

磁気抵抗センサーを用いた磁場マッピング測定システムの開発

DEVELOPMENT OF MAGNETIC FIELD MAPPING MEASUREMENT SYSTEM USING MAGNETO-RESISTIVE (MR) SENSOR

植木 竜一^{#,A)}, 大澤 康伸^{A)}, 川本 崇^{A)}, 土屋 清澄^{A)}, 増澤 美佳^{A)}

Ryuichi Ueki^{#,A)}, Yasunobu Ohsawa^{A)}, Takaashi Kawamoto^{A)}, Kiyosumi Tsuchiya^{A)}, Mika Masuzawa^{A)}

^{A)} High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

A magnetometer called “flux gate sensor” has been used to measure the magnetic field distribution but it is a large sensor and it is very costly. A sensor utilizes the magneto-resistance effects, such as AMR (Anisotropic-Magneto-Resistive), is smaller and less expensive than a flux gate sensor. Therefore it is effective for mapping measurement of magnetic field. We have examined characteristics of magneto-resistance sensors at the room temperature and cryonic temperature. The results are reported in this paper.

1. はじめに

KEK では、超伝導空洞の high-Q 運転の実現に向けた研究が進められている[1]。超伝導空洞周辺の残留磁場は、低温時の空洞の表面抵抗に影響を与えることが分かっており、空洞周辺の残留抵抗を減らすために高いシールド率を持った磁気シールドの開発が進められている[2]。シールド内の磁場は数 mG から数百 mG ほどであり、詳細な磁場分布を測定することが重要である。

また、空洞の冷却過程でニオブが超伝導に相転移する際、空洞内の磁束をはじき出すことで空洞の Q 値が飛躍的に向上することが報告されている[3, 4, 5]。このときの磁場の変化量は数 mG から十数 mG ほどであり、磁束のはじき出しを確認するためにはこの変化をモニターすることが必要不可欠である。このように、空洞の性能向上に向けた R&D において磁場分布測定の重要が高まっている。

磁場測定には、従来フラックスゲートと呼ばれる磁場測定器を使用してきた。フラックスゲートは高精度の測定に適している一方、センサー部の大きさは数センチほどであるため、ミリ単位の空間磁場分布測定には適さない。また、値段も高いため、測定器を複数個用意し、同時に複数カ所測定することは現実的ではない。そこで、市販の磁気抵抗効果(Magneto-Resistive : MR)センサーを用いた磁場マッピングシステムの開発を行っている。MR センサーは安価で数ミリほどの大きさであるため、複数の MR センサーを高密度に配置した測定装置の製作が可能で、空間分解能の高い磁場分布測定が期待できる。しかし、個々のセンサーの磁場感度特性のデータシートはないため、センサー1 個 1 個に対して、外部磁場に対する感度特性の測定が必要となる。さらに、マッピングを行うためには使用するセンサーの数も多くなるため、大量のセンサーの感度特性測定を短期間で行う必要がある。そこで 3 軸ヘルムホルツコイルシステムを使って複数個同時に感度測定を行うことのできるキャリブレーションシステムを構築し、MR センサーの特性評価を行った。センサーは周囲環境(常温、低温環境下など)によって感度

特性が変化するため、常温と液体窒素温度における MR センサーの磁場感度特性の評価も行ったので結果を報告する。

2. AMR センサー

異方性磁気抵抗(Anisotropic Magneto-Resistance : AMR)センサーは、一方向の外部磁場の変化に応じて出力電圧が変化する磁場センサーである。酸化膜シリコンまたはガラス基板上に鉄ニッケル合金のような強磁性金属(多くの場合はパーマロイが使用される)の薄膜が成形される。この薄膜は長手方向に容易軸が成形されている。容易軸方向に磁化した状態で、磁化の向きと垂直な向きに外部磁場が印加されると、薄膜磁束がある方向に統一され、印加される磁場の大きさに応じて薄膜の電気抵抗が変化する。パーマロイ薄膜の場合、その変化率は 1.5~3 % である。薄膜に適当な電気回路をつなぎ、この抵抗変化を出力電圧として取得することで磁場の大きさを検出することができる。

一般的に磁場に対する薄膜の抵抗をプロットすると Fig. 1(a) の実線のような感度特性を示す。低磁場領域では磁場変化に対する抵抗の変化率は小さく、センサーとしての感度は悪い。さらに、特性曲線は左右対称になっているため磁極の判別ができない。これを解決するため Fig. 1(b) のようなバーバーポール型電極というのが使われる。強磁性金属薄膜の上に導電率の高い金属を 45 度の角度で蒸着する。電流は、最短距離で強磁性金属薄膜中を移動するため、外部磁場がないときでも磁化の方向と電流の方向が一定の角度を持つことになる。これにより、薄膜の抵抗変化は Fig. 1(a) の破線のような曲線となる。低磁場領域において抵抗の変化量が大きくなることで磁場の変化に対して感度の高いセンサーとなり、極性の判別も可能となる。

我々は、SENSITEC 社の AFF755B を磁場センサーとして使用し、マッピング装置の開発を行っている。センサー内部の回路図を Fig. 1(c) に示す。センサーの大きさは、5 mm × 6 mm ほどである。4 つのバーバーポール

[#] ryuichi.ueki@kek.jp

型電極を持った磁気抵抗素子でブリッジ回路が構成されており、ブリッジ回路の端子 4 と端子 6 の間に数 V の駆動電圧を印加する。素子 A、D と素子 B、C はパーバールポールの角度が 45 度、-45 度になっており、外部磁場に対する抵抗の変化が異なる。この違いからブリッジ回路の midpoint での出力電圧差(端子 2 と端子 5 間電圧)が外部磁場の大きさに対して変化する。また、センサー内にはパーマロイ薄膜の磁化方向をコントロールするためのフリップコイルと磁場に対する出力電圧のキャリブレーションを行うためのテストコイルが内蔵されている。

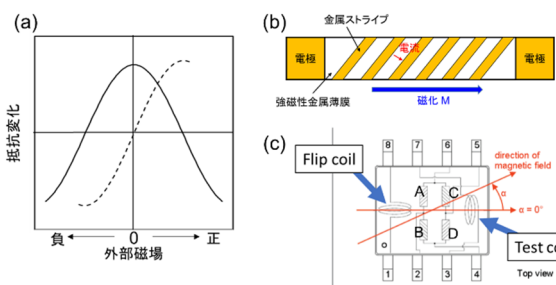


Figure 1: (a) Change in output voltage by magnetoresistive effect. (b) Schematic of bar-bar pole electrode. (c) Circuit diagram of AMR sensor.

3. ヘルムホルツコイルシステム

センサーの特性を調べるため、Fig. 2(a) のような X、Y、Z 方向それぞれ独立に磁場を発生することができるヘルムホルツコイルシステムを用意した。このシステムは 3 つのヘルムホルツコイルから構成されている。各コイルはそれぞれ個別の電源につながっており、コイルごとに独自で制御することができる。各コイルの発生磁場の範囲はおよそ -1 G から +1 G である。

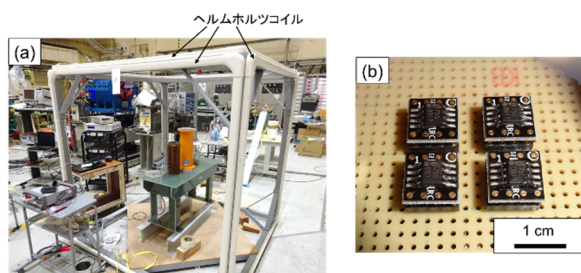


Figure 2 (a) Helmholtz coil system and (b) sensors mounted on substrate.

AMR センサーはユニバーサル基板上に取り付けられた IC ソケットにセットされ、この基板はアルミフランジに取り付けられている。このフランジをアルミの円筒ガイドに取り付けることで、センサーは必ずヘルムホルツコイルシステム内の同じ位置にセットされるようになっている。Figure 2(b) のようにユニバーサル基板には、1 度に 4 つのセンサーをセットできるようになっており、センサーは Y 方向に向くようにセットされている。測定時前にセンサー周辺の磁場を限りなく 0 G にするため、3 軸ガウスメーター (Lakeshore : Model 480) で 4 つのセンサーの中央の磁場を測定しながら、各方向のヘルムホルツコイルを使って、X、Y、Z 方向の磁場が 0 G になるように調整した。

4. AMR センサーの初期化

まず初めに、フリップコイルに電流を流しセンサーの初期化を行う必要がある。フリップコイルは、パーマロイ薄膜の磁化方向を決定するためのコイルで、製作された直後の薄膜はまだ磁化されておらず、Fig. 3(a) の緑色のプロットが示すように外部磁場に対して感度はない。この状態で、フリップコイルに電流を流すと薄膜が磁化し、Fig. 3(a) の青色のプロットのように外部磁場に対して感度特性を示す。流す電流の方向を変えることで、Fig. 3(b) のように出力電圧の傾きの正負を制御することができる。ここで注意すべき点はパーマロイ薄膜のヒステリシス曲線を考慮してフリップコイルに流す電流の大きさを決定しなければならないことである。Figure 3(c) は、flipcoil に流す電流の大きさを +200 mA → -200 mA → +200 mA (20 mA ステップ) 変化させたときのセンサーの出力電圧をプロットしたものである。パーマロイ薄膜が飽和状態になるためには ±100 mA 以上の電流をフリップコイルに流す必要がある。我々は、フリップコイルに 150 mA の電流を流すことで、センサーの初期化を行っている。さらに、何らかの原因でセンサーに大きな外部磁場がかかり、薄膜の磁化が崩れてしまうことがある。このような場合にも、再度フリップコイルを使った初期化が必要となる。システムとして使用する際には、念のため測定前に必ず初期化を行うことが必要となる。

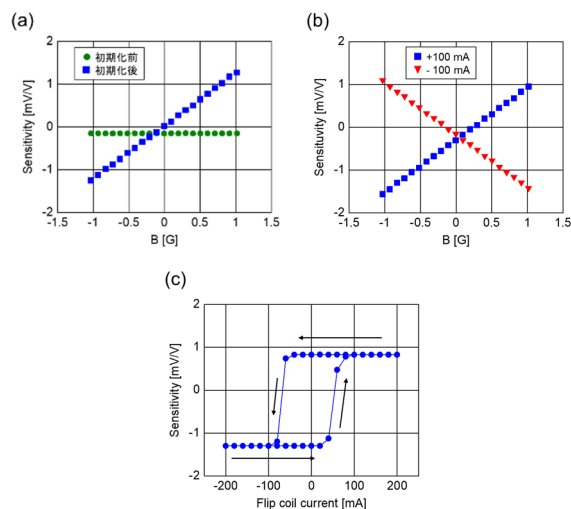


Figure 3: Initialization of AMR sensor with flip coil.

5. AMR の特性評価

外部磁場に対する出力電圧を測定し、AMR センサーの感度特性を調べた。ヘルムホルツコイルを使い Y 方向の外部磁場を ±1 G の範囲で 0.1 G ずつ変化させ、4 つのセンサーの出力電圧を PLC(F3HA12-1R:横河電機)で測定した。常温における感度特性を Fig. 4 の青色のプロットで示す。横軸は外部磁場、縦軸は駆動電圧 1 V 当たりの出力電圧を示している。測定データを 1 次直線でフィットした結果、1.22 mV/V/Gauss ほどの感度を示した。今回使用した AMR センサーは常温における使用を想定して作られている。しかし、磁気シールド内の磁場分布測定や冷却時の超伝導空洞周辺の磁場変化の測定では液体窒素温度または液体ヘリウム温度での測定が

必要になる。そのため、低温環境下における感度測定も行っている。今回は、センサーを液体窒素に浸した状態で同じように感度特性の測定を行った。結果を Fig. 4 の赤色のプロットに示す。一次関数でフィットした結果、 3.28 mV/V/Gauss となり常温時に比べ 2.5 倍以上の感度特性を示すことがわかった。

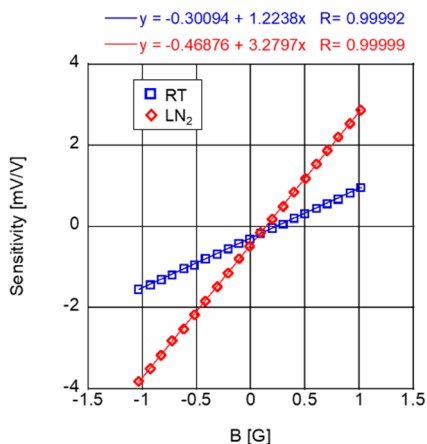


Figure 4: Sensitivity characteristics of AMR sensor in RT and LN2.

次に、センサーの安定度を調べるため、30分おきに合計 100 回以上の感度特性の測定を行い、その平均値に対するばらつきを評価した。Figure 5 (a) に結果を示す。測定ごとのばらつきは小さく $\pm 0.5\%$ 以内であった。また、先に述べたようにシステムとして稼働した際には測定前には必ず初期化が必要になる。しかし、初期化を行うごとに感度特性が変化しては測定システムとしての信頼度

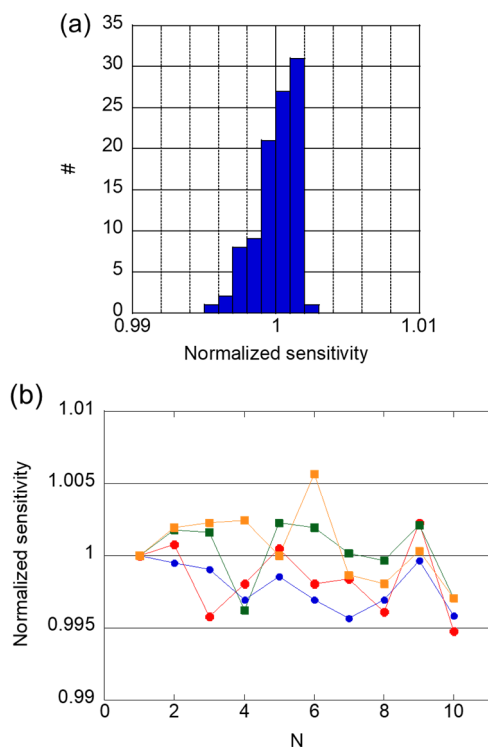


Figure 5: (a) Variation of sensitivity characteristic with repeated measurement of sensor. (b) Influence on sensitivity characteristic by initialization.

が下がってしまう。そこで、4 つのセンサーに対して初期化と感度測定をセットにした測定を 10 回繰り返し行った。Figure 5 (b) に測定結果を示す。縦軸は 1 回目の測定値で規格化した磁場感度である。この結果から、特に初期化の繰り返しによる劣化は見られず、感度特性のばらつきも $\pm 0.5\%$ 程度であることが分かった。

マッピング測定には、その範囲にもよるが大量のセンサーを用意する必要となる。超伝導空洞周辺の磁場測定には 100 個を超えるセンサーを取り付ける予定である。そこでセンサーの性能にどのくらいのばらつきがあるかを調べるため、Fig. 6 に 24 個のセンサーの平均値で規格化した感度特性をプロットした。この結果、センサー個々のばらつきは、大きいもので 2% 程度であった。このばらつきを出来るだけ小さくするためにも各センサーの感度測定を行い、センサーごとにキャリブレーションを行う必要がある。

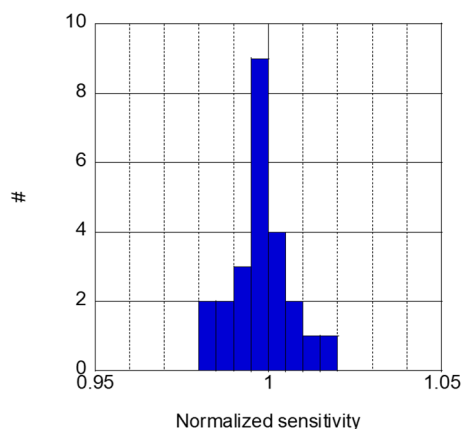


Figure 6: Variation of sensitivity characteristic of sensors.

6. テストコイルのキャリブレーション

今回使用した AMR センサーは、センサー自身の中に磁場を発生させることができるテストコイルが内蔵されており、センサーを測定対象物にセットアップした後に、磁場に対して正常に電圧が出力されているかを確認することができる。しかし、テストコイルの特性もセンサーごとに

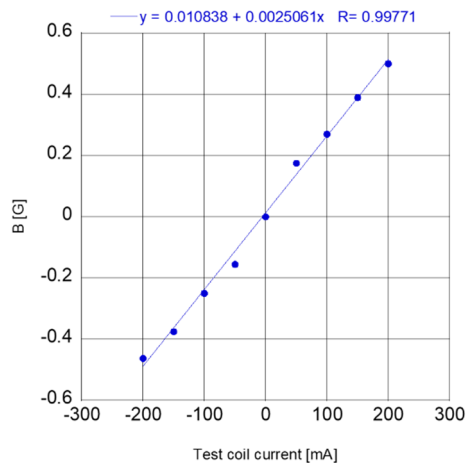


Figure 7: Generated magnetic field with applied current of test coil.

ばらつきがあるため、印加した電流と発生する磁場の相関を個別に確かめる必要がある。Figure 7 にテストコイルに流した電流とそのとき発生した磁場の関係をプロットした。テストコイルにより発生する磁場は、印加電流に対し非線形であった。

7. まとめ

AMR センサーを用いた磁場分布測定システムの開発を行っている。今回は、使用するセンサーの磁場に対する感度特性評価を行った。常温における感度が、1.22 mV/V/Gauss であったのに対し、液体窒素温度では 3.28 mV/V/Gauss と 2.5 倍以上の感度特性を示した。個々のセンサーの特性のばらつきは±2 %以内ではあるが、センサーごとに感度特性の測定を行い、センサー別のキャリブレーションデータを取得する必要がある。これをデータベース化し、実際の測定で使用する際はデータに基づいて出力電圧を磁場に変換する必要がある。センサー自体は長時間の繰り返し測定に対しても 0.5 %ほどばらつきで安定に動作することが分かった。しかし、テストコイルの発生する磁場は電流に対し非線形であるため、キャリブレーションを行う際は注意が必要である。今後は、低温における動作の安定性や、熱サイクルに対するセンサーの劣化の有無を調べる予定である。さらに、ヘリウム温度の測定に向けて小型クライオスタの準備を進めており、準備が整い次第、同様の測定を行う予定である。

参考文献

- [1] K. Umemori *et al.*, in Proc. IPAC2016, p. 2154.
- [2] M. Masuzawa *et al.*, “Magnetic shielding for superconducting RF cavities”, *Supercond. Sci. Technol.* 30 (2017) 034009.
- [3] A. Romanenko *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* 105, 234103 (2014).
- [4] S. Posen *et al.*, *Journal of Applied Physics* 119 (2016) 213903.
- [5] B. Schmitz *et al.*, “Magnetometric mapping of superconducting RF cavities”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 89, p. 054706, 2018.