A Method for Decreasing Magnetic Shaking Leakage from Separated Magnetic Shields by Combining an Additional Shaking Coil in Reverse Direction

R. Takahashi, Y. Nakashima, and I. Sasada*

Interdisciplinary Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu Univ., 6-1 Kasuga-kōen, Kasuga-shi, Fukuoka 816-8580, Japan

*Faculty of Engineering Sciences, Kyushu Univ., 6-1 Kasuga-kōen, Kasuga-shi, Fukuoka 816-8580, Japan

In actual magnetic shielding applications, having easy access to the internal space volume of the shield is essential. We propose a new model of the shield composed of two separate cylindrical halves with a flat extension. The leakage magnetic field is calculated by using the finite element method on several models of magnetic shields in which two configurations of the conductor location of shaking coils and the ratio of two shaking coil currents are used as design parameters. We found that using the combination of two shaking currents, one positive and the other negative, and adjusting their ratios was effective in reducing the magnetic leakage.

Key words: magnetic shield, separated cylindrical magnetic shield, magnetic shaking, CFRP magnetic tape composite, leakage field

付加コイルによる分離型磁気シールドのシェイキング磁界漏洩低減法

高橋理恵, 中嶋祥博, 笹田一郎*

九州大学大学院総合理工学府, 福岡県春日市春日公園 6-1 (〒816-8580)

*九州大学大学院総合理工学研究院, 福岡県春日市春日公園 6-1 (〒816-8580)

1 はじめに

我々の身の回りには地磁気や様々な電子機器等から発生する環境磁界が存在し, そのような環境下で生体磁気などの低周波微小磁界を計測する際には高性能な磁気シールドが必要となる。しかし, パーマロイ金属を用いた従来の磁気シールドでは, 重量やコストがかかるわりには数 Hz 以下の低周波磁界に対して遮断性能が低いといった問題があった。

これに対し, 著者らは高角形磁性材料であるコバルト系アモルファス磁性薄帯 Metglas2705M に磁気シェイキングを施すことで, 増分透磁率が飛躍的に増大することを見出し, これを低周波磁界の磁気シールドに適用することで大きなシールド効果を得ることができることを既に報告している¹⁾。磁気シェイキングを用いることにより, パーマロイを材料として用いた磁気シールドと比較して, 少量の磁性薄帯で高いシールド効果を得ることができ, 形状を両端開口円筒形にすることでシールド空間へのアクセスを容易にすることができる²⁾。さらには, よりシールド空間へのアクセスを容易にする目的で分割型円筒形磁気シールドも作製し, その性能を報告してきた³⁾。

また, アモルファス磁性薄帯とシェイキングコイルを軽量で高剛性の CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) と一体化したアモルファス磁性薄帯/CFRP 一体化円筒形磁気シールドを提案し, サンプルを試作し, 構造と基礎特性についても報告している⁴⁾。

我々は, 分割型円筒形磁気シールドを発展させ, 現在新たな磁気シールドのモデルとして, 分離型磁気シールドを提案している⁵⁾。このシールドは, 高いシールド比を保ちながら内部空間へのアクセスの容易性を高めたものである。

磁気シェイキングには磁性体の増分透磁率を増大させシールド比を高くする利点があるが, 同時に磁束漏洩を引き起こす

欠点もある。漏洩磁界は微小磁界の計測に大きく影響するため, できるだけこれが小さくなるようにシールドを設計しなければならない。特に, 分離型磁気シールドにおいてはシールドシェル間に大きな空隙を許容するため, 漏洩磁界が大きくなるというリスクをもち, そのためこれを低減させる処置が必要となる。

その方法として, 付加コイルを用いて漏れをキャンセルする方法が有効であることを前に報告した⁶⁾。これは, 既に出来上がった磁気シールドに外部から磁性体とシェイキングコイルを付加し, シールド内部に組み込まれたコイルと付加したコイルの 2 つを用いて逆位相でシェイキングをおこなうものであった。

本論文では, この方法をさらに発展させ, シールド作製段階で 2 つのシェイキングコイルを内部構造として組み込み, それに流す電流の比を調整することによって, 漏洩磁界を大幅に低減できることを数値計算によって示す。また, 様々なモデルに関する計算を基に, 漏洩磁界の低減に適したシールドシェルの構造やシェイキングコイルの配置, そして 2 つのシェイキング電流の電流比について検討した結果を報告する。

2 シェイキング磁束の低減法

本論文で検討する分離型磁気シールドは, Fig.1 に示すように 2 つのシェルを離隔して設置するため, 生体磁気計測の際は被測定者がシールド内部空間にアクセスしやすく, また, 測定のためのセンサも導入しやすいという特長がある。しかし, 分離型磁気シールドの磁気シェルには端部があるため, シェイキング電流による漏洩磁界が, 一体である円筒型磁気シールドに比べて大きくなるという欠点があるので, その対策が必要となる。

Fig.2, Fig.3 に, シェイキングコイルを 1 つ用いたときと 2

Fig. 1 Schematic of separated magnetic shield used to measure biomagnetic field.

Fig. 2 Leakage of magnetic fluxes for single shaking current.

Fig. 3 Leakage of magnetic fluxes for mutually opposing shaking currents.

つ用いたときに生じる磁束の流れの概念図を示す。シェイキングコイルが1つのときは、磁束のバイパスの役割を果たす内側のパッシブ層があっても磁束を全て集めることは難しく、磁束は磁性体外部へ漏れてしまう。これに対して、Fig.3に示すように2つのシェイキングコイルに互いに逆方向となるように電流を流すと、漏洩磁界はキャンセルし合うので、これを小さくすることができる。これが付加コイルを用いた実験で示されたことであり、本論文ではこの方法をさらに発展させ、分離型磁気シールドに一体としてコイルを組み込み漏洩磁界低減を図るものである。

3 分離型磁気シールドのシェル構造

3.1 磁性体層の構造

今回検討した分離型磁気シールドは、幅 10 cm の平板状延伸部をもつ長さ 60 cm の2つのシェルから成り、設置時の断面構造が異なる2種である。Fig.4, Fig.5には、これらの構造をシールドの片側につき示している。ただし、各シェルの磁性体層は実際はそれぞれ厚みをもつが、図中では構造が明確になるよう線のみで表現している。各シェルの磁性層は、アモルファス磁性薄帯 (Metglas2705M) を多数積層することで作製するも

Fig. 4 Structure of magnetic shell shown for one half (elliptic type).

Fig. 5 Structure of magnetic shell shown for one half (circle type).

のとする。各層の積層数は、最内層を 110 (合計厚 = 2.2 mm)、中央層を 110 (2.2 mm)、最外層を 100 (2 mm) とする。また、図中の x 軸は、2つの磁気シールドを組み合わせたときの対称面になっている (Fig.8, Fig.9 参照)。

Fig.4の磁気シールドは、主構造が半円形のものである。今回2つのシールドシェルは 10 cm の空隙をあけて設置することを想定したため、このシールド全体の断面構造は長軸 30 cm、短軸 20 cm の略楕円型形状となる。そこで、本稿ではこの形状の磁気シールドを楕円型分離型磁気シールドと呼ぶこととする。

また、Fig.5の磁気シールドは、その2つのシールドを離隔して設置したときにシールド断面が円型となるものである。本稿では、この形状の磁気シールドを円型分離型磁気シールドと呼ぶこととする。ここでも、2つのシールドシェルは 10 cm の空隙をあけて設置することを想定し、設置時の断面の直径が楕円型分離型磁気シールドのシェル間に 10 cm の空隙をあけて使用した時の断面の楕円の長軸の長さと同じになるように、パラメータを設定した。

3.2 シェイキングコイルのタイプ

シェイキングコイルの配置は、Fig.6, Fig.7に示す2つのタイプについて検討する。ここで、使用するシェイキングコイルは平角導線 (厚さ 0.3 mm、幅 1 mm) としている。

Fig.6には、2つのシェイキングコイルの導体が半径方向同一直線上に配置されるものを示している。このようなコイル導体配置をコイルタイプ A と呼ぶものとする。シェイキングコ

Fig. 6 Structure of corner part of one shell of shield (coil-type A).

Fig. 7 Structure of corner part of one shell of shield (coil-type B).

イルはそれぞれのシェルについて、中央磁性体層の周りに 19 ターン、最外磁性体層のまわりに 19 ターン巻いている。しかし、コイルタイプ A では 2 つのコイル導体を互いに絶縁して重ねなければならない、実際にシールドを作製するのが面倒である。

そこで、Fig.7 に示すような 2 対のコイル導体を交互に配置するものも検討する。このようなコイル導体配置をコイルタイプ B と呼ぶものとする。コイルタイプ B では、2 つのシェイキングコイルの導体を最外磁性体層と中央磁性体層の間中部に他の部分よりも本数を多く配置し、内側のコイル対と外側のコイル対が順番に並ぶようにしたものを示している。またこのとき、対称性を考えて、内側と外側のシェイキングコイルの巻数は、外側のシェイキングコイルが 19 ターン、内側のシェイキングコイルが 20 ターンとしている。

4 漏洩磁界の評価

計算には有限要素法解析パッケージ COMSOL を用いた。今回は簡単のため、シェイキング電流を交流電流ではなく直流電流とした直流解析を行う。

4.1 計算方法

今回検討した磁気シールドは全て境界 (Fig.4, Fig.5 の x 軸) を挟んで対称な構造であるため、有限要素法解析では片側のシェルのみ考えた。2 つのシェイキング電流を印加したときに生じる漏洩磁界は、Fig.4, Fig.5 中に示した線分 PQ 上で、磁束密度の絶対値で評価した。

印加するシェイキング電流について、内側のシェイキング電流 1 (I_{S1}) と外側のシェイキング電流 2 (I_{S2}) は互いに逆方向としているが、1 対の磁気シェルを考えると、各磁気シェルを流れる磁束の向きの組み合わせは、Fig.8 及び Fig.9 の 2 通りがある。そこで x 軸の境界条件は、Fig.8 を考えるときはノインマン型境界条件とし、Fig.9 を考えるときはディリクレ型境界条件とした。

漏洩磁界の評価の際には、 I_{S1} に対する I_{S2} の電流値の比を変え、それによる漏洩磁界の変化を調べた。このとき、シェイキング条件を同一に保つことが必要であるので、今回は 3 層あ

Fig. 8 Magnetic fluxes distributed in rotational symmetry.

Fig. 9 Magnetic fluxes distributed in mirror symmetry.

る磁性体層のうち、中央の磁性体層の磁束密度が 0.2 T となるように計算結果に調整を加えた。つまり、線形モデルを用いているので、 $I_{S1}:I_{S2}$ の比を一定に保ちながら双方を共に定数倍することによって、 y 軸上での中央の磁性体層の磁束密度が 0.2 T になるようにしたものである。0.2 T とは、分離型磁気シールドが最も高いシールド性能を発揮するだろうと推測される近傍のアモルファス磁性薄帯の磁束密度である。

また、磁性体の透磁率は 50000 として計算した。

4.2 計算結果

楕円型でコイルタイプ A、コイルタイプ B の磁気シールドに関して、Fig.8 の配置で評価した結果を、それぞれ Fig.10、Fig.11 に示す。図中の比は $I_{S1}:I_{S2}$ を表している。

Fig.10, Fig.11 より、2 つのシェイキング電流を用いることによってどちらも漏洩磁界が低減されており、漏洩磁界が最も小さくなる I_{S1} と I_{S2} の最適電流比が存在していることがわかる。ここで、Fig.10 と Fig.11 では、Fig.10 の方が漏洩磁界は小さくなっているが、実用化に十分な性能と作製の容易性から、コイルタイプ B について検討を進めることとした。

円型でコイルタイプ B、Fig.8 の配置で評価した結果を Fig.12 に示し、楕円型でコイルタイプ B、Fig.9 の配置で評価した結果を Fig.13 に示す。

Fig.10 ~ Fig.13 より、いずれの場合においても、2 つのシェイキング電流を用いることによる漏洩磁界低減効果が見られ、漏洩磁界を最も小さくする I_{S1} と I_{S2} の最適電流比が存在して

Fig. 10 Leakage field (elliptic type, coil-type A, rotational symmetry).

Fig. 12 Leakage field (circle type, coil-type B, rotational symmetry).

Fig. 11 Leakage field (elliptic type, coil-type B, rotational symmetry).

Fig. 13 Leakage field (elliptic type, coil-type B, mirror symmetry).

いた．今回検討した構造におけるその値は， $I_{S1}:I_{S2} = 1:6$ の前後であった．また，楕円型かつコイルタイプ A で Fig.8 のように磁束が循環するように 2 つのシェイキング電流が流れる場合が最も漏洩磁界が小さかった．しかし，楕円型かつコイルタイプ B で Fig.8 のようにシェイキング電流を流す場合の漏洩磁界も実用化に向けて十分な性能を示していた．

楕円型でコイルタイプ B，Fig.8 の配置の分離型磁気シールドで $I_{S1}:I_{S2}=1:7$ のときの計算によって得られた，定めた位置での磁束密度の絶対値を，最も大きい値を 100 としてパーセント表示したものを Fig.14，Fig.15 に示し，Fig.4 中の範囲 RSTU における磁束密度のベクトル図を Fig.16 に示す．Fig.14 の横軸の値は Fig.4 で設定した座標の y 座標の値であり，Fig.15 の横軸の値は分離型磁気シールドの中心から 45 度方向直線上での位置である．なお，このときのシェイキング電流を中央磁性体層の磁束密度が 0.2 T になるよう換算したときの値は，内側のシェイキング電流が 48.8 mA，外側のシェイキング電流が 342 mA である．

Fig.14，Fig.15 より，シェイキング電流によって磁性体部は円周方向に沿ってほぼ一様に磁化できていると考えられるため，シェイキングによるシールド効果の向上が得られていると

Fig. 14 Profile of magnetic flux density on y -axis (elliptic type, coil-type B, rotational symmetry, $I_{S1}:I_{S2}=1:7$).

考えられる．磁束の集まり方は 3 層の磁性体層でそれぞれ異なっていること，漏洩磁界低減に最適な電流比時に最内磁性体層の磁束密度はほぼゼロであることもわかる．さらに，Fig.16 より，漏洩している磁束が磁気シールドの端部から生じ，もう一

Fig. 15 Profile of magnetic flux density along 45-degree angle from x axis(elliptic type, coil-type B, rotational symmetry, $I_{S1}:I_{S2}=1:7$).

Fig. 16 Arrow plot of magnetic flux density in RSTU rectangle(elliptic type, coil-type B, rotational symmetry, $I_{S1}:I_{S2}=1:7$).

方の端部へと向かっていること、シールド中心近傍での磁束密度の値が小さいことがわかる。

評価は磁束密度の絶対値によりおこなったが、シールド中心近傍ではこれはほとんど x 方向の磁束密度 B_x によるものであり、 B_y はほぼゼロであった。

5 まとめ

今回、分離型磁気シールドにおいてシェイキング電流による漏洩磁界低減のためのシェイキング法やコイルの配置、磁気シールドの形状を変えた様々なモデルについて、有限要素法を用いて評価をおこなった。

異なった磁気セルを互いに逆向きに励磁する 2 つのシェイキング電流の大きさを変えることで、シェイキングによって漏洩する磁界の大きさをコントロールできることがわかった。

また、漏洩磁界低減のための最適電流比が存在することを示した。

今回検討した分離型磁気シールドの構造モデルにおいて、漏洩磁界の低減効果が最大であったシェイキングコイルのタイプは、コイルタイプ A であった。

しかし、実用上十分な性能を持ち、また作製の容易性から、コイルタイプ B について検討を進めた結果、形状が楕円型かつ Fig.8 の配置であるものが漏洩磁界の低減に適していた。また、コイルタイプ B の分離型磁気シールドでは、シェイキング電流比 $I_{S1}:I_{S2}$ を 1:7 程度にすることで、シールド中心近傍における漏洩磁界は 2.7 nT 程度まで低減できることがわかった。ただし、この最適な電流比には、最内磁性体層と中央磁性体層間の距離が影響を与えることに留意する必要がある。

今後は、より磁束の漏洩を低減させることができるシールド形状やコイル導体の配置、コイル巻数に関して、さらに詳しく検討していく必要がある。また、現在は簡単のために計算は直流解析でおこなっているため、この結果と実際用いる交流シェイキングとの整合性についても検討していかなければならない。

計算によって評価されたシールド中心近傍での漏洩磁界は、ほとんど x 方向の磁束によるものであり、 x 成分が y 軸に対称であるため、アキシャル構造 1 次微分型ピックアップコイルをこの対称面を考慮して配置すれば SQUID が観測する磁界はキャンセルされる。したがって、Fig.1 のように挿入されるデューワ内に鉛直方向のアキシャル構造の 1 次微分型 SQUID を利用して生体磁気計測の実用化に向けて、期待できると考えられる。

謝辞 本研究は科学研究費基盤研究 (A) の補助を受けおこなわれた。

References

- 1) I. Sasada, S. Kubo, and K. Harada: *J. Appl. Phys.*, **64**, 5696 (1988)
- 2) I. Sasada, E. Paperno, and H. Koide: *J. Appl. Phys.*, **87**, 5959 (2000)
- 3) K. Tashiro, K. Nagashima, S. Sumita, T. Fukunaga, and I. Sasada: *J. Appl. Phys.*, **93**, 6733 (2003)
- 4) I. Sasada, T. Kimura, T. Takeda, and M. Shimada: *Tech. on Magnetism, IEE Japan*, MAG-05-94 (2005) (in Japanese)
- 5) I. Sasada: 2007 Natl. Conv. Rec. IEE Japan, Toyama, 2007, Pt. 2, p. 196 (The Institute of Electrical Engineers of Japan, 2007) (in Japanese).
- 6) R. Takahashi, T. Horie, and I. Sasada: *Tech. on Magnetism, IEE Japan*, MAG-07-28 (2007) (in Japanese)

2007 年 10 月 04 日受理, 2008 年 03 月 14 日採録