新しい高温超電導コイル構成法による遮蔽電流磁界低減の実験的検証

本田 智和^{*1,†}, 岡部 祐麻^{*1}, 柁川 一弘^{*1}

Experimental Verification of Screening Current-Induced Field Reduction Using a New HTS Coil Structure

Tomokazu HONDA^{*1,†}, Yuma OKABE^{*1} and Kazuhiro KAJIKAWA^{*1}

Synopsis: We propose a new structure for layer-wound coil manufactured using a high-temperature superconducting (HTS) wire in the form of a tape to reduce the central magnetic field produced by screening currents induced on the broad surfaces of HTS tapes. Reducing this screening current-induced field is based on the abnormal transverse-field effect observed generally in the mixed state of Type-II superconductors. The structure proposed enables the inner bore of special coil required nuclear magnetic resonance systems to be used effectively. However, it cannot eliminate the screening current-induced fields completely because the innermost and outermost parts of the HTS winding are always exposed to magnetic fields weaker than the full-penetration fields. We carry out a series of experiments to confirm the effectiveness of reducing the screening current-induced fields in a HTS coil fabricated with a commercially available coated conductor.

Keywords: high temperature superconductor, tape-shaped wire, screening current, abnormal transverse-field effect, AC magnetic field

1. はじめに

NbTi や Nb₃Sn からなる低温超電導多芯線は外部横磁界印加による磁化が非常に小さいため、このような線材を巻いたコイルは中心部の高い磁界均一度を実現可能であり、磁気共鳴イメージング (MRI) 装置や核磁気共鳴 (NMR) 装置に幅広く利用されている。一方、近年開発されて販売が開始された高温超電導 (HTS) 線材を巻いた MRI/NMR 用コイルの開発が進められている¹⁻¹²⁾。しかし、HTS 線はテープ形状であり、これを巻線したコイルの励磁に伴ってテープ面に垂直な外部磁界が印加されると、幅広面内に遮蔽電流が誘起されて垂直方向に大きく磁化し、輸送電流が作る主磁界に加えて遮蔽電流が作る磁界 (遮蔽電流磁界) が重畳し、コイル中心部の磁界均一度が著しく低下することが問題となっている¹³⁻¹⁶⁾。そこで、第 2 種超電導体の混合状態で一般に観測される異常横磁界効果¹⁷⁻²³⁾を利用して、HTS テープ巻線が作る遮蔽電流磁界を除去する方

法が提案されている^{24,25)}。異常横磁界効果とは、第 2 種超電導体に生じた直流磁化に対して垂直な外部交流磁界を印加することで、直流磁化が緩和する現象である。これまでに、HTS コイルの周囲に同軸配置あるいはトロイド配置した消磁コイルを用いて微小な交流磁界を印加することにより、遮蔽電流磁界を低減可能なことが実証されている²⁴⁻²⁶⁾。しかし、遮蔽電流磁界を除去するための消磁コイルを別途設置する必要があるため、HTS コイルの周囲の空間を有効活用できない。一方、NMR 測定に REBCO コイルを用いる場合、遮蔽電流に関連して次の 3 つの問題点が指摘されている¹¹⁾。a) 磁束クリープに起因する中心磁界の時間的なドリフトが発生し、重水素ロックに非現実的な長期間を要する、b) 外側補正コイルを用いて Z2 成分を補償できない、c) 極低温シムコイルの能力低下により、中心磁界の不均一性を効果的に補正できない。しかし、遮蔽電流磁界が完全に除去できれば、これまでに構築されているシム技術をそのまま適用することにより、中心磁界の高均一化を達成できると期待される。

本論文では、消磁コイルを別途使用せずに、消磁機能を内蔵した HTS コイルを新規に提案する。また、提案構造の HTS コイルを実際に製作し、液体窒素浸漬冷却下において遮蔽電流磁界低減の有効性を実験的に検証する。

Received December 6, 2016

^{*1} 九州大学大学院システム情報科学府電気電子工学専攻
〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744

Department of Electrical and Electronic Engineering, Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

[†] E-mail: t_honda@sc.kyushu-u.ac.jp

DOI : 10.2221/jcsj.52.253

2. 新しい HTS コイル構成法の提案および設計

2.1 消磁機能内蔵 HTS コイルの提案

これまでに、**Fig. 1(a)**に示すような HTS コイルの内外に同軸配置した 1 対の消磁コイルに互いに逆向きの交流電流 I_{AC} を流すことにより、HTS コイル全体に中心到達磁界 B_p よりも大きな軸方向 (HTS テープ巻線の平行方向) の交流磁界 B_{AC} が印加され、HTS コイルの作る遮蔽電流磁界を低減可能なことが実証されている^{24,25)}。一方、本論文で提案する HTS コイル構成法では、HTS 層巻きコイルのうち内側および外側の数層を消磁コイルとして兼用するものである。**Fig. 1(b)**に示すように、HTS コイル全体に直流電流 I_{DC} を流しながら、内外の消磁兼用部に互いに逆向きの交流電流 I_{AC} を流すことで、従来の同軸配置の場合と同様な遮蔽電流磁界の低減が期待される。本構成法の利点としては、消磁のための内外コイル対が不要となり、同軸配置に比べると、特に内側ボアの有効利用空間を広くできる。適用先として、特に長いコイル長を必要とする NMR 用が想定される。一方、欠点としては、i) 消磁兼用部のさらに一部に印加される交流磁界 B_{AC} が中心到達磁界 B_p よりも小さく、完全に消磁されない、ii) 直流と交流を同時に流すため、前者の負荷率を大きくできない、iii) 巻線方法および電極配置を工夫する必要がある、iv) 層巻きコイルにしか適用できない、等が挙げられる。

Fig. 1 Schematic illustration and AC-field profile of (a) HTS main coil and a pair of shaking coils arranged coaxially, and (b) proposed structure of HTS coil with shaking parts.

Table 1 Specifications of HTS wire.

Width of tape (without insulator), w_b	5.02 mm
Thickness of tape (without insulator)	0.159 mm
Thickness of GdBa ₂ Cu ₃ O _x layer	2.6 μ m
Electrical insulator	Polyimide
Width of tape (including insulator), w_i	5.09 mm
Thickness of tape (including insulator)	0.211 mm
Critical current at 77 K in self-field, I_{c0}	256 A

Fig. 2 Experimental results of I_c - B - θ characteristics at 77 K in a coated conductor²⁷⁾ and their approximate curves.

Fig. 3 Profiles of (a) local magnetic field and (b) critical current in a pre-designed HTS coil, to which a transport current of 80 A is applied.

2.2 HTS 線材の諸元

今回使用した HTS テープ線の諸元を **Table 1** に示す。絶縁のないテープ線の幅 w_b は 5.02 mm であり、超電導 (GdBa₂Cu₃O_x) 層の厚さは 2.6 μ m である。線材周囲はポリイミドテープにより絶縁されており、絶縁後のテープ線の幅 w_i は 5.09 mm である。77 K、自己磁界下での臨界電流 I_{c0} は 256 A である。**Table 1** に示すものと同等の HTS 線材の 77 K における臨界電流 I_c の実験結果²⁷⁾に基づいて、その外部磁界・印加角度依存性を次式で近似した。

$$\frac{I_c(B, \theta)}{I_{c0}} = \frac{\alpha_1 B^{-\Gamma_1}}{\sqrt{\cos^2 \theta + \frac{1}{\gamma_1^2} \sin^2 \theta}} + \frac{\alpha_2 B^{-\Gamma_2}}{\sqrt{\frac{1}{\gamma_2^2} \cos^2 \theta + \sin^2 \theta}} \quad (1)$$

ここで、 B は外部磁界の大きさ、 θ はテープ幅広面に対して垂直な方向を基準とした磁界印加角度である。 α_1 , α_2 , Γ_1 , Γ_2 , γ_1 , γ_2 はそれぞれフィッティングパラメータであり、実験結果を最小二乗法で近似すると、 $\alpha_1 = 0.0159$, $\alpha_2 = 0.0988$, $\Gamma_1 = 0.92$, $\Gamma_2 = 0.65$, $\gamma_1 = 1 + 19.4B$, $\gamma_2 = 1 + 1.20B$ と表せる。ただし、磁界 B の単位はテス

ラである。実験結果と近似曲線の比較を Fig. 2 に示す。

2.3 新構造 HTS コイルの設計

矩形断面円筒形コイルの磁界計算プログラム²⁸⁾を用いて、HTS コイル内部の磁界分布を予め求めた。設計に用いたコイルの諸元は、内径 63.0 mm、外径 71.4 mm、コイル長 91.6 mm、層数 20、総ターン数 360 である。本コイルに 80 A 通電し、コイル断面に均一に電流が流れた場合の磁界分布の一例を Fig. 3(a)に示す。磁界が最も大きくなるのはコイル内側の中央部であり、331 mT となる。

Fig. 3(a)に示す磁界分布を用いて、(1)式より臨界電流分布を求めた結果を Fig. 3(b)に示す。臨界電流はコイル内側の上下端で最小となり、84 A と通電電流よりわずかに大きい。通電電流を 50~100 A の範囲で変化させた場合の臨界電流の最小値を求めた結果を、Fig. 4 の●印で示す。また、Fig. 4 の点線はコイルの負荷直線であり、交点よりコイル I_c は約 82 A と評価される。しかし、交流電流を重畳して流す必要があるため、実際の動作電流はより小さく設定する必要がある。

次に、消磁兼用部に必要な層数を決定する。中心到達磁界 B_p とコイル 1 層分の発生磁界振幅 B_1 はそれぞれ

$$B_p = \frac{\mu_0 I_{co}}{2w_b} \quad (2)$$

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_m}{w_i} \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 μ_0 は真空の透磁率、 I_m は交流電流振幅であり、各層を密巻していると仮定する。全発生磁界振幅 B_m と中心到達磁界 B_p の比を $k = B_m/B_p$ とすると、消磁に必要な層数 N を次のように表せる。

$$N = \frac{B_m}{B_1} = \frac{kB_p}{B_1} = \frac{k w_i I_{co}}{2 w_b I_m} \quad (4)$$

(4)式を用いて、通電電流 50~80 A に対して変数 k を 1 から 2 の範囲で変化させた場合の層数 N を求めると、Fig. 5 のようになる。消磁には k が 1 より十分大きい必要があるため、6 層あれば 60~65 A 程度通電できることがわかる。以上より、コイル 20 層を 6+8+6 層に分ける構成とした。

3. 新構造 HTS コイルの製作と通電試験

2 節の設計に基づいて HTS コイルを製作した。Fig. 1(b)に示すように、必要となる電極は 4 本であり、そのうちコイル両端の 2 本は直流・交流兼用である。また、電極同士が干渉しないように、4 本を円周方向に 90° ずつずらして配置した。電極として厚さ 1 mm の銅板をテープ線の幅広面上にハンダ付けした。巻線の際に、電極を取り付けた層の外側の数層は電極を避ける必要があるため、均等な層の構造は実現できない。そこで、a) 各層の下端の位置を揃える、b) 内外の消磁兼用部の断面構造を同一にする、という方針で巻線した。製作した HTS コイルの諸元を

Fig. 4 Estimated results of critical currents in a pre-designed HTS coil and its load line. The solid line is a guide to the eye.

Fig. 5 Number of layers required for reducing screening current-induced fields in the proposed HTS coil structure. The solid lines are a guide to the eye.

Table 2 に示す。内径 63.0 mm、外径 72.1 mm、総ターン数 346.25 であり、使用したテープ線の全長は 73.5 m と推定される。

製作した HTS コイルにおいて、内外兼用部に交流電流を流して消磁した場合とは別に、遮蔽電流磁界をほぼゼロに消磁するために、1 対の消磁コイルを HTS コイルの内外に同軸配置した実験も行った。使用した銅消磁コイルの諸元を Table 3 に示す^{24,25)}。銅線の直径は 1 mm で、2 つの消磁コイルの長さ、層数、ターン数はすべて同一である。

製作した HTS コイルの健全性を確かめるために、予備的通電試験を行った。HTS コイルを液体窒素で浸漬冷却し、電圧-電流特性を測定した。テープ線の全長より、電界基準を 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ としたときのコイル I_c は電圧 7.35 mV で定義されるが、90 A 程度から電圧が急上昇し、97 A/2 mV 程度で電流掃引を停止したため、コイル I_c まで通電し

Table 2 Specifications of HTS coil.

Inner diameter	63.0 mm
Outer diameter	72.1 mm
Average coil length	88.3 mm
Number of layers	20 (= 6 + 8 + 6)
Total number of turns	346.25
Total tape length	73.5 m

Table 3 Specifications of inner/outer copper shaking coils.^{24,25)}

Diameter of copper wire	1 mm
Number of layers	2
Inner diameter	53.0/79.0 mm
Outer diameter	57.0/82.9 mm
Coil length	139.8 mm
Total number of turns	264

ていない。2 節で予め評価したコイル I_c は約 82 A であることから、コイル全体の平均値は電界基準に達していないが、巻線の一部は I_c を超えていると推定される。

4. 実験

製作した HTS コイルを液体窒素で浸漬冷却し、コイル中心部に配置したホール素子により軸方向磁界を計測した。HTS コイルの通電電流を -60 A から励磁速度 1 A/s で単調増加させ、60 A でホールドした後、消磁兼用部を用いて周波数 10 Hz の交流磁界を印加したときの中心磁界の時間変化を、Fig. 6(a)に示す。ただし、コイル励磁直後を基準 ($t = 0$) として交流磁界印加開始時刻を 60 s に固定している。交流磁界印加開始から 540 s 間で中心磁界はわずかに増加し続けることがわかる。また、交流磁界振幅が大きくなるほど中心磁界の増加量は大きくなる。一方、交流磁界を印加しない場合も、磁束クリープの影響により中心磁界は増加し続ける。ここで、HTS コイルの消磁兼用部を用いた交流磁界の印加に伴う中心磁界の変化に与える磁束クリープの影響を調べるために、交流磁界印加の開始時刻を変化させ、その時刻を基準 ($t = 0$) としたときの中心磁界の測定結果を Fig. 6(b)に示す。ただし、交流磁界印加開始時刻を励磁後 60 s, 240 s, 420 s の 3 通りに設定した。また、印加する磁界振幅は 43.5 mT, 31.3 mT, 14.9 mT の 3 通りに変化させた。Fig. 6(b)より、交流磁界印加開始直後は磁束クリープの影響がみられるが、20 s 経過すれば、印加磁界振幅に応じて中心磁界の差は 0.3 mT 未満でほぼ一定となり、磁束クリープの影響がなくなることがわかる。

一方、短時間の交流磁界印加が磁束クリープに与える影響について議論する。Fig. 6(a)に示すように、HTS コイルのみを単独励磁すると、120~600 s に磁束クリープにより

Fig. 6 Time evolutions of central magnetic fields in the HTS coil for excitations up to 60 A and subsequent applications of AC magnetic fields with different amplitudes using shaking parts. (a) The time of zero is defined as the end of excitation and the time to start applying the AC fields is fixed at 60 s. (b) The time of zero is defined as the start of applying the AC field, which is set at 60 s, 240 s or 420 s after the end of excitation.

中心磁界は 0.74 mT 増加する。一方、励磁後 60 s から振幅 43.6 mT、周波数 100 Hz の交流磁界を 60 s 間印加すると、観測される中心磁界はほぼ一定になり、120~600 s の標準偏差は 0.02 mT で測定限界以下となる。つまり、短時間の交流磁界印加により磁束クリープを抑制できるといえる。

次に、HTS コイルの内外に銅コイルを同軸配置して消磁した場合の中心磁界の時間変化を、Fig. 7 に示す。この場合、磁界振幅が約 32 mT 以上で一定値に飽和することがわかる。この飽和値との差分を遮蔽電流磁界とみなし、片対数グラフ上にプロットした結果を、Fig. 6(a)および Fig. 7 に対応してそれぞれ Fig. 8(a), (b)に示す。銅コイルによる消磁の結果を示す Fig. 8(b)において、磁界振幅が約 32 mT 以上では遮蔽電流磁界は指数関数的に減少して最終的にゼロとなる。また、約 24 mT 以下では下に凸の曲線を描き、遮蔽電流磁界はゼロでない有限値に漸近する。一方、兼用部を用いた消磁の結果を示す Fig. 8(a)において、磁界振幅が約 38 mT 以下でも下に凸の曲線を描いており、

Fig. 7 Time evolutions of central magnetic fields in the HTS coil for excitations up to 60 A and subsequent applications of AC magnetic fields with different amplitudes using copper shaking coils arranged coaxially.

Fig. 8 Time evolutions of screening-current-induced fields in the HTS coil for excitations up to 60 A and subsequent applications of AC magnetic fields with different amplitudes using (a) shaking parts of the HTS coil, and (b) copper shaking coils arranged coaxially.

Fig. 9 Experimental results of central magnetic fields in the HTS coil with and without applying AC magnetic fields for initial excitations just after cooling. The chain line without symbols is obtained using the copper shaking coils arranged coaxially. The differences among these central fields are also estimated. The solid and dotted lines are a guide to the eye.

Fig. 10 Degaussing rate of screening-current-induced fields for initial excitation of the HTS coil.

ゼロでない有限の遮蔽電流磁界が常に残る。ただし、磁界振幅 43.5 mT の場合の遮蔽電流磁界は測定限界以下まで小さくなっているが、原理上完全な消磁は期待できないことから、再現性も含めた結果の原因究明が必要と思われる。

初期冷却後に単調に励磁した場合の中心磁界の測定結果を **Fig. 9** に示す。中心磁界の測定は、すべて励磁後 600 s 時点である。まず、HTS コイルのみを単純に励磁した場合の中心磁界 B_a は通電電流に比例せず、下に凸となる。次に、HTS コイルの励磁を 5 A 毎にホールドし、消磁兼用部を用いて振幅 43.6 mT、周波数 100 Hz の交流磁界を 60 s 間印加した場合の中心磁界を B_b で表すと、 B_a に比べて多少大きくなるが、まだ下に凸のままである。さらに、銅コイルを同軸配置して完全消磁した場合の中心磁界 B_c を別途測定して算出した理想的な負荷直線を、**Fig. 9** の一点鎖線で示す。以上の 3 つの中心磁界を用いて、任意の 2 つの差分磁界を求めた結果も、**Fig. 9** にプロットしている。差分磁界 $B_c - B_a$ は HTS コイルの励磁により誘起された全遮蔽電流磁界を表すが、通電電流の増加とともに大きくなり、12.5 mT で最大となった後、減少に転じる。一

Fig. 11 Experimental results of central magnetic fields for repeated HTS coil excitations between ± 60 A (a) without applying an AC field and (b) applying an AC field at every step. The deviations from approximate lines are also estimated. The solid and dotted lines are a guide to the eye.

方、差分磁界 $B_b - B_a$, $B_c - B_b$ は HTS コイルの兼用部を用いた遮蔽電流磁界の消磁量と未消磁量をそれぞれ表しており、未消磁量は最大 5.0 mT であり、60 A で 2.5 mT まで低下している。全遮蔽電流磁界 $B_c - B_a$ に対する消磁量 $B_b - B_a$ の比を消磁率として算出すると、**Fig. 10** が得られる。通電電流の増加とともに消磁率は単調に増加し、60 A で 77% に達することがわかる。

HTS コイルへの通電電流を ± 60 A の範囲で繰り返し励磁した際の中心磁界の変化を **Fig. 11** の黒印で示す。中心磁界の測定は、すべて励磁後 300 s 時点である。まず、**Fig. 11(a)** に示すように、HTS コイルのみを単純に励磁した場合の中心磁界は大きなヒステリシス曲線を描くことがわかる。次に、**Fig. 11(b)** に示すように、通電電流値を少し変えてホールドする度に振幅 43.6 mT、周波数 100 Hz の交流磁界を 60 s 間印加した場合、中心磁界のヒステリシスは小さくなり、より直線に近づく。また、中心磁界の近

似直線とのずれを求めた結果が **Fig. 11** に示す白印であり、交流磁界を印加することによりずれが最大 ± 13.1 mT から ± 7.1 mT へ半分程度まで小さくなっている。以上より、消磁兼用部を設けることにより HTS コイル単体で遮蔽電流磁界を低減できることが実験的に確認できた。

5. まとめ

高温超電導テープ線を巻いたコイルを励磁した際に誘起される遮蔽電流磁界を異常横磁界効果により低減するために、別途消磁コイルを配置して微小交流磁界を印加する従来方法の代わりに、消磁機能を内蔵した層巻きコイル構造を新規に提案した。また、提案構造の有効性を実験的に確認するために、市販の高温超電導テープ線材を用いて計 20 層のコイル（内側消磁兼用部 6 層、中央主要部 8 層、外側兼用部 6 層）を製作し、液体窒素中に浸漬して中心磁界を測定した。その結果、遮蔽電流磁界は初期励磁過程において最大約 8 割、繰り返し励磁過程において少なくとも約 5 割低減でき、提案構造の有効性を実証できた。このように、HTS コイル単体で遮蔽電流磁界を低減することにより、2 節で述べたように、NMR 用マグネットとして要求される内側ボアの広い有効利用空間を確保できる。

提案構造を用いて遮蔽電流磁界をより低減するためには、多層化が有効である。つまり、異常横磁界効果を用いて遮蔽電流磁界を完全に消磁するためには中心到達磁界以上の振幅をもつ交流磁界を印加する必要があるが、消磁兼用部の一部の印加磁界は必然的に中心到達磁界未満であり、未消磁部として残存してしまう。しかし、高磁界化を目指してコイル層数を増加すれば、消磁の主対象であるコイル中央部に中心到達磁界以上の交流磁界を印加するために必要な兼用部の層数は不変なため、未消磁部の占める割合が相対的に減少して、高温超電導コイル全体の消磁率の向上が期待できる。このような多層化により達成される遮蔽電流磁界の残存量がコイル励磁直後の 1 割程度であっても、NMR 装置に適用できる可能性がある²⁹⁾。

参考文献

- 1) W.D. Markiewicz, et al.: "Perspective on a superconducting 30 T/1.3 GHz NMR spectrometer magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **16** (2006) 1523–1526
- 2) J. Bascuñán, et al.: "An LTS/HTS NMR magnet operated in the range 600–700 MHz," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** (2007) 1446–1449
- 3) M. Razeti, et al.: "Construction and operation of cryogen free MgB₂ magnets for open MRI systems," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **18** (2008) 882–886
- 4) S. Hahn, et al.: "Operation and performance analyses of 350 and 700 MHz low-/high-temperature superconductor nuclear magnetic resonance magnets: A march toward operating frequencies above 1 GHz," *J. Appl. Phys.* **105** (2009) 1–8

- 5) H. Kitaguchi, et al.: "Development of a Bi-2223 HTS magnet for 3T MRI system for human brains," IEEE Trans. Appl. Supercond. **20** (2010) 710–713
- 6) Y. Iwasa, et al.: "High-temperature superconducting magnets for NMR and MRI: R&D activities at the MIT Francis Bitter Magnet Laboratory" IEEE Trans. Appl. Supercond. **20** (2010) 718–721
- 7) J. Bascuñán, et al.: "A 1.3-GHz LTS/HTS NMR magnet– A progress report," IEEE Trans. Appl. Supercond. **21** (2011) 2092–2095
- 8) B.J. Parkinson, et al.: "Development of a cryogen free 1.5 T YBCO HTS magnet for MRI," IEEE Trans. Appl. Supercond. **23** (2013) 4400405
- 9) J. Bascuñán, et al.: "90-mm/18.8-T all-HTS insert magnet for 1.3 GHz LTS/HTS NMR application: magnet design and double-pancake coil fabrication," IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014) 4300904
- 10) R.A. Slade, B.J. Parkinson and R.M. Walsh: "Test results for a 1.5 T MRI system utilizing a cryogen-free YBCO magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **24** (2014) 4400705
- 11) Y. Yanagisawa et al.: "Operation of a 400 MHz NMR magnet using a (RE: Rare Earth)Ba₂Cu₃O_{7-x} high-temperature superconducting coil: Towards an ultra-compact super-high field NMR spectrometer operated beyond 1 GHz," J. Magn. Reson. **249** (2014) 38–48
- 12) H. Maeda and T. Shimizu: "Development of an NMR spectrometer operated beyond 1 GHz — The significance and prospects of a NMR spectrometer operated beyond 1 GHz —," TEION KOGAKU **51** (2016) 324–328 (in Japanese)
前田秀明, 清水 禎: 「超 1 GHz NMR システムの開発 — 高磁場 NMR の将来に向けた超 1 GHz NMR システムの役割と成果 —」, 低温工学 **51** (2016) 324–328
- 13) N. Amemiya and K. Akachi: "Magnetic field generated by shielding current in high T_c superconducting coils for NMR magnets," Supercond. Sci. Technol. **21** (2008) 095001
- 14) M.C. Ahn, et al.: "Spatial and temporal variations of a screening current induced magnetic field in a double-pancake HTS insert of an LTS/HTS NMR magnet," IEEE Trans. Appl. Supercond. **19** (2009) 2269–2272
- 15) A. Miyazoe, et al.: "Magnetic field induced by screening current in short and straight coated conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. **20** (2010) 1557–1560
- 16) D. Uglietti, et al.: "Measurements of magnetic field induced by screening currents in YBCO solenoid coils," Supercond. Sci. Technol. **23** (2010) 115002
- 17) K. Funaki and K. Yamafuji: "Abnormal transverse-field effects in nonideal type II superconductors I. A linear array of monofilamentary wires," Jpn. J. Appl. Phys. **21** (1982) 299–304
- 18) K. Funaki, T. Niidome and K. Yamafuji: "Abnormal transverse-field effects in nonideal type II superconductors. II. Influence of dimension ratios in a superconducting ribbon," Jpn. J. Appl. Phys. **21** (1982) 1121–1126
- 19) K. Funaki, M. Noda and K. Yamafuji: "Abnormal transverse-field effects in nonideal type II superconductors. III. A theory for an AC-induced decrease in the semiquasistatic magnetization parallel to a DC bias field," Jpn. J. Appl. Phys. **21** (1982) 1580–1587.
- 20) K. Funaki, T. Niidome and K. Yamafuji: "Abnormal transverse-field effect in current-carrying superconducting wires," Tech. Rep. Kyushu Univ. **56** (1983) 45–51 (in Japanese)
- 船木和夫, 新留照英, 山藤 馨: 「超電導単芯線の通電時における異常横磁界効果」, 九大工学集報 **56** (1983) 45–51
- 21) E.H. Brandt and G.P. Mikitik: "Why an ac magnetic field shifts the irreversibility line in type-II superconductors," Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 027002
- 22) G.P. Mikitik and E.H. Brandt: "Theory of the longitudinal vortex-shaking effect in superconducting strips," Phys. Rev. B **67** (2003) 104511
- 23) E.H. Brandt and G.P. Mikitik: "Shaking of the critical state by a small transverse ac field can cause rapid relaxation in superconductors," Supercond. Sci. Technol. **17** (2004) S1–S5
- 24) K. Kajikawa and K. Funaki: "A simple method to eliminate shielding currents for magnetization perpendicular to superconducting tapes wound into coils," Supercond. Sci. Technol. **24** (2011) 125005
- 25) K. Kajikawa and K. Funaki: "Reduction of magnetization in windings composed of HTS tapes," IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 4400404
- 26) K. Kajikawa and Y. Okabe: "Reduction of screening-current-induced fields in an HTS tape winding using toroidal arrangement of shaking coil," IEEE Trans. Appl. Supercond. **26** (2016) 4400504
- 27) M. Daibo, et al.: "Characteristics of impregnated pancake coils fabricated using REBCO coated conductors," IEEE Trans. Appl. Supercond. **22** (2012) 3900204
- 28) K. Kajikawa and K. Kaiho: "Usable ranges of some expressions for calculation of the self-inductance of a circular coil of rectangular cross section," TEION KOGAKU **30** (1995) 324–332 (in Japanese)
柁川一弘, 海保勝之: 「矩形断面円筒形コイル用自己インダクタンス計算式の適用範囲について」, 低温工学 **30** (1995) 324–332
- 29) Y. Iwasa: private communication (2013)

本 田 智 和 1992 年生。2016 年九州大学工学部電気情報工学科卒業。現在、九州大学大学院システム情報科学府電気電子工学専攻電気システム工学コースに在籍。高温超電導テープ巻線における遮蔽電流磁界の低減に関する研究に従事。低温工学・超電導学会会員。

岡 部 祐 麻 1992 年生。2015 年九州大学工学部電気情報工学科卒業。現在、九州大学大学院システム情報科学府電気電子工学専攻電気システム工学コースに在籍。高温超電導テープ巻線における遮蔽電流磁界の低減に関する研究に従事。低温工学・超電導学会会員。

柁 川 一 弘 1968 年生。1990 年九州大学工学部電子工学科卒業。1992 年同大学院工学研究科修士課程（電子工学専攻）修了。現在、九州大学超伝導システム科学研究センター准教授。主に超電導線の電磁特性評価や熱的安定性評価、および超電導技術の液体水素応用に関する研究開発に従事。低温工学・超電導学会、電気学会、応用物理学会、IEEE 会員。博士（工学）。