技術資料

Technical Paper

磁気シールドルームの開発と製造

山口孝夫^{*}，岩田英敏^{*}

Development and Manufacturing of Magnetic Shielding Room

Takao Yamaguchi and Hidetoshi Iwata

Synopsis

In recent years, SQUID (superconducting quantum interference device) technology has been developed for measuring the very low magnetic field generated from a human's physiology activity, and this technology is used for MEG (magnetoencephalograph) and MCG (magnetocardiograph). In this way, the MEG and MCG have begun to be installed to the some hospitals as the medical devices. It is necessary to reduce the environmental magnetic field significantly, in order to measure the weak signals with high stability by using these devices.

We developed and manufactured the magnetic shielding room for this purpose. In this paper, shielding performance of the magnetic shielding room at the low intensity and low frequency magnetic field is introduced.

1 . 緒 言

1963 年にはじめて生体から発する磁場が記録¹⁾されて以来、近年では超伝導磁気センサーである SQUID (Superconducting QUantum Interference Device) を用いて人体から発生する微弱な磁場を計測する技術が実用化され、脳や心臓などの生理活動が、人体には全くの無侵襲で脳磁図 (MEG: MagnetoEncephaloGraph) や心磁図 (MCG: Magneto-CardioGraph) としてマッピング可視化できるようになった。

また、2004 年 4 月の診療報酬点数表の改正²⁾によって神経磁気診断が新規に採用され、健康保険が適用されるようになった。こうしたことから各地の病院には、脳の生理活動を直接測定できる診断装置として脳磁計が導入されつつあり、微弱な脳磁を安定して計測するために磁場環境を改善する装置として、磁気シールドルーム (MSR: Magnetic Shielding Room) が必需品となっている。

病院などに置かれる磁気シールドルームに要求される特性としては主に次の 4 項目が挙げられる。(1) 低磁界、低周波領域での高いシールド性能を有すること、(2) 極めて微弱な信号を扱うので超伝導磁気センサーや解析用コンピュータ機器類にそのケーブルも含めて EMC

(ElectroMagnetic Compatibility) 対策が施されていること、(3) シールド材が振動すると内部の磁場も振動するため、これら振動を測定して必要な防振対策が施されていること、(4) 診断を受ける患者はもちろんのこと、診断や機器の操作、介添などを行う医師、技師、看護師のために様々な安全性、快適性、利便性が考慮された居住空間を得ること。

これらの要求に対して実用に供する磁気シールドルームを開発し製造したので、本稿では、とくに (1) の低磁界、低周波領域での磁気シールド性能について、その測定方法も含めて紹介する。

2 . 磁気シールドの必要性和その評価

2.1 環境磁場ノイズ

生体から発する磁場の一つとして、例えば脳磁は脳神経細胞に流れるイオン電流から右ネジの法則によって発生するものである。その大きさは数十から数百 fT (fT: フェムトテスラ、 10^{-15} テスラ) 程度¹⁾とされている。これに対して、都市部においては環境磁場ノイズは数百から数千 nT (nT: ナノテスラ、 10^{-9} テスラ) である。すなわち、脳磁は環境磁場ノイズの1千万分の1程度の大きさである。

Fig.1 に磁気シールドルームの内部と外部の環境磁場ノ

2004 年 7 月 20 日受付

^{*} 大同特殊鋼(株)新分野開発センター (New Business Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

イズ³⁾の例を示す。磁気シールドルームの外部の環境磁場は、フラックスゲート式磁束計で測定した。地球磁場による磁力線は $1/f$ ゆらぎを持っているが、都市部にあっては電車や自動車などの磁性体が磁力線の中を横切ることによって発生する低周波の磁場のゆらぎや、送電線あるいは電車の架線や帰線電流などの巨大な電流ループによって発生する磁場、さらには建物の中にあつては、空調のファンやエレベータの稼動、その他電気機器類の稼動によって発生する人工的な磁場ノイズが重畳される。

それらの例として Fig.2 に昼夜連続して記録した磁場の

Fig.1. Magnetic noise level inside/outside of MSR (Magnetic Shielding Room).

Fig.2. Variation of the DC magnetic field (geomagnetism) under the influence of a train and a track.

大きさの変化を示す。これは、電車の線路から直線距離で200メートル離れた建物内部において30秒毎に瞬時の直流磁場(地磁気)の大きさをフラックスゲート式磁束計で測定したものである。電車の動いている時間帯の変動幅に比べて、電車が止まる夜中の0時から明け方5時半までは、その変動幅が小さいことが分かる。

また、Fig.3 にエレベータの稼動による磁場の大きさの

Fig.3. (a) Movement of the elevator which performed observation simultaneous with record of the magnetic field. (b) Variation of the DC magnetic field (geomagnetism) outside of the MSR under the influence of an elevator. (c) Variation of the DC magnetic field (geomagnetism) inside of the MSR under the influence of the elevator.

変化を示す。これは建物内でエレベータから直線距離で10メートル離れた廊下で測定し、磁束計の出力はパソコンで記録した。またエレベータが何階にいるか目視で確認し、その時刻を記録した。これらの記録は、パソコンの時計とエレベータの観察者の時計の時刻を秒単位まで一致させて行った。直流磁場の大きさの変化を示すグラフと並記すると、その変化がよく一致しており、エレベータの稼動によって直流磁場が変動していることが分かる。

以上に2つの例のみ示したが、我々の周囲には環境磁場ノイズが満ち溢れており、微弱な生体磁場を測定するためには、これらの磁場環境の改善が必要となってくる。

2.2 磁気シールドの設計

A.P.Wills によって球面と無限円筒の磁気シールドの理論式⁴⁾がある。また V.O.Kelha らによって、立方体殻などについての磁気シールドの近似式⁵⁾がある。これらによると1層の磁気シールド材で覆われた立方体殻の磁気シールド率は、

$$S = 1 + 0.8(\mu \cdot t/L) \quad (1)$$

ここで、S: 磁気シールド率 μ : 磁気シールド材の比透磁率 t : 磁気シールド材の板厚 L : 立方体の1辺の長さで計算されている。

また2層、3層の磁気シールド材で覆われている場合にはそれぞれ

$$S = 1 + S_1 + S_2 + S_1 S_2 V_{12} \quad (2)$$

$$S = 1 + S_1 + S_2 + S_3 + S_1 S_2 V_{12} + S_1 S_3 V_{13} + S_2 S_3 V_{23} + S_1 S_2 S_3 V_{12} V_{13} \quad (3)$$

ここで、

$$S_i = 1 + 0.8(\mu_i \cdot t_i/L_i), \quad i = 1, 2, 3$$

$$V_{ij} = 1 - (L_i/L_j)^3, \quad i, j = 1, 2, 3$$

見出し文字 i, j は最内層の殻から振る

これらの式によれば、シールド率 S はシールド材の透磁率 μ と板厚 t に比例し、シールドルームの大きさ L には反比例することが分かる。また、シールド層を多層にするほど、シールド率 S が上がることが分かる。さらには、多層にした場合、層と層の間の距離を大きくとる方がシールド率 S が上がることも分かる。

透磁率の高い材料としてパーマロイ (JIS C2531 PC 相当材) を用いて磁気シールドルームを設計し製造する場合において、(1) ~ (3) の式で、シールド材の板厚 t とシールドルームの大きさ L は任意に設定できる。パーマロイの透磁率 μ は、例えば製造ロット毎に JIS C2531 によって規定された方法で測定されているが、製造時の曲げや切断、穴あけ加工によって透磁率は極端に劣化するので熱処理⁶⁾を行なって回復させても、元の値を再出できるとは限ら

Fig.4. Variation of the environmental magnetic field plotted on the permalloy BH curve.

ず、磁気シールドルームを製造した後において保証される数値ではないので、任意の数値を入れることは出来ない。

また、パーマロイの直流磁化曲線⁶⁾の中で見た場合、外部環境磁場の変動が小さいということがある。例えば電車による地磁気の変動は、Fig.2 に示した例の場合、約 $38.17 \mu\text{T}$ ($=30.39\text{A/m}$) から約 $38.33 \mu\text{T}$ ($=30.52\text{A/m}$) の間で変動している。この電車による変動磁場をパーマロイの直流磁化曲線の中に記すと Fig.4 となり、最大透磁率 μ_m よりもはるかに小さい勾配となっていることが分かる。

磁気シールドの設計を行う場合、磁気シールドルームのサイズ L は設置場所や内部に置く脳磁計などから経済的なサイズが決定される。磁気シールド率 S は、外部の環境磁場や内部に置く装置 (脳磁計など) の性能から決定される。これに応じてシールド材の板厚、層の数も決められるが、経済的な数値でなければならない。板厚を厚くし、また層数を多くすれば、高い磁気シールド率が得られるが、重量が増しコスト高になるばかりでなく、設置場所の床耐過重増強の処置などが必要となる場合もある。こうしたことから、なるべく磁気シールド材の板厚を薄くし、層数も少なくしたい。そのためには磁気シールドルームが完成した後の最大透磁率よりも小さい勾配 (実際の透磁率 μ) を精密に見込んで設計されなければならない。

2.3 磁気シールドの測定方法

磁気シールド率 S は、内部磁界 H_i と外部磁界 H_e の比⁷⁾で表される。

$$S = H_e / H_i$$

例えば、エレベータが稼動したとき、Fig.3(b) に示す外部磁界に対して、Fig.3(c) に示す内部磁界となる。この例では、外部磁界が約 $38 \mu\text{T}$ であるのに対して、内部磁界が約 $0.058 \mu\text{T}$ であることから、磁気シールド率 S は、 $38 /$

0.058=650 となる。また、変動幅に着目すると、外部磁界は $38.23 \mu\text{T}$ から $38.27 \mu\text{T}$ の間で変動しており、変動幅は $0.04 \mu\text{T}$ である。これに対して内部磁界は $0.0572 \mu\text{T}$ から $0.0592 \mu\text{T}$ の間で変動しており、変動幅は $0.002 \mu\text{T}$ となる。すなわち、変動幅から磁気シールド率を算出すると S は、 $0.04 / 0.002 = 20$ となる。また、シールドの内部磁界と外部磁界は同一時間で測定していても、空間的には異なる場所の測定をしており、再現性のある値とはいいがたく、磁気シールドの検査を行うときなどには、こういった値は用いにくい。

磁気シールドルームの測定方法に関しては、1994 年超伝導センサー研究所に「COSMOS」と命名された超高性能磁気シールドルームが設置され、その磁気シールド率の測定方法が検討されている⁸⁾。これは球体に近い 32 面体構造をし最外形 6100mm のサイズの 4 層パーマロイ構造で総重量約 40 t であり単位面積あたりの荷重は 1t/m^2 を超え、設置場所の床は特別な補強が行われている。外部に置いた直径 2000mm のコイルで 1Hz と 12Hz の正弦波磁界を発生させ、その磁場を磁気シールドルーム内部に置いた SQUID 磁束計で磁束密度 (H_i) を測定し、磁気シールドルームが無いときの SQUID 磁束計の位置での磁束密度 (H_e) を

計算によって求めて、これらの比 (H_e / H_i) からシールド率を算出し、1Hz では 420700、12Hz では 1282000 という非常に高い磁気シールド率が得られている。

さらには、山崎ら⁹⁾によって、外部磁界印加用のコイルの寸法や配置、磁気シールドルームからの隔離距離が磁気シールド率の評価結果に与える影響があるとして、遠方から到来する様な磁場ノイズに対する磁気シールド率と、磁気シールドルームの近傍で発生する不均一な磁場ノイズに対する磁気シールド率の 2 種類では、それぞれ異なった結果になることの検討が行われている。

2.4 磁気シールドの製造と評価

2 層パーマロイ構造の磁気シールドルームを実際に設計・製造・評価を行った。2 層パーマロイ構造のものは、内寸で奥行 2300mm 、幅 2100mm 、高さ 2100mm とし、パーマロイとパーマロイの層間は 100mm とした。これは、磁気シールドルームとしての構造体を保持するものとしてアルミ (A6063) 角パイプ一般品の一つである 100mm 角を切断、溶接してフレーム構造として、そこにパーマロイを透磁率の低下しないように注意を払ってネジ止めで取り付けていく。パーマロイは、内外各々 1.8mm の厚さとした。その外観を Fig.5 に示す。この磁気シールド率を 2 種類の

Fig.5. Appearance of the MSR.

方法で測定した。1つは磁気シールドルームの対向する側面に沿う形で電線を配接しコイルとした。これを仮に大コイルと呼ぶ。もう1つは直径1200mmの円形コイルで可動式のものとした。これを仮に小コイルと呼ぶ。そのレイアウトをFig.6に示す。このとき磁気シールドルームが無い状態でコイルのみ有る場合も作り、そこで測定した磁界を外部磁界 H_e とした。

このとき、小コイルの位置を変えてコイル～センサー間の距離を変えて測定した結果をFig.7に示す。距離が離れるほど磁気シールド率が低下していることが、この例の場合では4550mm以上離れると磁気シールド率が安定化している。

コイルが離れた場合は、磁気シールドルームに印加される磁場が小さくなることから、磁場の大きさが磁気シールド

Fig.6. Layout of the MSR and the coil for the measurement system of the magnetic shielding factor.

Fig.7. Relation between the magnetic shielding factor and the distance of the coil to the MSR.

ド率に与える影響も見ておく必要がある。そこで小コイルの位置を一定とし、それに流す電流を変えることで、磁場の大きさを変えてみた場合がFig.8である。磁場の大きさはコイル中心部のものである。周波数が低いとき、例えば1Hzのとき、周波数の増大に伴って緩やかにシールド率 S は増えてはいるが、その変化は少ない。すなわち、小コイルが磁気シールドルームから離れていくと、小コイルから発した磁界が一般的な磁場ノイズに近づいていくものと推定される。

また、この例での大コイルでの磁気シールド率は、小コイルが距離2550mmのところにある場合と同じ程度になっている。したがって大コイルでの磁気シールド率は、一般的な磁場ノイズに対する磁気シールド率よりも大きめの値となり、近傍で発生する不均一な磁場ノイズに対する磁気シールド率よりも小さめの値となる。

実際の磁気シールドルームは、空間的に制約のある建物内に設置されることがほとんどである。すなわち、磁気シールドルームの外壁や屋根部分は、建物の部屋の内壁や天井と密着するように設置されることが多い。こうしたことから、測定に用いるコイルの配置も制約を受けるので、測定のために任意の位置にコイルを設置できない場合が多い。

そこで某大学に設置した脳磁研究用の3層パーマロイ構造の磁気シールドルームの例を示す。3層パーマロイの厚みは最内層から外層に向かって順番に4mm、2mm、2mmである。内寸は奥行3500mm×幅2300mm×高さ1990mm、

Fig.8. Relation between the magnetic shielding factor and the coil current (magnetic field of the coil).

Fig.9. The magnetic shielding factor of the MSR which is three-layer permalloy structure.

Fig.10. The outside drawing of the three-layer magnetic shielding room.

外寸は奥行 4350mm × 幅 3180mm × 高さ 2880mm であり、総重量は約 7t，単位面積あたりの荷重は 510kg/m^2 となる．その外形図を Fig.9 に示す．

この磁気シールドルームの稜線部に大コイルを取り付けた．この大コイルはビニール被覆の 10 芯のケーブルを用い、磁気シールドルームの扉面～背面方向、左側面～右側面、天井～床方向の 3 つの方向にそれぞれ磁界が印加されるように配置した．それらの測定結果を Fig.10 に示した．1Hz の磁気シールド率は、扉面～背面の方向に磁界を印加した場合が最も低いが 30000，その他の方向に磁界を印加した場合が 100000 以上のシールド率を得た．また SQUID センサーで測定した磁気シールドルーム内部の環境磁場ノイズを Fig.1 に示す．例えば 1Hz において約 5 桁ほど、外部の環境磁場ノイズよりも低くなっている．

3．まとめ

低周波低磁界での高い磁気シールド率 (30000 以上) を確保しつつ、従来のものよりも軽量化した磁気シールドルームを開発し製造した．

また、その磁気シールド率を再現性よく正確に測定する手法として、実際に磁気シールドルームが設置されるスペースも考慮して、磁気シールドルームの稜線部に多芯ケーブルを張り、そこに磁界を印加して磁気シールド内部の磁界を測定し、あらかじめ磁気シールドルームが無い場合の合同形でのケーブルで測定した外部磁界と比較することによって磁気シールド率を測定した．

(文 献)

- 1) 原宏, 栗城真也: 脳磁気科学 SQUID計測と医学応用(オーム社)(1997), 6.
- 2) 厚生労働省ホームページ: <http://202.214.127.149/smente040308.pdf>.
- 3) 風見邦夫, 春田康博, 山口孝夫: 日本生体磁気学会誌特別号16(2003), 1, 100.
- 4) A. P. Wills: Phy. Rev., (1899), 193.
- 5) Vaino O. Kelha: IEEE Trans. Magn., 18(1982), 1, 262.
- 6) 大同特殊鋼技術資料: KD8211bパーマロイ, (2002), 3.
- 7) Albrecht J. Mager: IEEE Trans. Magn., 6(1970), 1, 67.
- 8) 原川健一, 梶原暁, 風見邦夫, 尾形久直: 電気学会研究会資料1M-94(1994), 17.
- 9) 山崎慶太, 藤原耕二, 他: 電気学会論文集, A118(1998), 5, 453.