テーマ解説

HTS-SQUID を用いた試料回転式小型磁化率計の開発と応用展開

堺 健司^{*,†}, Mohd Mawardi Saari^{*}, 紀和 利彦^{*}, 塚田 啓二^{*}

Development and Application of a Compact Rotating-sample Magnetometer Using HTS-SQUID

Kenji SAKAI^{*,†}, Mohd Mawardi SAARI^{*}, Toshihiko KIWA^{*} and Keiji TSUKADA^{*}

Synopsis: This paper describes our newly developed compact rotating-sample magnetometer that uses a high-temperature superconductor, superconducting quantum interference device (HTS-SQUID). The system configuration of the developed magnetometer is described. The magnetic signal of pure water was measured, and the signal generated from pure water was successfully detected. In addition, the improvement of the new device was examined, and the signal-to-noise ratio increased by optimizing the measurement system. For practical application of the system, the silica gel moisture content was measured by comparing the magnetic signals obtained from several samples. The magnetic signal intensity increased with the silica gel moisture content. A new moisture content evaluation method using the change in magnetic signal that resulted from changing water content was proposed. Magnetic signal measurements during the magnetic relaxation of magnetic moments were investigated by changing the pick-up coil position. When the magnetic signal from pure water was measured with a time delay of 0.2 s after magnetization, a magnetic signal change could be detected. Therefore, the newly developed system can also measure magnetic relaxation phenomena.

Keywords: HTS-SQUID, magnetometer, diamagnetism, moisture content evaluation, magnetic relaxation

1. はじめに

磁性は物質の基本的パラメータの1つであり、全ての物質は外部磁場に対して固有の応答を示す。従って、各物質の磁気特性を評価することにより物質の特定が可能である。さらに物質固有の磁気特性を測定することで、非破壊検査や磁気免疫検査等へ応用することも報告されている¹⁻⁶⁾。これらの評価には物質の磁気特性を計測するシステムが必要であるが、測定対象の磁性、形状、状態に合わせた測定手法が求められる。

一般的に物質の磁性は強磁性体、常磁性体、反磁性体に区分され、その特性を表すパラメータの一つとして磁化率の値がある。強磁性体は磁化率の値が大きく外部磁場に対する応答が大きいため、低感度な磁気センサを用いて磁気特性を評価することが可能である。一方、常磁性体や反

磁性体は磁化率の値が小さく、一般的な磁気センサを用いた磁化率計では評価が難しい。そこで、非常に高感度な磁気センサである low temperature superconductor-superconducting quantum interference device (LTS-SQUID) を用いた磁化率計が開発され、常磁性体や反磁性体の高精度な評価が可能となった。LTS-SQUID は非常に高感度であるものの、冷媒に液体ヘリウムを使用するための断熱機構やヘリウムの回収装置などが必要となり、計測システムが大型になるといった欠点が挙げられる。また、測定試料の形状、体積にも制限があり、多種多様な試料の測定が求められる非破壊検査等へ応用するには不向きである。

そこで、我々は液体や粉末試料も容易に測定できる卓上サイズの高感度磁化率計の実現を目指し、新規計測システムの開発を行ってきた。磁気センサには LTS-SQUID よりもやや感度が劣るものの、常磁性体や反磁性体も十分に評価可能な感度を持つ high temperature superconductor- (HTS-) SQUID を用いた。試料から発生する磁気信号の検出は、直流磁場中で試料を磁化し、試料を変動させることにより生じる磁束変化をコイルで検出する方式を採用している⁷⁾。これまでに我々は、試料を振動させて試料からの二次的な磁場を検出する試料振動式磁化率計 (vibrating sample

Received April 1, 2014

* 岡山大学自然科学研究科

〒700-8530 岡山市北区津島中3丁目1-1

Graduate School of Natural Science and Technology, Okayama University, 3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama 700-8530, Japan

† E-mail: sakai-k@okayama-u.ac.jp

DOI: 10.2221/jcsj.49.352

Fig. 1 Schematic drawing of the developed system.

magnetometer: VSM) と HTS-SQUID を組み合わせた小型磁化率計を開発し、その有用性を示した⁸⁾。さらに我々は、試料を回転させることで試料からの磁場を検出する試料回転式磁化率計^{9,10)}と HTS-SQUID を組み合わせた磁化計も開発した¹¹⁾。試料回転方式の磁化率計では、複数の試料を同時に計測することが可能となり、同時計測による計測時間の短縮、標準試料と測定試料の同時計測による高精度測定などを実現できる。また、試料回転方式を採用することにより磁気モーメントの緩和過程を容易に測定することも可能である。

本稿ではこの試料回転式磁化率計について、まず開発した計測システムの詳細を述べ、試料から生じた二次的な磁場の計測方法について説明する¹¹⁾。その後、反磁性体の水から生じた磁気信号の計測と、システムの改善による S/N 比の向上について述べる¹³⁾。最後に本磁化率計の応用として、シリカゲルの水分量測定と磁気モーメントの緩和過程における磁気信号の計測について述べる¹⁴⁾。

2. HTS-SQUID を用いた試料回転式小型磁化率計

2.1 開発した磁化率計の構成

開発した磁化率計は、Fig. 1 のように、試料を磁化する永久磁石、試料の回転機構、検出コイル、入力コイル、HTS-SQUID、flux locked loop circuit (FLL) 回路、HTS-SQUID 冷却用のデュワ、磁気シールドから構成される¹¹⁾。試料から生じた磁気信号の検出は以下のようにして行う。試料ケースに封入した測定試料は円盤に固定され、永久磁石の磁極間を通過するように回転する。永久磁石により印加される磁場は 300 mT であり、円盤は回転数制御可能な電磁モーターを用いて高精度な回転を実現している。また、試料の回転機構は計測時の磁気信号に影響を与えないよう、

Fig. 2 Frequency dependence of magnetic field noise of the developed system under the DC magnetic field.

電磁モーター以外は全て非磁性の亚克力および MC ナイロンで構成した。

試料からの二次的な磁場を検出する検出コイルには 200 回巻きの常伝導銅コイルを逆向きに 2 個接続した平面型一次微分コイルを使用しており、コイル 1 個のパラメータは外径 17 mm、内径 9 mm、高さ 5 mm、巻き数 200 回となっている。検出コイルは Fig. 1 に示すように永久磁石上に設置し入力コイルと直列に接続されている。入力コイルは 59 巻きの超伝導コイルであり、超伝導コイル基板は SQUID 基板とフリップチップ構造で固定され SQUID と磁氣的に結合している。

今回使用した HTS-SQUID は、塚本、安達らにより非破壊検査等へ応用するために開発されたものを使用した¹²⁾。ランプエッジ型のジョセフソン接合を有する積層型の HTS-SQUID であり、SQUID のインダクタンス、入力コイルのインダクタンス、相互インダクタンスはそれぞれ 40 pH, 110 μH, 1.88 nH である。SQUID は入力コイル基板とともにデュワ内で液体窒素により冷却し、磁気ノイズおよび RF ノイズ低減のため、デュワはパーマロイ 2 層、アルミニウム 1 層の磁気シールド内に設置した。磁気シールドの大きさは外径 270 mm、高さ 500 mm であり、回転機構とともに卓上に設置できる大きさとなっている。これは、一般的な LTS-SQUID を用いた磁化率計と比較して非常に小型なシステムである。

2.2 試料の測定方法

試料ケースにはポリスチレン製の容器を使用した。容器のサイズは外寸 30 mm × 30 mm × 19 mm、内寸 25 mm × 25 mm × 16 mm であり、ケース内に充填できる試料は約 10 mL である。測定試料は試料ケースに充填し、試料ケースを Fig. 1 に示した円盤に固定して回転させた。全ての測定において、試料ケースと検出コイルの距離が 1 mm になるよう調整し測定を行った。

Fig. 3 Magnetic signal from the standard sample (a composite made of iron particles dispersed in polystyrene resin) measured by the developed magnetometer.

3. 開発した小型磁化率計の基礎特性

本章では開発した磁化率計の基礎特性として、システムの環境磁場ノイズと標準試料および純水の測定結果を紹介する¹¹⁾。環境磁場ノイズの測定にはスペクトラムアナライザを使用し、検出コイルは直流磁界中に設置して、試料の回転機構は駆動させていない状態で測定を行った。**Fig. 2**の磁場ノイズスペクトルより、電源周波数とその高調波成分の周波数でノイズレベルが高くなっていることがわかる。しかし、それ以外の際立ったスペクトルは見られず、周波数とともに磁場ノイズスペクトルは減少した。

次に試料からの磁気信号計測について紹介する。まず、十分な信号強度を持つ標準試料を用いて磁気信号が計測できていることを確認した。標準試料には強磁性体である酸化鉄粒子とポリスチレン樹脂を混合したものを使用し、試料ケースに装填できるよう加工を行った。酸化鉄の混合量は 0.5 wt% である。**Fig. 3** に標準試料を測定した場合の SQUID 出力の時間変化を示す。試料の回転数は 200 rpm である。**Fig. 3** より 0.125 s 付近で出力信号に大きな変化が生じていることがわかる。また、出力波形の変化は 2 つのコイルの出力を差分した形となっており、微分コイルで検出した磁気信号であることを示している。この測定により開発したシステムが試料からの磁気信号を正しく計測できていることがわかる。

本磁化率計は非常に高感度でありながら、ある程度の体積の液体や粉体を容易に測定できる点が特徴の一つである。そこで、磁化率が小さい反磁性体の純水を測定試料として取り上げ、磁気信号の測定および高感度計測の手法を検討した。試料ケースに純水を充填し測定を行った結果、純水から発生する二次的な磁場が非常に小さく、環境磁場ノイズの存在により純水からの信号を確認するのが困難であった。そこで、多数回転分の信号を取得し平均化を行うことで S/N 比の改善を行った。**Fig. 4** は 200 回の平均化を

Fig. 4 Magnetic signal from pure water measured by the developed magnetometer.

Table 1 Parameters of the circular and elliptical coils

Coil shape	Circular coil	Elliptical coil
Size [mm]	Outer dia. : 17	Outer size 26.0 (Long axis) 13.5 (Short axis)
	Inner dia. : 9	Inner size 15.0 (Long axis) 1.5 (Short axis)
Base line [mm]	17	13.5
Inductance [μ H] @1 kHz	446	452
Height [mm]	5	4
Resistance [Ω] @20°C	2.08	2.99

行った純水からの磁気信号波形を示している。平均化を行うことで S/N 比が向上し、**Fig. 3** で示した標準試料と同様の微分コイルに起因する信号波形が観測できた。しかし、**Fig. 3** と **Fig. 4** を比較すると波形の位相が逆になっていることがわかる。これは水が反磁性体であることによるものと考えられる。水の磁化率は -9.05×10^{-6} であり、試料からは印加磁界と反対方向の磁場が発生する。従って、水から発生する磁場は強磁性体の試料から発生する磁場と逆方向となり、**Fig. 4** で得られた波形の位相が逆になったと考えられる。この結果より、本磁化率計は波形の位相により強磁性体・常磁性体と反磁性体の判別も可能である。

Fig. 4 では純水からの波形を確認できたが、高周波成分のノイズが見られ、試料からの信号波形も歪んでいるため、この状態では定量的な評価が必要な非破壊検査等への応用は難しい。そこで、磁気信号検出部の改善及び磁気信号取得時の信号処理方法を最適化し S/N 比の改善について検討を行った。

4. 計測システムの高感度化

4.1 検出コイル形状の最適化

3 章では検出コイルに円形コイルを使用した。検出コイルの出力はコイルに鎖交する磁束の時間微分に比例す

Fig. 5 Magnetic signal from pure water detected using the elliptical pick-up coil.

る。従って、コイルの形状、配置を最適化することにより検出コイルの出力が大きくなると考えられる。そこで、磁束の時間変化量を大きくするために、2つのコイル間距離であるベースライン長を短くした楕円形のコイルを用いて Fig. 4 と同条件の実験を行った¹³⁾。Table 1 に示したように、コイルを楕円形にすることでベースライン長は 3.5 mm 短くなった。

楕円形コイルを用いて純水の磁気信号を測定した結果、Fig. 5 に示したように信号強度の時間変化率が大きくなり、Fig. 4 と比較して信号強度が大きくなった。比較のためそれぞれの S/N 比を求めると円形コイルは 26 dB、楕円コイルは 29 dB であり、この結果からも楕円コイルの S/N 比が改善できていることがわかる。ここで、S/N 比の信号強度は波形の peak to peak 値、ノイズは環境磁場ノイズ部分の標準偏差とした。以上の結果より、コイル形状を最適化することで S/N 比の改善を実現することができた。

4.2 振動ノイズの除去

Fig. 4 や Fig. 5 に示した純水の波形では平均化を行ったが、試料の信号以外の部分に周波数の高いノイズが見られる。このノイズ成分は平均化を行った後でも存在しているため、周期的な高周波成分の信号である。この原因として試料回転時の機械的振動により検出コイルが振動し、磁束の変化を取得していることが考えられる。この影響を検討するため、試料回転時の磁場ノイズスペクトルを測定した。測定は試料固定用の円盤に試料を固定せず 200 rpm で回転させた状態で行った。また、回転機構を計測システムと分離し、機械的振動が伝達しない状態のノイズスペクトルも測定した。Fig. 6 に示したノイズスペクトルの比較より、円盤を回転させた場合に磁場ノイズが増加していることがわかる。特に 180 Hz 以上の周波数領域では顕著に増加していることが確認できる。一方、機械的振動が伝達しない場合はノイズスペクトルに大きな変化は見られなかった。この場合、円盤回転用の電磁モーターの位置は、Fig. 1 で示したシステムとほぼ同じ位置に設置しているが、モーター

Fig. 6 Frequency dependence of magnetic field noise with and without the effect of vibration caused by the sample rotating component.

Fig. 7 Magnetic signal from pure water measured under optimized conditions.

ターの駆動で生じる電磁ノイズによるノイズスペクトルの変化も見られなかった。従って、純水の測定波形に見られた高周波のノイズは試料回転時の機械的振動が大きな要因と考えられる。

前述した高周波ノイズを除去するため、ローパスフィルタを用いて試料から生じた信号成分のみを取得することを試みた。ローパスフィルタのカットオフ周波数を決定するため、標準試料を回転数 200 rpm で測定した場合の磁気信号を FFT 解析した結果、200 Hz 以下の周波数成分で構成されることがわかった¹³⁾。Fig. 6 より機械的振動によるノイズは 180 Hz 以上であるため、カットオフ周波数は 200 Hz に決定した。試料の回転数を 200 rpm、検出コイルには楕円コイルを使用し、デジタルローパスフィルタを用いて高周波成分をカットした場合、Fig. 5 で見られた高周波成分の信号は除去され、Fig. 7 のように純水からの信号のみが検出できていることが確認できる。また、この測定における S/N 比は 54 dB となり、開発したシステムの感度を大幅に向上することができた。

以上、検出コイル、回転時の振動ノイズの検討により開発したシステムで磁化率の値が小さい純水の高精度測定を

Fig. 8 Peak to peak value of the magnetic signal from the silica gel with different moisture content.

達成した。次節では、開発した磁化率計の応用例として磁気信号計測による水分量評価を検討したので紹介する。

5. 磁気信号計測による水分量評価への応用

開発した磁化率計を用いて水からの磁気信号を高感度に計測することができたが、この磁気信号は水の体積に比例して大きくなる。従って、水に起因する磁気信号の変化を高感度磁化率計で評価することができれば、物質の水分量を計測することが可能と考えられる。そこで、吸湿性のシリカゲルを用いて水分量が異なるシリカゲルの磁気信号を開発した磁化率計で測定し、強度を比較した。

初めに全てのシリカゲルを加熱し、シリカゲル内の水分を蒸発させた。その後、試料ケースに充填できる同じ質量のシリカゲルを複数準備し、それぞれを大気中に放置して水分を吸着させた。大気中に放置する時間を変え、水分量が異なる試料を3種類作製した。ここでシリカゲルに含まれる水分量は、乾燥させた状態から変化した質量を計測することで求めた。

各試料を測定し、得られた磁気信号の peak to peak 値と水分量の関係を **Fig. 8** に示す。水分量が増加した場合、磁気信号の peak to peak 値も増加していることがわかる。水分量が 0 g の場合も約 9 mV 程度の信号が観測されたが、これはシリカゲル自体によるものと考えられ、水分量 0 g 測定時の波形は純水の波形と同じ極性であった。従って、測定したシリカゲルの磁気信号は反磁性によるものであり、各試料の乾燥させた状態におけるシリカゲルの質量は、どの試料も同じにしているため、**Fig. 8** で増加している信号強度は純水の変化を捉えていると考えられる。

以上の結果より、水分量変化により生じる磁気モーメントの変化を開発した磁化率計で検出し、非破壊・非接触の水分量評価に応用できることが示された。ただし、今回使用した試料ケースは内寸の高さが 16 mm であるため、水分の不均一分布による誤差が考えられ、水分量と磁気信号の線形性が低下していると考えられる。今後、試料ケースの最適化や低水分量域での評価を検討することで高感度かつ汎用的な水分量評価システムの開発が期待できる。

Fig. 9 Schematic drawing of the system for the magnetic relaxation measurement.

Fig. 10 Schematic drawing of the magnet and pick-up coil position for the magnetic relaxation measurement.

6. 磁気信号の緩和過程計測

これまでに紹介した測定結果は、全て試料を磁化した際に発生する磁気信号を計測したものであるが、磁気特性の一つとして印加磁場を取り除いた後の磁気信号の変化、いわゆる磁気緩和過程も重要な特性である。磁気緩和も各物質や物質の結合状態に応じて固有の応答を示し、磁化率測定では得られない情報が得られることもある。

そこで我々は開発した磁化率計を改良し、磁気モーメントの緩和現象測定を試みた。本節では緩和現象の測定原理と純水の緩和過程における磁気信号の測定結果について紹介する¹⁴⁾。

6.1 開発した磁化率計の改良による磁気緩和過程計測システム

我々が開発した試料回転式磁化率計は、試料が磁極間を通過した際に試料を磁化するが、その後試料が再び磁極間を通過するまでに試料は磁化されていない。従って **Fig. 9** に示すように試料が回転する円周上に検出コイルを設置することで、試料を磁化した後に生じる磁気モーメントの緩和過程における信号を検出することが可能と考えられる。そこで、開発した磁化率計において検出コイルを円周上に設置する台を作製し、磁気緩和信号の測定を行った。測定試料にはこれまでと同じ純水を使用し、回転速度は 150 rpm、検出コイルは **Fig. 10** に示す永久磁石から 180°回転した位置に固定した。また位置センサを用いて、試料が検出コイル上を通過する位置と、磁極間を通過する位置を検出

Fig. 11 Magnetic signal from pure water and the sample case obtained during/after magnetization. The solid line shows the signal from pure water filled in the sample case and the dotted line shows that from the sample case only.

し、試料を磁化してから経過した時間を求めた。

6.2 純水の緩和過程における磁気信号

前述した条件で純水の緩和過程における磁気信号の測定結果を **Fig. 11** に示す。横軸の時間は、試料が永久磁石を通過する点を 0 s としており、磁化してから検出までの時間遅れを表している。**Fig. 11** の 0.2 s 付近に出力信号の変化が見られた。この時間は、試料が磁極を通過してから検出コイルに到達するまでの時間を試料の回転数から計算した値とほぼ一致しており、試料が検出コイルを通過した際に取得した信号であることが言える。また、純水を磁化した時点での信号である **Fig. 7** と比較して **Fig. 11** の信号強度はかなり小さくなっているが、信号の極性は **Fig. 7** で示した純水の信号と同じである。さらに、試料ケースが磁化されることによる影響も調べるため、空ケースについても測定を行い、その結果を **Fig. 11** に点線で示した。空ケースの場合も 0.2 s 付近に出力信号の変化が見られるが、純水の場合と比較して信号強度が非常に小さくなっている。以上の結果より、**Fig. 11** の実線で示した信号強度の変化は純水に起因すると結論付けることができる。

ここで、180°の位置における外部磁界の影響を調べるため、ホールセンサを用いて試料が回転する際に描く円周上の磁束密度を調べた。測定した磁束密度の方向は、**Fig. 1** の x , y , z 方向であり、試料を磁化する z 方向の磁束密度分布を **Fig. 12** に示している。永久磁石を設置している 0°の位置では磁石の設計通り磁束密度が 300 mT であるが、**Fig. 11** で計測を行った 180°の位置では、ほぼ 0 mT であることが **Fig. 12** よりわかる。また、 x , y 方向についても **Fig. 12** と同様の磁束密度分布を測定した結果、180°の位置における外部磁場は観測されなかった。一方、永久磁石付近における x , y 方向の磁束密度は 50 mT 程度であり、永久磁石を通過する際に x , y 方向にも磁場が印加されていることがわかった。これは、**Fig. 11** の波形が **Fig. 7** と若干異なっ

Fig. 12 Magnetic field distribution on the circle that the rotating-sample describes.

ている一因として考えられるが、今後更なる検討が必要である。

以上の結果より、**Fig. 11** で観測された信号変化は、0°の位置で磁化された磁気モーメントが緩和していく過程の磁気信号を検出していると考えられ、開発した磁化率計を用いて、磁気緩和過程における磁気信号測定が可能であることを示した。

7. まとめ

本稿では開発した HTS-SQUID による試料回転式小型磁化率計について、計測システムの詳細と純水の測定、水分量測定への応用と磁気モーメントの緩和測定について解説した。

約 10 mL の純水から生じる微小な磁気信号を検出することに成功し、システムの改善により S/N 比を 54 dB まで高めることができた。また、水分量が異なるシリカゲルを測定した結果、水分量に比例して検出した磁気信号強度が増加し、開発した磁化率計を用いて非破壊・非接触の水分量測定が実現できる可能性を示した。さらに、検出コイルの位置を変え、磁気モーメントの緩和過程における磁気信号を測定した結果、純水の磁気緩和信号を取得することに成功した。

今後は磁化率が明らかになっている基準の試料を用いて磁化率の定量評価を行い、水分量評価や磁気緩和信号測定の定量評価を目指すとともに、開発した磁化率計を用いて様々な物質の磁気特性を評価し、新たな物質評価法や非破壊検査法の検討を行う予定である。

本研究は JST 産学イノベーション加速事業により実施した。また、本研究で使用した HTS-SQUID は国際超電導産業技術研究センター (ISTEC SRL) で開発されたものを提供いただいた。ここに感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) K. Enpuku, Y. Tamai, T. Mitake, T. Yoshida and M. Matsuo: "Liquid-phase immunoassays using brownian relaxation of magnetic markers", *IEEE Trans. Magn.* **47** (2011) 2867-2870
- 2) J. Eveness, J. Kiely, P. Hawkins, P. Wraith and R. Luxton: "Evaluation of paramagnetic particles for use in a resonant coil magnetometer based magneto-immunoassay", *Sensors and Actuators B* **139** (2009) 538-542
- 3) S. Tanaka, Y. Kitamura, Y. Hatsukade, T. Ohtani and S. Suzuki: "Metallic contaminant detection system using multi-channel high T_c SQUIDS", *J. Magn. Magn. Mater.* **324** (2012) 3487-3490
- 4) J. Kawano, T. Hato, S. Adachi, Y. Oshikubo, A. Tsukamoto and K. Tanabe: "Non-destructive evaluation of deep-lying defects in multilayer conductors using HTS-SQUID gradiometer", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **21** (2011) 428-431
- 5) K. Tsukada, T. Kiwa, H. Tahara, E. Miyake, H. Yamada, A. Tsukamoto and A. Kandori: "Highly sensitive measurement of moisture content using HTS-SQUID", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **19** (2009) 878-881
- 6) T. Kiwa, Y. Fukudome, S. Miyazaki, M.M. Saari, K. Sakai, A. Tsukamoto, S. Adachi, K. Tanabe, A. Kandori and K. Tsukada: "Magnetic detection of currents in an electrolytic cell using high- T_c SQUID", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 1600804
- 7) S. Foner: "Vibrating sample magnetometer", *Rev. Sci. Instrum.* **27** (1956) 548
- 8) M.M. Saari, K. Sakai, T. Kiwa and K. Tsukada: "Optimization of the detection technique for a vibrating-sample magnetometer using high- T_c SQUID", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 1600204
- 9) P.J. Flanders: "Utilization of a rotating sample magnetometer", *Rev. Sci. Instrum.* **41** (1970) 697-710
- 10) A. Tsukamoto, K. Saitoh, D. Suzuki, N. Sugita, Y. Seki, A. Kandori, K. Tsukada, Y. Sugiura, S. Hamaoka, H. Kuma, N. Hamasaki and K. Enpuku: "Development of multisample biological immunoassay system using HTS SQUID and magnetic nanoparticles", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** (2005) 656-659
- 11) K. Sakai, M.M. Saari, T. Kiwa, A. Tsukamoto, S. Adachi, K. Tanabe, A. Kandori and K. Tsukada: "Development of a compact DC magnetometer using HTS-SQUID and a rotating sample", *Supercond. Sci. Technol.* **25** (2012) 045005
- 12) A. Tsukamoto, S. Adachi, Y. Oshikubo, K. Tanabe and K. Enpuku: "Development of a HTS SQUID module for use with an external pickup coil", *Supercond. Sci. Technol.* **26** (2013) 015013
- 13) D. Hamasaki, N. Okamoto, M.M. Saari, K. Sakai, T. Kiwa and K. Tsukada: "Improvement of sensitivity for a compact magnetometer

using HTS-SQUID with rotating sample", *IEEJ Trans. Fund. Mater.* **23** (2014) 347-351 (in Japanese)

濱崎大地, 岡本直大, Mohd Mawardi Saari, 堺 健司, 紀和利彦, 塚田啓二: 「HTS-SQUID を用いたサンプル回転方式小型磁化率計の高感度化」, *電気学会論文誌 A* **23** (2014) 347-351

- 14) K. Sakai, M.M. Saari, T. Kiwa and K. Tsukada: "Compact rotating-sample magnetometer for relaxation phenomenon measurement using HTS-SQUID", *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **23** (2013) 1601904

堺 健 司 2010 年 3 月同志社大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。2010 年 4 月から 2010 年 8 月まで日本学術振興会特別研究員として, メタマテリアルを用いた電波吸収体の開発に従事。2010 年 9 月岡山大学大学院自然科学研究科助教。現在に至る。現在, 磁気センサを用いた計測システムの構築および非破壊検査システムの開発, ガスセンサ, イオンセンサのデバイス開発に関する研究に従事。低温工学・超電導学会, 電気学会, 応用物理学会, 電子情報通信学会, 日本非破壊検査協会会員。

Mohd Mawardi Saari 2013 年 3 月岡山大学大学院自然科学研究科博士前期課程修了。2013 年 4 月から同大学大学院自然科学研究科博士後期課程在籍。応用物理学会会員。

紀 和 利 彦 2003 年 3 月大阪大学大学院工学研究科博士後期課程修了。博士 (工学)。2002 年 4 月から 2004 年 3 月まで日本学術振興会特別研究員として, 超伝導・テラヘルツハイブリッドデバイスの開発, レーザー励起テラヘルツ放射顕微鏡の開発に従事。2004 年 4 月より岡山大学工学部講師を経て, 2008 年 12 月より同大学大学院自然科学研究科准教授。テラヘルツ波ケミカル顕微鏡およびテラヘルツ分光システムの開発, 超伝導量子干渉素子 (SQUID) システムの開発に従事。応用物理学会, IEEE, 電子情報通信学会等会員。応用物理学会テラヘルツ電磁波技術研究会委員長。

塚 田 啓 二 1982 年 3 月筑波大学理工学研究科修士課程修了。博士 (工学, 医学)。1982 年 4 月から 2003 年 3 月日立製作所中央研究所。その間 1991 年~1996 年超伝導センサ研究所。2003 年 4 月から岡山大学工学部教授。超伝導量子干渉素子 (SQUID), 集積化ガスセンサ, 薄膜イオンセンサなどセンサデバイスおよび計測システムの研究に従事。応用物理学会, IEEE, 日本磁気学会, 日本非破壊検査協会等会員。