磁性体の移動に起因する磁気ノイズの考察

Examination on Magnetic Noises due to Movement of Object Composed of Magnetic Materials

鎌田清孝・湯ノ口万友*・山崎慶太**・中瀬知哉***・藤原耕二***・高橋則雄***

鹿児島工業高等専門学校電子制御工学科, 鹿児島県始良郡隼人町真孝 1460-1 (☎899-5102)

*鹿児島大学工学部生体工学科, 鹿児島市郡元 1-21-40 (☎890-0065)

**竹中工務店技術研究所, 千葉県印西市大塚 1-5-1 (☎270-1395)

***岡山大学工学部電気電子工学科, 岡山市津島中 3-1-1 (☎700-8530)

K. Kamata, K. Yunokuchi*, K. Yamazaki**, T. Nakase***, K. Fujiwara***, and N. Takahashi***

Kagoshima National College of Technology, 1460-1 Shinkou, Hayato, Aisa-gun, Kagoshima 899-5102

Kagoshima University, 1-21-40 Korimoto, Kagoshima 890-0065

Takenaka Corporation, 1-5-1 Ohtsuka, Inzai, Chiba 270-1395

Okayama University, 3-1-1 Tsushima-naka, Okayama 700-8530

(1998年10月15日受理, 1999年1月21日採録)

For biomagnetic measurements, it is important to understand the characteristics such as frequency dependence, fluctuation, and source of environmental low-frequency magnetic field noises. Biomagnetic signals, especially magnetoencephalogram and magnetocardiogram signals, always exist in the frequency range below several ten Hz. These signals are very weak in comparison with those of environmental magnetic noises. Such noises at low frequency are generated mainly by the transmitting and return currents of streetcars, movements of automobiles and elevators in geomagnetism, and vibrations of magnetically shielded rooms. In this paper, magnetic noise due to the movement of an object composed of magnetic materials is investigated by using a newly developed method of analysis. That combines the finite element method and an analytical method of calculating the magnetic fields produced by the magnetization in the object. The proposed method is verified by a basic experiment using simple steel boxes.

Key words: magnetic noise, biomagnetic measurement, object composed of magnetic materials, automobile, elevator, finite element method

1. まえがき

時間的に変動する環境磁気ノイズは、脳磁図や心磁図のような生体からの微弱磁界の測定に大きく影響する。そのノイズ源には、電車、自動車やエレベータ、電気・電子機器等のモータおよびファン等が挙げられる。このような環境磁気ノイズの大きさは、生体磁気信号に比べてはるかに大きく、磁気シールドルームのない状況下ではその影響は著しく、生体磁気計測にどの程度影響を与えるか検討することは重要なことである。既に我々は、鹿児島大学構内において、生体磁気計測で重要な数十以下の低周波領域における磁気ノイズを測定し、そのノイズ源が主に市電の送・帰電流、自動車やエレベータ等の磁性体の移動に起因することを明確

にした^{1)~7)}。本研究の目的は、磁性体の走行に起因する磁気ノイズを予測する手法を確立することである。磁性体の走行に起因する磁気ノイズの特性を測定し、それを検証するために、立方体の鉄箱モデルを走行させて、フラックスゲート型磁束計により磁束密度の測定を行い、解析手法およびモデル化手法の妥当性を検討したので報告する。

2. 磁性体の移動に起因する磁気ノイズの解析方法

本論文では、磁性体が地磁気中を移動することによって発生する磁気ノイズを、磁界の数値解析技術を用いて算出する方法を検討する。磁界解析の観点から、ここで取り扱う問題は、次のような特徴を有する。

- (1) 磁性体は、地磁気によって磁化されるため、磁束密度がかなり低い領域における磁化特性が必要である。
- (2) 磁性体は、薄板で構成される場合が多い。
- (3) 磁性体から遠く離れた考察点における磁気ノイズを求めなければならない。

特徴(1)で述べた低磁束密度領域における非線形磁化特性は、単板磁気特性試験法^{8) 9)}により測定し、それを用いて磁性体内の磁化分布を計算するが、このような磁性体の非線形磁化特性を考慮した磁界解析には、各要素数や接点数などきめ細かく設定できるので有限要素法が適していると考えられる。特徴(2)の薄板の取扱いに関しては、有限要素法の方が境界要素法や積分方程式法よりも有利である。しかしながら、特徴(3)への対応は、有限要素法のみでは精度的に問題があり、実用上困難である。そこで、まず手順①として、磁性体中の磁化分布を三次元有限要素法により求める。次に手順②として、手順①で求めた磁化分布から、磁性体を構成する複数の直方体領域中における磁化の平均値 M を算出する。直方体領域中の平均磁化を算出する理由については、後述する。最後に手順③として、手順②で算出された M を用い、(1)式に示す磁気双極子が作る磁場に関する積分公式¹⁰⁾により、磁性体から距離 r だけ離れた任意の考察点 P における磁束密度 B_p を計算する。ただし、手順①の有限要素解析の部分では、移動によって磁性体中に生じる速度起電力は無視する。

$$B_p = \frac{1}{4\pi} \text{grad} \left\{ \iiint \text{grad} \left(\frac{1}{r} \right) \cdot M dv \right\} \quad (1)$$

磁性体の形状が複数の直方体の組合せで表現でき、それぞれの直方体領域中で M が一定であるとする、(1) 式の解析積分は、紙面の関係で省略するが、比較的容易に行うことが可能である。

なお、手順①の三次元有限要素法で用いた離散化要素は、一次六面体辺要素^{11)~14)}である。非線形解析にはニュートン・ラフソン法¹⁵⁾を、大次元連立一次方程式の求解には加速係数自動決定機能付き ICCG 法^{16) 17)}を適用して、計算の高速化を図った。

Fig. 1 Arrangement of weights.

3. 鉄箱を用いた検証方法

移動に伴って磁気ノイズを発生する代表的な磁性体である自動車やエレベータの基本構造は、薄板で構成された鉄箱であり、その内外に塊状の鉄体が複雑に分布する。このように複雑に分布する鉄体を忠実に考慮するのは実用上困難であり、また鉄体数が少なく考慮可能な場合でも、磁気ノイズの空間的分布およびその大きさの概略を把握するためには、忠実なモデル化が必ずしも効率が良いとは思われない。そこで、分布する鉄体を、重量が等価な薄板としてモデル化する方法について検討する。検証実験は、外形が同一（1辺 1m の立方体）で板厚 t が異なる 3 種類の中空鉄箱（ $t = 1.2, 2.3, 4.5\text{mm}$ ）と、板厚の差に対応した重りを用いて行った。鉄箱は、Fig.1 に示すように、鉄製（SS 材）の薄板をアングルにネジ止めして固定し作製した。

Fig.2 に示すように、鉄箱を 12m の長さのレール上で走行させて、レールの中心から 5.5m の距離の木台上に設置された 3 軸のフラックスゲート型磁束計（Applied Physics Systems 社製 APS520A）により、磁気ノイズの各方向成分を同時に測定した。まず、板厚の異なる中空鉄箱を用いて磁気ノイズを測定し、板厚と磁気ノイズの関係を検討した。次に、Fig.1 のように、鉄箱中に重りを収納した場合の磁気ノイズを測定した。重りの材質は、基本構造の薄板と同一である。

Fig. 2 Measurement of magnetic noises due to movement of a steel box.

Table 1 Weight of each part.

Part		Weight [kg]	Difference of weight
Angle and Frame		31.7	
Steel plate (1000 mm × 1000 mm × t mm)	t = 1.2	55.4	50.8
	t = 2.3	106.2	
	t = 4.5	207.6	101.4
Weight (295 mm × 974 mm × 4.5 mm)		50.8	101.4
		101.4

Fig. 3 Analyzed model of the steel box.

またその重量は、表1に示すように、板厚が異なる中空鉄箱の重量の差と等しくなるようにした。つまり、 $t = 1.2\text{mm}$ の中空鉄箱に 50.8kg の重りを収納すると、 $t = 2.3\text{mm}$ の中空鉄箱と同一の重量になる。また、 $t = 1.2\text{mm}$ の中空鉄箱に $(50.8 + 101.4)\text{kg}$ の重りを、 $t = 2.3\text{mm}$ の中空鉄箱に 101.4kg の重りをそれぞれ収納すると、 $t = 4.5\text{mm}$ の中空鉄箱の重量と等しくなる。Fig.3 に示す解析モデルに、2章で述べた解析方法を適用して、中空鉄箱および重りを収納した鉄箱が、Fig.2 に示すように南北 (x 方向) に走行した場合の考察点 (フラックスゲート型磁束計が設置された位置) における磁気ノイズを算出した。ただし地磁気は、水平 ($-x$) および鉛直 ($-z$) 方向で、それぞれ $3 \times 10^{-5}\text{T}$ とした。Fig.1 に示したX字型の補強用フレームは、モデルを簡略化するため、鉄箱隅部のアングルの幅を変更することで考慮した。また重り用鉄板は、実験時にはFig.1に示すように底面部に積層して設置したが、解析時には都合上、鉄箱の中心部と側面部に塊状の鉄心として設置した。Fig.4 に、上述の手順①の有限要素法による非線形解析に用いたSS材の直流磁化特性を示す。ただし、 B および μ_s はそれぞれ磁束密度および比透磁率である。

Fig. 4 Materials properties of steel box.

4 結果と検討

Fig.5 に、鉄箱と考察点との x 方向の距離 Lx に対する磁気ノイズの y 方向成分を示す。(a) 図の測定結果と (b) 図の解析結果において、鉄箱と考察点との距離に対する磁気ノイズ分布、および変動幅が板厚の増加に従って大きくなるという定性的傾向は類似しているが、磁気ノイズの大きさに差異が認められる。

Fig.6 に、鉄箱重量に対する磁気ノイズの変動幅 ΔB_i ($i = x, y, z$) を示す。(a) 図の測定結果では、板厚を単純に増して重量を増加させた場合、重量 W に比例して磁気ノイズの全成分ともその変動幅は大きくならず、飽和する傾向が認められた。特に ΔB_z では、重量 137.9kg ($t = 1.2\text{mm}$ の中空鉄箱に相当) と 239.3kg ($t = 4.5\text{mm}$ の中空鉄箱に相当) の結果がほぼ同一であった。また、重りを収納した鉄箱と外形および総重量が同一の中空鉄箱の変動幅には、大きな差異が認められなかった。(b) 図の解析結果でも

測定結果と同様に、変動幅が重量に対して飽和する傾向が認められた。しかし変動幅は、同一重量で比較すると、測定結果の方が解析結果より2~3倍程度大きい。また、重りが鉄箱の中心部に位置する場合に比べて側面部に位置する場合の方が変動幅が大きくなり、かつ同一重量の中空鉄箱の変動幅に近付いており、変動幅が重りの位置に依存する傾向が認められた。実験および解析の両方によって認められた。磁気ノイズの変動幅は重量に比例して大きくならず飽和するという傾向は、鉄箱を構成する鉄板の表面近傍に磁束が集中するため、等価的に板厚が減少するからであると考えられる。また、実験において重りが収納された鉄箱と同一重量の中空鉄箱による変動幅が概ね一致したのは、Fig.1 に示すように、重り用の鉄板が底面部に偏って積層されていたためであることが、解析結果から推測できる。なお、測定結果および解析結果ともに、いずれの重量においても、水平方向の変動幅 (ΔB_x , ΔB_y) が鉛直方向の変動幅 (ΔB_z) より大きい。変動幅の測定結果と解析結果の差異については、材料定数のばらつきを含め、今後さらに検討する予定である。

(a) Measurement

(b) Calculation

Fig. 5 Fluctuation of magnetic noise due to movement of the steel box.

Fig.6 Fluctuation of magnetic field due to movement of steel box, depending on the weight.

ここでは、板厚が鉄箱の外径に対して薄い場合について、板厚と磁気ノイズの関係を実験および解析の両面から検討したが、その結果は松葉等の結果²⁾と概ね一致している。

以上のように、実験と解析において磁気ノイズの空間的分布の定性的傾向と大きさのオーダが一致し、提案した解析手法およびモデル化手法が磁性体の移動に起因する磁気ノイズの予測に適用可能であることが明らかになった。

5. むすび

磁性体が地磁気中を移動することによって発生する磁気ノイズを予測するための解析手法およびモデル化手法を提案し、鉄箱を用いた基礎実験によりその妥当性を検証した。磁気ノイズの変化の傾向だけでなく、変動幅のオーダも、解析と実験で良く一致した。したがって本提案手法は、磁性体の移動に起因する磁気ノイズを実用的に十分な精度で予測することが可能であり、磁気ノイズが問題になる設備の建物内における配置計画に応用できると考

えられる。しかしながら、厳密には解析と実験において、磁気ノイズの分布や変動幅の大きさに差異が認められたので、今後、材料定数のばらつきや要素数等の影響について検討して精度向上を図り、本提案手法を自動車の移動に起因する磁気ノイズの予測に応用したい。

文 献

- 1) J. Vrba : SQUID Gradiometer in Real Environments, 118 (Kluwer Academic Publishers, 1996)
- 2) 松葉博則, 藤巻則夫, 宮内哲 : 日本生体磁気学会論文誌, 10, 1 (1997)
- 3) 山崎慶太, 小谷誠, 内川義則 : 日本応用磁気学会誌, 15, 597 (1991)
- 4) 山崎慶太, 湯ノ口万友, 栗城真也, 内川義則, 小林宏一郎, 鎌田清孝, 中瀬知哉, 西本英彦, 藤原耕二 : 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-97-223 (1997)
- 5) 山崎慶太, 湯ノ口万友, 藤原耕二, 中瀬知哉, 内川義則, 小林宏一郎, 鎌田清孝 : 日本応用磁気学会誌, 22, 749 (1998)
- 6) 阿倍隆之, 山崎慶太, 藤原耕二, 中瀬知哉 : 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-97-224 (1997)
- 7) 山崎慶太, 鎌田清孝, 湯ノ口万友, 中瀬知哉, 藤原耕二 : 平10 電気学会全国大会, 513 (1998) 8) JIS : 電磁鋼板単磁気特性試験方法, C2556 (1996)
- 9) 藤原耕二 : 日本能率協会磁気応用技術シンポジウム, 3-3-1 (1998)
- 10) 太田恵造 : 磁気工学の基礎 (共立出版, 東京, 1971)
- 11) A. Kameari : Applied Electromagnetics in Materials (Ed.K.Miya), Pergamon Press, 225 (1989)
- 12) T.Nakata, N.Takahashi, K. Fujiwara T.Imai and K.Muramatsu : IEEE Trans.Magn., 27, 4073 (1996)
- 13) K. Fujiwara, T.Nakata, and H. Ohashi : Improvement of Convergence Characteristic of the ICCG method for A-φ Method Using Edge Elements, IEEE Trans. Magn., 32, 804 (1996)
- 14) J.Jin : The Finite Element Method in Electromagnetics (1998) John Wiley & Sons
- 15) 中田高義, 高橋則雄 : 電気工学の有限要素法 (森北出版, 東京, 1990)
- 16) 小国力, 村田健郎, 三好俊郎, ドングラ, JJ, 長谷川英彦 : 行列計算ソフトウェア (丸善, 東京, 1991)
- 17) K.Fujiwara, T.Nakata and H.Fusayasu : IEEE Trans.Magn., 29, 1958 (1993)