

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月20日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760376

研究課題名（和文） 三次元磁場測定装置における素子角度の高精度検出システムの開発

研究課題名（英文） Development of high precision correction system of sensor angles in three dimensional hall probe.

研究代表者

佐々木 憲一 (SASAKI KENICHI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・准教授

研究者番号：70322831

研究成果の概要（和文）：3軸ホールプローブにおける、素子の取付け角度に起因する磁場測定誤差を較正するため、各素子の取付け角度を自動測定するシステムの開発を行った。その測定システムはx・y・z軸に任意の磁場を発生する事が出来る3軸ヘルムホルツコイルと5軸移動ステージから構成される。磁場を乱さないため、コイル中心付近に設置される部品については、全て非磁性材で構成されている。5軸移動ステージにピックアップコイルを取り付け、3軸ヘルムホルツコイルの角度測定を行った。

研究成果の概要（英文）：Angles hall sensors in a three dimensional hall probe are not directed along the x, y and z axes correctly, and it causes an error of field measurement. Automated measurement system for the sensor angles of hall probe is developed. The system consists of 3-axis Helmholtz coils and 5 axis positioning stage. The parts of positioning stage inside the coils are made of non-magnetic materials in order to avoid field distortion. A pickup coil is attached to the positioning system, and the field direction of the Helmholtz coil is measured against the mechanical axis of the stage.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測機器 ホール素子 磁場測定 高精度化

1. 研究開始当初の背景

磁気または磁場は、現代社会において様々な形で応用されており、産業・研究分野は言うに及ばず、医学・バイオテクノロジーにも広く応用されている。また、時には磁場が問題となることもあり、他の電子装置への悪影響や電子装置が発生する磁場による健康被害などが懸念される場合もある。それら磁場起因による問題の原因究明等も含めて装置の性能を評価するという点においては、磁場分布を測定するという事がまず第一に必要なとなる。磁場を測定する方法はいくつかあるが、簡便に磁場分布を測定する手段として、

現在ではホール素子が広く用いられている。これは、ホール素子には以下のような利点があり、様々なメーカーによって測定システムが製作され、一般的に販売されているためである。

- ・ 小型
- ・ 直流磁界の測定が可能
- ・ ホール素子の出力は磁場の強さとほぼ比例関係にあるため、直感的に分かり易い
- ・ 磁場の向きに対して敏感

特に4番目の利点は、ベクトル量である磁場の空間分布測定を可能とし、ホール素子の普及を促進した大きな要因の一つとなってい

る。

ホール素子を用いて磁場ベクトル分布を測定する際には、一つのホール素子の角度を 90° ずつ変えて $x \cdot y \cdot z$ の各成分を測定する方法もあるが、より一般には、一つのプローブの中に各方向 1 つずつのホール素子を配置した 3 軸ホールプローブが使用される。ホールプローブで測定する際の誤差要因としては、入力磁場に対する出力電圧の非線形性および素子出力の温度依存性がよく知られているが、その他の誤差要因で最近見直され始めているものとして、プローブの幾何学的形状から決定される軸に対する素子の取付け位置精度がある。これは市販の 3 軸測定用のホールプローブにほぼ特有の問題である。一般的に、素子間の相対的な水平距離は $\pm 0.1 \text{ mm}$ 以下の精度で製作されているのに対し、図 1 に示すような素子の座標軸からの傾きという点では、角度誤差として $\pm 2^\circ$ 以下と規定されているだけである。これは、磁場均一度が非常に高い MRI 用磁石や、狭い空間に磁極が交互に存在するリニアモータ等の磁場ベクトル分布測定を行う際には無視できない測定誤差の要因となる。もし磁場方向が素子の軸と等しければ、磁場の測定誤差はせいぜい $\pm 0.0006 = \cos(0^\circ) - \cos(0 \pm 2^\circ)$ 程度であるが、磁場方向が素子の軸からずれていくにつれてその誤差は大きくなり、 90° ずれた場合の測定誤差は $\mp 0.034 = \cos(90^\circ) - \cos(90 \pm 2^\circ)$ にもなる。これは、ホール素子の一般的な測定限界精度 $\cdot 1 \times 10^{-4}$ よりも 2 桁大きい。工作精度の限界などもあり、角度取付け誤差をゼロにする事は不可能であるが、少なくとも取付け角度を正確に測定しておけば、磁場を測定した後にデータを補正する事ができる。ところが、プローブに一度納められた素子は通常見る事が出来ず、取付け角度を直接測定する事が出来ないため、間接的に素子取付け角度を測定する装置が必要となる。

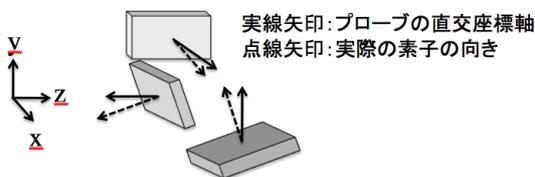


図 1 ホール素子の直角軸からの傾き

2. 研究の目的

以上の背景を考慮した本研究の目的として、3 軸ホールプローブの素子取付け角度自動測定装置の開発を目指す。市販されている 3 軸ホールプローブの素子取付け角度を高精度で自動測定する 3 軸磁場発生装置を開発する。この装置の特徴はホールプローブは動かさず、発生する磁場のベクトルを高精度

に制御し、ホール素子の出力と磁場の向きの関係を 0.1° 以下の精度で測定する事にある。

3. 研究の方法

目的とする装置は、磁場発生コイル、高精度プローブ移動ステージ、素子角度自動測定プログラムの 3 つから構成される。それぞれについて、以下の様に開発を進めた。

(1) 高精度 3 軸磁場発生コイルの設計と製作

装置中心付近に、あらゆる方向の均一磁場を任意に発生させる事のできるコイルの設計と製作を行った。コイル構成としては、1 軸の磁場を発生させることができるヘルムホルツコイルを 3 つ製作し、それぞれ x, y, z 成分を発生出来る様に組み合わせ、各軸の磁場強度を調整する事で様々な向きの磁場ベクトルを発生させる。以下の仕様を木ヒョトする。

- ・ホール素子が十分な感度を持つように中心最大磁界 10 mT 以上
- ・磁場中心付近の直径 10 mm の球状空間 (10 mm DSV) における空間磁場均一度が 1×10^{-4}

(2) 磁場角度測定用フラクスメータおよび 5 軸移動機構の開発

上記で製作した 3 次元磁場発生コイルの磁場発生角度を 0.1° 以下の精度で測定する事を目標に、磁場を測定するフラクスメータ (ピックアップコイル) とそれを高精度に移動できるステージの開発を行った。フラクスメータは、均一磁場領域 (10 mm DSV) より小さい必要がある。フラクスメータは、ホール素子による磁場測定精度よりも高い限界精度を持ち、加えて磁場の向きを測定する事が出来るため選択した。

製作した 3 次元磁場発生コイルの磁場中心とピックアップコイルの位置を一致させ、磁場角度を測定するためには $x \cdot y \cdot z \cdot \theta \cdot \phi$ の 5 軸に関する移動を制御する必要がある、そのための高精度移動ステージを製作した。ホール素子角度測定の目標精度 $\pm 0.1^\circ$ 以下を考慮して、角度方向 ($\theta \cdot \phi$) を $\pm 0.01^\circ$ 、水平方向 ($x \cdot y \cdot z$) を 0.01 mm の分解能で移動できる事を目標とした。

(3) 素子角度自動測定プログラムの開発

角度校正をしたヘルムホルツコイルを用いて、対象となるホールプローブに取り付けられているセンサー角度を自動で測定するプログラムを開発する。市販されているホールプローブは、 100 mm 以上の長さである事が多いため、ヘルムホルツコイルの寸法の制約から、5 軸ステージでホールプローブを回転させる事は出来ないと思われる。そこで、プローブを回転させず、磁場ベクトルの向きを変更できるようにする。 $x \cdot y \cdot z$ の 3 軸コイルの各電流値を調整する事で、任意の向きの

磁場を発生、スキャンする事でセンサー角度を測定出来るようなプログラムの開発を行う。

4. 研究成果

(1) 高精度 3 軸磁場発生コイルの設計と製作
設計したコイルの基本仕様を表 1 に、これを元に製作したコイルの外観を図 2 に示す。

表 1 3 軸ヘルムホルツコイル仕様

	x coil	y coil	z coil
内径 (mm)	380	270	160
コイル長さ (mm)	40	40	40
コイル厚さ (mm)	20	20	20
コイル中心間距離 (mm)	230	175	120
電流密度 (A/m ²)	56250	50000	37500

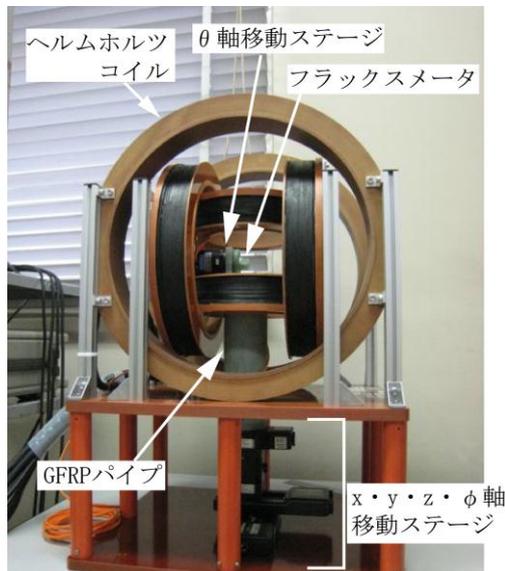


図 2 3 軸ヘルムホルツコイルおよび 5 軸移動ステージ

製作した 3 コイルの磁場分布について、ホールセンサーを用いて予備的測定を行った。y 軸上の各コイル磁場分布を図 3 a に、z 軸上の各コイル磁場分布を図 3 b に示す。x・y・z 各コイルには、45.22 A、36.48 A、24.16 A を通電している。y コイルおよび z コイルは、x コイルより小さく、コイル製作誤差の影響が出易いため、設計値の 10 mT より若干小さい磁場となってしまうが、この程度であれば電流値で調整可能であるため問題ない。磁場分布について、±5 mm の範囲では、 2×10^{-3} 程度の変化が見られ、設計値の 1×10^{-4} より 1 桁以上大きいズレが見られる。大きな要因としてはコイル製作誤差があるが、その他、測定を行った領域の中心が磁場中心と一致していない事も考えられる。図 3 (b) 中の $B_z(y+5\text{mm})$ と B_z を比較すると、前者は y 方向に 5 mm 中心からずれているにもかかわらず

ず、磁場分布の均一性は高い。実際の磁場中心位置の測定および、 1×10^{-4} の均一度を満足する領域の大きさについては、次に示すフラックスメータおよび 5 軸移動ステージを用いて詳細な測定を行う予定である。

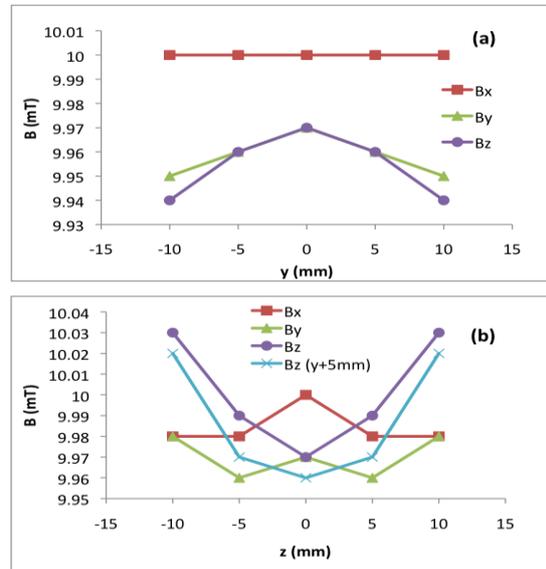


図 3 ヘルムホルツコイル磁場分布

(2) 磁場角度測定用フラックスメータおよび 5 軸移動機構の開発

フラックスメータ (ピックアップコイル) は GFRP のボビンに銅線を巻いて製作する。今回は、測定領域の大きさおよび磁場測定感度を考慮し、直径 3 mm、長さ 3 mm の溝に銅線を巻き付けて製作した。使用した銅線について、製作の簡便さを考慮し、まずは $\phi 0.1$ mm の銅線を 60 ターン巻いたものを製作した。

5 軸移動機構について、磁場を乱さないよう、全て非磁性材料で製作するのが望ましいが、強度や移動精度の面で設計が難しく、またその製作にはコストもかかる。そのため、x・y・z・ ϕ の 4 軸の移動機構については、ヘルムホルツコイル外部へ設置することで、金属部品を使用した市販品での構成を可能とし、磁場中の設置が不可避である θ ステージだけは、非磁性材料だけで構成されるステージを製作した。まず x・y・z・ ϕ の 4 軸については、市販品であり信頼性のある、シグマ光機製の精密型自動ステージを組み合わせることで製作した。これらの位置分解能は、x・y・z 軸方向に 1 μ m、 ϕ 方向に 0.0025° である。位置制御については、専用のステージコントローラを使用し、GPIB インタフェースを介してパソコンから制御を行う。 θ ステージについては、磁場中でも動作可能であり磁性体を全く使用しない超音波モータと、同じく磁性体を全く使用しない光エンコーダを組み合わせることで設計・製作した。

(3)ヘルムホルツコイルの磁場方向測定

上記(1)および(2)で製作したと装置を組み合わせ、まずはヘルムホルツコイルが発生する磁場の向きを測定した。図2にはヘルムホルツコイルの他、5軸ステージも示されている。θステージとx・y・z・φの4軸ステージはGFRPのパイプで接続されており、これにより4軸移動機構の磁場への影響を極力小さくしている。図4に制御および測定系の概略図を示す。シグマ光機製精密ステージについては、専用コントローラへGPIBを介してコマンドを送ることで位置制御を行う。コイル電流については、ファンクションジェネレータで発生した正弦波をバイポーラアンプで増幅した電流を入力する。ファンクションジェネレータもGPIBを用いて周波数および振幅を制御する。θステージについては、専用の制御機構がないため、エンコーダカウンタとパルスモータコントローラを組み合わせることで制御を行っている。

フラックスメータの出力測定については、想定している出力電圧が数百μV以下と小さいため、ロックインアンプを用いて測定を行っている。ファンクションジェネレータの出力波形をロックインアンプの参照信号とし、その参照信号から90°位相が遅れている正弦波の電圧をピックアップコイルの出力電圧として測定した。

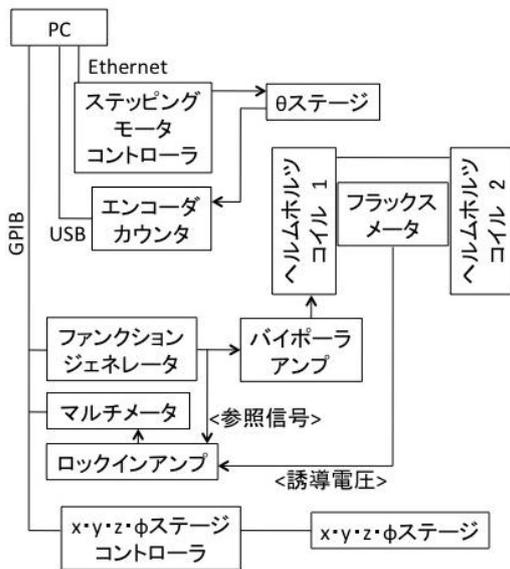


図4 制御系および信号フロー概略図

図5に以下の条件で測定したときの信号例を示す。

- xコイルに周波数30Hz、ピーク電流値33.3Aの正弦波を入力
- ヘルムホルツコイルの構造中心へフラックスメータを配置
- θステージを回転させて出力が最大となる位置で固定

- φステージを機械的原点（リミットスイッチ）まで戻し、角度を0°にリセット
- φステージを回転させてフラックスメータの出力を測定

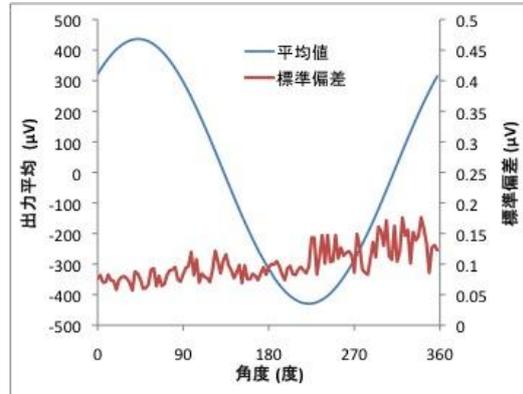


図5 フラックスメータ 角度 vs 出力 例

図中には、各角度において100回電圧を測定したときの平均値および標準偏差をプロットしている。図の様に、綺麗な正弦波状の出力が得られており、測定のばらつきを表す標準偏差も十分小さいと思われる。この波形をフーリエ解析し、周波数1における振幅および位相をプロットしたものを図6に示す。

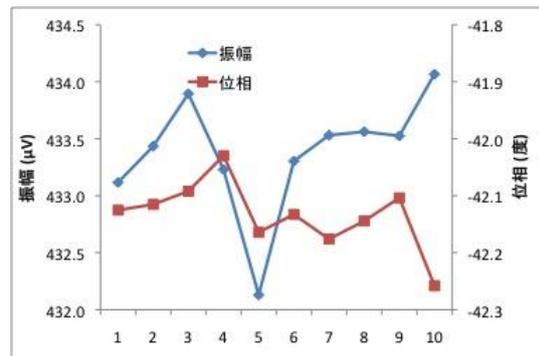


図6 振幅および位相の10回測定結果

この図では10回分の測定データをプロットしている。振幅について、10回測定の平均値は433.38 μVであった。予備試験の結果から予想される出力振幅、約472.21 μVに対し、若干小さい値となった。考えられる要因としては、

- ピックアップコイルに巻き付けた銅線が整然と並んでおらず、計算通りのインダクタンスになっていない
 - 測定信号が小さいため、ノイズの影響が大きい
- 等がある。位相の値について、ヘルムホルツコイル磁場方向を表す値であり、10回測定の平均値は-42.134°、標準偏差は0.0597°となり、目標精度0.01°より測定のばらつきが大きくなってしまった。要因としては
- ノイズの影響

・測定中の温度変化等による出力磁場の変化等が考えられる。2番目の温度変化等に付いて、現状の測定では ϕ 角度方向に128分割しており、測定時間は約30分かかっている。測定中の環境変化による誤差を小さくするため、測定点を減らす等して測定時間を短くする事が必要であると考えられる。

(4)まとめ

3軸ヘルムホルツコイルおよび5軸移動ステージの設計・製作を行った。

ヘルムホルツコイルについて、磁場強度は目標の10 mTを達成できたが、磁場分布は予定していた10 mm DSVの領域で、 10^{-4} 以下の均一度を達成できなかった。今後、どの程度の領域内であれば 10^{-4} を達成できるかを測定する。

5軸移動ステージについては、当初の目標分解能を達成できている。今後は、自動測定最適化等を行い、フラックスメータを用いた磁場測定における測定時間の簡略化を行っていく。

フラックスメータ（ピックアップコイル）について、 $\phi 3$ mm×長さ3 mmのコイルを製作し、このサイズで磁場測定が可能である事が確認できた。今後は、 $\phi 20$ μ m程度の細い線を用いて巻線数を増やして、実信号に対するノイズレベルを相対的に減少させる。

現時点では、ヘルムホルツコイル1軸分の角度校正ができるようになった。残り2軸分の角度校正を早急に行い、その結果を元に、任意の磁場ベクトルを発生できるコイル電流源の制御システム・プログラムを構築していく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計1件)

佐々木憲一、ミュオニウム超微細構造精密測定用超伝導磁石システムの開発、日本物理学会第68回年次大会 27aRF5、広島大学、2013年3月27日

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐々木 憲一 (SASAKI KENICHI)

高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・准教授

研究者番号：70322831

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし