U字形磁性体を用いた磁気遮蔽

Magnetic Shielding using U-Shaped Soft Ferromagnetic Bodies

芳賀 昭 東北学院大学工学部, 宮城県多賀城市中央 1-13-1 (〒985)
A. Haga Dept. of Electrical Engng., Tohokugakuin Univ.,
13-1, Chuo 1 chome, Tagajo, 985

A new static magnetic shielding equipment consisted of several U shaped soft ferromagnetic bodies is proposed. This magnetic shielding equipment shows a remarkable shielding effect and the shielding factor can be adjusted optionally. Magnetization characteristics of the U shaped soft ferromagnetic body in a uniform magnetic field are analyzed by a numerical method assuming that magnetization of a short segment of the U shaped soft ferromagnetic body is uniform over the short segment. The shielding effectiveness is calculated by superposing a demagnetizing field due to magnetization of the U shaped ferromagnetic body on an external field. The calculated results are in very good agreement with the measured results.

1. ま え が き

本文は高透磁率材をU字形に成形したものを複数個組合せた静磁気遮蔽体の解析法とその測定結果について示したものである。

従来の磁気遮蔽はパーマロイのような高透磁率材を箱形, 球形あるいは円筒形に形成しこれを遮蔽したい空間に包囲することによって行われている。そしてその遮蔽の程度は高透磁率材の厚みを加減することによって行われるが, 実際上厚みがある程度増加させても遮蔽の効果は増加せず一定となり, 外部磁界の影響を十分取り除くことができないので, 高透磁率材を二重あるいは三重に包囲している。しかしこのような遮蔽装置は高価なパーマロイを多量に必要とし, 多額の建設費がかかる欠点がある。

本文に示す静磁気遮蔽体は高透磁率材をU字形に成形したものを複数個組み合わせた構造で, U字形磁性体の脚長, 及び間隔によって遮蔽効果は任意に可変できる特長を有する。すなわち, 本文はまずU字形遮蔽装置の構成原理を明らかにし, 具体的構造としてU字形磁性体を組み合わせた遮蔽体を提案する。ついで遮蔽体の設計に必要なU字形磁性体の磁化特性の解析を, 分割磁性体の磁化の一般性の仮定により数値解析を行い, 更に遮蔽効果を求め実験結果とよく一致することを述べたものである。

2. U字形磁性体を用いた静磁気遮蔽

2.1 静磁気遮蔽の原理

例えば Fig. 1(a) のような棒状強磁性体の長さ方向に一様な外部磁界を印加すると棒状磁性体は H_0 の方向に磁化し磁性体外には磁界 H_L を生じる。磁性体外の磁界は一様外部磁界 H_0 と磁性体の磁化による磁界 H_L を

重畳したものである。Fig. 1(b) のEの近傍は H_0 と H_L が同方向であるから強め合い, Fの付近では H_L は H_0 に対し逆方向に作用するため磁界は弱められ遮蔽効果を有することになる。 H_0 と H_L を重畳した磁力線の分布はちょうど透磁率の大きい磁性体に磁束が吸い込まれ磁性体側面は疎になる周知の形となる。このように磁性体の磁化によって磁性体外に生じる磁界は場所によって外部磁界と同方向あるいは逆方向になるわけであるが, 静磁気遮蔽はこの逆方向磁界を外部磁界に作用することであると考えることができる。

次に長さが断面積に比し十分長い矩形断面棒状磁性体をU字形に形成し脚の長手方向を印加磁界と一致させれば Fig. 2 のようにU字形磁性体の長手方向に沿って磁化する。その結果磁性体の外では P, Q 点からO点に向かって磁界を生じ, U字形磁性体の POQ で囲まれた領域では外部印加磁界と逆方向に作用するため遮蔽効果を有することになる。更にU字形磁性体の脚部と印加磁界を平行にすることにより, 外部印加磁界は磁性体に有効に作用し, 脚長を長くするほど, 磁束密度Bは増加し逆方

Fig. 1 Ferromagnetic bar in a uniform field.

Fig. 2 Magnetization and demagnetizing field of the U shaped ferromagnetic body.

Fig. 3 Shielding equipment consisted of several U shaped ferromagnetic bodies.

向磁界も増加する特徴を持たせることができる。

2.2 U字形磁性体を使った静磁気遮蔽装置

Fig. 3(a) は本文で述べるU字形磁性体を組み合わせた遮蔽体の具体的構造の一例を示したものであり、複数個のU字形磁性体を所要の間隔をもって互い違いに組み合わせたものである。Fig. 3(b) は他の具体的構造で複数個のU字形磁性体を用い校倉に組み合せ井形に形に構成したものである。

3. U字形磁性体の磁化特性の数値解析法^{1), 2)}

磁性体Vの各点における磁化を $J(x_j, y_j, z_j)$ で表すと、点 $P(x_i, y_i, z_i)$ に生じる反磁界 $H_P(x_i, y_i, z_i)$ は次のように表される。

$$\begin{aligned} H_P(x_i, y_i, z_i) &= -\text{grad}_P \int_V J_Q(x_j, y_j, z_j) \cdot \text{grad}_Q \left(\frac{1}{r_{PQ}} \right) dv_j \\ &= \text{grad}_P \int_V J_Q(x_j, y_j, z_j) \cdot \text{grad}_P \left(\frac{1}{r_{PQ}} \right) dv_j \quad (1) \end{aligned}$$

ここで

$$r_{PQ} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (2)$$

長さが断面積に比し十分長い矩形断面棒状磁性体をU字形に形成し脚の長さ方向に印加磁界を一致させればFig. 5のようにU字形磁性体の長手方向に沿って磁化する。このU字形磁性体の磁化特性を数値解析するのにFig. 6のように n 等分し、この分割磁性体は一樣に磁化され分割磁性体内部のどの部分でも磁化の強さは等しいと仮定する。座標系 (x, y, z) は半円部の中心を原点と

し脚の長手方向を z 軸方向とした直角座標である。今 j 番目の分割磁性体の点 $Q(x_j, y_j, z_j)$ の磁化の強さを J_j 、 J_j により i 番目の分割磁性体の点 $P(x_i, y_i, z_i)$ に生じる磁界を H_{ij} とする。 J_j と Z 軸が平行になるように (x, y, z) 座標系を座標変換した (X, Y, Z) 座標系で考えれば、磁化は Z 成分のみを考えればよい。 (X, Y, Z) 座標系で J_j が i 番目の分割磁性体の P 点に及ぼす磁界 H_{ij} は (3) 式で表され、積分するとその各成分は (4), (5), (6) 式で表される。

$$H_{ij} = J_j \text{grad}_P \int_V \frac{\partial}{\partial Z_j} \frac{1}{r} dv_j \quad (3)$$

$$H_{ijx} = J_j \{ g_{ijx}(Z + \Delta Z/2) - g_{ijx}(Z - \Delta Z/2) \} \quad (4)$$

$$H_{ijz} = J_j \{ g_{ijz}(Z + \Delta Z/2) - g_{ijz}(Z - \Delta Z/2) \} \quad (5)$$

$$H_{ijy} = J_j \{ g_{ijy}(Z + \Delta Z/2) - g_{ijy}(Z - \Delta Z/2) \} \quad (6)$$

ここで座標変換した (X, Y, Z) 座標系で P, Q の座標を $P(X_i, Y_i, Z_i), Q(X_j, Y_j, Z_j)$ とすれば

$$X = X_i - X_j, \quad Y = Y_i - Y_j, \quad Z = Z_i - Z_j$$

である。また、 $g_{ijx}, g_{ijz}, g_{ijy}$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} g_{ijx} &= \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{Z^2 + (X-a/2)^2} + (Y+b/2)^2 - (Y+b/2)}{\sqrt{Z^2 + (X-a/2)^2} + (Y+b/2)^2 + (Y+b/2)} \\ &\quad - \frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{Z^2 + (X-a/2)^2} + (Y-b/2)^2 - (Y-b/2)}{\sqrt{Z^2 + (X-a/2)^2} + (Y-b/2)^2 + (Y-b/2)} \end{aligned}$$

Fig. 4 Field of magnetization J.

Fig. 5 Magnetization of the U shaped ferromagnetic body.

Fig. 6 Segments of U shaped ferromagnetic body.

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{Z^2+(X+a/2)^2+(Y+b/2)^2}-(Y+b/2)}{\sqrt{Z^2+(X+a/2)^2+(Y+b/2)^2}+(Y+b/2)} \\
& +\frac{1}{2} \ln \frac{\sqrt{Z^2+(X+a/2)^2+(Y-b/2)^2}-(Y-b/2)}{\sqrt{Z^2+(X+a/2)^2+(Y-b/2)^2}+(Y-b/2)} \\
& (7) \\
g_{ijz} = & \tan^{-1} \frac{Y+b/2}{Z} \cdot \frac{(X-a/2)}{\sqrt{Z^2+(X-a/2)^2+(Y+b/2)^2}} \\
& -\tan^{-1} \frac{Y-b/2}{Z} \cdot \frac{(X-a/2)}{\sqrt{Z^2+(X-a/2)^2+(Y-b/2)^2}} \\
& -\tan^{-1} \frac{Y+b/2}{Z} \cdot \frac{(X+a/2)}{\sqrt{Z^2+(X+a/2)^2+(Y+b/2)^2}} \\
& +\tan^{-1} \frac{Y-b/2}{Z} \cdot \frac{(X+a/2)}{\sqrt{Z^2+(X+a/2)^2+(Y-b/2)^2}} \\
& (9)
\end{aligned}$$

g_{ijy} は g_{ijx} で X と Y を入れ替えたものになる。

次に i 番目の分割磁性体の点 P に着目して、 P 点の磁界の強さを H_i 、外部印加磁界の強さを H_{o1} 、分割磁性体全体の磁化による P 点の磁界の強さを H_{d1} 、磁化の強さを J_1 とすると次式が成り立つ。

$$J_1 = \chi H_i \quad (9)$$

$$H_i = H_{o1} + H_{d1} \quad (10)$$

ここで χ : 磁性体の磁化率

いま J_1 は U 字形磁性体の長手方向に沿っているので、 H_i 、 H_{o1} 、 H_{d1} を J_1 と同方向成分のみを考え (9)、(10) 式から H_i を消去すれば次のようになる。

$$J_1/\chi = H_{o1} + H_{d1} = H_{o1} + \sum_{j=1}^n H_{1j} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
-H_{o1} = & \sum_{j=1}^n H_{1j} - J_1/\chi \\
= & \sum_{j=1}^n [J_j \{g_{1jz}(Z+\Delta Z/2) - g_{1jz}(Z-\Delta Z/2)\} \\
& \times \cos(\theta_i - \theta_j) + \{g_{1jx}(Z+\Delta Z/2) \\
& - g_{1jx}(Z-\Delta Z/2)\} \sin(\theta_i - \theta_j) - \delta(k)/\chi] \\
& (12)
\end{aligned}$$

ここで $k=i-j$

$$\delta(k) = \begin{cases} 1 & k=0 \\ 0 & k \neq 0 \end{cases}$$

(12) 式から U 字形磁性体の任意の点における磁化 J_j を求めることができる。更に、複数個の U 字形磁性体を組み合わせた場合も同様に求むられる。磁性体外に作る反磁界は (12) 式から得られた J_j を使い (4)、(5)、(6) 式から求められ、更に遮蔽効果は印加磁界と重ね合わせることで得ることができる。

4. 一様印加磁界中の U 字形磁性体

4.1 分割数と収束の程度

U 字形磁性体の磁化分布の数値解析においては、分割数は多いほど精度よく求められるが、実際の計算では計算の処理時間は n^2 に比例して大きくなる。Fig. 7 は数値解析時における n と最大磁束密度 B_{max} (一様磁界中

Fig. 7 Convergence by number of segments.

Fig. 8 Normalized magnetization of the U shaped ferromagnetic body.

の U 字形磁性体の磁化分布で磁束密度が最大となる点の磁束密度)の計算値の収束の程度を示す。これより $\Delta Z/S$ を約 1.3 以下になるように n を選んで数値解析を行えば、 n による磁束密度の収束値に対する誤差は 2% 以内におさえることができる。以後の計算では収束値に対する誤差は 2% 以内になるように分割数を選んだ。

4.2 磁化分布

U 字形磁性体の脚の長手方向に一様印加磁界の方向を一致させ磁化した場合の磁化分布を (12) 式から求めた数値解析結果と、純鉄製 U 字形磁性体の実測値を Fig. 8 に示す。磁化分布を最大磁束密度 B_{max} で規準化し、更に U 字形磁性体の各点を脚の全長 l で規準化すれば他の寸法の U 字形磁性体でも同一曲線となる。これより明らかなように計算値と実測値は良好に一致している。

5. U 字形磁性体を組み合せた磁気遮蔽³⁾

Fig. 9 は U 字形磁性体 9 本を Fig. 3 のように互い違いに、 $\tau=0.6$ (cm) の間隔で |O| 形に組み合せた磁気遮蔽体の中心軸上の遮蔽磁界を示したものであり、横軸は遮蔽体の中心を原点とし中心軸上 (Y 軸) の各点を表している。 a, b は U 字形磁性体矩形断面の厚みと幅で、 D は直径、 L は脚長である。この図より数値解析法による値と実測値はほぼ一致し、更に U 字形磁性体の脚長を変化することにより遮蔽体内の磁界は任意に変化できることがわかる。Fig. 10 は U 字形磁性体間隔を 0.5~1.5 (cm) まで変化した時の遮蔽体内の中心軸 (Y 軸) 上の各点の遮蔽磁界の実測結果である。|O| 形の遮蔽体は U

Fig. 9 Shielding effectiveness on the Y axis of H type shielding equipment.

Fig. 10 Shielding effectiveness on the Y axis of H type shielding equipment.

字形磁性体を互い違いに組み合わせているため、間隔を狭めても磁気相互干渉は小さく磁化の減少も少ないので、間隔を狭め遮蔽空間を小さくした分だけ遮蔽効果が增加する。以上の結果より注目すべき点は遮蔽体内の遮蔽磁界 H_1 が負の値になったことである。つまり遮蔽体内の磁界 H_1 は印加磁界 H_0 と逆方向である。これは印加磁界 H_0 によってU字形磁性体が磁化し、それによって生じる逆方向磁界が印加磁界 H_0 を過補償し負の磁界が生じたと考えられる。したがって、脚長 L や磁性体間隔 τ を適当にし、印加磁界と逆方向磁界を平衡すれば外部磁界の影響を完全に取り除くことができる。

Fig. 11は|O|形と#形の遮蔽体の中心軸に垂直な平面での印加磁界の方向に対する遮蔽磁界の実測値を示したものである。#形は印加磁界の方向によらずほぼ一定の遮蔽効果を示すが、|O|形は印加磁界の方向に強く依存している。|O|形はU字形磁性体の長手方向に対する磁界に対し最も遮蔽効果が大きく、方向性を強めることによ

Fig. 11 Directional characteristics of shielding equipments.

って遮蔽効果を高めたとも言える。#形は|O|形に比べ2倍のU字形磁性体を必要とするが中心軸に垂直な面でどの方向の磁界に対しても遮蔽効果は一定であるとともに遮蔽体内の遮蔽磁界の一樣性を高めている。

6. 結 び

複数個のU字形磁性体を|O|形及び井形に組み合わせた新しい磁気遮蔽体を提案し、更に磁化の部分的一様性を仮定し、磁化と反磁界の関係を階段積分表示を適用した数値解析法により、U字形磁性体の磁化特性を解析し、更にU字形磁性体を組み合わせた遮蔽体の遮蔽効果を解析し、実測値と良好に一致することを示した。この新しい遮蔽体は次のような利点を持つ。

(1) U字形磁性体の脚長を变化することにより、また、U字形磁性体間隔を变化することにより遮蔽効果を任意に制御することができ、外部磁界の影響を完全に取り除くことができる。

(2) 従来のように二重、三重に包囲する必要がないので高透磁率材は少量ですむとともに構造が簡単で製作が容易である。

本文においては実験は直流磁界についてのみ行ったが、交流磁界に対しても有効であり、特にうず電流による遮蔽効果が期待できない低周波磁界に対しては直流磁界と同様に著しい効果を示すことがうかがえる。

文 献

- 1) W. A. Barret: IEEE Trans. Mag., MAG 2, No. 2, 92 (1966).
- 2) 鈴木, 矢野: 電気通信研究所研究実用化報告, 20 巻, 10 号, 203 (1971).
- 3) 芳賀: 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-82-119 (1982).

1982 年 12 月 13 日受理, 1983 年 2 月 17 日採録