

## $g-2$ /EDM 精密計測用ミュオン蓄積磁場一様化の受動シミング機構の設計

### DESIGN OF PASSIVE SHIMMING STRUCTURES FOR PRECISION MAGNETIC FIELD SHIMMING ON MUON STORAGE VOLUME IN THE SUPERCONDUCTING MUON STORAGE MAGNET FOR $g-2$ /EDM MEASUREMENTS

阿部充志<sup>#, A)</sup>, 佐々木憲一<sup>A)</sup>, 三部勉<sup>A)</sup>, 小川真治<sup>A)</sup>, 飯沼裕美<sup>B)</sup>

Mitsushi Abe<sup>#, A)</sup>, Ken-ichi Sasaki<sup>A)</sup>, Tsutomu Mibe<sup>A)</sup>, Shinji Ogawa<sup>A)</sup>, Hiromi Inuma<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> KEK, <sup>B)</sup> Ibaraki Univ.

#### Abstract

This proceeding describes 3D (three-dimensional) magnetic field shimming in the fiducial volume of a superconducting magnet, in which muons are stored to measure anomalous magnetic moment ( $g-2$ ) and electric moment (EDM) in J-PARC. The target homogeneity (peak-to-peak amplitude/average magnetic field strength) is less than 0.2 ppm, which is quite homogenous one comparing with usual MRI magnetic field. Such uniform magnetic field requires very accurate magnetic field shimming as well as a magnet design. We use the passive shimming method, in which iron (or nickel) pieces are used as shims. In this proceeding, we discuss about the shimming calculation algorithm and the shimming structures to realize such good homogeneity of 0.2 ppm and the adequate iron piece placement positions.

#### 1. はじめに

J-PARC で準備を進めているミュオンの磁気・電気モーメント( $g-2$ /EDM)高精度測定に、用いる磁石はミュオンを周回・蓄積するシリンダー状の領域(3 cm 半径幅、10 cm 高で直径 66.6 cm)に、高磁場(3.0 T)で超高一様磁場(振幅 $\pm 0.1$  ppm)を持つ。螺旋入射した muon を赤道面付近の周回軌道を安定に保つ弱収束磁場(WFF: Weak Focus Field)にも、各位置で $\pm 0.1$  ppm 以内の精度が必要である[1, 2]。ここで、均一度とは、実験領域の表面で定義し、下記である。

$$\text{均一度} = \frac{\text{磁場分布の最大最小値の差}}{\text{平均磁場}} \times 10^6 \quad [\text{ppm}] \quad (1)$$

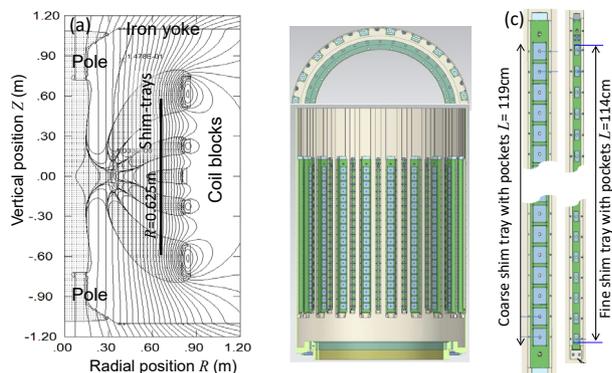


Figure 1: Passive shimming structure for  $g-2$ /EDM magnet. (a) Designed magnetic field of the magnet. Dotted area is higher than 3.0 T and vertical curved lines are magnetic force lines. Bold line indicates shim-tray positions. (b) A cylindrical structure on which shim trays are placed. (c) shim-trays for coarse and fine shimming operation. Small rectangles in each tray are shim-pockets in which shim pieces are placed.

<sup>#</sup> abemk@post.kek.jp

磁石設置直後の磁場(素磁場)には、組立・設置誤差などで、最大 1000 ppm 程度の誤差磁場を持つ(MRI 磁石の場合[3])。そこで、実験に先立ち磁場分布を精密に調整(シミング)する必要がある。そこで、MRI 磁石用に開発・された受動的シミング法を利用する[3-8]。この方法では磁場中で磁化した鉄片による磁場を利用する。シミング領域の周りに誤差磁場分布を打ち消す磁場を発生するように、鉄片をシミング領域の周りに配置する。MRI 用磁石を再利用する MuSEUM 実験用磁石[7, 9]を利用して、目標の磁場振幅 $\pm 0.1$  ppm 精度でシミングが可能であることは既に示した[7]。このとき、シム鉄片配置位置は、従来から MRI 磁石で用いられてきた位置とした。

しかし、 $g-2$ /EDM 磁石のシミングは幾何学的形状が MRI 磁石とは異なる[2, 4, 5]ので、シム片配置位置を新たに設計する必要がある。概略の配置については参考文献に既に記述したが、今回は、シミング可否をシミングのシミュレーション(仮想シミング)を通して、検討・設計を行ったので、その方法と結果を報告する。

#### 2. シミング機器と手法の構成

##### 2.1 シミング手法の概要

シミングに使う機器は文献[5]に概略が示されているが、受動シミングと能動シミングが用意されている。前者では、磁場中で受動的に磁化して磁気モーメント(MM: Magnetic Moment)を持つシム片を配置して磁場調整を行う受動シミングと、コイルアレイの電流分配による磁場分布を行う能動シミングがある。後者では、細かい分布の磁場調整は不可能であり、周回方向 1 回、もしくは 2 回の磁場分布を調整するのみである。一方、受動シミングでは、鉄片配置を空間的に細かく出来るので、磁石設置直後の数百 ppm の均一度から、0.2 ppm の目標均一度に調整できる[6, 7]。Figure 1 にその概要を示す。幾何学的体系は異なるが、再利用 MRI 磁石を用いる MuSEUM 実験の準備として、このような極めて良い均一度のシミングが可能であることを示した。このとき利用したシム

ング方法を、本研究では g-2/EDM 磁石磁場のシミングへの適用を検討する。

受動シミングの作業は Fig. 2 の手順で行われる[6, 7]。据え付け時のみでは無く、保守時や、実験の合間にも行われる。磁場を計測した後、離散的な計測磁場点 (MFMPs: Magnetic Field Measurement Points) のデータを用い、MFMPs で囲まれた領域の任意の点で磁場を把握できるように、磁場分布再構成を行う。シミング用の磁場評価点 (MFEPs: Magnetic Field Evaluation Points) の再構成磁場を目標磁場に調整するためのシム片配置計算を行う。そして、シム片配置とシミング後の推定磁場分布を出力する。

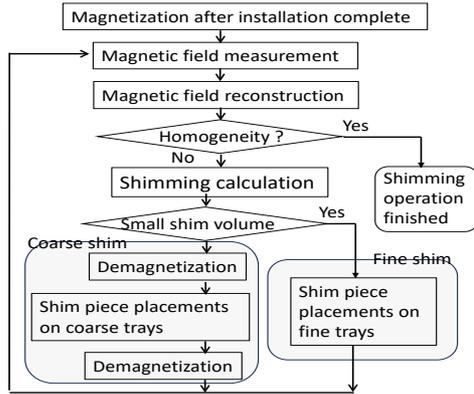


Figure 2: Shimming procedure to obtain homogeneous magnetic field.

## 2.2 シミング計算(shimming calculation)

シミング計算は、Fig. 1, Fig. 3 の幾何学配置と Table 1 の手順で計算する[6, 7, 10]。Figure 3(a)には起磁力 (MFS: Magnetomotive Force Surface)と MFMPs を持つ 2面を示す。外面上に MF(Magnetomotive Force)として磁気モーメント MM(MM: Magnetic Moment)を多数(5000 個程度)配置し、計測磁場を再現する MM 分布を決める。計測面上には 1500 点程度の MFMPs を配置する。以下では Table 1 の手順を説明する。

### 2.2.1 磁場計測

Figure 3(b)に半径 ( $R$ )- 軸方向位置 ( $Z$ ) の断面で MFMPs 位置を示した。1.5 cm 間隔で本来の蓄積領域より広範囲に配置した。本検討で使用される磁場データは

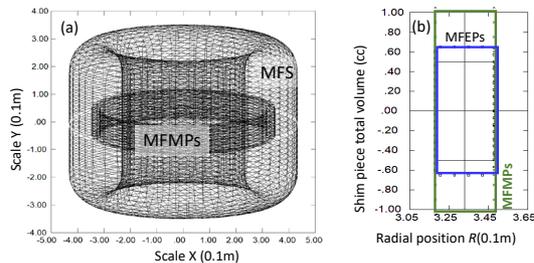


Figure 3: Computational model for the shimming calculation. (a) MFS (Magnetomotive Force Surface) and surface for MFMPs. (b) 2D cross section with surfaces for MFMPs and MFEPs.

3D 非線形磁場計算によるもので、誤差磁場成分として磁石軸 ( $Z$  軸) 周回方向に 4 回対称の成分が強く、これ以上に細かい誤差磁場成分は強くない。そのため、周回方向には 36 点 (角度 10 度毎) に磁場計算点を取り、MFMPs での計測磁場として入力した。

Table 1: Procedures of the Shimming Calculation

No.	Procedure
1	MgF measurements at MFMPs to input measured data
2	MgF distribution reconstruction from MgF data at MFMPs
3	Shim placement calculations from reconstructed MgF
4	Estimation of shimmed MgF distribution
5	Output of shim piece placements for shim operation

Note, MgF: Magnetic Field, MFMPs: MgF Measurement Points

### 2.2.2 磁場再構成計算

磁場の再構成により、MFMPs に囲まれた領域ならば連続的に磁場分布を把握できるようにする[10]。

計算中の桁落ちによる計算誤差の拡大を防ぐために、計測 (計算) 磁場データを直接扱うのではなく、誤差成分  $B_i^{ER}$  を再構成する。つまり、

$$B_i^{ER} = B^{AV} - B_i^{MS} \quad (2)$$

の成分である。ここで、 $B_i^{MS}$  は MFMP の  $i$  番目の計測磁場データであり、平均磁場  $B^{AV}$  は、磁場の再構成に用いる計測磁場の加算値/データ数の単純平均値で、3.0 T 前後の値である。下添え字  $i$  は  $i$  番目計測位置を表す。

誤差磁場成分  $B_Z^{ERR}$  成分を、多数の MM から磁場により表現 (再構成) する。つまり、 $i$  番目位置 ( $X_i, Y_i, Z_i$ ) の磁場  $B_{Zi}^{ERR}$  は、

$$B_{Zi}^{ER} = \sum_{j=1}^{N_M} A_{ij} M_j \quad (3)$$

で表される。ここで、 $N_M$  は MM 数 (Fig. 1 の接点数)、 $M_j$  は  $j$  番目 MM の強さ ( $\text{Am}^2$ ) で、 $X, Y$  方向の成分は零として、再構成に用いる。また、 $A_{ij}$  は単位強さ ( $|\mathbf{m}_j|=1.0 \text{ Am}^2$ ) の MM が作る磁場、

$$\mathbf{b}_{ij} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\mathbf{m}_j \cdot \mathbf{r}_{ij}) \mathbf{r}_{ij} - r_{ij}^2 \mathbf{m}_j}{r_{ij}^5} \quad (4)$$

の  $Z$  成分である。ここで  $\mathbf{m}_j$  は、 $(0, 0, M_j)$  で、 $\mathbf{r}_{ij}$  は位置  $i$  から  $j$  へのベクトルである。纏めると、

$$\mathbf{B}^{ER} = \mathbf{A} \mathbf{M} \quad (5)$$

である。左辺の  $\mathbf{B}^{ER}$  は Eq. (2) の  $B_i^{ER}$  を成分とするベクトルである。MM 分布  $\mathbf{M}$  は Eq. (5) から、

$$\mathbf{M}(\mathbf{B}^{AV}, M_T) = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}^{ER} = \sum_{k=1}^{M_T} \frac{\mathbf{v}_k \mathbf{u}_k^t}{\lambda_k} \mathbf{B}^{ER} \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{u}_k$ ,  $\mathbf{v}_k$ は、それぞれ、 $k$  番目の SVD (Singular Value Decomposition)固有モードで、磁場分布、MM 分布の固有モード分布を示す基底で、 $\lambda_k$ は特異値で、 $\mathbf{v}_k$ から $\mathbf{u}_k$ への換算係数[T/(Am<sup>2</sup>)]と見ることも出来る。つまり、MM 分布  $\mathbf{v}_k$ が発生する MFMPs の磁場分布は $\lambda_k \mathbf{u}_k$ である。 $M_T$ は打ち切り特異値分解 TSVD(TSVD: Truncated SVD)計算の打ち切り固有モード番号である。この $M_T$ 値は計算結果を見ながら決める。

この $\mathbf{M}$ を用いると、MFMPs で囲まれた領域の任意の位置で磁場を再構成できる。つまり、

$$\mathbf{b}^{\text{REC}}(X, Y, Z) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B^{\text{AV}} \end{pmatrix} + \sum_{j=1}^{M_T} \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3r_{zj} \mathbf{r}_{ij} - r_{ij}^2 \mathbf{n}_z}{r_{ij}^5} M_j \quad (7)$$

である。ここで、 $\mathbf{n}_z$ は軸(Z)方向を向いた単位ベクトルである。また、再構成磁場と計測磁場の差異(残差)は、

$$\mathbf{B}^{\text{RE}}(B^{\text{AV}}, M_T) = \mathbf{B}^{\text{ER}} - \mathbf{A}\mathbf{M}(B^{\text{AV}}, M_T), \quad (8)$$

である。そして、再構成の良否を、下記の残差 peak-to-peak 値 $B_{\text{pp}}^{\text{RE}}$ で判断する。

$$B_{\text{pp}}^{\text{RE}}(B^{\text{AV}}, M_T) = \text{Max}[B_i^{\text{RE}}(M_T)] - \text{Min}[B_i^{\text{RE}}(M_T)]. \quad (9)$$

この計算は、TSVD 計算の打ち切り固有モード番号 $M_T$ に依存するが、これについては次項と 2.3 節で議論する。

### 2.2.3 シム片配置の計算

誤差磁場を打ち消すようにシミング対象領域の表面で最小二乗法(LSM: Least Square Method)、

$$\text{Err} = \sum_i (B_i^{\text{TG}} - B_i^{\text{SHM}})^2 \rightarrow \text{Minimum} \quad (10)$$

により算出する。ここで、 $B_i^{\text{TG}}$ は  $i$  番目位置の目標磁場、 $B_i^{\text{SHM}}$ は、シミング後の磁場で、

$$\mathbf{B}^{\text{SHM}} = \mathbf{B}^{\text{MS}} + \mathbf{B}^{\text{MM}}, \quad (11)$$

である。ここで、上添え字 MM はシム片 MM による磁場、MS は再構成磁場を含めて計測磁場である。また、 $\mathbf{B}^{**}$ (\*\* : MS, MM, TG, SHM-- 等)のような太文字ベクトル  $\mathbf{B}^{**}$  の要素は、MFMPs や MFEPs(Magnetic Field Evaluation Points)の磁場分布を表す。シム片配置計算の LSM は MFEPs で行い、その解は、

$$\mathbf{B}^{\text{ER}} \approx \mathbf{B}^{\text{MM}} = \mathbf{A}\mathbf{M}, \quad (12)$$

である。ベクトル  $\mathbf{M}$  はシムポケットのシム片配置を示す。応答行列  $\mathbf{A}$  は、シム片の単位 MM が、MFEPs に作る磁場を表すが、非正則なので TSVD 法による正則化を適用して逆行列求め、 $\mathbf{M}$  の解を得る。

$$\mathbf{M}(B^{\text{TG}}, M_T) = \sum_{k=1}^{M_T} (\mathbf{v}_k \mathbf{u}_k^t / \lambda_k) \mathbf{B}^{\text{ER}}, \quad (13)$$

ただし、Eq. (13)では負の  $M_j$  を算出するポケットが発生する。この制限・回避には文献[6, 11]の方法を使う。

MFEPs でのシミング後の残差 $\mathbf{B}^{\text{RE}}$ の予測は、

$$\mathbf{B}^{\text{RE}}(B^{\text{TG}}, M_T) = \mathbf{B}^{\text{ER}} - \mathbf{A}\mathbf{M}(B^{\text{TG}}, M_T), \quad (14)$$

で可能であり、その peak-to-peak 値  $B_{\text{pp}}^{\text{RE}}$  は Eq. (9)で行い、シミング後の一様性を推定する。そして、シム総量が少なく、良い均一度与える $B^{\text{TG}}, M_T$ を選択し、 $\mathbf{M}$  を決める。具体的な方法は文献[6, 7]が参考になる。

### 2.2.4 シミング後の磁場分布

シミング後の磁場分布は、Eq. (7)の $\mathbf{b}^{\text{REC}}$ とシム片による磁場の加算であり、

$$\mathbf{b}^{\text{SHM}} = \mathbf{b}^{\text{REC}} + \sum_j \mathbf{b}_j^{\text{MM}}, \quad (15)$$

で MFEPs 以外の位置でも推定できる。ここで、第 2 項はシム片が作る磁場で、全シムポケット  $j$  について加算する。

### 2.2.5 シム片配置の出力

Equation (13)の MM 配置をシム片量(体積)に換算する。シム片は磁場中で磁気飽和(磁化  $B_{\text{SAT}}$ 、鉄: 2.15 T、ニッケル: 0.6 T)し、 $j$  番目シムポケット配置量  $V_j$  は

$$V_j = M_j / (B_{\text{sat}} / \mu_0) \quad [\text{m}^3], \quad (16)$$

で換算する。しかし、 $V_j$  は連続な実数で、実際のシミング作業には、次式でシム片量を離散化する。

$$V_j^{\text{OUT}} = V_{\text{min}} \text{Int} \left( \frac{V_j}{V_{\text{min}}} + 0.5 \right), \quad (17)$$

で近似的なシム片量を出力する。ここで、 $V_{\text{min}}$  は最小単位で、関数(Int)は実数の整数部を意味する。小さい  $V_{\text{min}}$  により正確なシミングの可能性はあるが、作業量や作業ミスが増大に繋がる。そのため、目標均一度を実現できる範囲で大きめのシム片最小単位を採用する[6, 7]。

## 2.3 磁場再構成精度の確認

前節で説明した磁場再構成計算法が、MFMPs で囲まれた領域の磁場分布を、精度良く再構成することを確認する。シム片配置計算の確認は、シミング後の磁場の推定で、本計算全体の精度確認が出来る。

Figure 4 に使用する計算磁場分布を示した。一様磁場と弱収束磁場(WFF: Weak Focus Field)[1, 8]を含んでいる。設計計算磁場であるが入射用、冷凍機用等、貫通孔が鉄 yoke に存在しているため、5.5 ppm 相当の振幅を持つ誤差磁場成分を含んでいる。

WFF-coil が作る磁場(半径方向 $B_R^{\text{WF}}$ 、軸方向 $B_Z^{\text{WF}}$ )は、

$$B_R^{\text{WF}} = -n_{\text{index}} \frac{B_{z0}}{R_0} Z \quad (18)$$

$$B_Z^{\text{WF}} = -n_{\text{index}} \frac{B_{z0}}{R_0} (R - R_0) + \frac{1}{R} \frac{\partial B_Z}{\partial R} \frac{Z^2}{2} \quad (19)$$

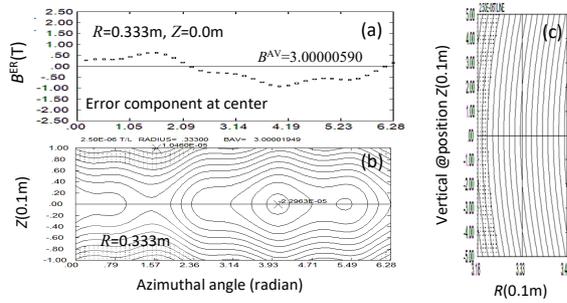


Figure 4: Test magnetic field calculated by 3D non-linear code. Distribution of the error field components of (a) in azimuthal direction, (b) on a cylindrical plane, at  $R = 0.333$  m  $Z = \uparrow 0.1$  m to  $+0.10$  m, and (c) azimuthally averaged magnetic field. (b) and (c) are shown by contour lines at every  $2.5 \mu\text{T}$  and are strong at dotted area.

であり、本実験では  $n_{index} = 1.5 \times 10^{-4}$  としている[8]。

MFMPs 位置は、 $R = 0.318, 0.348$  m で、 $Z = -0.15 \sim +0.15$  m の  $1.5$  cm 毎、及び  $Z = \uparrow 0.15$  m で  $R = 0.333$  m 位置で、周回方向  $15$  度毎の  $1584$  点とした。

Figure 5 は Eq. (9)の残差  $B_{pp}^{RE}$  を、打ち切り固有モード番号  $M_T$  の関数で示す。この図で  $M_T$  を決める。  $M_T > 800$  でシミング後の許容残差の  $\uparrow 0.1$  ppm より十分小さく、

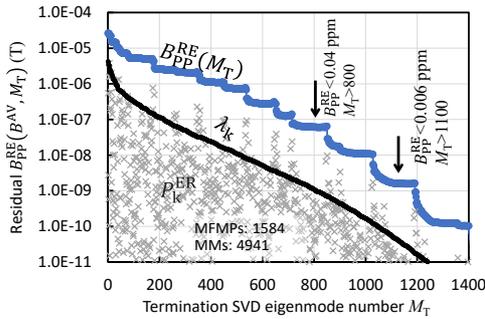


Figure 5: Dependence of reproduction residual  $B_{pp}^{RE}$  (blue line) on the truncation number  $M_T$ . Singular values  $\lambda_k$  (black line) and eigenmode strengths  $P_k^{ER}$  (crosses) are also plotted.

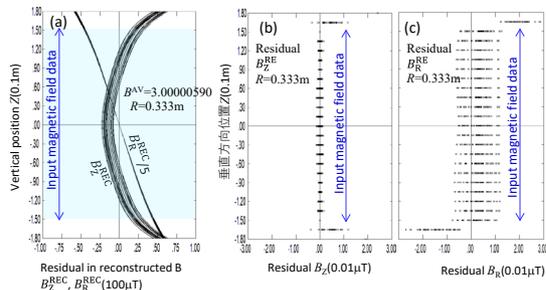


Figure 6: (a) Reconstructed magnetic field distribution on  $R = 0.333$  m cylindrical surface. (b) Residual  $B_Z^{RE}$  on  $R = 0.333$  m, (c) Residual  $B_R^{RE}$  on  $R = 0.333$  m, at every  $10$ -degree azimuthal angle.

良い精度で MFMPs 位置の磁場が再現出来る。本研究では、より残差を小さくするために  $M_T = 1300$  とした。

Figure 6 では MFMPs 以外の位置で、計算磁場と再構成磁場を比較した。Figure 6(a)は Eq. (7)の再構成磁場を  $R = 0.333$  m 上の  $b_Z^{REC}$  と  $b_R^{REC}$  で示す。入力磁場(Fig. 3)と矛盾は無い。再構成精度を詳しく把握するために、(b)と(c)には残差  $b_Z^{RE}$  と  $b_R^{RE}$  を、 $R = 0.333$  m の円筒面上で、示す。MFMPs 点は  $Z = \uparrow 0.15$  m のみである。MFMPs で囲まれた領域( $Z = \uparrow 0.15 \sim +0.15$  m)では、残差  $b_Z^{RE}$  は、 $1$  nT 程度、残差  $b_R^{RE}$  も  $15$  nT 以下で小さく、十分な再構成精度であり、シミング計算に利用できると考える。

### 3. 受動シミング機構の設計

#### 3.1 検討項目

Figure 1 のように、概略のシミング機構配置は決められているが、本設計で正確化する。ここで議論する項目は、

- (1)シムトレイ 20 本の妥当性確認、
- (2)シムポケット数/1トレイ、
- (3)シム片の最小単位、

である。項目(1)では、 $|Z| < 0.24$  m の各シムポケットに最大量配置しても磁場リップルが  $\pm 0.02$  ppm 以下で目標磁場精度に影響を与えないこと、及び、入射口などの貫通孔と両立すること、から 20 本は妥当と判断した。

他項目には、本研究で開発したシミング計算を使った。(3)シム片最小単位[6,7]は、仮想シミングで目標の  $0.2$  ppm に到達可能な単位が鉄片  $0.0063$  cc(ニッケル片  $0.021$  cc)以下と解った。項目(2)の議論は以下に述べる。

#### 3.2 シムポケット数の検討

Figure 7 には  $M_T$  の関数としてシミング計算により到達可能な均一度を推定した[6, 7]。WFF は無い。この図から、シムトレイの本数が、20 本と 32 本、また、シムポケット数/トレイが 20 個と 120 個と増やした場合でも、同程度の均一度が可能である。そのため、20 本のシムトレイは十分な本数で、また、120 個のような沢山のポケットをもうける必要は無いと判る。  $M_T$  を大きくしていくと、残差磁場が大きく改善する固有モードがある。これらを BEM(基本固

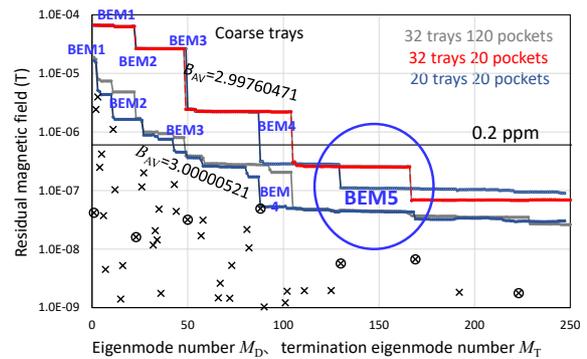


Figure 7: Estimation of  $B_{pp}^{RE}$  in shimmed magnetic field on the fiducial volume as functions of  $M_T$  for three kinds of shim-tray with pockets. Input data to the shimming calculations are small error field case of  $5.5$  ppm and large error field case of  $22.2$  ppm in the fiducial volume of  $3$  cm  $R$ -width and  $10$  cm  $Z$ -width, without WFF.

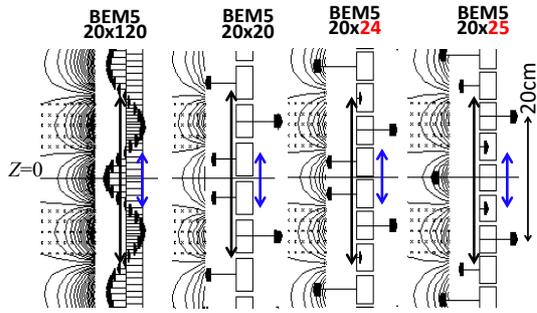


Figure 8: Comparison of shim pocket size and positions for 4 numbers of the pockets. 20x120 to 20x25 means the number of trays and number of the pockets per a tray.

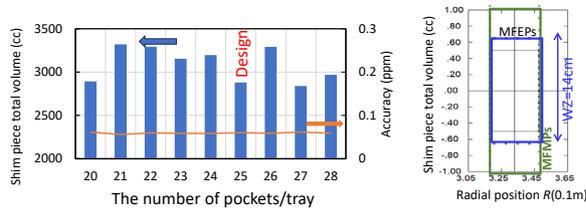


Figure 9: Comparison of the number of shim pockets per a tray to shim wide fiducial volume with  $W_z = 14$  cm. 25 pockets case gives small shim piece volume and selected as design structure.

有モード、Basic Eigen Mode)と呼ぶが、磁石軸周りの周回方向に一樣な固有モードである。Figure 7 から BEM5 をシミング出来れば、多少の誤差磁場が加算されても、目標の均一度にシミング可能と考える。また、これら BEM 群は、2D 磁場設計で用いた固有モード[12, 13]と磁場分布が一致し、この意味でも BEM 群をシミングできることが重要であると理解できる。

以上の考えで BEM5 のシム鉄片配置とシムポケット配置個数を細かいシム片配置が要求される赤道面  $Z = 0$  付近について Fig. 8 に示す。ポケット数/トレイを 20, 24, 25 を連続配置に近い 120 個と比較した。図中の両青矢印は、120 ポケットの場合のシム片配置幅で、この配置幅分解能が必要と考える。20 ポケット/トレイの配置は青矢印に合わず、24 個/トレイ以上のポケット数が必要と考える。

Figure 9 では、シミングにより縦方向幅  $W_z = 14$  cm と拡張する場合のシム片総量を WFF を含む磁場で算出した。25 個と 27 個でシム総量が少ない。この結果を受け、また、ポケット数が必要以上に多いと作業が煩雑になることを避けるため、25 個/トレイのポケット数とする。

なお、軸方向幅  $W_z = 14$  cm とする場合、シム片量が 2800 cc 程度と推定したが、実機では各種の誤差磁場が混入する。このため、実機でシム総量を過大にしないという観点から、 $W_z = 13$  cm が最大縦方向幅と考える。

### 3.3 討論

#### 3.3.1 磁石軸に垂直な磁場成分

文献[5]でも議論したように軸に垂直な磁場成分は計測が難しいと共に、磁場再構成も難しい。特に、

$$\frac{\partial b_y}{\partial X} = \frac{\partial b_x}{\partial Y}, \quad (20)$$

に従う磁場成分の再構成は不可である。これらの成分が小さい場合には、ここで説明した再構成手法で精度良く磁場再構成が出来ると言える。しかし、磁石軸に傾きがある場合、容易に一樣な  $b_x$ ,  $b_y$  成分が発生し得る。この成分が実験に与える影響は今後議論する必要があるが、磁場分布を目標磁場分布にシミングするというだけでは、単に一樣な磁場強度がわずかに上乘せされるのみで、シミングへの影響は小さいと考える。しかし、何らかの方法で、例えばミュオン起動を把握するなどして、 $b_x$ ,  $b_y$  成分を把握することが必要になってくると考える。

nmr 磁気センサーの計測値  $b^{MS}$  は磁場絶対値の、

$$b^{MS} = (b_z^0 + b_z^{ER}) \left( 1.0 + \frac{(b_1^0 + b_1^{ER})^2}{2.0 \times (b_z^0 + b_z^{ER})^2} \right) \quad (21)$$

であるが、シミング計算では軸方向成分として計算する。本磁石のように磁石軸方法の磁場成分以外の成分(軸に垂直な磁場成分  $b_1$  が小さい磁石では、 $b_1$  が  $b^{MS}$  に与える影響は小さく、この考えは妥当である。しかし、実機では何らかの方法で、 $b_1$  強さの確認が必要である。

#### 3.3.2 シミング作業に要する時間

MRI 用の磁石であれば、1, 2 日で行うシミング作業である。しかし、本磁石のシミングにどの程度の時間を要するかは現状では不明で、特に、磁石の消磁・励磁時間、シムトレイ取り出し・挿入の作業時間、について不明である。また、一樣磁場のコイル励磁後、WFF 励磁後のシミング作業と順を追ってシミングする計画である。そのため、MRI 磁石の場合に比べ、大幅に長い時間を要すると考える。さらに、新設計・製作の本磁石の場合、磁場分布を正確に把握するために細かい磁場計測も行う。これらのため、最初のシミングが完了するには、数ヶ月の時間が必要と考えている。

## 4. まとめ

ミュオンの g-2/EDM 計測実験用の磁石で、ミュオン蓄積領域の磁場を理想的な磁場分布に調整する磁場シミングの機構について設計検討を行った。手法は、

- 計測磁場から磁場分布を再構成
- 再構成された磁場評価点の磁場を補正するシム片配置計算

からなるシミング計算法を開発し、計算上の仮想シミングを行う方法である。そして、シムトレイ本数 20 本で、シムポケットは 25 個/トレイとすることで、大きな誤差磁場でもより少ないシム片量でシミングできること、及び、シム片の最小単位を鉄片 0.0063 cc (ニッケル片では 0.021 cc) が妥当であることが判った。

## 謝辞

本研究は、科研費 19H00673, 20H05625 の助成を受けています。感謝します。

## 参考文献

- [1] H. Iinuma *et al.*, “Three-dimensional spiral injection scheme for  $g$ -2/EDM experiment at J-PARC”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, vol. 832, pp. 51-62 (2016).
- [2] M. Abe *et al.*, “Magnetic design and method of a superconducting magnet for muon  $g$ -2/EDM precise measurements in a cylindrical volume with homogeneous magnetic field”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, vol. 890, pp. 51-63 (2018).
- [3] T. C. Cosmos, M. Parizh, “Advances in whole-body MRI magnets”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 21, pp. 2104-2109 (2011).
- [4] 阿部充志, “10.  $g$ -2/EDM 超伝導電磁石開発とMRI への精密磁場技術”, 高エネルギー加速器セミナーOHO’22, 2022年OHOセミナー超伝導磁石技術, 2022年9月.
- [5] M. Abe *et al.*, “Magnetic Field Shimming Strategy of Muon Storage Magnet for  $g$ -2/EDM Precision Measurement”, 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2019), Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 95-100.
- [6] M. Abe *et al.*, “Static Magnetic Field Shimming Calculation Using TSVD Regularization Considering Constraints of Iron Pieces Placements,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 27, 4400812 (2017).
- [7] 阿部充志 他, “TSVD シミング計算とMRI 磁石を用いた超良好一様( $\pm 0.1$  ppm)磁場実現のシミング試験”, 低温工学, 第 58 巻, pp. 132-139 (2023), <https://doi.org/10.2221/jcsj.58.132>
- [8] M. Abe *et al.*, “Design of weak focus field coil to stabilize muon orbits and for precision measurements of  $g$ -2/EDM in the superconducting muon storage magnet”, 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug. 29 - Sep. 1, 2023, pp. 245-249.
- [9] K. Sasaki *et al.*, “Development of precise shimming technique with materials having low saturation magnetization”, IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 32, 9002109 (2022).
- [10] M. Abe *et al.*, “Magnetic field tuning support system, and magnetic field tuning method”, Japanese Patent no. 6368849, Jul. 13, 2018 (in Japanese), 阿部充志ら, 「磁場調整支援システムおよび磁場調整方法」, 特許第 6368849 号, 2018年7月13日登録.
- [11] M. Abe, “Passive shimming of MRI static magnetic field using regularization of truncated singular value decomposition”, Magnetic Resonance in Medical Sciences, vol. 16, no. 4, pp. 284-296 (2017). <https://doi.org/10.2463/mrms.mp.2016-0046>
- [12] M. Abe and K. Shibata, “Consideration on current and coil block placements with good homogeneity for MRI magnets using truncated SVD”, IEEE Trans. Magn., vol. 49, pp. 2873-2880 (2013).
- [13] M. Abe and K. Shibata, “Coil block designs with good homogeneity for MRI magnets based on SVD eigenmode strength”, IEEE Trans. Magn., vol. 51, 7002713 (2015).