

## 磁気記録を利用した電磁石磁場マッピング手法の開発

### DEVELOPMENT OF MAGNETIC FIELD MAPPING METHOD FOR ACCELERATOR MAGNET USING MAGNETIC RECORDING

武藤史真<sup>#,A)</sup>, 青木和也<sup>A)</sup>, 上利恵三<sup>A)</sup>, 秋山裕信<sup>A)</sup>, 家入正治<sup>A)</sup>, 石田正紀<sup>B)</sup>, 倉崎るり<sup>A)</sup>, 里嘉典<sup>A)</sup>,  
澤田真也<sup>A)</sup>, 白壁義久<sup>A)</sup>, 高橋俊行<sup>A)</sup>, 高橋仁<sup>A)</sup>, 田中万博<sup>A)</sup>, 豊田晃久<sup>A)</sup>, 広瀬恵理奈<sup>A)</sup>,  
皆川道文<sup>A)</sup>, 森野雄平<sup>A)</sup>, 山我拓巳<sup>A)</sup>, 山野井豊<sup>A)</sup>, 渡辺丈晃<sup>A)</sup>

Fumimasa Muto<sup>#,A)</sup>, Kazuya Aoki<sup>A)</sup>, Keizo Agari<sup>A)</sup>, Hironobu Akiyama<sup>A)</sup>, Masaharu Ieiri<sup>A)</sup>, Masaki Ishida<sup>B)</sup>,  
Ruri Kurasaki<sup>A)</sup>, Yoshinori Sato<sup>A)</sup>, Shinya Sawada<sup>A)</sup>, Yoshihisa Shirakabe<sup>A)</sup>, Toshiyuki Takahashi<sup>A)</sup>,  
Hitoshi Takahashi<sup>A)</sup>, Kazuhiro Tanaka<sup>A)</sup>, Akihisa Toyoda<sup>A)</sup>, Erina Hirose<sup>A)</sup>, Michifumi Minakawa<sup>A)</sup>,  
Yuhei Morino<sup>A)</sup>, Takumi Yamaga<sup>A)</sup>, Yutaka Yamanoi<sup>A)</sup>, Hiroaki Watanabe<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

<sup>B)</sup> Applied Research Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

#### Abstract

A technique of magnetic-field measurements using resin sheets mixed with magnetic materials was investigated for the application of in-situ magnetic-field mapping of magnets, such as accelerator radioactive magnets in narrow spaces, and complex-shaped spectrometer magnets. These sheets can record the magnetic-field distribution as a magnetization distribution. In this study, three types of magnetic materials, ferrite, neodymium, and samarium-iron, were examined. Based on the measured relationship between the magnetization of the sheet and the magnetic-field strength, the performance of the magnetic-field mapping was evaluated.

#### 1. 加速器電磁石の磁場測定における課題

近年の大型加速器施設では、ビーム運動量の増加や高強度化に伴い、電磁石の大型化に加え、実験に使用されるスペクトロメータ電磁石等の形状複雑化が進んでいる。これらの電磁石の磁場測定には非常に大掛かりな測定装置が必要になり、例えば、J-PARC で運用されているスペクトロメータ電磁石では、数平方メートルの測定範囲をカバーできる測定機器が必要になる。磁場計測の方法としては、ホール素子、NMR、サーチコイル等による手法が挙げられるが、DC 電磁石であれば、ホール素子を用いた測定が一般的である。そのため Fig. 1 に示した写真のように、ホール素子を 3 軸に走査できる大型の磁場測定器に、電磁石本体を正確に位置出しすることで、磁場マッピング(3次元位置(x, y, z)に対応する3次元磁場( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ ))を行うことが出来る。しかし、大型電磁石の長い磁極長間でホール素子を精度よく走査させることは困難であり、アーク形状を持つ偏向電磁石の場合には、電磁石の両端からホール素子を挿入・走査させねばならない。電磁石の分解や移動が簡単であれば、ホール素子の設置も容易となるかもしれないが、設置に数ヶ月を要する大型電磁石や、付近で長時間の作業が行えない放射化電磁石の磁場測定は簡単ではない。そうすると、電磁石ごとに専用の走査機器を作成することが唯一の磁場マッピング手法となるが、非常に高コストである。そのため、現場で手軽に磁場分布を確認する手段がなく、代替の測定として磁場のスポット測定から磁石全体の磁場を推測するといった手法が用いられているのが現状である。

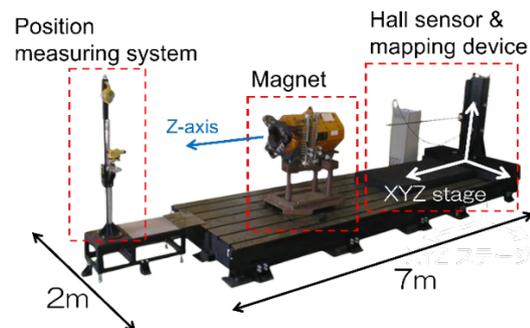


Figure 1: An example of 3-dimensional magnetic field measuring instrument.

#### 2. 磁気記録を利用した磁場測定手法

本研究では磁性材料で作られた磁性シートに電磁石磁場分布を磁気記録として写し取る新しい磁場測定手法を考案し、より手軽で作業時間の少ない磁場マッピング手法として利用できるか検討する。Figure 2 に考案する測定手法の概要を示した。本手法では、脱磁された磁性シートを電磁石の磁極間に挿入し、電磁石自身の磁場で着磁する。十分な保磁力を持つ磁性シートを用いれば電磁石の磁場分布を磁性シートの磁化分布として写し取ることができる。シートに記録される磁化ベクトルは各磁区ごとに、着磁時の磁場ベクトルの方向を保持するため、着磁ベクトル( $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$ )の強度に依存して、磁化ベクトル( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ )として記録される。ゆえに、着磁ベクトルと磁化ベクトルの強度比の相関関係を正確に知ることができれば、磁性シートの磁化ベクトル分布から、着磁時の電磁石の磁場ベクトル分布を推定出来る。

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

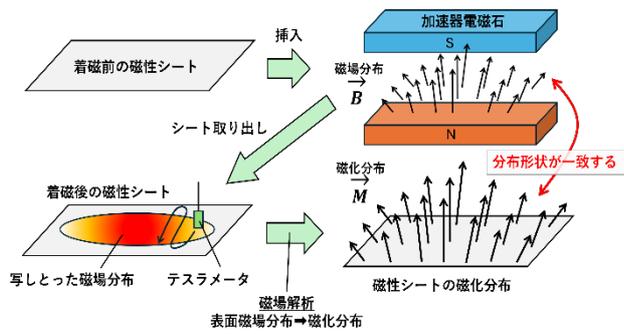


Figure 2: Overview of the magnetic field mapping method with magnetic sheets.

磁性シートに記録された磁化ベクトルは、Fig. 2 に示すように、磁性シート周囲に表面磁場を作り出す。この表面磁場分布はテスラメータで読み取ることができ、その表面磁場情報を元に逆問題として磁場解析(5章にて後述)を行うことで、表面磁場から磁化分布を推定することができる。この手法では、十分な大きさの磁性シートを電磁石ギャップ間に取り付けるだけで、電磁石の磁場分布を一度に記録できるため、Fig. 1 に示すような大型の走査ステージは必要なくなる。そのため、複雑な形状の電磁石の磁場マッピングが手軽に行える。放射化電磁石が対象だとしても、周囲での作業時間を極めて短時間に抑えられることから、従来手法に比べて磁場マッピングを行うハードルは大きく下がる。特にビームラインに設置済みの電磁石の磁場測定に効力を発揮することができると考えられる。一方で、本手法における磁場測定精度は、従来手法と比べて多くのパラメータから影響を受けることが予想される。たとえば、①磁性シートに含まれる磁性材料の均一性、②表面磁場を読み取るテスラメータの測定誤差、③表面磁場から磁化分布を計算する際の推定誤差、などが挙げられる。本研究では、常伝導磁石の最大磁場 2.2 T まで測定が行えると予想される 3 種類の磁性材料からなるシートについて、上記の①-③の項目を確認し、着磁磁場の測定精度を比較する。

### 3. 磁性シートの選定

本研究で採用するマグネットシートは磁性材料粉末を塩素化ポリエチレン樹脂(CPE)練りこんだものである。こ

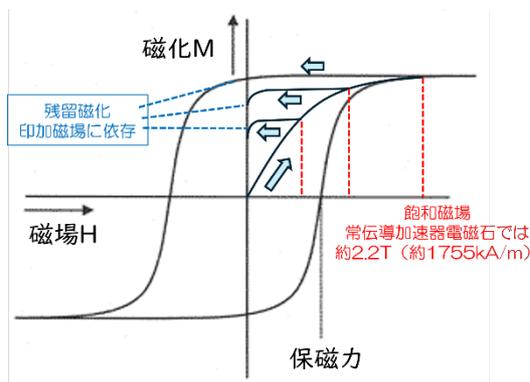


Figure 3: Relation between magnetizing field and magnetization in magnetic sheets.

の粉末磁性体は Fig. 3 に示すように、印加磁場強度に依存して磁化される。本研究で対象とする常伝導磁石の最大磁場は約 2.2 T であるため、粉末磁性材が磁気飽和する時の着磁磁場である飽和磁場は 2.2 T (1755 kA/m) 以上でなければならない。飽和磁場は磁性材料によって異なるが、一般的に保磁力  $iH_c$  の 3~5 倍程度であるため、磁性シートには最低でも 350 kA/m 以上の保磁力  $iH_c$  が求められる。加えて、シートの表面磁場を精度よく測定するために、できる限り高い表面磁場を持つシートを選定する。シート形状は、大型電磁石に対応できる大面積かつなるべく薄い形状のものが良いが、シート厚が薄くなるほど表面磁場も小さくなってしまふ。本研究ではメーカーカタログ[1]に記載された保磁力、表面磁場から飽和磁場を推定し、シート厚は 1 mm とした。Table 1 に選定した磁性シートの磁気特性を記載する。保磁力が十分であり、表面磁場もテスラメータで測定可能な 100 mT 程度の磁性シートとしてネオジム、サマリウム鉄シートを選定した。フェライト(等方性)については、飽和磁場、保磁力が基準を満たしていないが、保磁力に対する表面磁場が大きいと、低磁場領域で他の磁性材料をしのぐ感度があることが推察され、本研究で比較することとした。ちなみに、フェライトには異方性タイプのものも製造されており、等方性タイプに比べて表面磁場が強いことが知られている。しかし、異方性タイプは特定の方向に着磁される特性があるため、磁化ベクトルの方向が、着磁ベクトルの方向を保持しない可能性が高い。電磁石中心部のような一様方向磁場である領域のみで使用するには向いているが、電磁石端部のように一様磁場でない領域には向かない。そこで本研究では測定位置を選ばない等方性タイプを選定している。

Table 1: Performance Comparison of Magnet Sheets

磁性材料 シート厚: 1 mm	飽和磁場 [T]	保磁力 $iH_c$ [kA/m]	表面磁場 [mT]
選定基準	> 2.2	> 350	大ほど有利
フェライト(等方性)	0.7~1.2	190	44
ネオジム	2.3~3.9	620	100
サマリウム鉄	3.4~5.8	920	120

Table 1 に示した磁性シートに含まれる磁性材料の均一性を確認するため、SEM/EDS による元素分析を実施した。磁性シートは CPE と磁性体粉末を混練機で練り合わせ、押し出し成形することによって製作される。混練が不十分な場合には、磁性体比率の偏りが生じ、シートが一様に着磁できなくなる。本研究では、磁性シートの表面磁場測定に島津理化製磁気センサ PS-3221 を使用した。磁気感部の寸法が約  $1 \text{ mm}^2$  であるため、磁性シート内の

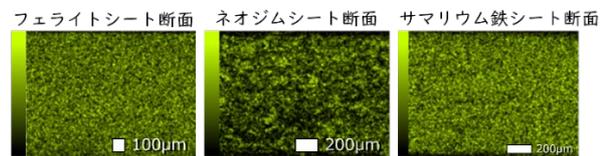


Figure 4: SEM images showing iron abundance distribution of the magnetic sheets in the thickness direction.

磁性体粉末も同程度のスケール内では均一になっていることが重要である。Figure 4 は SEM で確認した磁性シート断面における Fe 元素分布である。色が濃いほど Fe 元素からのスペクトル強度が高いことを示している。フェライト、サマリウム鉄については、数 $\mu\text{m}$ 程度の細かなコアが満遍なく断面に分布しているが、ネオジウムについては、他のシートに比べて濃淡があり、磁性体粉末が不均一であることが分かる。しかし、数か所の測定でも同程度の濃淡であることが確認できており、1 mm<sup>2</sup>程度のスケールであれば、3種類のシートは全て十分に磁性体粉末が混練されていることが確認された。また、SEM/EDSによるX線スペクトルから同定した元素における半定量値分析では、同一試料内では磁性材料の半定量値が同程度であり、100×100 mm 程度のシート内での材料不均一性は確認されなかった。

#### 4. 磁性シートの着磁試験

Table 1 で示した 3 種類のシートを実際に偏向電磁石で着磁し、着磁磁場と磁化強度の相関を確認した。まず既存の Fig. 1 に示した 3 軸走査型測定器[2]に電磁石を設置し、従来のホール素子による磁場マッピングを実施することで、着磁時の磁場を確認できるようにセットアップした。Figure 5 はホール素子で測定した偏向電磁石の Z 軸上の磁場強度である。領域①で示した磁石中心部は Good Field Region と呼ばれる磁場一定領域であり、着磁する磁性シート幅が 100 mm 程度であれば、磁性シート全体を均一に着磁することができる。運転電流を調整することで任意の着磁磁場で均一に着磁できるため、着磁強度と磁化強度の対応を確認するのに向いている領域である。一方で、領域②は磁極長の外側であるため、急激に磁場強度が下がっている。この領域に磁性シートを設置すれば、1 枚のシート内で大きく着磁磁場を偏らせて着磁できる。シートの表面磁場から磁化分布を推定するにあたり、着磁磁場の偏りが推定に影響を与えないか確認するために使用する。着磁した磁性シートは Fig. 6 に示したシートステージによって 0.1 mm 程度の位置精度で表面磁場測定器に固定され、3 軸磁気センサによって、シート表面の磁場分布を測定する。Figure 7 に実測した表面磁場分布を示した。左図は Fig. 5 で示した領域

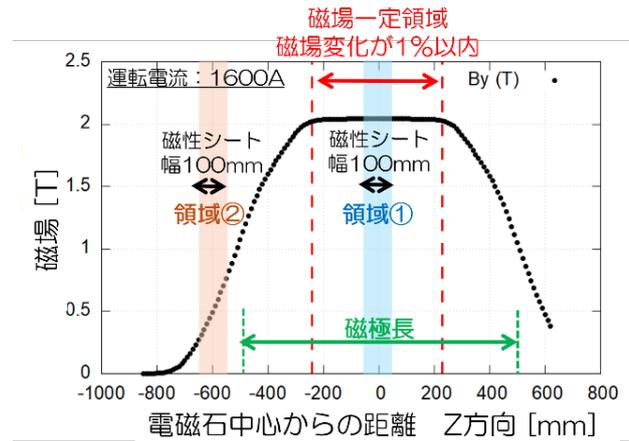


Figure 5: Magnetic field distribution on the z axis of the dipole magnet used for magnetization tests.

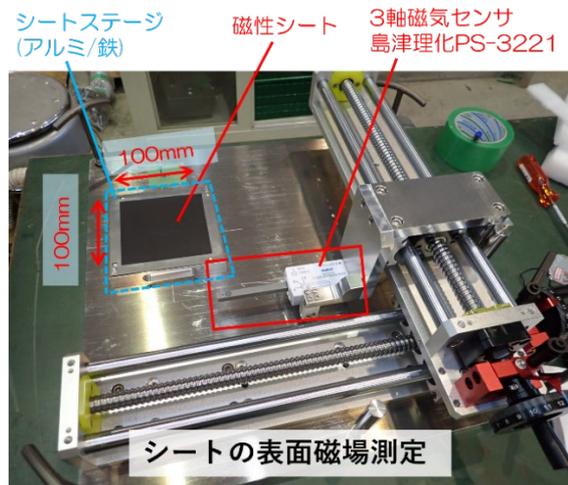


Figure 6: Surface magnetic field measuring instrument for the magnetic sheets.

①で着磁したシート、右図は領域②で着磁したシートの表面磁場であり、Z 軸は Fig. 5 の座標に対応している。表面磁場は、シート表面から裏面へと回り込む経路を取

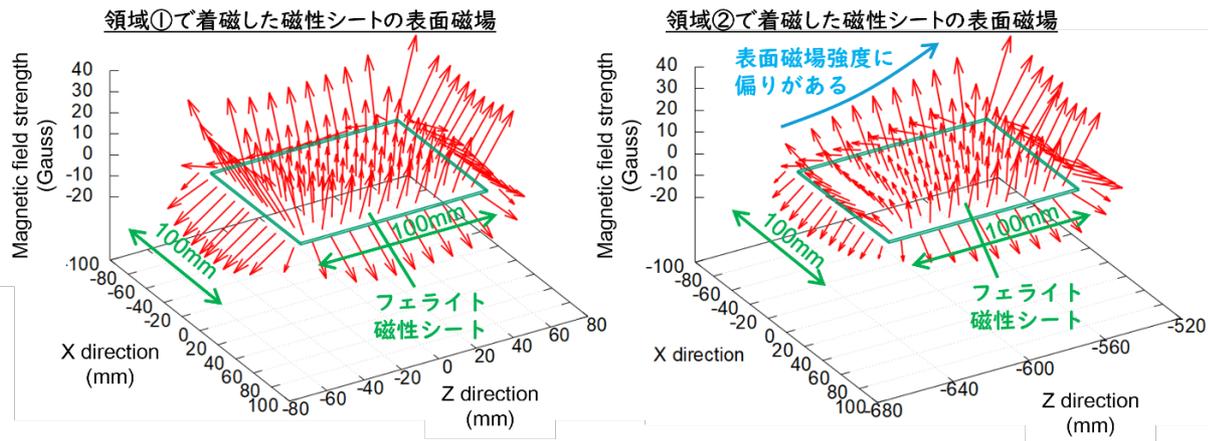


Figure 7: Measured surface magnetic field distribution of the ferrite magnetic sheet. Left figure shows measured data in the uniform magnetic field (Region 1), and right shows measured data in the non-uniform magnetic field (Region 2).

るため、シート中心部の磁場は経路が長くなり、磁場強度も弱まる特徴がある。そのため、シート端部は磁場強度が強く、中心部は弱いという分布をとるが、領域①で着磁したシートは一樣な磁場で着磁しているため、シート中心に対して対称な磁場分布である。一方で、領域②で着磁したシートには磁場強度に偏りがあり、Z が大きい(磁石中心に近い)ほど磁場強度が強くなる分布となる。

### 5. 磁性シートの磁化分布推定

4 章で取得した表面磁場情報から、磁性シートの磁化分布を推定する。推定には、株式会社フオン製の磁気モーメント法による 3 次元静磁場解析シミュレータ MAGTZ を使用した[3]。Figure 8 に示すようにシミュレータ上に 100×100 mm(厚さ 1 mm)の磁性シートをモデリングし、シートを 20×20 mm ごとの要素に分割する。各要素は要素内で磁化を一定とし、要素内の磁化  $\vec{M}_n$  が分かっているとき点  $X_p$  に  $\vec{M}_n$  がつくる磁場  $\vec{B}_n$  は、式(1)で求められる。

$$\vec{B}_n(\vec{X}_p) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\text{rot } \vec{M}_n(\vec{X}_p) \times \vec{R}}{|\vec{R}|^3} dV \quad (1)$$

この各要素からの  $\vec{B}_n$  を合計した磁場ベクトル  $\vec{B}_p$  の i 成分を  $B_{pi}$  としたとき、これを 4 章で実測した表面磁場の i 成分である  $\overline{B}_{pi}$  と式(2)を用いて比較する。

$$\Psi = \sum_{pi} \frac{1}{2} (B_{pi} - \overline{B}_{pi})^2 \quad (2)$$

この  $\Psi$  が最小となるように、各要素の磁化ベクトルを求める。この式の極値は、両辺を  $M_{ni}$  で微分したものをゼロと置くことによって得られる方程式によって求めることができる。しかし、この方程式の解は一意ではないため、近傍の要素の磁化方向ができるだけ同じ向きになるような条件をつけて解を求める。具体的には、 $g_{nm}$  を n 番目の要素と m 番目の要素の距離に依存する正の係数として、式(3)を定める。

$$\sum_{n \neq m} g_{n,m} \vec{M}_n \cdot \vec{M}_m \quad (3)$$

この式(3)をできるだけ大きくするという付帯条件をつける

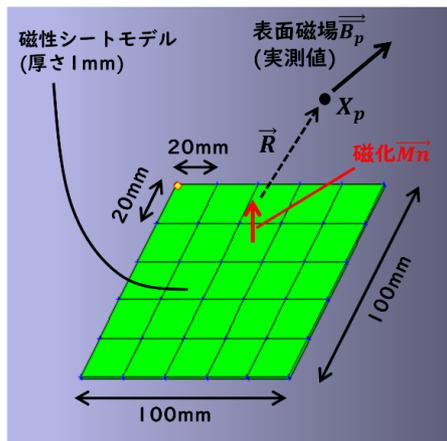


Figure 8: Model for evaluating magnetization of the magnetic sheets.

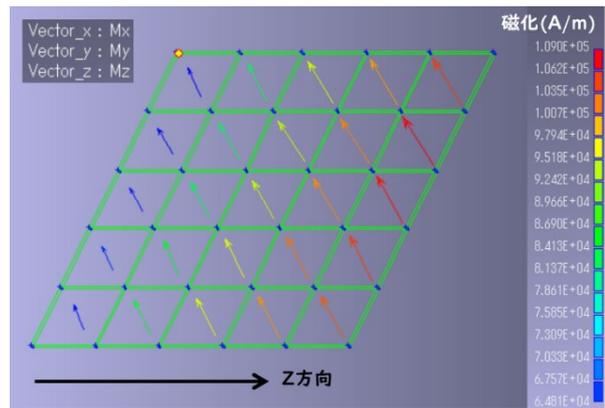


Figure 9: Example of magnetization estimation result for ferrite magnet sheet.

ことで、式(2)を最小にする磁化ベクトルを求めることが出来る。 $g_{nm}$ には、この条件の強さを表すスカラー値  $\lambda$  の任意性があり、 $\lambda$  が大きいほど安定した解が得られるが、一方で精度が小さくなる。本研究ではシミュレータのデフォルト値である  $\lambda = 10^{-3}$  を採用している。解の安定性は、磁性シートの分割数にも関係がある。今回の解析では Fig. 8 に示したように 100×100 mm のシートを 5×5 の 25 要素に分割したが、要素数が増えるほど、式(2)を最小とする  $M_{ni}$  が見つけ難く、現実的ではない局所解に陥ってしまう。そのため、より小さいスケールでの磁化分布(着磁磁場分布)を調べるためにはシートを 100×100 mm より小さく切り、その小さいシートごとに表面磁場を測定し、モデル上の要素数は 25 程度を維持して磁化推定を行う必要がある。

次に実際の磁化推定結果について紹介する。Figure 9 に示したのは、Fig. 7 右図に示した表面磁場情報から推定したフェライト磁性シートの磁化分布である。この磁性シートは Fig. 5 に示した領域②で着磁したシートであるため、Z 位置が大きいほど、強く着磁されている。推定された磁化も Z 位置が大きいほど大きい磁化になっており、磁化ベクトルは My 成分が大部分を占める。実際に、シートは By 成分(0.35~0.77 T)で強く着磁され、Bx, Bz 成分(最大 0.03 T)では、ほとんど着磁されていない

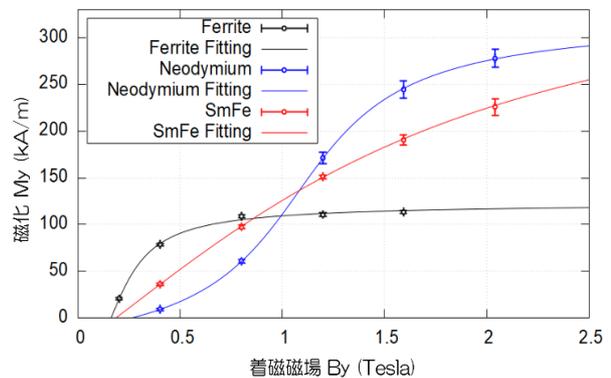


Figure 10: Results of B-M curves: relationship between the magnetic-field strength applied to the magnetic sheets and measured magnetization of the magnetic sheets in the Region 1.

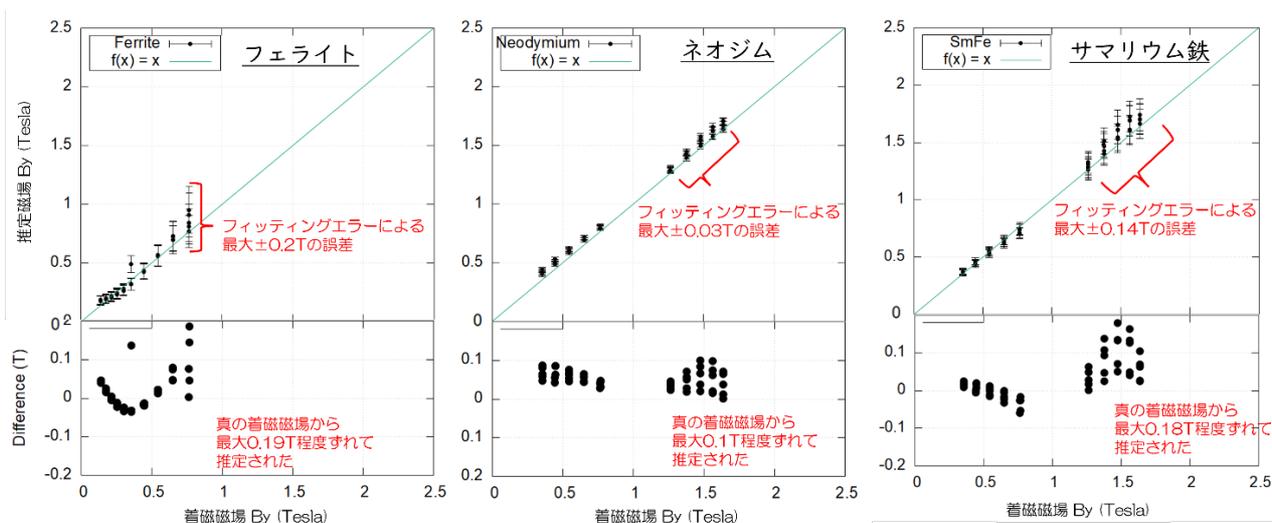


Figure 11: Comparison between the estimated magnetic-field strength in Region 2 and the applied magnetic-field strength in the magnetization of the magnetic sheets. Left, center and right show the comparison for ferrite, neodymium and samarium-iron, respectively.

い。このことから、推定された磁化ベクトルは着磁ベクトルの向きを正しく保持していることが推察される。一方で、Fig. 5 に示した領域①で均一に着磁したシートの表面磁場情報から推定した磁性シートの着磁磁場と磁化の対応を示したのが Fig. 10 である。Table. 1 に示した 3 種類の磁性シートを 0.2~2.1 T の範囲で着磁し、それぞれ磁化を推定している。フィッティングには下記の(4)式を用いた。

$$M(x) = A \tan^{-1}(Bx + C) + D \quad (4)$$

ここで、 $M$  は推定する磁化  $M_y$ 、 $x$  は着磁磁場である。フィッティングパラメータである  $A$  は飽和磁化、 $B$  は磁化遷移パラメータ、 $C$ 、 $D$  はシートに残留磁化が存在した場合の補正変数である。Figure 10 に示した結果は Table. 1 の磁性材性能から予想されていた結果と一致しており、実測によって得られたフィッティングパラメータと(4)式によって、磁化から着磁量を推定可能となった。Figure 11 上グラフに示したのは Fig. 9 のように領域②で着磁したシートの表面磁化から計算した磁化から Fig. 10 の結果と式(4)を用いて、磁化から着磁磁場を推定した結果である。実際の着磁磁場が横軸、推定した磁場が縦軸である。どのシートも 1:1 の対応を示す緑線上に沿って推定できているが、着磁磁場が大きくなるほど、Fig. 10 に示すように磁化が飽和点に近く、(4)式のフィッティングエラーによる誤差も大きくなる。フィッティングエラーは、Fig. 10 のデータ点数が少ないことが主な原因であり、今後さらに統計を貯めていくことで改善すると思われる。一方、Fig. 10 下グラフは、推定磁場と実際の着磁磁場の差を示している。どのシートも全体的に推定値が実際の値より 0~0.1 T ほど大きく推定されており、系統的なズレが生じている。原因としては、測定時の温度差によって、磁性シートの表面磁場が変動している可能性が考えられる。加えて表面磁場を測定しているホール素子の温度依存性も、今回の分析では考慮に入れていない。実際に、Fig. 10 の測定時と Fig. 11 の測定時では約 20°C 近くの温度差があるが、表面磁場、ホール素子の温度効果が考慮されてお

らず、0~0.2 T という大きいズレが生じていると考えられる。

## 6. まとめ

大型で複雑な形状を持つスペクトロメータ電磁石や、周囲で長時間の作業が行えない放射化電磁石の手軽な磁場マッピング手法として、磁性材料を練りこんだ樹脂シートに着磁磁場を磁化分布として写し取る磁場測定手法を検討した。本測定に適した磁性シートとしてフェライト、ネオジウム、サマリウム鉄の 3 種類のシートを選定し、電磁石の安定磁場領域で B-M 曲線を測定した。この結果をもとにシート磁化量から着磁時の磁場を推定できるようになった。磁化からの磁場推定の実証として、Fig. 5 領域②で示したように偏った磁場で着磁されたシートの磁化分布を Fig. 9 のように計算し、得られた磁化から Fig. 11 のように着磁磁場を推定した。実際の着磁磁場からフィッティングエラーで最大 0.2 T、系統的なズレが最大 0.19 T ほど生じており、おおよその着磁強度の推定には使用できるが、まだまだ実用的な推定精度とは言い難い。フィッティングエラーによる誤差は今後さらに校正点を貯めていくことで改善すると思われる。一方で、系統的なズレは磁性シートや表面磁場を測定しているホール素子の温度管理等の管理が必要な可能性を示している。

## 謝辞

本研究は、第一三共「はばたく次世代」応援寄付プログラムの支援により実施されたものです。

## 参考文献

- [1] 株式会社マグナ 製品カタログ Vol.30(2024.6 改訂), <https://www.magna-tokyo.com/outtech/catalog>
- [2] E. Hirose *et al.*, "A new 3-axis magnetic field measurement system based on Hall elements", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, VOL. 14, NO. 2, JUNE 2004.
- [3] 株式会社フoton PHOTO-Series MAGTZ ユーザーズマニュアル, <https://www.photon-cae.co.jp/product/photo-series>