*

Characterization Techniques for Local Critical Current Densities in HTS Tapes

Takanobu KISS*

Synopsis: The high spatial homogeneity of critical current density, J_c , in HTS tape is one of the most important requirements to realize practical superconducting tapes. However, it is hardly possible to detect local J_c distribution using conventional characterization techniques because the length scale of such J_c variation is several orders smaller than that of the conventional techniques. We have succeeded in developing novel techniques such as low-temperature laser scanning microscopy and reel-to-reel Hall probe scanning microscopy for spatially resolved measurements of local J_c in HTS tapes of multiple lengths and operating conditions. In this paper, I summarize these techniques together with other useful methods including magneto-optical imaging and the Hall sensor array technique.

Keywords: high T_c superconducting tape, critical current, spatial distribution, low temperature laser scanning microscopy, magnetic microscopy

1. はじめに

高温超電導線材の臨界電流密度は、一般に四端子法や磁化法によって評価される。四端子法においては、試料両端より電流 I を印加し、電圧端子間に誘起される電界あるいは抵抗率が基準値に達したところで臨界電流値 I_c を定義する。ここで、電界は発生電圧 V を電圧端子間距離で除した値で定義され、臨界電流密度 J_c は試料の超電導断面の面積で I_c を除した値として定義される。超電導線材は一次元の電流輸送媒体であることを考えると、四端子法は最も実用環境に近い状態での測定であり、その意味で測定法としての重要性も高い。また、磁化法においては試料全体の磁気モーメントを測定し、臨界状態モデルによる磁化電流の空間パターンを仮定し、試料内の磁化電流密度を評価する。臨界状態モデルによると、試料内の磁化電流密度の大きさは J_c と等しく¹⁾、よって試料の J_c 値の評価が可能となる。磁化法では電流電圧端子の取り付けも必要なく、かつ大電流印加時の試料の焼損といった問題も回避できる利点を有する。しかしながら、いずれの手法も直接的な観測量は試料サイズに亘るマクロな物理量であり、 J_c の値は試料の均一性を前提として導出されている点に注意が必

要である。筆者らは研究の初期の段階から、高温超電導線材の電流輸送性能は、局所不均一性の影響を顕著に受けることを指摘し^{2,3)}、試料内の局所的な J_c 分布の評価が本質的に重要であることを示してきた。超電導体特有の非線形な電界—電流密度 (E - J) 特性のため、欠陥近傍の僅かな電流不均一は電界の著しい空間局在を引き起こす^{4,5)}。このことから、線材内の空間均一性は、臨界電流の向上や信頼性の確立など、実用上重要な研究課題である。電流制限因子の解明のためには、SEM や TEM を用いた nm から μm スケールの結晶組織観察が極めて有効であるが、その観測領域は典型的に数 $10\ \mu\text{m}$ から $100\ \mu\text{m}$ 程度に制限される。よって、筆者らは、臨界電流制限因子を明確化し高性能線材を実現するアプローチとして、電磁気的な顕微手法を用いて局所的な J_c 分布を数 $10\ \mu\text{m}$ から $100\ \mu\text{m}$ の解像度で明らかとし、 J_c 低下位置を特定した上で SEM や TEM との複合観察を行うハイブリッド顕微法を提案している。さらに、工業材料としての実用線材は km オーダーであることから、品質管理の観点からは、長尺線材の高速な評価が求められる。また、一連の高温超電導線材は、幅広のテープ形状を有していることから、線材磁化の大きさに影響する線材幅や、局所的な J_c 低下部位の面内での位置検出など、2 次元的な空間情報の取得が重要であることを指摘し、そのための評価手法の確立に取り組んできた。

J_c 分布の評価手法としては、電流を流した時の発生電界を観測する手法と、試料内電流から生じる磁界を検出する手法とに大別できる。しかしながら、観測目的に応じて対

Received September 4, 2014

*九州大学大学院システム情報科学研究院
〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744
Department of Electrical Engineering, Kyushu University,
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan
E-mail: kiss@sc.kyushu-u.ac.jp
DOI: 10.2221/jcsj.49.465

象とする空間スケールは何桁も変化し、また温度、磁界などの動作環境や試料内の電流密度や電界も大きく変化するため、観測手法も多様に変化する。本稿では、筆者等がこれまで開発してきた、低温レーザ走査顕微鏡、走査型 SQUID 顕微鏡、走査型ホール素子顕微鏡を中心として、磁気光学法や既に市販の評価装置が普及している配列 Hall 素子法など他の手法も含めて、高温超電導テープ線材における J_c の空間分布を測定する手法について解説する。

2. 短尺線材の局所 J_c 分布評価技術

2.1 低温レーザ走査顕微鏡 (LTLSM)

欠陥等の電流障害因子が存在する場合は、超電導体特有の非線形な通電特性のために、損失は欠陥近傍に局在する。高温超電導体の E - J 特性は E が J の n 乗に比例して増大する n 値モデル: $E(J)=E_c(J/J_c)^n$ 、によって近似的に表されることが知られている。ここで E_c は電界基準であり一般に $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ が用いられる。欠陥近傍では電流が迂回することにより偏りが生じ、電界はその n 乗で増大することから空間的な局在を生じる^{4,5)}。このことは n 値が大きいほど顕著となる。しかしながら、不均一性が問題となる典型的な空間スケールは、数 μm から $100 \mu\text{m}$ 程度であり、一般に用いられる四端子法による空間分解能に比べ何桁も小さい。そこで我々は、集光したレーザビームを用いて、磁束フロー電圧の空間情報を選択的に取得する低温レーザ走査顕微鏡法 (LTLSM: Low Temperature Laser Scanning Microscopy) を用い、超電導線材内の局所的損失分布を観測するシステムを構築した⁵⁻⁸⁾。

Fig. 1 に本測定法の原理と筆者らの研究室で開発した高磁界対応の装置の外観写真を示す。本装置では、超電導状態の試料に一定電流を印加し、強度変調を加えたレーザスポット光を試料表面に照射し局所的に加熱することにより J_c の変調を加え、レーザ照射位置で生ずる電圧応答をロックインアンプを用いて計測する。対物レンズを用いてレーザを集光し、試料表面に照射する。試料は、光学窓を有する温度可変クライオスタットに設置されており、電流電圧端子の設置は通常の四端子法と同様である。レーザ照射に伴い、試料内の温度が周囲の温度に比べ局所的に僅かに上昇する。したがって、レーザ照射によって照射位置でのみ臨界電流が局所的に低下し、その結果、熱的に磁束フローが誘起され、端子間に電圧を生じる。すなわち、レーザ照射時の J_c 値が、観測点のバイアス電流密度 J より小さくなる点で磁束フローが誘起され、電圧応答を生じる。このときの電圧振幅の大きさは、超電導体特有の強い非線形性を有する E - J 特性のために、局所電界に比例する。例えば、 E - J 特性が n 値モデルで与えられる場合、レーザ照射位置における出力電圧 ΔV は以下のように与えられる⁸⁾。

$$\Delta V(x,y) \approx -\frac{\partial J_c}{\partial T} \frac{E(x,y)}{J_c} 2n \Delta T \quad (1)$$

Fig. 1 Principle of low-temperature laser scanning microscopy (LTLSM), and a photograph of a high-field LTLSM (HF-LTLSM) system developed in our laboratory.

Fig. 2 Visualization of local flux flow dissipation using the HF-LTLSM under an external magnetic field of 1 T at 84 K in a $100 \mu\text{m}$ -wide, 1 mm -long micro-bridge patterned in a YBCO-coated conductor. Bias current density was increased from (a) 5.33×10^4 , (b) 6.00×10^4 , (c) 6.67×10^4 , and (d) $7.33 \times 10^4 \text{ A}/\text{cm}^2$. The inset shows global E - J characteristics of the bridge obtained using the conventional four-probe method.

ここで、 Λ はレーザスポットの半径、 ΔT はレーザ照射に伴う局所的な温度上昇を示す。

レーザスポットの照射位置を試料面内で走査することにより、試料面内の電界分布を得ることが可能となる。レーザのスポット径は $2 \sim 3 \mu\text{m}$ であり、典型的に数 μm の空間分解能で損失分布の観測が可能となる。すなわち、従来の四端子法に比べ、空間分解能を飛躍的に向上させることに成功した。したがって局所的な電界基準によって J_c の空間分布を評価できる^{6, 7)}。本手法はまた、高磁界中でも適用可能であるという大きな利点を有している。本システムでは、試料ステージ部位を室温ボアを有する超電導マグネット内に配置しており、試料面に対して垂直方向に最大 5 T の磁界を印加することが可能である。

Fig. 2 に Ion Beam Assisted Deposition (IBAD) 法で製作した配向基材上に成膜した YBCO コート線材を用いて、1 T の外部磁界中で、磁束フロー損失の空間分布を可視化した例を示す。印加電流の増大に伴って、局所的に J_c が低い領域から損失が発生していることが分かる。本試料は、77 K、自己磁界中で 2 MA/cm^2 程度の J_c 値を有するが、 J_c 向上のためには均一性のさらなる向上が有効であることを示している。低 J_c 領域は、数 $10 \mu\text{m}$ ～ 数 $100 \mu\text{m}$ 程度の間隔で現れており、IBAD や YBCO 層のグレインサイズに比べて遙かに大きい。

2.2 走査型 SQUID 磁気顕微鏡 (SSM)

前節に述べた、試料内の局所電界と相補的な物理量として、局所電流密度がある。局所的な電流分布を計測する手法としては、試料近傍の磁界分布を計測する磁気顕微法がある。用いる磁気センサによっていくつかの手法に分類され、その特徴も異なる。本節では、高感度な磁気計測を可能とする SQUID 磁気センサを用いた、走査型 SQUID 磁気顕微鏡 (SSM: Scanning SQUID Microscope) による電流分布の評価法について述べる。

本測定では、金属系 SQUID を使い、センサチップ上に直径 $10 \mu\text{m}$ の 1 ターンコイルからなるピックアップコイルと SQUID 素子を集積し、試料表面を走査することによって垂直磁界成分の 2 次元磁気像を得る。走査の際の試料表面とピックアップコイルとの距離は典型的には数 μm ～ $10 \mu\text{m}$ の条件で測定を行う。試料は真空断熱雰囲気配置され、SQUID センサと試料ステージとは独立な温度制御が可能である。

Fig. 3 に Fig. 2 に示したものと同一試料を用いて、SSM によって得られた自己磁界分布の通電電流依存性の測定結果を示す⁸⁾。自己磁界分布が通電電流の複雑な流れを反映して不均一になっていることが分かる。また、試料端から侵入する磁界が、電流の増大に伴いパーコレーション的に広がっている様子が確認できる。

磁気像より、ビオ・サバル則の逆問題を解くことにより、各座標位置でのシート電流ベクトルを求める⁹⁾。逆問

Fig. 3 Self-field distribution observed using a scanning SQUID microscope (SSM) with transport currents: 3, 4, and 5 mA at 87.4 K. The inset shows the global I - V characteristics of the bridge. The sample is the same as that shown in Fig. 2.

Fig. 4 Sheet current density distribution obtained from the self-field image shown in Fig. 3 ($I=5 \text{ mA}$) by solving the inversion problem of the Biot-Savart law. Thickness of the YBCO layer is 300 nm.

題による J_c 分布の導出において、試料の厚さ方向の電流分布がある場合には一意の解を得ることが困難であるが、厚さ方向の分布を無視し、表面のみに流れるシート電流として近似できる場合には、磁気像より電流ベクトル分布の導出が可能である。また、膜厚方向の分布を一定と仮定すると、シート電流密度を膜厚で除することで単位断面積当たりの電流密度を得ることができる。HTS テープ線材において超電導層の厚さは十分薄く、シート電流の近似は良く成り立つ。逆問題の解析手法は種々の方法が提出されているが、本研究では、離散フーリエ変換を用い、波数空間で解く手法を採用している^{9, 10)}。

Fig. 3 に示した自己磁界分布から求めた電流分布を Fig. 4 に示す。線材内部において通電電流が不均一に分布する様子が分かる。同図中に円で示した領域は、Fig. 3 の 5 mA 通電時の自己磁界分布に示すように、ブリッジの臨界電流に到達した際に磁束がパーコレートする領域に対応している。この部位の局所的電流密度の最大値は、均一に流れた際の平均の電流密度に比べ 2 倍程度に増大している。その結果、Fig. 2 に示したようにこの部位において局所電界が発生し

Fig. 5 Sheet current density distribution obtained using a scanning Hall probe microscope (SHPM) for a 1 cm-wide YBCO-coated conductor tape with different values of bias current: 20, 40, and 61 A. The lower panel shows transverse distribution at the position shown by the arrow in the upper panel. The solid lines are theoretical calculations using the critical state model¹⁾.

ている。同図 (c) が通電電流がブリッジの I_c にほぼ到達した時の局所電界分布を示している。両端で観測される電圧は、磁束分布がパーコレートした領域が集中的に担っており、他の部位はまだ磁束フロー状態に達していないことが分かる。すなわち、パーコレートした部位がボトルネックとなり、マクロスケールで観測される I_c が制限されていることを示している。

2.3 走査型 Hall 素子磁気顕微鏡 (SHPM)

SQUID センサは高感度である一方、飽和磁界による制限から線材に対して大電流印加時あるいは高磁界中の評価を行うには、磁気センサとして Hall 素子が適している。本節では、走査型ホール素子顕微鏡 (SHPM: Scanning Hall-Probe Microscope) の基本原理と計測例について紹介する。なお、詳細については本特集号の東川らによるテーマ解説の頁¹¹⁾を参照されたい。

SHPM の測定原理は基本的には SSM と同様である。測定モードとしては、通電電流を印加し、自己

Fig. 6 Transport SHPM image of a Bi-2223 multi-filament tape. Transverse distribution of the (a) perpendicular component of the magnetic field, and (b) sheet current density with bias currents close to I_c under different values of external magnetic fields applied perpendicular to the tape surface from -20 to 20 mT at 87 K.

磁界分布を計測するモードと、外部磁界の印加によって線材を磁化し、その磁束分布より面内の磁化電流を評価する測定モードとに分けられる。後者は、試料への端子を必要とせず、非接触な測定が可能であることから、後述する長尺線材の高速測定に適している。

いずれの測定モードにおいても、SHPM で試料表面の磁界分布を測定し、ビオ・サバル則の逆問題を解くことによって試料面内の電流分布を得る。筆者らの開発した装置では、感受領域 $50\ \mu\text{m}$ 角の微小ホール素子を走査ステージにマウントし、試料表面から一定距離の磁気像を取得している。幅 1 cm のコート線材に電流を流した際の評価例を **Fig. 5** に示す。試料端部より徐々に電流が侵入する様子が分かる。着磁モードによる測定例¹²⁾については、東川らの頁を参照されたい。

本手法はまた、コート線材のみならず、Bi-2223 多芯線材への適用も可能である^{13, 14)}。**Fig. 6** に外部磁界下で臨

Fig. 7 Spatially resolved measurement of time-dependent electromagnetic field distribution using a transport SHPM with an alternating bias current.¹⁵⁾ The multi-filament model sample was formed in a YBCO-coated conductor.

界電流を印加した際の Bi-2223 線材の観測例を示す。素線内の電流分布は幅方向に大きな分布を有しており、これはフィラメント領域の分布と自己磁界分布の影響によって説明できる。また、このような素線内の電流輸送特性の分布は、集合導体化した際の電流容量に大きな影響を及ぼし、導体設計の基本となる情報である¹⁴⁾。

また、周期的な電流を印加する場合は、各座標位置において位相遅れを調整しながら同期した磁気像を取得することにより、一周期分の時間依存性を含めたデータを取得することが可能となる。模擬的なマルチフィラメント線に対して 2 Hz の交流電流を印加しつつ、磁気像の時間依存性を取得し、ビオ・サバル則の逆問題より電流分布を、またファラデー則より電界分布を評価した結果を **Fig. 7** に示す。さらに、電流密度と電界との積により、交流損失の瞬時値の空間分布の像とその時間発展を得ることが可能となる¹⁵⁾。電流は試料端部より位相遅れを伴って試料内部に侵入し、また損失は試料端部に集中している様子が分かる。これらの振る舞いは、本試料では両端の電極部分でフィラメントが結合していることから理解できる。また、局所的にフィラメントが結合している部位や、部分的に断線している複雑な形状を有する領域における電磁現象を定量的に把握する手法として威力を発揮する。

2.4 磁気光学イメージング法 (MOI)

磁気光学イメージング法 (MOI: Magneto Optical Imaging) は、磁気光学膜 (インジケータフィルム) を用いて試料表面の磁界分布を光学像として可視化する手法である。一般には、インジケータフィルムとして面内磁化膜を用い、膜面に対して垂直な磁界成分によるファラデー回転を用いて、垂直磁界分布を偏光顕微鏡像の濃淡のイメー

ジとして観測する¹⁶⁻¹⁹⁾。磁気光学イメージングの原理図を **Fig. 8** に示す。インジケータフィルムの感度をあらかじめ校正することで、磁界分布の定量的な評価が可能となり、したがって試料表面とインジケータフィルム間の距離が分かれば、SHPM と同様に試料表面の電流分布を得ることができる^{16, 17)}。本手法は、テープ線材との整合性に優れており、インジケータフィルムと試料間を密着することができれば、1 μm 以下の優れた解像度を実現できる。また 10 mm 角以上の広い視野を一度に観測できるといった優れた利点を有する。ただし、観測可能な磁界の範囲は、インジケータフィルムの飽和磁界によって制限され、典型的には 0.1 T 以下に限られる。

Fig. 9 に SHPM と MOI とを用いて、同一の試料 (幅 1 cm のコート線材) を評価した結果を示す。特徴的な部分における像が一致しており、両者は同等の情報を取得することが分かる。両者の結果を詳細に比較すると、解像度においては、拡大図より分かるとおり MOI の方が優れている。一方、MOI 観察では偏光顕微鏡像取得の際の露光条件によっても像の濃淡が変化しており、磁界強度に変換する際には、露光条件も考慮した面内での変換係数の分布を考慮する必要がある、特に大面積での測定の際には、注意が必要である。

2.5 誘導法

励磁コイルを用いて超電導テープ面に垂直に正弦波形の交流磁界を印加し、超電導層に誘起された誘導電流が作る磁界を検出コイルで検知する手法である²⁰⁻²²⁾。誘導電流が臨界電流値以下の場合、誘導電流によって生じる磁界も正弦波となるが、励磁コイルの磁界振幅の増大によって誘導電流の大きさが臨界電流値に到達すると、誘導による磁

界波形は、最大振幅が飽和した波形へと変化する。よって、この時検出コイルで観測される周波数成分には奇数次の高調波が生じるため、検出コイルに高調波成分が生じるときの励磁電流によって、直下の膜の臨界電流値を計測することができる。測定には、一般には3倍高調波が用いられる。また、励磁コイルの周波数によって膜中に誘起される誘導電界を変化させることができるため、異なる励磁周波数による測定から、臨界電流の電界依存性の評価が可能となり、 n 値を導出できる利点を有する^{21, 22)}。本手法は非接触・非破壊な測定が可能で、他の磁気的手法と同様の特徴を有する。ただし、空間分解能は励磁コイルのサイズと同程度であり、観測領域内に不均一性が存在する場合、その測定結果の解釈には注意が必要である。また、本手法は元々大面積薄膜の I_c 分布評価手法として提案されたものであるが、近年のコート線材は膜厚の増大に伴って I_c 値が増大しており、励磁コイルへの大電流の印加による発熱などの問題も考慮する必要がある。

2.6 その他

誌面の都合上詳細は割愛するが、その他の手法として、永久磁石の直下に微小 Hall 素子を配置し、試料直上を走査することによって試料からの応答磁界を計測し、面内の磁化電流の分布を検出する手法：Magnetoscan が提案されている^{23, 24)}。本手法は元々超電導バルク材の不均一性を評価するための手法として提出されたが²³⁾、コート線材の長手方向の I_c 分布の評価にも適用可能であることが示されている²⁴⁾。原理的には TapestarTM (3.2 節参照) や走査型 Hall 素子顕微鏡と類似している。また、着磁した線材から受ける磁気力が線材の磁気モーメントの大きさ、すなわち磁化電流の大きさに比例することを用いて、磁気力の分布から I_c 分布を評価しようとする手法も提案されている²⁵⁾。

3. 長尺線材の J_c 分布評価技術

3.1 リール式四端子法 (尺取り法)

液体窒素中に浸漬冷却した線材に対し、可動式の電流端子並びに電圧端子を圧着させ、四端子法により各区間の I - V 特性を測定し、リールによって尺取り式に線材を搬送しながら全長に亘って測定する評価手法である。各測定区間は典型的に 50 cm～5 m 程度で行われている²⁶⁻²⁸⁾。本手法は、通電時の発生電圧を観測するという点で、実際に線材が使用される環境での評価に最も近い。また、 I_c 値のみならず n 値の評価が可能であり、線材の実用パラメータの取得に適している。最近では、磁界発生コイルと組み合わせることで磁界下の I_c 値や I_c の磁界印加角度依存性の長手分布の評価が可能な装置が開発されている^{29, 30)}。

ただし、高 I_c 線材になると電流端子接触部での発熱が無視できない点や、各区間での I - V 特性の測定が必要のため高速化には限界があること、また、空間分解能が電圧端

Fig. 8 Principle of the magneto-optical imaging (MOI).

Fig. 9 Comparison between SHPM (upper) and MOI (lower) obtained from the same 1 cm-wide coated conductor.

子間距離で制限されることから、局所的な I_c 低下の検出が困難であるという問題も指摘されている³¹⁾。

3.2 配列 Hall 素子法 (TapestarTM)

線材に垂直磁界を印加した際の幅方向の侵入磁界の分布を線材直上に配置した配列 Hall 素子によって計測し、その磁界分布より直下 (座標位置 x) にある線材の臨界電流値を評価する。Fig. 10 に装置の原理図を示す。最も典型的な装置では、等間隔に配列した 7 個のセンサによってテープ面直上の侵入磁界分布を計測し、テープ内の幅方向の J_c 分布は均一と仮定して臨界状態モデルにより、センサ位置に発生する磁界分布を導出し、フィッティングパラメータとして I_c 値を決定する³²⁾。センサの数を増やして、線材の幅方向の非対称性を捉えることも可能であるが、一般に幅方向の解像度は余り高くない。また、得られる I_c 値は線材とセンサ間の距離に依存し、また測定時の誘導電界も四端子法の電界基準と異なっているため、通電法の I_c と比較するためには校正を行う必要がある。特に、 n 値が低い場合は、 I_c 値が小さめに見積もられる可能性がある³³⁾。長手方向の分解能は 1 mm 程度と高いため、 $I_c(x)$ の測定データは短い周期で複雑に変化する。そこで、一般には各座標位置 x 近傍のある区間長における I_c の最大値と最小値を求め、その x 依存性を示したグラフが用いられる。Fig. 11 に 200 m 級の市販コート線材の測定例を示す。本

手法は、ドイツ Theva 社より TapestarTM として評価装置が市販されていることもあって、前述のリール式四端子法と共に現在最も一般的な長尺線材の評価手法として線材メーカなどに普及している。

本装置の最大の利点は、非破壊・非接触な測定が可能であることと、長手方向の I_c 分布の評価速度は $\Delta x=1$ mm の空間分解能で 300 m/h と高速に評価できる点にある。前節で述べたリール式四端子法に比べ空間分解能が高く、線材内の局所的 I_c 低下の有無をスクリーニングする上では極めて有効な評価技術である。ただし、線材の幅方向に局所的に I_c 変化がある場合や、線材の実効的な有効幅の評価を行うには幅方向の空間分解能が十分でない。また、上述した I_c の最大値と最小値の差異が線材プロセスの何に起因しているのかなど、不均一性の原因を把握するためには必ずしも十分な情報を得ることができない。

3.3 リール式走査型 Hall 素子顕微鏡

近年特に、HTS 応用機器や導体の可設計性や安定動作実現のために長尺 HTS 素線の空間均一性の実現が極めて重要な開発項目となっている。しかしながら、テープ線材特有の問題として、2 次元的な超電導テープ面内に点在する局所欠陥を、長尺に亘って高い空間分解能で高感度に検出することは容易ではなく、局所不均一性の発生メカニズムの解明はおろか、そのための観測手法すら十分に確立されていないのが現状である。実用レベルの長尺線に適用可能な、高速かつ高感度・高分解能の評価手法の確立は、高温超電導線材開発、実用化のために喫緊の課題となっている。

筆者らは、2.3 節に述べた SHPM の評価手法を高速化させ、リール式の線材搬送機構と組み合わせることによって、連続的に着磁しながら長尺線の磁気像を取得する磁気顕微鏡の開発を行った^{34, 35)}。走査機構の高速化と同時に、磁界信号計測時の周波数帯域の増大によって SN 比の低下が問題となるが、計測システムの低雑音化によってこの問題をクリアし、短尺測定時の測定精度を保ったまま長尺線材の高速評価を実現している。1 ch の Hall センサを用いたシステムにおいて、長手方向の空間分解能 1 mm、幅方向の空間分解能 40 μm の条件下で、ほぼ実用レベルの評価速度 36 m/h を達成している³⁴⁾。Fig. 12 にコート線材の評価例を示す。局所 J_c 低下部位のサイズならびにテープ面内の位置を明瞭に捉えていることが分かる。

本装置を用いて、既に数 100 m 級線材の評価実績を多く挙げており、長尺線材における I_c 分布の統計的振る舞いに関する新たな知見を得ると共に、本装置で初めて可能となった長尺線材の電磁気的有効幅の評価法の提出や、それを用いた線材加工技術の最適化など、本装置を用いて希土類系コート線材の高性能化に関する有益な成果を挙げている¹¹⁾。

Fig. 10 Schematic diagram of the Hall sensor array measurement system well-known as TapestarTM³²⁾ (upper), and its sensing area (lower).

Fig. 11 An example of measurement results using TapestarTM. The sample is a 200 m-long commercially coated conductor. The red and blue lines are longitudinal variation of maximum- and minimum-value of I_c as a function of longitudinal coordinates, respectively.

Fig. 12 Reel-to-reel SHPM visualizing local J_c drop in a 1 cm-wide coated conductor.

3.4 リール式磁気光学イメージング

SHPM と同様、テープ面内の 2 次元的 J_c 分布を長尺に亘って評価することを目的に、町らは MOI 法をリール式線材搬送機構と組み合わせた装置を開発している³⁶⁾。

インジケータフィルムには1インチの磁気光学膜を用い、16 mm 角の領域の像を一度に取得可能であり、解像度は1 μm と SHPM に比べ高解像度な測定が可能である。ただし、線材搬送機構は SHPM に比べると複雑になっており、線材搬送中のインジケータフィルムの反射面の損傷を防ぐため、観察時のみにインジケータフィルムを圧着し、線材搬送中はインジケータフィルムを持ち上げた状態で16 mmの区間ごとに線材を送り、偏光顕微鏡像を繰り返し取得する。その結果、測定速度は今のところ1.5 m/h と SHPM に比べるとかなり遅い。

Fig. 13 に本装置によるコート線材の観測例を示す³⁶⁾。同図の白い部分は磁界の高い領域で有り、局所的に J_c が低下した磁界侵入領域を明瞭に捉えていることが分かる。同図の下のは TapestarTM によって同一線材を観測した結果である。TapestarTM の測定では、暗い領域が磁界が侵入している低 J_c の領域に対応する。TapestarTM では欠陥部位の幅方向の位置が不明瞭であるのに対し、リール式 MOI 装置では、線材幅方向の構造が明瞭に捉えられており、面内での欠陥位置の同定が可能である。すなわち、TapestarTM で捉えられた長手方向の I_c 低下の原因を解明するにあたって、2 次元的な評価との複合化が有効であることが分かる。

4. まとめ

4.1 各種評価手法の特徴

本稿で紹介した、代表的な J_c 分布評価手法について、現状の典型的な性能と特徴をまとめた表を Table 1 に示す。使用目的に応じて、必要となる空間分解能、評価速度、動作環境は異なることから、一つの観測手法で全ての目的をカバーすることは難しい。適した評価手法を選択し、組み合わせることによって複合的評価を行うことが最も有効である。

4.2 今後の課題

前項で述べたとおり、評価手法によって空間分解能、電界基準など何桁も異なる。その結果、一口に J_c 分布といっても見かけ上の J_c 分布や均一性は測定法によって大きく異なっており、線材の均一性の定義そのものもまだ十分に確立できていない。各評価手法によって得られる J_c 値ならびに J_c 分布の相互の関係を定量的に明らかにすると共に、線材性能の評価手法として標準化が今後必要になってくると考えられる。一つのアプローチとして、筆者らは SHPM による高解像度計測の結果をもとに、測定電界ならびに空間分解能の校正を行うことによって、SHPM の結果と、四端子法の結果とが定量的に良く一致することを示している。また、空間分解能による見かけ上の標準偏差の変化は、空間周波数解析の結果から観測の際の空間周波数帯域を考慮することによって定量的に説明できることを示している^{37), 38)}。このような長尺線材の J_c 揺らぎの振

Fig. 13 Reel-to-reel MOI (upper) visualizing local flux penetration in a 1 cm-wide coated conductor, and the results using TapestarTM (lower) obtained for the same sample.³⁶⁾

Table 1 Comparison among typical methods for spatially resolved measurement on local J_c in HTS tapes

	評価手法	長手方向 分解能	幅方向 分解能	電界基準 (V/m)	磁界範囲	温度範囲	測定速度
短尺	LTLSTM	2~3 μm	2~3 μm	$\sim 10^{-2}$	e.f.~数 T	○	○
	SSM	2~3 μm	2~3 μm	$\sim 10^{-8}$	< 数100 μT	◎	○
	SHPM	20~30 μm	20~30 μm	$\sim 10^{-8}$	s.f.~数 T	◎	○
	MOI	~1 μm	~1 μm	$\sim 10^{-8}$	< 0.1 T	◎	◎
長尺	リール式四端子法	0.5 ~ 5m	×	10^{-4}	< 1T	77 K	○
	配列Hall素子法	~1 mm	△	$\sim 10^{-6}$	数10 mT	77 K	◎
	リール式SHPM	< 1 mm	20~30 μm	$\sim 10^{-8}$	数10 mT	77 K	○
	リール式MOI	~1 μm	~1 μm	$\sim 10^{-8}$	数10 mT	◎	△

る舞いについて、観測結果をもとに理論的に考察し、その機構を明らかとすることによって、各評価手法を定量的に関係づけることが可能であると考えている。

本研究の一部は、超電導応用基盤技術研究開発ならびに超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発の一環として、(公財)国際超電導産業技術研究センター (ISTEC) を通じて、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) からの委託を受けると共に、日本学術振興会の科研費 (15360151, 18360153, 20360143, 24360122) の助成を得て実施したものである。

参考文献

- 1) E.H. Brandt and M. Indenbom: "Type-II-superconductor strip with current in a perpendicular magnetic field," Phys. Rev. B **48** (1993) 12893-12906.
- 2) K. Yamafuji and T. Kiss: "A new interpretation of the glass-liquid transition of pinned fluxoids in high- T_c superconductors," Physica C **258** (1996) 197-212.
- 3) T. Kiss, M. Inoue, S. Egashira, T. Kuga, M. Ishimaru, M. Takeo, T. Matsushita, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh, S. Awaji, K. Watanabe and Y. Shiohara: "Percolative transition and scaling of transport E - J characteristics in YBCO coated IBAD tape," IEEE Trans. Appl. Supercond. **13** (2003) 2607-2610.
- 4) M. Friesen and A. Gurevich: "Nonlinear current flow in superconductors with restricted geometries," Phys. Rev. B **63** (2001) 64521-64547.
- 5) T. Kiss, M. Inoue, S. Egashira, M. Yasunaga, H. Tokutomi, M. Takeo, H.G. Shirinyan, S.G. Gevorgyan, Y. Iijima, K. Kakimoto

- and T. Saitoh: "Imaging of the local dissipation in YBCO coated tapes," *Adv. Cryo. Eng.: Trans. ICMC (American Institute of Physics)* **50** (2004) 677-684.
- 6) T. Kiss, M. Inoue, M. Yasunaga, H. Tokutomi, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh, Y. Tokunaga, T. Izumi and Y. Shiohara: "Low temperature scanning laser microscopy of YBCO coated IBAD tapes," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** (2005) 3656-3659.
 - 7) M. Inoue, T. Kiss, H. Tokutomi, T. Shoyama, K. Imamura, M. Takeo, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh, Y. Tokunaga, T. Izumi and Y. Shiohara: "Study on local inhomogeneity in TFA-MOD YBCO coated conductor by use of low temperature scanning laser microscopy," *Physica C* **426-431** (2005) 1073-1077.
 - 8) T. Kiss, M. Inoue, T. Shoyama, S. Koyanagi, D. Mitsui, T. Nakamura, K. Imamura, A. Ibi, Y. Yamada, T. Kato, T. Hirayama and Y. Shiohara: "Visualizing transport properties in IBAD based YBCO coated conductors by multiple analysis techniques," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** (2007) 3211-3214.
 - 9) K. Koyanagi, T. Kiss, M. Inoue, T. Nakamura, K. Imamura, M. Takeo and Y. Shiohara: "Measurement of local current flow around transverse defects in YBCO film by use of scanning SQUID microscope," *Physica C* **445-448** (2006) 677-681.
 - 10) B.J. Roth, N.G. Sepulveda and J.P. Wikswo, Jr : "Using a magnetometer to image a two-dimensional current distribution," *J. Appl. Phys.* **65** (1989) 361-372.
 - 11) K. Higashikawa, M. Inoue and T. Kiss: "Characterization of local J_c distribution in superconducting wires and tapes based on scanning Hall-probe microscopy," *TEION KOGAKU* **49** (2014) 485-493 (in Japanese)
東川甲平、井上昌睦、木須隆暢：「走査型ホール素子顕微鏡による超伝導線材の局所 J_c 分布評価」、*低温工学* **49** (2014) 485-493
 - 12) K. Higashikawa, M. Inoue, T. Kawaguchi, K. Shiohara, K. Imamura, T. Kiss, Y. Iijima, K. Kakimoto, T. Saitoh and T. Izumi: "Scanning Hall-probe microscopy system for two-dimensional imaging of critical current density in RE-123 coated conductors," *Physica C* **471** (2011) 1036-1040.
 - 13) Y. Honda, K. Higashikawa, M. Inoue, T. Kiss, N. Ayai, M. Kikuchi, K. Hayashi and K. Sato: "Study on critical current distribution in CT-OP Bi-2223 tape based on the scanning Hall probe magnetic microscopy," *Physica C* **470** (2010) 1377-1379.
 - 14) K. Furukawa, K. Higashikawa, K. Imado, M. Inoue, M. Kikuchi, S. Kobayashi, T. Nakashima, K. Hayashi, K. Sato, M. Tomita and T. Kiss: "Influence of self-field on critical current density distribution in Bi-2223 tape and current capacity in parallel conductor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** (2015) submitted.
 - 15) K. Higashikawa, Y. Honda, M. Inoue, M. Iwakuma, T. Kiss, K. Nakao, Y. Yamada and T. Izumi: "Spatially-resolved measurement on time-dependent electromagnetic behavior in alternating current carrying coated conductor," *Physica C* **470** (2010) 1280-1283.
 - 16) A.A. Polyanskii, A. Gurevich, A.E. Pashitski, N.F. Heinig, R.D. Redwing, J.E. Nordman and D.C. Larbalestier: "Magneto-optical study of flux penetration and critical current densities in [001] tilt $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin-film bicrystals," *Phys. Rev. B* **53** (1996) 8687-8697.
 - 17) A.E. Pashitski, A. Gurevich, A.A. Polyanskii, D.C. Larbalestier, A. Goyal, E.D. Specht, D.M. Kroege, J.A. DeLuca and J.E. Tkaczyk: "Reconstruction of current flow and imaging of current-limiting defects in polycrystalline superconducting films," *Science* **275** (1997) 367-369.
 - 18) D.M. Feldmann, J.L. Reeves, A.A. Polyanskii, A. Goyal, R. Feenstra, D.F. Lee, M. Paranthaman, D.M. Kroege, D.K. Christen, S.E. Babcock, D.C. Larbalestier: "Magneto-optical imaging of transport currents in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ on RABiTSTM," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **11** (2001) 3772-3775.
 - 19) T. Machi, J. Matsuda, N. Chikumoto, I. Hirabayashi, Y. Tokunaga, Y. Kitoh, Y. Aoki and T. Izumi: "MO observation on $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductors obtained by TFA-MOD technique," *Physica C* **426-431** (2005) 1078-1082.
 - 20) J.H. Claassen, M.E. Reeves and R.J. Soulen Jr.: "A contactless method for measurement of the critical current density and critical temperature of superconducting films," *Review of Scientific Instruments* **62** (1991) 996-1004.
 - 21) H. Yamasaki, Y. Mawatari and Y. Nakagawa: "Nondestructive determination of current-voltage characteristics of superconducting films by inductive critical current density measurements as a function of frequency," *Appl. Phys. Lett.* **82** (2003) 3275-3277.
 - 22) K. Nakao, I. Hirabayashi and S. Tajima: "Application of an inductive technique to the characterization of superconducting thin films based on power law I - V relations," *Physica C* **426-431** (2005) 1127-1131.
 - 23) M. Eisterer, S. Haindl, T. Wojcik and H.W. Weber: "'Magnetoscan': a modified Hall probe scanning technique for the detection of inhomogeneities in bulk high temperature superconductors," *Supercond. Sci. Technol.* **16** (2003) 1282-1285.
 - 24) M. Zehetmayer, R. Fuger, M. Eisterer, F. Hengstberger and H.W. Weber: "Assessment of the local supercurrent densities in long superconducting coated conductors," *Appl. Phys. Lett.* **90** (2007) 032506
 - 25) S. Ohshima, K. Umez, K. Hattori, H. Yamada, A. Saito, T. Takayama, A. Kamitani, H. Takano, T. Suzuki, M. Yokoo: "Detection of critical current distribution of YBCO-coated conductors using permanent magnet method," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** (2011) 2285-3388.
 - 26) M. Igarashi, K. Kakimoto, S. Hanyu, R. Kikutake, Y. Sutoh, R. Suzuki, M. Daibo, H. Fuji, H. Kutami, Y. Iijima, M. Itoh and T. Saitoh: "Advanced development of IBAD/PLD coated conductors at FUJIKURA," *Physics Procedia* **36** (2012) 1412-1416.
 - 27) V. Selvamanickam, Y. Chen, I. Kesgin, A. Guevara, T. Shi, Y. Yao, Y. Qiao, Y. Zhang, Y. Zhang, G. Majkic, G. Carota, A. Rar, Y. Xie, J. Dackow, B. Maiorov, L. Civale, V. Braccini, J. Jaroszynski, A. Xu, D. Larbalestier and R. Bhattacharya: "Progress in performance improvement and new research area for cost reduction of 2G HTS wires," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** (2011) 3049-3054.
 - 28) M.W. Rupich, X. Li, S. Sathyamurthy, C.L.H. Thieme, K. DeMoranville, J. Gannon and S. Fleshler: "Second generation wire development at AMSC," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 6601205.
 - 29) J.Y. Coulter, T.G. Holesinger, J.A. Kennison, J.O. Willis and M.W. Rupich: "Nondestructive investigation of position dependent I_c variation in multi-meter coated conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009) 3609-3613.
 - 30) J.O. Willis, Y. Coulter and M.W. Rupich: " n -value analysis of position-dependent property variability in long-length coated conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** (2011) 2988-2991.

- 31) J.J. Gannon, Jr., A.P. Malozemoff, R.C. Diehl, P. Antaya and A. Mori: "Effect of length scale on critical current measurement in high temperature superconductor wires," IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 8002005.
- 32) S. Furtner, R. Nemetschek, R. Semerad, G. Sigl and W. Prusseit: "Reel-to-reel critical current measurement of coated conductors," Supercond. Sci. Technol. **17** (2004) S281-S284.
- 33) K. Nakao, T. Machi, S. Miyata, T. Muroga, A. Ibi, T. Watanabe, M. Konishi, Y. Yamada, Y. Kitoh, H. Fuji, Y. Aoki, T. Izumi and Y. Shiohara: "Non-destructive characterization of long coated conductors using a Hall sensor array," Physica C **445-448** (2006) 669-672.
- 34) K. Higashikawa, K. Shiohara, Y. Komaki, K. Okumura, K. Imamura, M. Inoue, T. Kiss, Y. Iijima, T. Saitoh, T. Machi, M. Yoshizumi, T. Izumi and H. Okamoto: "High-speed scanning Hall-probe microscopy for two-dimensional characterization of local critical current density in long-length coated conductor," Physics Procedia **27** (2012) 228-231
- 35) K. Higashikawa, K. Katahira, M. Inoue, T. Kiss, Y. Shingai, M. Konishi, K. Ohmatsu, T. Machi, M. Yoshizumi, T. Izumi, and Y. Shiohara: "Nondestructive diagnostics of narrow coated conductors for electric power applications," IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014) 6600704.
- 36) T. Machi, N. Chikumoto, K. Nakao, Y. Aoki, Y. Kitoh, H. Fuji, T. Izumi, A. Ibi and Y. Yamada: "Development of a magneto-optical imaging equipment for long length 2G-HTS tapes," Physica C **445-448** (2006) 673-676.
- 37) T. Kiss, K. Higashikawa, M. Inoue, K. Imamura, T. Taneda, A. Ibi, T. Yoshida, M. Yoshizumi, T. Izumi, Y. Shohara, K. Kimura, T. Koizumi, N. Aoki, T. Hasegawa, S. Awaji and K. Watanabe: "Spatial homogeneity and in-field current carrying capability of RE-123 coated conductors (invited)," presented at ICSM 2014, Antalya, Turkey, April 28, 2014.
- 38) T. Kiss, et al.: "Spatial frequency analysis on local critical current distribution in REBCO coated conductors," Abstract of 75th autumn meeting of the Japan Society of Applied Physics, 17p-A21-8 (2014) 11-104.
木須隆暢ら:「REBCO 線材の局所臨界電流分布に対する空間周波数解析」, 2014 年秋季第 75 回応用物理学会学術講演会講演予稿集 17p-A21-8 (2014) 11-104.

木 須 隆 暢 1991 年九州大学大学院博士課程修了。1990 年日本学術振興会特別研究員、1991 年九州大学助手、1996 年同助教授、2007 年同教授、現在に至る。超伝導システム科学研究センター、低温センター併任。iSTERA 主管研究員。1999 年 Wisconsin 大学訪問研究員、2000 年 Twente 大学訪問研究員。この間、超電導薄膜、SQUID、臨界電流特性に関する研究などに従事。2006 年超伝導科学技術賞授賞。低温工学・超電導学会国際交流委員会委員長、ICEC Board Member、ASC Board Member。低温工学・超電導学会、応用物理学会、電気学会、電子情報通信学会、MRS、IEEE、ACerS 各会員。工学博士。