

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01239

研究課題名(和文) 精密物理実験のための超高均一磁場調整手法の開発

研究課題名(英文) Development of fine shimming technique for precision physic measurements

研究代表者

佐々木 憲一 (SASAKI, Ken-ichi)

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・教授

研究者番号：70322831

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,400,000円

研究成果の概要(和文)：J-PARCで進められているミュオンを対象とした素粒子実験では、0.2 ppm p-pという非常に高い磁場均一度を持つ空間が要求されており、そのための磁場調整手法及び、超高精度な磁場分布測定装置の基礎開発を行った。磁場測定装置について、センサー直近に配置される電気回路の素子および設計見直しを行い小型化に成功した。また、複数chを並列配置するための条件を検討した。磁場調整手法について、従来用いられる小鉄片では大きすぎる飽和磁化により微調整には向かないため、体積飽和磁化が小さい磁性流体や磁性パテを用いる手法を検討した。磁性パテを用いた磁場調整試験を行い、0.17ppm p-pの均一度を達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最近の素粒子物理学分野においては、ミュオン及び陽電子の磁気能率測定や、ミュオニウムにおける超微細構造測定など、物理量を精密に測定する実験が計画・遂行されており、それらの実験には数十cm角程度の大きな空間で非常に均一度の高い磁場が要求されている。本研究成果において、大空間において0.2ppm p-p以下の磁場均一度を達成するための有効な方式を示し、その達成に必要な測定装置に関する核心的な技術を開発した。この成果は、精密な物理量の決定に対する一助となり、ひいては物理学の発展に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：In order to improve the homogeneity of the static magnetic field in the internal space of a superconducting magnet for whole-body MRI, a magnetic field adjustment operation called shimming is necessary. It was found that the required homogeneity could not be achieved in the spatial magnetic field homogeneity adjustment test using small iron pieces (minimum unit 0.47 g), which is a conventional method. Therefore, I developed a new method for adjusting the spatial magnetic field using ferrofluid and magnetic putty, which have smaller magnetization than iron of the same volume. In this study, a spatial homogeneity of 0.17 ppm (peak to peak) was achieved in the muon stop region (Fig. 1).

研究分野：素粒子実験用超伝導磁石開発

キーワード：超伝導磁石 精密磁場調整 磁場測定 磁性流体 磁性パテ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

素粒子実験の領域においては、粒子軌道やスピン方向を制御するため、磁場は必要不可欠なものである。東海村にある大強度陽子加速器施設(J-PARC)においては、ミュオンの異常磁気能率および電気双極子モーメントを測定するg-2/EDM 実験や、ミュオンと電子の束縛系であるミュオニウムの精密分光を行うMuSEUM 実験が進められており、どちらの実験においても空間均一度が0.1 ppm 以下となる均一磁場空間が要求されている。磁場を調整する一般的な手法としては、鉄などの強磁性体(鉄シム)を磁石内部に配置する方法と特定の磁場分布を発生させるコイル(シムコイル)を複数用いる方法がある。どちらの場合も、目標磁場からの誤差を打ち消すように、追加の磁場を作り出す。それぞれの特徴を表1 に示す。

表1：一般的に使用される磁場調整手法

| 方式 | 原理 | 調整範囲 | 特徴 |
|-------|-----------------|---------------------|---|
| 鉄シム | 鉄の磁化 | 1 ppm ~ 1000 ppm | ○ 大きな誤差磁場も調整可能 ○ 複雑な磁場形状にも対応可 × 鉄の物理的な大きさによって調整するため 微調整が難しい |
| シムコイル | 電磁石による 磁界の発生 | < 数 10 ppm | ○ 磁場強度の微調整が容易 × 巻線形状に依存した誤差磁場分布しか調整できない × 広範囲の磁場調整には大きなコイル、大電流が必要となる × シムコイルの製作誤差による誤差磁場分布を考慮する必要有 × 高安定電源が必要 |

備考：○ は長所、× は短所を示す

よく用いられる調整手順では、磁石製作時のばらつきからくる誤差磁場など、高強度で複雑な形状を持つ誤差磁場については鉄片を用いた磁場調整手法で打ち消し、1 ppm 以下の小さな誤差磁場や長期的に変動する誤差磁場をシムコイルで打ち消す。通常、鉄シムでの磁場調整では、まず磁石内部に鉄シムを配置できるポケットのような場所を用意し、そこに誤差磁場を打ち消すように計算された鉄片(鉄シム)を配置していく。その際、複数の種類の厚さを持つ鉄シムを用意しておき、その組み合わせ枚数を変えることで必要となる鉄量の変化に対応する。この方法では、鉄量が離散化された値となってしまうため、0.1 ppm 以下の微小な調整をすることは困難である。原理的には、より小さな鉄片を使用することで対応可能ではあるが、必要寸法や量については、各磁石の個性や設置場所における外部からの誤差磁場などの影響が強く、予測して準備しておくことが難しい。測定結果を元に鉄片を準備する方法もあるが、実験の進捗状況によって種々の計測器の設置状況が変わる可能性がある物理実験において、その都度新たな形状の鉄片を準備することは非効率的であると言わざるを得ない。

2. 研究の目的

以上の背景のもとに、本研究では次に挙げる課題を研究目的とした。

(1) 0.01 ppm の空間均一度を可能とする磁場調整機構の開発

鉄シムで打ち消すことが容易ではない、0.1 ppm 以下の誤差磁場を微調整可能な、磁性流体を用いた磁場調整システムの基礎開発を行い、既存MRI 磁石を用いて実証試験を行う。

(2) 超精密磁場測定用多チャンネルNMRプローブシステムの開発

上記で開発した装置による調整結果について、0.01 ppm 以下の分解能で、短時間に磁場分布を測定するための多チャンネル磁場測定プローブを開発する。

3. 研究の方法

(1)について、磁性流体の磁化率を測定するための測定装置の開発を行った。次に、その開発した装置を用いて、市販の磁性流体の体積磁化を測定し、0.1ppm 以下の微小な誤差磁場を調整可能な磁気特性を持つかどうかの検証を行った。分量を変更したサンプルで複数回の測定を行い、磁場調整用材料として使用可能かどうかを検討、実証試験に使用する磁性サンプルを選定した。次に、選定したサンプルを用いて既存 MRI 磁石の磁場調整を行うための支持機構を製作した。最後に、選定したサンプルと製作した支持機構を用いて、既存 MRI 磁石の磁場調整試験を行った。(2)について、プローブの直近に配置される電気回路(Readout Board)に使用する素子の検討を最初に行った。次にそれらの素子を用いた Readout Board の製作を行い、その動作検証を行った。

4. 研究成果

(1) 0.01 ppm の空間均一度を可能とする磁場調整機構の開発

磁性流体の磁化率は、磁場中にサンプルを設置した際に発生する磁場変位の空間分布を測定し、

評価式をフィッティングすることで求める。磁場空間分布を測定するための装置開発をまず行った。既存の1軸(x軸)ステージに2軸(y, z軸)を追加することで、精密な空間分布測定を可能とした。図1に改良した測定装置の写真を示す。



図1：磁場分布測定装置

次にこの装置を用いて市販磁性流体(DS-50)の体積磁化を評価した。図2に1gの磁性流体が作り出す磁場変位分布を示す。この測定結果に距離に三乗に反比例する磁気モーメントの計算式をフィッティングすることで体積磁化を求め、その値は $4.1 \times 10^{-2} \text{ Am}^2/\text{g}$ となった。この値は鉄の約19%程度であり、MRIにおける微小誤差磁場調整に十分使用可能な値である。ただしこの粘度の磁性流体を用いるためには、流体の必要量に適した寸法の容器が必要であることがわかった。図3に、後述する磁場調整試験用の3.5ml容器に0.1mgの磁性流体を封入したものを磁場中に設置した際の写真である。重力方向に溜まった状態にあるのではなく、磁束の分布にしたがって、複雑な形状をとることが確認された。この形状は設置場所ごとに異なり、磁性流体が作り出す磁場変位の計算を難しくしてしまう。そのため、当初考えていた磁性流体の代替となる物質として、磁性パテの調査を行った。これはシリコン粘土に酸化鉄粉末を混合させた物質であり、容易に体積、すなわち磁化量を変化させることができ、かつ鉄よりも小さな磁化を持つという磁性流体に類似した特徴を持つと言える物質である。市販磁性パテの磁化率を測定したところ、 $4.6 \times 10^{-2} \text{ Am}^2/\text{g}$ という体積磁化であり、上記の磁性パテに近い値を持つことがわかった。また、磁場中の変化においても、容器のそこに押し付けて封入することで磁束による形状変化を防げることがわかったため、以下の磁場調整試験においては磁性パテを用いて試験を行った。

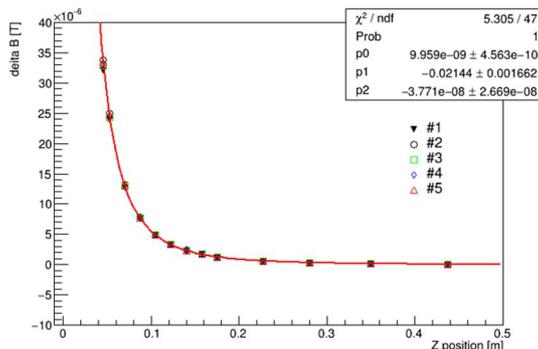


図2：磁性流体による磁場変動分布測定結果



図3：磁場中においた磁性流体の変形

磁場調整試験を行うためには、任意の場所に任意の調整用材料、すなわち磁性パテを設置、固定できる支持機構が必要である。本研究における調整検証試験においては、3.5ml ガラス瓶とケーブル配線用プラスチックモールおよびゴムブッシュを用いて支持機構を製作した。プラスチックモールにガラス瓶の直径と同じサイズの貫通穴をあけ、その下にゴムブッシュを取り付けた。プラスチックモールの穴に挿入したガラス瓶をゴムブッシュの収縮・摩擦力で固定し、脱落を防いでいる。図3中においてガラス瓶の下側に見える白いプラスチックモールが見えており、ゴムブッシュはモールの内側に配置されている。

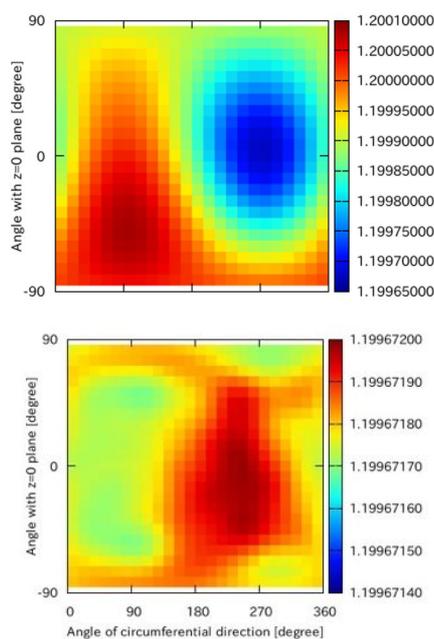


図4：磁場調整前の磁場分布(上)と調整後の磁場分布(下)

以上、選定した磁性パテと製作した支持機構を用いて1.2Tにおいて磁場調整試験を行った。試験はまず鉄シムにてppm オーダーまで磁場調整を行った後、磁性パテを用いて微調整を行った。今回は、市販の磁場分布測定装置を用いて、40cmDSVの範囲での調整を行っている。図4に磁場調整前、鉄シム磁場調整後、磁性パテ磁場調整後の磁場分布を示す。6回の鉄シムによる磁場調整によって、341.1ppm p-pの磁場均一度であったものが、

6回の鉄シムによる磁場調整によって、341.1ppm p-pの磁場均一度であったものが、

0.28 ppm p-pまで減少できた。その後、2回の磁性パテによる調整を行った結果、目標値の0.2ppm p-pより良い、0.17 ppm p-pの磁場均一度を達成できた。これにより、サブppmオーダーの磁場均一度を要求する物理実験を遂行する際の磁場調整方法に関する1方式を提案出来たものと考えられる。ただし、今回の試験に用いた磁場調整材支持機構は原理実証のためのものであり、スペースの有効利用の観点からは実際の実験に適用することは現実的ではなく、より省スペースで取り扱やすい方式を検討する必要がある。

(2) 超精密磁場測定用多チャンネルNMRプローブシステムの開発

スルーホール型素子を用いた既存の Readout Board について、小型化および非磁性化を推進するため、まず、既存素子と同等性能を持つ表面実装素子の選定を行った。非磁性製品が入手できる素子はそれに置き換えた。非磁性製品が存在しないFETやダイオードについては、異なるベンダーの同等性能品を購入し、選定を行った。素子が持つ磁化の大きさは、取り付け電極部分に常磁性体、特にニッケルが使用されているかどうかが大いなる要素となるが、そのような情報は素子の仕様書には通常明記されない。そのため、サンプル品を入手し、磁石を用いた吸着試験を行うことで選別した。次に選別した表面実装素子を用いた Readout Board の設計製作を行った。図5に製作した Board の写真を示す。写真から明らかなように、新しく製作した Board は、そのサイズが以前の1/5以下になり、測定の結果、磁化の値も半分以上に低減させることに成功した。面積の低減率ほど磁化の低減率がよくない理由は、使用しているオペアンプの一つについて、磁化量が小さい代替品が見つからなかったためであり、これについては更なる市場調査が必要である。次に開発した Board を用いて、複数プローブによる磁場測定試験を行った。図6に四つのプローブを29 mm 間隔で並列に配置した場合の NMR 信号測定例を示す。図中、台形型の黒線が周波数変調の仕方を表しており、 $\pm 0.5V$ で $\pm 400Hz$ の変調を行っている。周波数を上昇時と下降時にそれぞれ核磁気共鳴の吸収信号ピークがあらわれている。(1)から(4)のプローブの場所すなわち磁場が異なるため、それぞれのプローブが異なるピークを出力しているのがわかる。これにより、少なくとも4台のプローブで、同時に磁場測定を実施できることが確認された。次に、プローブ間の距離と混線(クロストーク)の関係を調べた。

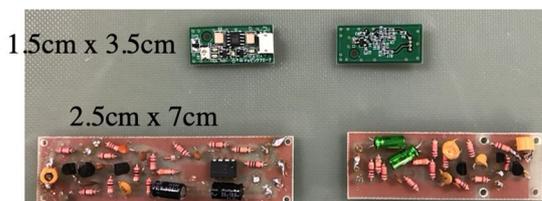


図5：開発した Readout Board(上)と既存 Readout Board(下)

図7はプローブ間の距離を15mmとして、2台のプローブで同時に磁場測定を行った時の信号例である。図中(1)の信号を見ると、明らかに(2)信号の吸収ピーク(負側ピーク)と同じ場所に正側に振れるピークがあらわれている。それぞれのプローブ単独で測定した際にはこのようなピークが現れないことから、図7中の正側ピークはクロストークによるものと考えられる。これらの結果から、プローブ間距離を少なくとも30 mm程度離して設置することでクロストークが回避できることがわかる。以上の結果から、磁場分布を0.1ppm以下の精度で精密に、短時間に測定するための磁場測定器開発に対する基本的な開発および実証は出来たと考える。今後は、実際に広域磁場分布を短時間で測定する磁場マッピング装置の製作と実証試験を進める必要がある。

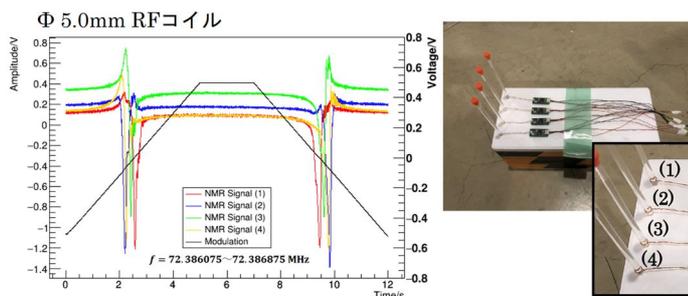


図6：4プローブによる磁場同時測定時の信号例

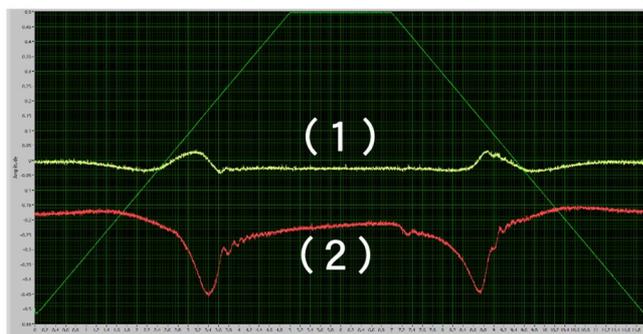


図7：プローブ間距離15mmの場合の信号例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Yamaguchi Hiroshi, Sasaki Ken-ichi, Tanaka Toya, Abe Mitsushi, Flay David, Kawai David, Mibe Tsutomu, Seo Shun, Shimomura Koichiro, Ueno Yasuhiro, Winter Peter | 4. 巻 29 |
| 2. 論文標題 Development of a CW-NMR Probe for Precise Measurement of Absolute Magnetic Field | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity | 6. 最初と最後の頁 1~4 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2019.2895360 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 2件/うち国際学会 6件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 佐々木憲一 |
| 2. 発表標題 Study on Shimming System of Superconducting Magnets for J-PARC g-2/EDM and MuSEUM experiments |
| 3. 学会等名 10th ACASC / 2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 阿部充志 |
| 2. 発表標題 A shimming technique to obtain high homogeneous magnetic field |
| 3. 学会等名 10th ACASC / 2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference（招待講演）（国際学会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 杉田萌 |
| 2. 発表標題 Precise Operation of Superconducting Magnet for Beam Capture Applying Whole-body MRI Magnet Technology |
| 3. 学会等名 10th ACASC / 2nd Asian-ICMC/CSSJ Joint Conference（国際学会） |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 佐々木憲一 |
| 2. 発表標題 Development of fine shimming technique with magnetorheological fluid |
| 3. 学会等名 MT-26 (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山口博史 |
| 2. 発表標題 J PARCミュオニウム超微細構造精密測定の際の磁場測定準備状況 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2019秋季大会(物性) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山口博史 |
| 2. 発表標題 MuSEUM及びJ-PARC muon g-2/EMD実験に用いる較正用磁場測定器の開発状況 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2019秋季大会(素核宇) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 田中陶冶 |
| 2. 発表標題 高磁場におけるミュオニウム超微細構造測定に向けた磁場測定器開発 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2019秋季大会(素核宇) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 杉田萌 |
| 2. 発表標題 磁場強度に対する温度の影響に関する検討と超均一磁場調整手法の開発 |
| 3. 学会等名 第16回 日本加速器学会年会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 杉田萌 |
| 2. 発表標題 CONSIDERATION OF ACTUAL OPERATION OF SUPERCONDUCTING MAGNET FOR BEAM TRAP FOR ULTRA-PRECISE PARTICLE APPLIED WHOLE-BODY MRI MAGNET TECHNOLOGY |
| 3. 学会等名 4th International Symposium of Quantum Beam Science at Ibaraki University (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山口博史 |
| 2. 発表標題 ミュオン超微細構造精密測定実験及びミュオン異常磁気能率・電気双極子能率精密測定実験の磁場測定装置開発 |
| 3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山口博史 |
| 2. 発表標題 ミュオン超微細構造精密測定実験(MUSEUM)及びミュオン異常磁気能率・電気双極子能率精密測定実験(J-PARC muon g-2/EDM)の磁場測定装置開発 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会 |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Hiroshi Yamaguchi |
| 2. 発表標題 Development of a CW-NMR Probe for Precise Measurement of Absolute Magnetic Field |
| 3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference, 2018 (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 杉田萌 |
| 2. 発表標題 飽和磁荷の小さい物質を用いたミュオン捕捉用超伝導磁石の精密磁場調整 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 清水光太郎 |
| 2. 発表標題 高磁場下におけるMuSEUM 実験に用いる磁場空間分布測定器の開発 |
| 3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 全身MRI用磁石技術を応用したビーム捕捉用超伝導磁石の精密磁場調整 |
| 2. 発表標題 杉田萌 |
| 3. 学会等名 第17回 日本加速器学会年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-----------|--|--|----|
| 研究 分担者 | 山口 博史 (YAMAGUCHI Hiroshi) (40717914) | 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子 原子核研究所・研究員 (82118) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

| 国際研究集会 | 開催年 |
|--|---------------|
| Absolute magnetic field measurement Workshop ~ US-JP Collaboration Meeting on B Field Cross Calibration | 2019年 ~ 2019年 |

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|