磁気シールド開口端侵入磁界の能動補償

Adaptive Compensation for Intrusive Magnetic Fields Entering through an Opening in a Magnetic Shield

山内貴雄・笹田一郎

九州大学工学部電子工学科, 福岡市東区箱崎 6-10-1 (〒812-81)

T. Yamauchi and I. Sasada

Dept. of Electronics, Kyushu Univ., 10-1, Hakozaki 6-chome, Higashi-ku, Fukuoka 812-81

An opening compensation system was developed, using a feedback control scheme by which a magnetic field intruding through an opening in a cylindrical magnetic shield can be largely suppressed. Three flat coils—two cross-coupled figure-of-eight coils and a ring coil—are installed together at the opening, corresponding to the three components of a magnetic field. The compensation current to each of the coils is determined to be null. Corresponding to the reading of a triaxial flux-gate magnetometer placed inside the opening. By virtue of the orthogonality of the coil system, the compensation current for each coil can be determined independently. A uniformly shielded area in the cylindrical magnetic shield was extended toward the opening by a distance approximately equal to the radius of the cylinder.

Key words: magnetic shielding, biomagnetics, opening compensation, adaptive compensation, figure-of-eight coil

1. ま え が き

生体磁気のような微小磁界測定には、環境磁気ノイズを十分低減する磁気シールドルームが必要となる。例えば脳磁界の主要帯域は0.5~30 Hzであり、そのスペクトルは低周波に向けて減少する¹⁾。このため生体磁気測定には、特に低周波磁界をシールドすることが重要となる。著者らは、角形磁化特性をもつ磁性体に磁気シェイキングを施しシールド性能を高めるとともに、非干渉平面コイル系を用いた開口端侵入磁界補償法を適用した軽量・開構造の高性能磁気シールド法の研究を進めている^{2)~4)}。すでに実用規模の一端開口大型円筒磁気シールド（内径約68 cm、長さ180 cm、磁性体重量約72 kg）を製作し、地磁気に対し3,000, 0.5 Hzで2,700, 10 Hzで1,600の優れたシールド比が得られることを示すとともに⁵⁾、地磁気を対象とした8の字平面コイルによる開口端侵入磁界補償法の有用性を示している⁴⁾。さらに、複数の平面コイルからなる系に流す補償電流設定の自動化をはかるために、3軸磁界センサを組み込んだ閉ループ制御による能動補償法を検討している。

本論文では、シールド径方向の内部磁界分布測定および上記補償方法の周波数特性の測定から、低周波で大きな補償効果が得られることを明らかにし、さらに複数の侵入磁界成分に対する同時補償が各コイル間で干渉なく独立して行えることを示した。

2. 開口端侵入磁界能動補償の原理

2.1 円筒磁気シールド開口端侵入磁界

Fig. 1には円筒径方向に直流磁界があるとき、円筒磁気シールド内に侵入する磁界を3次元有限要素法によって解析したもので、実線がシールド断面を、矢印が中心軸を含む垂直面内の磁界分布を示している⁶⁾。ここで、シールドは外径68 cm、長さ180 cm、磁性体厚さ1.6 mm、磁性体の比透磁率30,000と仮定し、外部磁界は径方向に12.5 mGとしている。シールドの径方向に外部磁界が印加された場合、Fig. 1に示すようにシールド開口付近では、磁束密度の低いシールド内側へ磁束が押し曲げられる。このとき、円筒磁気シールドの対称性から、シールド内部磁界は中心軸上で外部印加磁界と平行になる。

また、シールド円筒軸方向に外部磁界が印加される場合は、中心軸上では磁界は軸方向成分のみで、径方向印加磁界による内部磁界と干渉することはない。

2.2 能動補償の原理

円筒磁気シールドに対し座標軸をFig. 2(a)のようにとる。外部磁界は x, y, z の3成分に分けられるので、各成分ごとに補償を行う⁷⁾。Fig. 2(a), (b)に示すように、開口面から侵入する x, y 成分の磁界に対しては円形コイルをその中心で半回転ねじった8の字平面コイルにより、それらの侵入磁界を外側に押し

Fig. 1 Magnetic field plot at an opening of the cylindrical magnetic shield, in which uniform magnetic field is applied to the shield transversely. This calculation was done by a 3D FEM program package.

(a)

(b)

Figure-of-eight flat coil

(c)

Fig. 2 Principle of compensation; (a) a typical path of the intrusive magnetic field and compensating magnetic field by a figure-of-eight flat coil to be superposed on the intrusive magnetic field, (b) installation of flat coils to the opening, and (c) actual pattern of the figure-of-eight flat coil used in this paper.

戻すように作用する磁界を重畳する。z成分に対しては円形コイルにより侵入磁界をキャンセルする補償磁界を作る。2.1で述べたようにシールド中心軸上では内部磁界の各成分は、それぞれ外部磁界の同方向成分によってのみ生じ、他の方向の成分に干渉されることはない、つまり内部磁界のx成分は外部磁界のx成分にのみ生成され、y, z成分においても同様となる。このことから、フラックスゲート磁界センサにより中心軸上開口端近くで磁界の3成分を同時検出し、各成分が零となるように各平面コイルに電流を流す。

この方法で重要なのは、各補償コイルが互いに非干渉であるという点である。そのため、各成分ごとに独立に磁界を補償できるようにしている。

3. 実験および結果

3.1 磁気シールドおよび実験装置の構成

磁気シールドの構成はすでに報告しているもの⁵⁾と同じであり、一端開口円筒形パーマロイシールド（長さ180 cm、外径68 cm、厚さ1.6 mm、重さ約60 kg）の外周にMETGLAS

Fig. 3 Experimental setup. A figure-of-eight coil and a ring coil are installed for the y-component and the z-component, of intrusive magnetic field, respectively.

2705M アモルファス磁性薄帯（幅50 mm、厚さ約22 μm ）をらせん状に16層、各層ごとに互いに逆向きになるように巻き、シェイキングコイルはアモルファス層のみを取り囲むようにトロイダル（ピッチ6 cm、36ターン）巻きしている。

Fig. 3に実験装置の構成を示す。円筒磁気シールドに対し、4 m $\times$ 2 m $\times$ 1.5 mの矩形ヘルムホルツコイルによりy方向に100 mGの低周波交流磁界を印加し、これによる開口端侵入磁界を8の字コイルにより補償して、侵入磁界を抑制することを試みた。実験に用いた8の字コイルは10ターン巻きで、Fig. 2(c)に示すように外径70 cm、直線部分は7 cmの間隔をあけて二つに分離している。補償電流は、x, y, zの3成分が同時検出可能な補償用フラックスゲート磁界センサ（分解能20 μG 、カットオフ周波数1.6 kHz）のy成分出力が零になるよう8の字コイルに流した。2.2で述べたようにシールド中心軸上は3成分が非干渉で、各成分を独立に検出できる位置であるので、補償用磁界センサは中心軸上に置くことが望ましいが、中心軸上には測定用センサを置いたため中心軸からy方向（下方）に6 cm、さらにz方向の位置依存性を調べるために開口端から20, 30, 40 cmの位置Zcに置いた。また、Fig. 3に示したシールド開口面に設置した1.5 m $\times$ 1.5 mの角形コイルにより、開口面中心において30 mGのz方向外部磁界をy方向磁界と同時に印加し、8の字コイルおよび円形コイルを用いてy, z方向の外部磁界の同時補償を行った。

3.2 閉ループ制御系の設定

Fig. 4にZc=30 cmのときの8の字コイル、センサとアンプからなる閉ループ制御系の開ループ伝達関数のボード線図を示す。補償用センサと8の字コイルによる補償磁界の結合はZcにより異なるため、同図ではZc=30 cmでのコイル定数を測定して用いている。ここで、コイル定数とは1Aの電流をコイルに流したときのセンサ位置に与える磁界によって定義した

Fig. 4 Bode plots of control system, when (a) only gain control is used, and (b) an integrator is incorporated to the gain control path as shown in Fig. 3.

Fig. 5 Effect of position Z_c of the magnetometer to the adaptive compensation.

ものである。3.1で述べた8の字コイルのコイル定数 $k = 19.6$ mG/Aであった。(a)の補償回路の伝達関数がパワーアンプによるゲイン調整のみの場合、約1.5 kHzで位相が -180° を超えており、ゲインは約2までしか上げられなかった。これに対

Fig. 6 Flux density distribution showing the performance of adaptive compensation, taking x -position as a parameter.

し、積分要素を補償回路に加え低周波でのゲインを上げた場合を(b)に示す。(b)では低周波に対する補償効果が高くなっており、以降の実験では積分要素を補償回路に入れたものを用いた。

Fig. 5には Z_c をパラメータにとり、1 Hzの交流磁界を加えたときのシールド中心軸上での補償結果を示す。補償の効果を高めるにはゲインを高くする必要があるので、ここではこの制御系が安定限界近傍ではあるが、パワーアンプのゲインをそれぞれ $Z_c = 20$ cmで9.8, $Z_c = 30$ cmで20, $Z_c = 40$ cmで38に設定した。ここで、安定限界近傍でのアンプのゲインが異なる理由は、 Z_c が小さくなるにつれてコイル定数が大きくなるのに対応している。 $Z_c = 20$ cmの場合は $z = 30 \sim 50$ cmでの残留磁束が大きくなった。 $Z_c = 40$ cmの場合は $z = 40$ cmより奥では残留磁束が小さいが、シールド内をより広く有効に利用する意味からすると、シールド半径よりわずかに小さい $Z_c = 30$ cmが妥当である。このとき0.1 mG以下に達するのは開口から30 cmであり、無補償時の開口から70 cmと比較すると磁界の侵入が大幅に抑制された。

3.3 磁界分布測定結果

3.2の補償用センサ位置 Z_c をパラメータとした実験より、 $Z_c = 30$ cmが妥当とわかったので、 $Z_c = 30$ cmとして測定を行った。

Fig. 7 Flux density distribution showing dependence of the adaptive compensation on the frequency of the applied magnetic field; (a) with compensation, (b) without compensation. (b) is shown as a reference.

Fig. 6 に x の位置をパラメータにとった, B_y の z 軸方向分布を示す。ただし、外部印加磁界は 100 mG, 1 Hz とした。 $x=0, 10, 20, 30$ cm の補償効果を比較すると、 $x=20$ cm のときの $z=30$ cm での補償効果がわずかに低い、ほぼ x 方向の位置にかかわらず補償効果が顕著であった。このことから、この補償法は中心軸以外の場所でも補償効果があることがわかる。また、中心軸を含む断面内において径方向成分が補償されるとき、軸方向成分もほぼ同様に補償されることが、地磁気水平成分を対象とした補償実験で示されている⁴⁾。

Fig. 7 には外部印加磁界周波数をパラメータにとった場合の中心軸上での磁界分布を示す。ここで補償用センサは中心軸上で、開口端から 30 cm の位置に置いた。(a) に開口端補償を施した結果を示す。この場合、開口端より 30~60 cm の範囲では、1 Hz, 10 Hz のときピーク値がそれぞれ 0.07 mG, 0.13 mG となった。これに対し、(b) の無補償時の分布では、開口端より 60 cm の位置では、1 Hz, 10 Hz のときそれぞれ 0.15 mG, 0.2 mG であり、開口端に近づくほど磁界は大きくなっている。1 Hz, 10 Hz のとき、顕著な補償効果が現れているが、100 Hz のときは十分な補償効果が得られていない。このことは Fig. 4 で周波数が高くなるほどゲインが低くなっているため、補償の効果をさらに高めるには 100 Hz 近傍においてもゲインを高くする必要がある。このための一つの方法は、補償用磁気センサ

Fig. 8 Flux density distribution when adaptive compensations are on simultaneously for transversely applied magnetic field and axially applied magnetic field.

のカットオフ周波数を高くすることである。例えば、カットオフ周波数を 10 倍の 16 kHz にすることができれば 100 Hz でのゲインは 800 と 10 倍になり良好な補償効果が期待できる。

次に、 y, z 方向からの印加磁界に対する同時補償を行い、 z 方向印加磁界補償による y 方向印加磁界補償への干渉を調べた。この場合シールド中心軸上における磁界の y 方向成分の分布を Fig. 8 に示す。Fig. 7(a) と Fig. 8 を比較するとほぼ一致し、これらの平面コイルは独立非干渉であって、 z 方向印加磁界の補償が y 方向印加磁界の補償に影響を及ぼしていないことがわかる。

4. あとがき

閉ループ制御系を用いた非干渉平面コイル系とシールド開口端の内側に置かれた磁界センサにより、低周波磁界に対する開口端侵入磁界の自動補償系を構成し、以下のことが明らかになった。

- (1) 1 対の直交 8 の字平面コイルと円形コイルからなる非干渉コイル系を用いることにより各成分を独立に補償することができる。
- (2) 補償用センサを開口端からほぼ半径の大きさの位置に置くことにより、シールド内への磁界の侵入が顕著な範囲が、無補償時は直径程度であったものが、補償時は半径程度へと改善される。

文 献

- 1) D. Cohen: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-11**, 694 (1975).
- 2) I. Sasada, S. Kubo, and K. Harada: *J. Appl. Phys.*, **64**, 5696 (1988).
- 3) I. Sasada: *IEEE Trans. Magn.*, **30**, 4638 (1994).
- 4) I. Sasada and Y. Oonaka: *J. Appl. Phys.*, **75**, 6984 (1994).
- 5) 笹田一郎, 大田康公: 日本応用磁気学会誌, **18**, 473 (1994).
- 6) 樋谷昌史: 九州大学卒業論文 (1994).
- 7) 笹田一郎, 原田耕介: 電気磁気学会マグネティックス研究会資料, MAG-92-210 (1992).

1994 年 10 月 13 日受理, 1995 年 1 月 20 日採録