

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

THE EFFECT OF TEMPERATURE ON MAGNETIC FIELD AND DEVELOPMENT OF METHOD TO ACQUIRE SUPER FLAT MAGNET FIELD

杉田萌^{A)}, 飯沼裕美^{A)}, 大金千織^{A)}, 佐々木憲一^{B)}, 山口博史^{B)}, 阿部充志^{C)}

Moe Sugita^{A)}, Hiromi Iinuma^{A)}, Chiori Ohgane^{A)}, Ken-ichi Sasaki^{B)}, Hiroshi Yamaguchi^{B)}, Mitsushi Abe^{C)}

^{A)}茨城大学理工学研究科

^{B)}KEK 超伝導低温工学センター

^{C)}KEK 素粒子原子核研究所

Abstract

The objective of muon $g-2$ /EDM experiment at J-PARC is to measure muon anomalous magnetic moment ($\mu g-2$) and detecting muon electric dipole moment (μ EDM) directly first in the world. A muon beamline for the experiment is designed so that the beam is kept in a small solenoid magnet after accelerating muon beam in LINAC. It is required to control magnet field in a solenoid magnet with sub-ppm order. The required magnetic field strength is 3 T with a homogeneity of less than 0.1 ppm. Design techniques for medical MRI magnet are applied to meet the requirements. The scheme to produce and keep such a high homogeneity is studied with a MRI magnet which generates magnetic field strength of 1.7 T with a homogeneity of 0.45 ppm within 30 cm DSV (Diameter Spherical Volume). This paper discusses two items; the correlation between room temperature and the magnetic field strength, and the study of the materials that are suitable for passive shimming of sub-ppm level.

1. はじめに

J-PARCで計画が進んでいるミュオン $g-2$ /EDM 実験では、ミュオン異常磁気モーメント($\mu g-2$)の 0.1 ppm レベルの超精密測定および、電気双極子モーメント(μ EDM)の世界初の直接検出を目的としている。BNLで行われた E821 実験は、ミュオンの異常磁気モーメントを 0.54 ppm という高精度で測定し、標準理論の予想値よりも約 3σ 大きい値を報告した[1]。ミュオン電気双極子モーメント(EDM)の有限値の存在が確認されれば T 対称性の破れ(CPT=1 より)の証拠となるため、実験的な直接検出は未知の新物理の証拠発見になる。

この実験では、相対論的エネルギー($\gamma=3$)のミュオンビームを直径 66 cm の小型ソレノイド磁石に蓄積するビームラインを設計しており、小型ソレノイド磁石内の磁場をサブ ppm の精度で制御する必要がある。ここで、その理由を示すために磁場中に存在するミュオンスピン歳差運動の角運動量ベクトルの式を参照する(Eq. (1))。

$$\vec{\omega} = \frac{q}{m} \frac{g-2}{2} \vec{B} + \frac{q}{m} \frac{EDM}{2} \vec{\beta} \times \vec{B} \quad (1)$$

第 1 項と第 2 項は直交するため分離可能で、第 1 項は $g-2$ に、第 2 項は EDM に由来している。第 1 項に注目すると、 q/m は定数とみなせるので、 $g-2$ を 0.1 ppm レベルで精密測定するためには角運動量 $\vec{\omega}$ と磁束密度 \vec{B} を 0.1 ppm の精度で測定する必要がある。そのため、この実験で使用されるミュオン蓄積用超伝導磁石においては、3 cm 幅、10 cm 高、半径 33.3 cm の円筒領域で ± 0.1 ppm 以下という空間均一度が要求されている。

現在は、実機製作に先駆けて 1.7 T で永久電流モー

ド運転中の MRI 用超伝導磁石(最大磁場 2.9 T)を用いて磁場調整に関する実験を行っている(Fig. 1 上段)。MRI 用超伝導磁石の内部空間における静磁場の空間的不均一を解消するためには、シミングと呼ばれる磁場調整操作が必要となる。シミングの 1 つの手法として、鉄などの強磁性体を磁石内部に配置する方法がある。この磁石においては、磁場調整用の鉄片(シム鉄)を配置するためのポケット(Fig. 1 下段)が周方向に 24 個、軸方向に 24 個の計 256 個あり、それぞれのポケットに入れるシム鉄の量を変えることで磁場の調整を行うことができる。

現在は温度変化による磁場変動への影響の評価と、磁性流体を用いた超精密な磁場調整手法の検討を進めている。

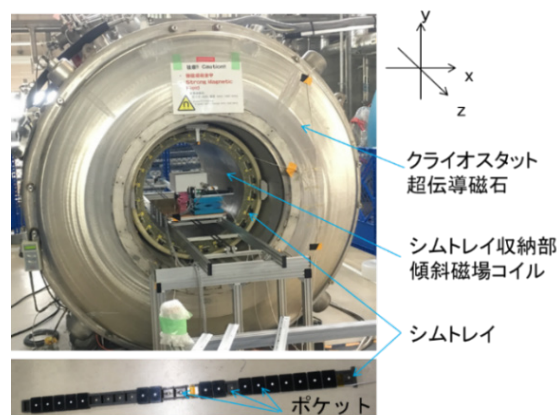


Figure 1: Superconducting magnet for MRI.

2. 磁場強度の温度依存性評価

2.1 温度に関する誤差磁場要因の検討

温度変化は磁場変動の主な原因のひとつである。温

度変化による磁場変動のメカニズムのひとつとしてはシムトレイ収納部の熱膨張がある。鉄シムは通常シムトレイと呼ばれる収納部に配置されている。鉄をシムトレイ上に置くと磁束が鉄に集まるため中心の磁場強度は弱くなる。温度の上昇に伴ってシムトレイ収納部が熱膨張すると、鉄シム位置が外側に広がり (Fig. 2)、その影響が弱くなるため中心磁場は大きくなる。

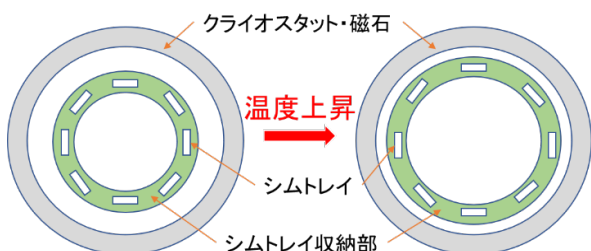


Figure 2: Thermal expansion of support for shim trays.

2つ目のメカニズムとしては、ブロッホの $T^{3/2}$ 則による鉄の磁化の変化がある。鉄シムの温度が上昇すると Eq. (2) に従って磁化が減少する。すなわち、鉄シムが磁束を引き付ける力が小さくなるため、中心磁場は上昇する。

$$M_s(T) = M_s(0)(1 - CT^{\frac{3}{2}}) \quad (2)$$

M_s : 自発磁化

$$C = \left(\frac{0.0587}{aS}\right) \left(\frac{k}{2SJ}\right)^{\frac{3}{2}} = \text{const.}$$

a : 単位格子中の原子数

(単純立方格子なら1、体心立方格子なら2、面心立方格子なら4)

S : イオンのスピン

J : 交換積分

以上の要因による磁場変化を定量的に議論するため、以下に示す実験を行った。

2.2 セットアップ

シムトレイ収納部に埋め込まれている3つの傾斜磁場コイル(x, y, z方向傾斜磁場コイル)に直流電流を流してジュール熱によってシムトレイ収納部及び鉄シムの温度を上昇させ、磁石中心磁場がどのように変化するかを測定した。

磁場変化を測定するためにNMRプローブを用いた。そのプローブは磁石の構造中心に置き、シムトレイ収納部の温度上昇の影響を受けないようにするため、箱状の発泡スチロール内に入れて断熱した。箱の内部温度はプローブ近くにセットした熱電対により測定した。

既存の電源を用いて十分な温度上昇を得るために2つの電源を使用した。x方向コイルを1台の電源に繋ぎ、70 A, 10 Vを通電、y, z方向コイルは直列に電源に接続し、20 A, 3.8 Vを通電した。

シムトレイ収納部他の温度は熱電対により測定している。設置した場所を Fig. 4 に示す。CH1は磁石容器の外側表面に設置し、磁石周辺環境の気温を測定している。

CH2は発泡スチロール箱内に設置した熱電対である。また、CH3, CH5, CH6はシムトレイ収納部の表面に、CH4は、シムトレイ内に設置されたシム鉄表面に取り付けた。

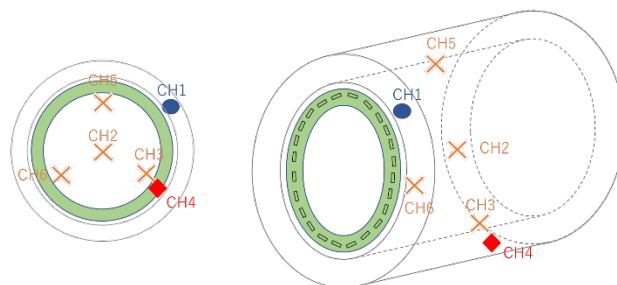


Figure 3: Position of thermocouples.

中心磁場を計測する際に、傾斜磁場コイルが通電状態のままでは、その傾斜磁場によってNMRプローブの分解能が悪くなってしまうため、CH3の温度が一定温度に達した時点で一度電源を切り、その状態で磁場測定を行った。測定後、再度傾斜磁場コイルに電流を流し、ジュール熱を発生させ、この手順を繰り返した。

2.3 結果

Figure 4は温度の時間変化を、Fig. 5は磁石中心磁場の温度依存性を示す。ジュール熱によって、シムトレイ収納部表面の温度(CH3, 5, 6)は2.5 °C/時で上昇した。鉄シム(CH4)の温度は、熱伝達が遅いためシムトレイ収納部(CH3, 5, 6)よりも遅れて上昇している。そのため、測定の前半では熱膨張の影響が主であり、後半ではブロッホ $T^{3/2}$ 則の影響も現れてくると考えられる。Figure 5 から、温度の上昇とともに中心磁場が大きくなっていることが分かり、その磁場の変化量平均は0.138 ppm/°Cであった。このことから、現状の磁石において、磁場の温度変化を0.1 ppm以下に抑えるためには磁石設置環境の温度変化を0.7 °C以内にする必要があると言える。ただし、この変化量はシミングに使用している鉄量に依存するため、各要因および全体的な定量評価にはより詳細な検討が必要である。ブロッホ則および熱膨張の影響の内訳についても今後より詳細な検討が必要である。

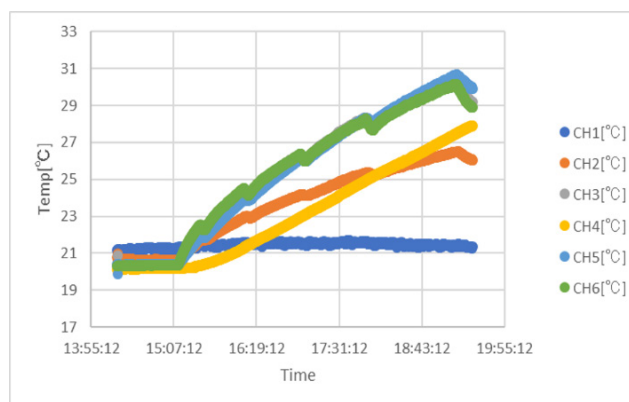


Figure 4: Temporal change of temperature.

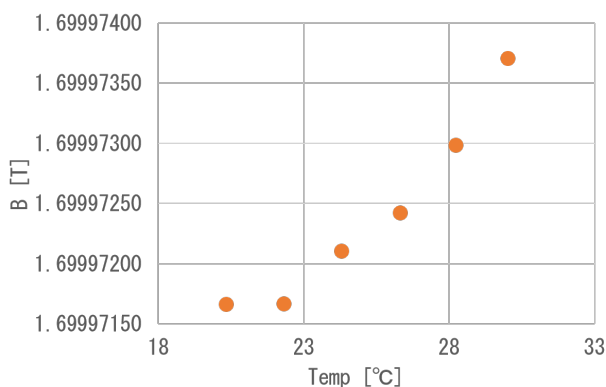


Figure 5: Correlation between magnetic field and temperature.

3. 磁性流体を用いた超均一磁場調整手法の検討

実験に用いた MRI 磁石のシミングに関する事前検討によると[2]、現在使用している寸法の鉄シム(30 mm×40 mm×0.05 mm= 0.06 cc の鉄片)を用いたシミングでは、離散的な寸法により、磁石中心磁場の均一度は±0.45 ppm が到達限界であった。さらに精度を上げた磁場の微調節を可能にするためには、鉄シム片を 0.012 cc 以下に細分化する必要があるという計算結果が出ている。しかし、磁石の製作誤差や周辺環境の影響によって必要となる鉄片の最小寸法が変動するため、予め準備することは難しい。また、小さな鉄片を精度よく必要な場所に複数枚固定するためには特別なシムトレイが必要となり、現実的には難しい。そこで本研究では磁性流体に着目し、高均一シミングへの適用可能性について検討した。磁性流体は、磁性微粒子、界面活性剤、ベース液からなる液体材料で、酸化鉄の周囲を界面活性剤が被膜し、ベース液中に安定的に分布している。磁性流体は一般的に鉄よりも十分小さい磁化率をもつうえ、液体の性質があるため固体の鉄よりも微量な量の調節が可能である。磁性流体の基本的性質を把握するため、まずは磁性流体の磁気モーメント計測を行った。

3.1 セットアップ

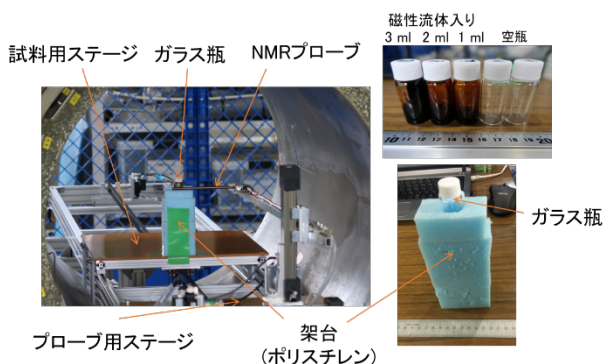


Figure 6: Setup for magnetic moment measurement.

Figure 6 に磁性流体の磁化測定の実験セットアップを示す。本実験で使用した磁性流体は、株式会社シグマハイケミカル製の DS-50 で、成分は酸化鉄、イソパラフィ

ン、インステアリン酸である。また、磁性流体を入れる容器にはガラス瓶を使用した。そのガラス瓶は本体がホウケイ酸ガラス、キャップがポリプロピレン製である。Figure 6 に示す通り、試料用ステージの上にポリスチレン製の架台を置き、その中に測定する試料を設置する。NMR プローブの測定部が磁石中心となるように、プローブ位置を固定した。そして試料用ステージを z 軸方向に動かし、試料による磁場分布の変化を測定、その結果をフィッティングすることで磁気モーメントを求めた。

3.2 結果

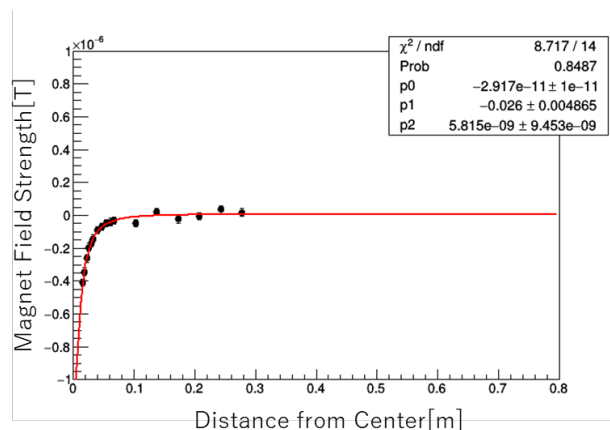


Figure 7: Magnetic field distortion by bottle.

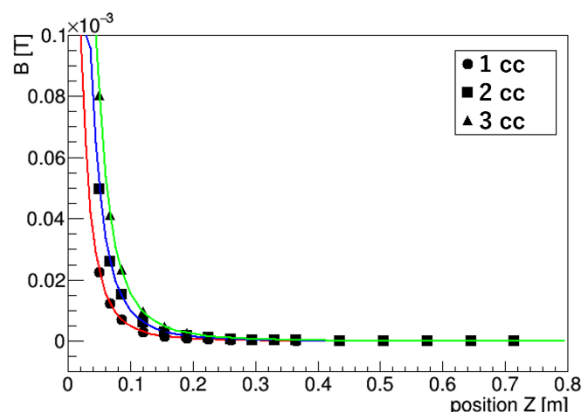


Figure 8: Magnetic field distortion by ferrofluid.

Figure 7 にガラス瓶単体の測定例を、Fig. 8 に磁性流体が 1 cc, 2 cc, 3 cc の場合の測定例を示す。横軸は瓶中心からの距離を、縦軸は磁場変化量を表している。ホウケイ酸ガラスやプラスチックは反磁性をもつため磁場の変化量は負を示す (Fig. 7)。一方で、磁性流体は強磁性粉末を成分とするため変化量は正の値を示す (Fig. 8)。

いくつかの場合について測定を行い、その結果を Table 1 にまとめる。測定条件は以下の通りである。

- ケース①: 空のガラス瓶 (瓶 1) を 5 回測定
- ケース②: 規格が同一な空のガラス瓶を 5 本用意し、それぞれの瓶で 1 回ずつ測定
- ケース③: 磁性流体 1 cc 入りの瓶を 5 本用意し、それぞれの瓶で 1 回ずつ測定

ケース①の結果を見ると、同一条件、同一物体での測定

にも関わらず、磁気モーメントの標準偏差はその平均値と同じオーダーであり、ばらつきが大きいように見えるが、これは測定限界であると考えられる。ケース②における磁気モーメントの標準偏差はケース①と同程度であり、こちらも測定限界であるといえる。さらに、ケース③で測定した磁性流体の磁気モーメントよりケース②の標準偏差は十分に小さいため、磁性流体の磁気モーメントを測定する際は瓶の個体差による影響を考慮しなくても問題ないといえる。ケース③は、同じ量の磁性流体を封入した場合であり、③-2から③-5はほとんど一定の値を示した。しかしながら、③-1の磁気モーメントのみ低い結果となった。理由としては、磁性流体をガラス瓶に封入する際に十分に攪拌がなされていなかったためと考えられる。

Figure 9は、磁性流体の量を変化させた際の磁気モーメント変化を示す。磁性流体が1 cc, 2 cc, 3 ccのとき、磁気モーメントは磁性流体の量に比例して大きくなるのが確かめられ、線形フィットの結果から、その傾きは1 ccあたり $4.11 \times 10^{-2} \text{ A m}^2$ となった。純鉄の飽和磁化から換算した1 ccあたりの磁気モーメント 1.711 A m^2 比較すると、約1/40であるといえる。すなわち、シム鉄0.012 ccは磁性流体約0.5 ccに相当し、このオーダーの量であれば、十分微調整可能な量であると考えられる。ただし、線形フィットにおいて誤差が生じており、その原因としては磁性流体の体積の計量の正確性や、磁場測定における測定誤差の影響が考えられる。磁性流体量の微調整を実際に行うためには、より詳細な検討をする必要がある。

Table 1: Magnetic Moment of Bottles and Ferrofluid

番号	①	②	③
1	-3.17×10^{-5}	1-①と同様	5.67×10^{-2}
2	-3.95×10^{-5}	-8.33×10^{-5}	6.63×10^{-2}
3	-1.29×10^{-5}	-8.73×10^{-5}	6.65×10^{-2}
4	-5.56×10^{-5}	-8.73×10^{-5}	6.58×10^{-2}
5	-6.05×10^{-5}	-9.38×10^{-5}	6.78×10^{-2}
平均	-4.01×10^{-5}	-7.84×10^{-5}	6.47×10^{-2}
標準偏差	1.92×10^{-5}	2.17×10^{-5}	4.48×10^{-3}

磁気モーメント [$\text{A m}^2/\text{cc}$]

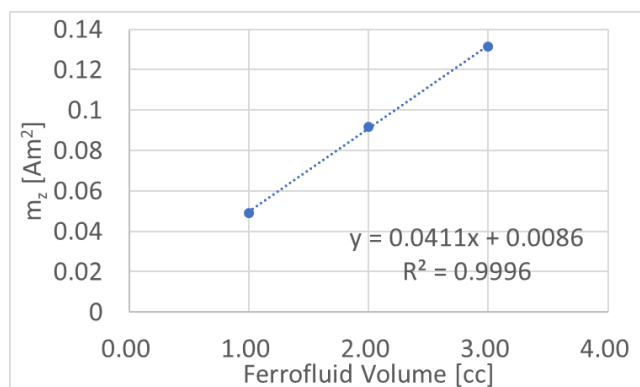


Figure 9: Magnetic moment by ferrofluid

4 まとめと今後の展望

今回の測定では温度上昇によって中心磁場が上がることを確認したが、定量的な評価をするためにはより詳細な検討が必要である。

磁性流体に関しては、いくつかの条件に対して磁気モーメントを測定し、今回測定した磁性流体の磁気モーメントは鉄の約1/40の値をもつことが分かった。今後は量を変化させて同様の測定を行い、実際のシミング作業に関わる磁化量の調整手法について検討する。また、磁性流体を用いた超高均一度の磁場調整手法を確立するため、シミングに使用する際の磁性流体の再配置や量の調整が容易な支持機構の開発を進める。

参考文献

- [1] G.W. Bennett *et al.*, Phys. Rev. D 73, 072003 (2006).
- [2] M. Abe *et al.*, "Discussion on possibility of high accuracy shimming o", 春季低温工学・超伝導学会, Tsukuba, 3A-a10 (2019).
- [3] <http://www.jahep.org/hepnews/2012/12-3-5-g-2-Mibe.pdf>