

低周波磁場を用いた深部欠陥検査応用のための RE123 系高温超伝導磁束トランスの作製

非会員 小森 和範^{*,**a)} 非会員 立木 実^{*}
非会員 有沢 俊一^{*} 非会員 遠藤 和弘^{**}

Preparation of Magnetic Flux Transformer by Using RE123 High- T_c Superconductor for Low Frequency Electromagnetic Evaluation of Deep-Lying Defects

Kazunori Komori^{*,**a)}, Non-member, Minoru Tachiki^{*}, Non-member, Shunichi Arisawa^{*}, Non-member, Kazuhiro Endo^{**}, Non-member

(2018年3月5日受付, 2018年7月12日再受付)

We have prepared a magnetic flux transformer that is operable at 77K by using commercially available RE123 High- T_c superconducting (HTS) tape. HTS seamless loop used in this study has been prepared by “Cut-and-wind” method, which enables to fabricate not only the large bore loop but also the multi-turn structure without jointing. The seamless loops constituting the transformer have diameter above 10 cm in this report. We have confirmed induction of superconducting shielding current in the loop for static field applying and magnetic field transferring by the flux transformer at 77K.

キーワード : 磁束トランス, RE123 系高温超伝導体, 高温超伝導テープ線材, 超伝導永久電流モード動作, 静磁場計測
Keywords : magnetic flux transformer, RE123 High- T_c superconductor, HTS tape conductor, persistent current mode, static magnetic field measurement

1. はじめに

高度成長期に建設された多くのインフラにおける老朽化と、それらの安全性確保が喫緊な課題となっている。対象となる構造体の量は膨大であり、そのため補強作業に当たっては経年劣化を簡単に検査し、補強の要不要を診断する迅速な作業が不可欠である。非破壊で劣化診断を行う最も迅速な方法は目視検査であるが、しばしば重大事故の要因となる構造体内部に生じる欠陥については、表面に劣化が顕在化することが少なく、目視による予期が困難である。

構造体内部を非破壊で検査する方法には超音波を用いた音響探査, X線検査, 電磁気を用いた検査法などが知られている。しかし超音波方式では素材に機器が接触するために素材の被覆や表面状態に検出能力が影響を受ける課題があり, X線方式では放射線の取り扱いの問題が存在する。対して電磁気を用いる検査法は, 対象が金属などの導電体や磁性体に限定されるが, 非接触式で簡便な検査が可能である特長を持つ。

電磁気方式による金属構造体の非破壊検査では, 測定対象に交流磁場を印加することで表面近傍に誘導される渦電流や透磁率を測定し, 材料の変化を診断する。しかし導電性材料においては, 渦電流による遮蔽効果のために, 印加磁場の到達距離は表面から表皮深さの範囲までに限定される。この表皮深さは測定対象物の導電率, 印加磁場の周波数に依存し, 低周波数ほど磁場の侵入深さは大きくなる。一方, 磁場の検出に多用されている金属誘導コイルでは, 磁場の周波数を下げるほど検出コイルの信号は小さくなる。そのため, 実用的な診断深さは構造体表面から数 mm にと

a) Correspondence to: Kazunori Komori. E-mail: KOMORI.

Kazunori@nims.go.jp

* 物質・材料研究機構

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

National Institute for Materials Science

1-2-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japan

** 金沢工業大学

〒921-6501 石川県野々市市扇が丘 7-1

Kanazawa Institute of Technology

7-1, Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa 921-6501, Japan

どまる。そこで、より深部の欠陥検査への応用については、低周波磁場に対する感度が優れる MR センサ、SQUID (超伝導量子干渉素子) などの適用が検討されている⁽¹⁾⁽²⁾。金属誘導コイルによる磁気検出ヘッドと異なり、これらのセンサ素子は構造的に大型化による感度向上が難しい。超伝導磁束トランスは検知対象の磁場を集束し、センサへ伝達するデバイスであり、このようなセンサ素子の感度向上に有効と考えられる。

磁場下に置かれた超伝導体には、マイスナー効果によるシールド電流が試料表面に誘起され、印加磁場の超伝導体内部への侵入を妨げる。ループ形状にした超伝導体では、ループ内の磁束総和が磁場印加前の状態を保つようにシールド電流が導線上に誘起される。このため 2 つのループ部を内包する超伝導閉回路では、一方のループ部に侵入した磁束を、シールド電流を介して他方のループ部から排出するので、ループ線を通した磁束の伝達が可能となる。この「超伝導磁束トランス」は、電磁誘導を基にした金属誘導コイルと異なり、静磁場に対する高い伝達性を有する。電気抵抗低減のため液体窒素温度に冷却した低損失共振銅コイルを磁束伝達に適用した SQUID システムなど磁気センサの高感度化の試みがなされているが⁽³⁾、超伝導磁束トランスの適用は、特に静磁場や極低周波の磁場の利用が有用と考えられる資源探査、非破壊検査技術における深部探査、超長波通信技術等への応用が期待できる。さらに液体窒素や小型冷凍機による冷却が可能な高温超伝導材料が適用できれば、液体ヘリウム冷却を必要とする金属超伝導材料の磁束トランスに比べて、フィールド運用での機器の取り回しは非常に簡便になる。

Nb など金属系超伝導材料を用いた超伝導磁束トランスは、SQUID 等の高感度磁束計において試料信号をセンサへと伝達するデバイスとして実用化されている。一方で Bi 系や RE123 系など銅酸化物系の高温超伝導材料 (High- T_c Superconductor: HTS) を用いた磁束トランスの開発は進んでいない。この理由は高温超伝導材料における線材端部の超伝導接合が非常に困難なことにある。超伝導磁束トランスは、外部磁場によって自発的に励起する超伝導シールド電流を利用するため、全線路が超伝導状態にある閉ループ線が不可欠である。金属系超伝導線材を使用する既存の超伝導磁束トランスの作製では、溶接や液体 He 温度で超伝導性を発現する Pb-Bi はんだ等による線材端面の超伝導接合が可能である。はんだ接合では接合部における T_c (超伝導臨界温度) や J_c (臨界電流密度) などの超伝導特性は低下するものの⁽⁴⁾、弱磁場環境で使用される超伝導磁束トランスへの応用は可能である。しかし銅酸化物系高温超伝導体においては、酸素拡散処理を必要とする結晶構造や結晶配向性に強く依存する超伝導特性などの理由から、材料の熔融を伴う接合は非常に困難であり、溶接により接続部の超伝導特性は著しく劣化するか、あるいは消滅する。

現在までに報告されている高温超伝導体線材の接合では、研究の多くの場合、十分な超伝導特性を維持するために接

合面積の拡張や極低温保持などで特性の劣化分を補償するか⁽⁵⁾、または超伝導性の維持を断念してはんだ付けなど⁽⁶⁾が行われている。前者の方法は機器形状や動作環境の点で大きな制約となり、後者は液体窒素温度 (77K) において量子位相的な超伝導接続とならないため、マイスナー効果によるシールド電流は励起されず、磁束トランスへの応用は不可能である。最近では構成元素の置換により融点を降下させた超伝導相を接合面に介在させ、部分熔融による結晶成長を用いた線材接合法が提案されている^{(7)~(9)}。RE123 系高温超伝導体の超伝導特性は導電面内の結晶配向への依存性が強いいため、超伝導相に三次元的結晶配向が付与されているが⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、これらの接合方法では基材の結晶配向性を維持し、接合部における高い超伝導特性の維持を図っている。しかしプロセスにおいて結晶のエピタキシャルな液相成長をさせる温度管理や他の線材部分への熱影響、熔融試料中の酸素の拡散時間などの問題を抱えており、接合処理には長いプロセス時間を必要とする⁽⁸⁾⁽⁹⁾。

そこで本研究では、本質的に接合処理を要しない高温超伝導体のループ線構造を適用する。市販の高温超伝導線材を基材として、位相幾何的な手法を用いて作製された接合のない超伝導ループ線構造と特性が報告されている⁽¹²⁾⁽¹³⁾。我々は同様の手法で 2 つのループを内包した磁束トランスを構築し、液体窒素温度 (77K) での磁束伝達特性の測定と高感度磁気計測応用の検討を行うものである。

同様に完全な超伝導にある高温超伝導ループ線については、単結晶基板上、あるいはテープ線材上に作製された薄膜にエッチングでパターンニングを施した高温超伝導磁束トランス作製の報告がある⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。しかしこの方法では幾何学的制限から 1 ターン巻コイルしか実現できず、また基板やテープ基材幅の制限から大口径ループの作製が困難である。対して、本方式では数十 cm~数 m の開口径を持つ、数ターン構造の超伝導コイル構築が可能である。大口径の検知コイル (pickup coil) をもつ磁束トランスの適用は、検出の空間分解能については低下するが、一方、対象物における検知コイルのサイズの領域の磁気情報を高感度に検知できる。そのため、この特長は補修必要性を迅速に判断する高速探傷検査、低周波磁場を利用した非破壊深部探査、食品異物検査、資源探査、超長波通信技術などへの応用に有用であると考えられる。

2. 実験方法

〈2・1〉 高温超伝導シームレスループ線の作製 本研究では、液体窒素温度 (77K) での応用を見込むことから、耐フラックスリーブ特性などを考慮し、RE123 系高温超伝導体線材を用いることにした。市販の SuperPower Inc. 製の 2G-HTS Wire (RE123 系) テープ材 (12mm 幅) を基材として、Fig. 1 (a) の上図に示す切削加工を行った。テープ裏面まで貫通するスリットは、0.1mm 厚のダイヤモンドホイールを用いて切削加工を行った。また貫通しないスリットはマスキングおよび化学エッチングを用いて対象となる層を

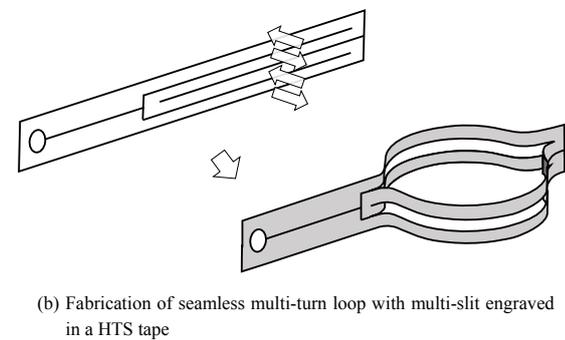
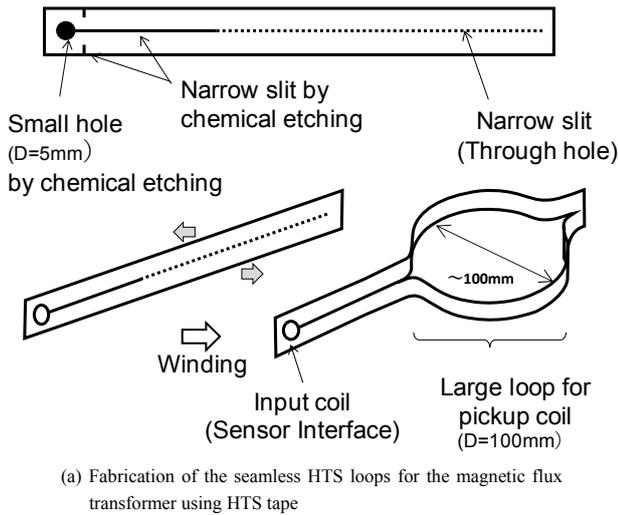


Fig. 1. Fabrication of HTS flux transformers by “Cut-and-Wind” method using HTS tape conductor.

除去している。このテープ線材は 50 μm 厚の Hastelloy C-276 を基材とし、超伝導層 (1 μm) の上に保護層として銀 (2 μm)、さらに銅 (20 μm) のコーティングがなされている。銅、銀、および超伝導層をそれぞれ 5% 塩酸 + 35% 過酸化水素水、1% アンモニア水 + 35% 過酸化水素水、1% 塩酸を用いて除去した。この加工材を、Fig. 1 (a) の下図に示すように貫通スリット部をテープ面に鉛直方向において逆向きに広げ、外径 100mm のガラスエポキシ製円筒にはめ込むことで、内径 100mm の円環に近い形状を構築する。これによって、ベースの直線テープ材から内径 100mm および化学エッチングで製作した内径 5mm の 2 つの環状部を有する HTS ループ線が構築される。この幾何的構造では、溶接その他の方法による線材の接合部が存在しないため、高温超伝導を用いたシームレスのループ線となっていることが期待できる。曲げ加工による超伝導特性の劣化については、曲率半径 12.5mm まで曲げて 77K での J_c を測定したところ劣化は見られず、本研究の試料形状での特性劣化は生じないと考えられる。また、Fig. 1 (b) に示す通り、HTS テープ上に複数のスリットを設け、その上下を互いに逆方向に広げることでマルチターン巻のループコイルを作製することができる。薄膜形状の材料では、ツイスト変形などで基材と上層の間に複合的な応力が働く場合に試料に剥離その他の問題を生じやすい。本研究のマルチターンループ構造では、テープ材

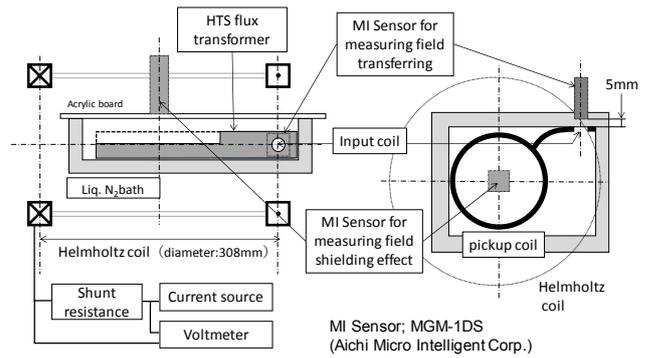


Fig. 2. Schematic of measurement system for the magnetic properties of the seamless HTS loop and the flux transformer.

には表面に鉛直な方向への単純曲げによる張力あるいは圧縮応力のみが加わるので、捻りなどの加工を加える構造に比べて損傷に対する耐力が高いと考えられる。

〈2・2〉 HTS ループ線における磁気特性の評価 作製した HTS ループ線の磁気特性の評価を行うため、Fig. 2 に示す測定系を構築した。HTS ループ線における超伝導永久電流モード動作を確認するために、磁場中冷却およびループの一部加熱による HTS ループ直上の磁場変化を磁気センサで測定した。また直流磁場を HTS 磁束トランスの大口径側の pickup coil に印加し、小口径側の input coil からの発生磁場を磁気センサで測定することで磁束トランスの磁場伝達能力を評価した。直流磁場の発生源には、直径 308mm のヘルムホルツコイルを用いた。磁気センサには、MI センサ (アイチ・マイクロ・インテリジェント (株) MGM-1DS) を用いた。

3. 実験結果と考察

〈3・1〉 HTS ループ内の磁束保存特性 HTS ループ線上に自励シールド電流が生じる場合、ループ線近傍の磁場はシールド電流が発生する磁場の分だけ外部磁場よりも低くなる。また、ループ線を磁場中で超伝導転移させ、その後磁場を除去した場合には、ループ内の磁束を保存するよう超伝導永久電流が誘導されるが、ループの一部を加熱すると、超伝導電流が消失するためにループ内の保存磁束もリリースされる。そこで Fig. 2 の測定系を用い、pickup coil 中心直上の磁場を測定しながら、磁場中冷却とループ内への磁束残留、ついでループの部分加熱 (input coil 側端部 5cm 程度のみを液体窒素液面より上部に出す) によるループ内残留磁束のリリースを行った。実験結果を Fig. 3 に示す。ゼロ磁場状態で冷却した HTS ループをヘルムホルツコイル内に置き、均一な直流磁場を印加すると、印加磁場に対して HTS ループ近傍の磁場は減少する。ついでループ線の一部を加熱して超伝導状態を壊すと、ループ近傍の磁場は印加磁場にほぼ等しくなることから、磁場の減少分は HTS ループに誘導されたシールド電流によるものと考えられる。さらに磁場印加下でループ線を再冷却して超伝導状態に戻し、ついで外部磁場をゼロにするとループ状に磁場の残留

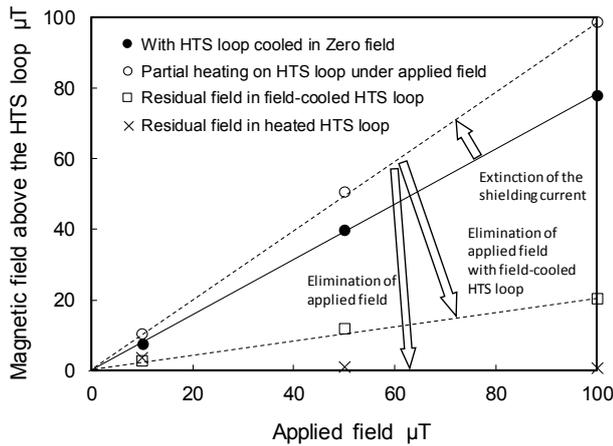


Fig. 3. Effect of induced superconducting shielding current to the magnetic field close to middle of the HTS loop.

が観測されるが、再度ループ線を加熱するとこの残留磁場は消滅する。この結果から、77K おいて外部直流磁場の印加により HTS ループに超伝導永久電流が励起されており、ループ線全周に渡る超伝導性の維持が確認できたと考えられる。また測定系の上限である 100 μ T までの外部磁場印加において、超伝導状態でのループ近傍の磁場は印加磁場に比例しており飽和が見られないことから、ループ線の電流許容値(臨界電流: I_c)は誘起されたシールド電流に対して十分に高い特性が維持されていることが分かる。さらに、部分的な加熱で残留磁場がほぼ消失することから、磁束の残留はループ線内のシールド電流によるものであり、線材中に磁束ピンニングでトラップされたものの寄与分はほとんどないことが分かった。

〈3・2〉 HTS 磁束トランスの磁場伝達特性の評価

本ループ線が有する大小 2 つの円環状部分を利用した磁束トランス機能について、Fig. 2 の測定系を用い、pickup coil へ直流の外部磁場を印加したときに input coil に生じる直流磁場の計測を行った。本実験において、校正した MI センサは液体窒素冷却せず、約 5mm の厚さの発泡スチロール断熱材を介して液体窒素冷却槽内の超伝導ループ線状の input coil に結合する。測定においては超伝導シールド電流の効果を確認するため、外部直流磁場印加中に〈3・1〉節と同様に HTS ループ線の部分加熱を行い、超伝導状態を壊した状態で input coil に生じる磁場の変化を計測した。結果を Fig. 4 に示す。

ヘルムホルツコイルにわずかな横方向の磁場分布が存在するため、HTS ループを設置しない状態でも印加磁場の増大に伴い MI センサの検出値は増加するが、その割合はコイル出力 100 μ T に対して計測値は 1.8 μ T と非常に小さい値に留まる。これに対して、HTS 磁束トランスを設置した場合には、印加した直流磁場に比例して大きな直流磁場が MI センサに検出された。また、磁場印加状態で HTS 磁束トランスの部分加熱を行うと、MI センサの検出磁場は大きく減少し、HTS 磁束トランスを設置しない場合とほぼ等しくなっ

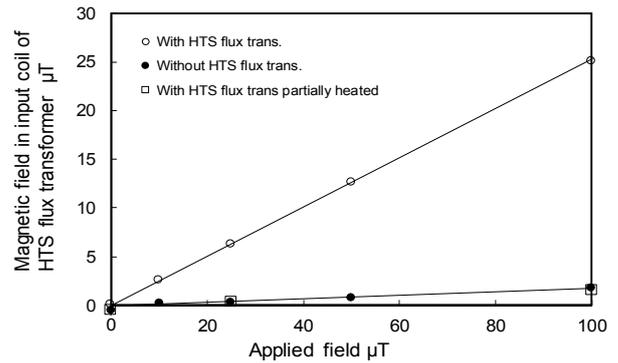


Fig. 4. Magnetic field transferred from applied field in the pickup coil to the input coil of the HTS flux transformer.

Table 1. Transmission of magnetic field depending on the turn number of pickup coil (D = 100 mm) of HTS flux transformers.

Applied Field	0	10	25	50	100
Magnetic Field on the input coil (1T pick up coil)	0.1	2.6	6.3	12.6	25.1
Magnetic Field on the input coil (2T pick up coil)	1.0	1.5	3.7	7.4	14.9

Unit: μ T

た。このことから、本 HTS 磁束トランスにおいては、1 つのループ部分から侵入した磁束が他方のループ部分に超伝導シールド電流を介して移送され、磁場の伝達機能を達成したものと考えられる。また伝達効率は pickup coil への 100 μ T の磁場印加に対して input coil の伝達磁場は 25 μ T 程度であった。さらに、Fig. 1 (b) に示す、2 ターンの pickup coil を内包する HTS 磁束トランスについて伝達磁場の測定を行った。結果を Table 1 に示す。pickup coil を 2 ターンにした構造においても、超伝導シールド電流の誘導による磁場の移送機能が確認できた。しかし内包ループ間のインダクタンスの差が開くために、シングルターン構造に比べて伝達効率は低下した。一例では、金属超伝導磁束トランスを用いた SQUID システムにおいては pickup coil から SQUID センサに伝達される磁場は磁束密度で 8 倍に濃縮される⁽¹⁶⁾。これに対して、今回の結果は HTS 磁束トランスの磁場伝達効率は十分な値ではない。磁束トランスでは input coil と pickup coil のインダクタンスが等しいときに最も磁束伝達効率が高くなる。本研究で用いたループは input coil と pickup coil の幾何的な面積比が 19.6mm²/7.64 \times 10³mm² と大きく、両 coil 間のインダクタンスのミスマッチングが大きいと考えられる。また磁束トランス構造のインダクタンスについては、厚さ 35 μ m の銅箔線を用いて作製した、磁束トランスと同形状のループ線のインダクタンスを実測したところ、1 ターンおよび 2 ターン構造について、それぞれ 305nH、960nH であった。非対称的な立体構造を有する本構造では、インダクタンスの計算は難しいが、銅箔線と同じ断面積の丸線で pickup coil に類似する直径 100mm の 1 ターンループを作った場合、イ

ンダクタンス計算値は約 330nH となる。HTS ループ線では導体の磁化率が銅箔とは異なるためインダクタンス値は銅箔ループ線の場合とは等しくはならないと考えられるが、1ターン構造よりも2ターン構造の方がインダクタンスのミスマッチングは大きくなり、磁束伝達効率が低下することは予想できる。

こうしたループ間のインダクタンスマッチングの改善ならびに磁場伝達効率の改善は、input coil への磁性コアの適用等の方法で可能と考えられる。マルチターンコイル構造は印加磁場に対する誘導シールド電流が小さくなるので、線材の電流許容値 (I_c) に対して余裕が大きくなり、デバイスが飽和せず対応できる磁場の上限を広げることが可能である上、さらにコイル設計におけるインダクタンスの設計値の幅を広げることができる点でも利点大きい。

また図中には示していないが、厚さ以外は同寸法の電子回路リボンケーブル用銅プリント基板 (サンハヤト (株) 製) を用いて作製した銅ループ線を冷却槽内に設置した場合も、何も設置しない状態での計測値にほぼ等しい。このことから定常磁場の信号に対しては、HTS 磁束トランスは金属導線による磁束伝達と比べて有意な機能を持っており、非破壊検査その他において極低周波あるいは静磁場を利用する応用に有効と考えられる。今後は低温動作可能なセンサの磁束トランス上への直接マウントによる相互インダクタンス改善などの改良が見込まれる。

4. まとめ

本研究で作製した HTS ループ線では、外部静磁場の印加により超伝導シールド電流が励起されており、ループ線全域に渡って 77K において超伝導接続が維持されていると考えられる。また、2つのループを内包した閉回路構造をもつ HTS 磁束トランスについては、ループ間の磁束トランス機能について、印加静磁場と検出磁場の線形性を確認できた。本研究で用いた外部直流磁場は 100 μ T までの弱磁場であり、RE123 (RE=Y) の下部臨界磁場 $H_{c1}^{(17)}$ を考慮すれば、HTS テープ線材内への磁束トラップについての考慮は不要と考えられる。しかし応用上、より強い磁場が HTS 磁束トランスに対して印加される場合には、磁束トランス機能の線形性が、線材内への磁束トラップにより変化する可能性はある。

また磁束トランスの磁場伝達能力は、現在のところ磁気センサシステムの感度を向上させるために十分な磁束密度の濃縮機能までには至っていないが、今後、低温動作が可能な磁気センサを検出側ループに直接マウントするなどの方法により結合を強化することで、さらなる性能向上が可能と考えられる。本手法は大口径・マルチターンコイルへの拡張が可能であり、フィールドテストなどに有効なグラジオメータ構造の磁束トランスの作製が期待できる。

謝辞

本研究における低温環境の磁気センサ測定については、物質・材料研究機構の大井修一氏に多大なご協力をいただきました。記して謝意を表します。

文 献

- (1) D. He, M. Shiwa, S. Takaya, and K. Tsuchiya: "Covering Depth Detection of Steel Reinforcing Bar Using Electromagnetic Method", *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*, Vol.42: Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XX) pp.247-252 (2017); DOI: 10.3233/978-1-61499-767-2-247
- (2) S. Kanai, Y. Hatsukade, K. Hayashi, K. Mori, and S. Tanaka: "Eddy-Current-Based SQUID-NDE System for Copper Tubes With Laser Displacement Sensor", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.19, No.3, pp.786-790 (2009)
- (3) K. Enpuku, S. Hirakawa, Y. Tsuji, R. Momotomi, M. Matsuo, T. Yoshida, and A. Kandori: "HTS SQUID Magnetometer Using Resonant Coupling of Cooled Cu Pickup Coil", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.21, Issue 3, pp.514-517 (2011); DOI: 10.1109/TASC.2010.2096454
- (4) T. Fukuzaki, H. Maeda, S. Matsumoto, S. Nimoori, S. Yokohama, and T. Kiyoshi: "Development of a Superconducting Joint for High Field NMR", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.16, No.2, pp.1547-1549 (2006)
- (5) R. Tediosi, M. Alessandrini, C. Beneduce, S. Schneider, and D. Eckert: "Low Temperature and Magnetic Field Performance of Spliced Commercial YBCO CC", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.22, Issue 3, p.6600804 (2012); DOI: 10.1109/TASC.2011.2178579
- (6) J. Y. Kato, N. Sakai, S. Tajima, S. Miyata, M. Konishi, Y. Yamada, N. Chikumoto, K. Nakao, T. Izumi, and Y. Shiohara: "Diffusion joint of YBCO coated conductors using stabilizing silver layers", *Physica C* 445-448, pp.686-688 (2006)
- (7) X. Jin, Y. Yanagisawa, H. Maeda, and Y. Takano: "Development of a superconducting joint between a GdBa₂Cu₃O_{7-x}-coated conductor and YBa₂Cu₃O_{7-x} bulk: Towards a superconducting joint between RE (Rare Earth) Ba₂Cu₃O_{7-x}-coated conductors", *Supercond. Sci. Technol.*, 28, 075010 (2015)
- (8) Y. J. Park, M. W. Lee, Y. K. Oh, and H. G. Lee: "Laser drilling: enhancing superconducting joint of GdBa₂Cu₃O_{7-x} coated conductors", *Supercond. Sci. Technol.*, 27, 085008 (2014)
- (9) K. Ohki, T. Nagaishi, T. Kato, D. Yokoe, T. Hirayama, Y. Ikuhara, T. Ueno, K. Yamagishi, T. Takao, R. Piao, H. Maeda, and Y. Yanagisawa: "Fabrication, microstructure and persistent current measurement of an intermediate grown superconducting (iGS) joint between REBCO-coated conductors", *Supercond. Sci. Technol.*, 30, 115017 (2017); DOI: 10.1088/1361-6668/aa8e65
- (10) Y. Iijima, N. Tanabe, O. Kohno, and Y. Ikeno: "In-plane aligned YBa₂Cu₃O_{7-x} thin films deposited on polycrystalline metallic substrates", *Appl. Phys. Lett.*, 60, p.769 (1992); DOI:10.1063/1.106514
- (11) A. Goyal, D. P. Norton, J. D. Budai, M. Paranthaman, E. D. Specht, D. M. Kroeger, D. K. Christen, Q. He, B. Saffian, F. A. List, D. F. Lee, P. M. Martin, C. E. Klabunde, E. Hartfield, and V. K. Sikka: "High critical current density superconducting tapes by epitaxial deposition of YBa₂Cu₃O_x thick films on biaxially textured metals", *Appl. Phys. Lett.*, 69, 1795 (1996); DOI: 10.1063/1.117489
- (12) H.-G. Lee, J.-G. Kim, S.-W. Lee, W.-S. Kim, S.-W. Lee, K.-D. Choi, G.-W. Hong, and T.-K. Ko: "Design and fabrication of permanent mode magnet by using coated conductor", *Physica C* 445-448, pp.1099-1102 (2006)
- (13) C. C. Rong, P. N. Barnes, G. A. Levin, J. D. Miller, D. J. Santosusso, and B. K. Fitzpatrick: "Investigation of the Relaxation of Persistent Current in Superconducting Closed Loops Made Out of YBCO Coated Conductors", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol.25, No.3, 8200805 (2015)
- (14) D. Koelle, A. H. Miklich, E. Dantsker, F. Ludwig, D. T. Nemeth, J. Clarke, W. Ruby, and K. Char: "High performance dc SQUID magnetometers with single layer YBa₂Cu₃O_{7-x} flux transformers", *Applied Physics Letters*, 63, p.3630 (1993); DOI: 10.1063/1.110071
- (15) E. Dantsker, O. M. Froehlich, S. Tanaka, K. Kouznetsov, J. Clarke, Z. Lu, V. Matijasevic, and K. Char: "High- Tc superconducting gradiometer with a long baseline asymmetric flux transformer", *Applied Physics Letters*, 71, p.1712 (1997); DOI: 10.1063/1.120012
- (16) 杉山 卓・井深 丹: 「高感度磁束センサ SQUID」, *低温工学*, Vol.15, No.1, p.2 (1980)
- (17) R. Liang, P. Dosanjh, D. A. Bonn, W. N. Hardy, and A. J. Berlinsky: "Lower critical fields in an ellipsoid-shaped YBa₂Cu₃O_{6.95} single crystal", *Phys. Rev. B*, 50, p.4212 (1994); DOI: 10.1103/PhysRevB.50.4212

小 森 和 範



(非会員) 1990年3月早稲田大学大学院理工学研究科資源および材料工学専攻修士課程。同年, 科学技術庁金属材料技術研究所入所。組織改編により現在, 国立研究開発法人物質・材料研究機構超伝導位相エンジニアリンググループ主幹研究員。高温超伝導材料の薄膜技術, マイクロ波特性評価研究を経て, 現在は超伝導磁束トランス機能と応用技術に関する研究に従事。金沢工業大学大学院高信頼ものづくり専攻博士課程在学中。

有 沢 俊 一



(非会員) 1993年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(材料学)。同年科学技術庁金属材料技術研究所。1997~1998年ジュネーブ大学在外派遣。改組を経て現在, 物質・材料研究機構超伝導位相エンジニアリンググループ・グループリーダー。走査 SQUID 顕微鏡を用いた超伝導体の磁束量子評価, 超伝導体薄膜の物性および構造評価, デバイス応用などに従事。

立 木 実



(非会員) 1999年3月大阪大学大学院基礎工学研究科電気工学専攻博士課程修了。博士(工学)。早稲田大学客員講師を経て, 国立研究開発法人物質・材料研究機構超伝導位相エンジニアリンググループ主幹研究員。現在超伝導デバイス, 磁気顕微鏡, 機能性薄膜作製に関する研究に従事。

遠 藤 和 弘



(非会員) 1976年3月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(工学博士)。同年, 通産省工業技術院電子技術総合研究所に入所。(独)産業技術総合研究所を経て, 現在, 金沢工業大学大学院工学研究科教授。材料科学, 薄膜, 高温超伝導体, 酸化物エレクトロニクス材料の研究に従事。