アクティブ微振動制御装置を用いた 磁気シールドルームのノイズ低減に関する検討

正員 阿部 隆之 (竹中工務店) 正員 山崎 慶太 (竹中工務店)
非会員 宮内 哲 (郵政省通信総合研究所) 非会員 藤巻 則夫 (郵政省通信総合研究所)
正員 小林 宏一郎 (東京電機大学)

Noise Reduction in Magnetically Shielded Room Using by Active Microtremor Isolation System

Takayuki Abe, Member (Takenaka Corp.), Keita Yamazaki, Member (Takenaka Corp.),
Satoshi Miyauchi, Non Member (Communications Research Laboratory),
Norio Fujimaki, Member (Communications Research Laboratory),
Koichiro Kobayashi, Member (Tokyo DENKI University)

In biomagnetic measurements such as magnetoencephalography and magnetocardiography, very weak magnetic fields have been measured. Magnetic sensitivity can be limited by microtremor of magnetically shielded room (MSR) used for the measurements as well as environmental magnetic noise at low frequencies caused by streetcars (trains), motorcars traffics and elevators. There are two possible mechanisms for a contribution of vibration of the MSR to magnetic noise: movements of the MSR shielding panels change magnetic field inside the MSR and the vibrating SQUID magnetic sensors receive static magnetic field as time-varying magnetic field.

Thus, it is important to investigate the relationship between magnetic noise and vibration of the MSR, and method for eliminating the vibration is desirable. In this paper, we measured the magnetic noise in the MSR using a 148-channel SQUID magnetometers (BTI) when artificial vibrations were applied to the MSR by means of heel impacts and evaluated correlation between the vibration and magnetic noise. Further an active microtremor isolation system (TACMI) was installed as a base of MSR to reduce the microtremor of the MSR. We also measured reduction of vibration and magnetic noise in an MSR actually mounted on TACMI.

キーワード: 磁気シールドルーム、生体磁気計測、環境振動、磁気ノイズ、アクティブ微振動制御装置

1. まえがき

MEG・MCG等のSQUID磁束計を用いた生体磁気計測では、 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ T程度の微弱な磁界を対象とする。そのため、磁界計測感度は、地磁気中の自動車やエレベータ等の鉄体の移動^{(1) - (3)}や、電車の送・帰電流に起因する低周波環境磁気ノイズ^{(4) - (6)}、空調等のポンプ・ファン、電灯線等からの磁気ノイズ⁽⁷⁾などに制約される。これらの磁気ノイズは、強磁性体や超電導体で構成された磁気シールドルーム(MSR)によって低減することができるが⁽⁸⁾、磁界計測感度は、MSR自体の微振動に起因する磁気ノイズ^{(7) - (9)}に制約・影響される場合がある⁽⁸⁾。

MSRの微振動に起因する磁気ノイズのメカニズムには、以下の二つが考えられる。(1) 磁化されたシールドパネルの

微振動がMSR内の磁界を変動させる。(2) MSR内で分布する残留磁界の中をSQUID磁束計のセンサ自体が振動することによって、時系列的に変化する磁界変動としてとらえる。特に(1)のメカニズムの場合、磁界計測感度を向上させるため、MSRの遮蔽性能を高く設計してシールドパネルの層数、厚みを増すに従い、影響するパネルの磁化量が増大し、ノイズも大きくなる傾向がある。さらに、SQUID磁束計に差分型コイルを用いた場合に比べて、マグネットメータ型コイルを用いた場合、影響が大きくなると考えられる。ただし、キャンセレーションが働いていれば、影響は少なくできる。

一方、MSRの微振動の要因となる環境振動⁽¹⁰⁾の振動源としては、建物外部では地盤の微細な常時微動(数Hz)、道路・鉄道等の交通機関(10 Hz前後)があり⁽¹¹⁾、建物内

部では空調機・ダクトなどの設備機械（15～100 Hz）、人の歩行ステップ（2～3 Hz）等があるが、いずれも生体磁気計測に大きく影響する周波数帯である。また、受振体としてのMSRの振動特性は、これらの伝搬してくる振動源の振動数とともに、媒体であるMSR自体の固有振動数に依存し、磁気ノイズもこれらの周波数帯で大きく増幅すると考えられる。

従来からMSRの除振対策は検討されてきた。V.O. Kelhäiは、OTANIEMIのMSRで、周囲の振動をルームに伝えないために、コンクリート基盤に直接MSRを設置している⁽¹²⁾。A.Mager等は1980年にベルリンにあるドイツ物理工学研究所（PTB）に、当時としては世界最高の遮蔽性能（1 Hz以下において遮蔽率が約10,000）を有するMSRを実現したが⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾、MSR内部の活動に起因する振動が遮蔽壁に伝達することを防ぐために、遮蔽層を貫通した4本の太い黄銅性の柱で直接コンクリート基礎に固定して、MSR床部を支持している⁽¹⁵⁾。しかしながら、実際に設置されたMSRにおける振動に起因する磁気ノイズについては言及されていない。

また、Y. P. Ma等は、13mm厚のアルミニウムと1.6mm厚のミューメタルで構成されたパネル2層で組み立てられた内寸600mm×1,200mm×1,700mm、周囲からの振動の絶縁を考慮した設計の非破壊検査用MSRを製作した。周囲の床の振動から絶縁するために、外側層パネルの床とコンクリートスラブの間には7層の防振ゴムが入れられ、MSRの共振振動を減衰させるために、内側層と外側層の約14mmの床部の層間には、布袋に入れられた約1,100kgの砂が入れられた。周囲の実験室床を加振してもMSRの振動に起因する信号は確認されず、コンクリートスラブからの除振設計に対して満足した結果を得ている⁽¹⁶⁾。高橋等は外来振動を防ぐために、26面体、重量約10tのMSRを、固有振動2.45Hz程度の4個のエアダンパー上に設置した⁽¹⁷⁾。しかしながら、いずれの場合も、MSRの振動と磁気ノイズについての定量的な知見は明らかにされていない。また、MSRの基礎として防振ゴム、エアダンパー等の3Hz程度の除振装置を用いた場合、その除振効果は除振装置の固有振動数の $\sqrt{2}$ 倍程度の周波数にあり⁽¹⁸⁾、5Hz以下の振動を減衰させることは困難である。しかも、除振体の固有振動数を低くすると、被験者がMSRに入った際のMSR自体の振動が減衰するために時間を要し不快感の要因となり、かつ生体磁気で重要な周波数帯で、振動が増幅するという問題が生じる。

そこで、われわれは室内寸法1,300mm×1,300mm×2,100mm、44mm厚のボード両側に1mm厚のパーマロイが貼られたシールドパネルで組み立てられた簡易型MSR、アルミフレームで組んだ自立型のガントレとマグネットメータ型SQUID磁束計（ $\phi 15\text{mm}$ 1ターン、セイコーインスツルメント社製）を用いた、コンクリート床、壁パネルを加振させた実験で、以下のことを明らかにした。

コンクリート床を加振した場合のMSRの振動は、ガントレよりパネルの方が変位振幅が大きく、SQUID磁束計に現れる磁気ノイズは、パネルの水平方向の固有振動数成分で

あった。また、壁パネルを加振した実験では、壁パネルの1 μm の振動によって約1pTの磁気ノイズが生じたが、MSRが固定されている床に10Hz前後で1 μm 程度の環境振動が伝搬した場合、壁パネルでは10 μm に増幅するため、磁気ノイズは10pT以上であることが判明した⁽¹⁹⁾。また、二次勾配型SQUID磁束計（ $\phi 10\text{mm}$ 、2ターン-4ターン-2ターン、ベースライン25mm、セイコーインスツルメント社製）によって環境振動に起因する磁気ノイズを計測した場合、マグネットメータ型に比べて小さくなることを明らかにした⁽²⁰⁾。

しかしながら、本実験の結果はあくまでもプロトタイプの実験用MSRとSQUID磁束計で得られた結果であり、汎用の大型で高性能なMSR⁽²¹⁾⁽²²⁾、ガントレとマルチチャンネルSQUID磁束計⁽²³⁾～⁽²⁵⁾で構成された生体磁気計測システムでは、振動特性、磁気ノイズ特性もおおいに異なると予測される。さらに、シールドパネルの磁化と振幅から解析的に磁気ノイズを求める方法も試みられているが、パネルの磁化の大きさ・方向は、MSRの地磁気に対する方向および組み立て方法、輸送方法によって大きく異なるため、解析結果を実測の傾向、絶対値と近ずけることは困難である⁽²⁶⁾。

以上のように、汎用のマルチチャンネル生体磁気計測システムで用いられている大型で高性能なMSRの振動と磁気ノイズの複雑な関係を実験的に明らかにし、その除去方法を検討することは、生体磁気計測の精度を向上させるために重要である。

そこで、本報告では、まず、MSRの振動と磁気ノイズの相関を明らかにするために、ヒールインパクト（足踏み）加振時におけるMSR内磁気ノイズを、148チャンネルSQUID磁束計（BTI社製、マグネットメータタイプ）を用いて測定し、MSRの振動と磁気ノイズとの相関を実験的に評価し、振動と磁気ノイズの関係を定量的に明らかにするとともに、磁気ノイズのピークが同じ周波数に存在すると考えられるMSRの固有振動数を求めた。

さらに、MSRの微振動を低減させるためにアクティブ微振動制御装置（TACMI）をMSRの基礎として採用し、振動・磁気ノイズの低減効果を以前のモデル解析⁽²⁷⁾⁽²⁸⁾を基に評価した。TACMIは、定盤上のセンサが振動をキャッチすると、デジタルコントローラが最適な制御力を計算し、即座にアクチュエータが逆方向の力を発生させて振動を打ち消すため、防振ゴム、エアダンパー等のパッシブ装置単独では不可能な、地盤振動、歩行ステップなどが要因となる数Hz以下の除振が可能である特徴を有している。そのため、MSR内における被験者の微小な動き等に起因する振動も、速やかに減衰することが期待できる。

2. 実験方法

図1に実験に使用したMSR（トーキン製AK3タイプ、バキュームシュメルツ社設計）、SQUID磁束計、TACMIの概要と振動加速度測定点を示す。通常の基礎は鉄骨で構成するが、TACMIに用いた基礎は磁気ノイズを考慮して、コンクリート（非磁性鉄筋）構造とした。そのため、基礎の厚さ

図1. アクティブ微振動制御装置を基礎として用いた磁気シールドルームの概要および加速度測定点
Fig. 1. Active microtremor isolation system for magnetically shielded room and locations of acceleration measurement.

500mmは、有限要素法解析により最も弾性モード（基盤がゆがむ）の振動数が高く、コスト的にもより安価の厚さになるように設計した⁽²⁹⁾。

実験に使用したMSRは、解析結果の一般性と再現性を持たせるため、市販品(AK3)を用い、外側2mm厚、内側3mm厚の2層のパーマロイと、その間の1層の9mm厚アルミニウム層で構成され、各周波数の交流磁界に対しての遮蔽性能は、0.1Hzで40dB、1Hzで60dB、10Hzで82dB、10kHzの周波数帯では100dB以上である⁽²¹⁾。また、MSRの長手方向を南北に向けて設置してある。簡易型MSRではガントリは自立型であったのに対して、本MSRではガントリは天井パネルに取り付けられたレールから支持されており、MSR内の任意の場所での測定が可能になっているが、SQUID磁束計デューアの重量が天井パネルにかかりデューアはより振動しやすい可能性がある。今回は扉反対側の壁からy方向に約1,500mm、x方向はMSRの中央で、高さはホールヘッド型デューアの頭部中心で約1,300mmの位置にSQUID磁束計を設置した。148チャンネルSQUID磁束計から3チャンネルを選定し、x方向(B_x)、y方向(B_y)、z方向(B_z)の磁気信号を計測した。ただし、磁気ノイズを取り出すため、通常のMEG計測の際に行っているノイズキャンセレーション（環境磁気変動を他のSQUIDにより計測し、信号SQUIDに重み付けをして引き算する方法）は停止して測定した。実験に際し磁気ノイズに主として影響を与えるMSRの振動方向を確認する目的でMSRの天井パネル(z方向)、水平方向(x,y方向)の振動加速度を測定した。その結果、同一加振力に対し、3方向の振動加速度は、MSRの弱辺方向（短辺方向）であるx方向が最も大きいことが分かった。その理由は、MSRの水平方向に関する剛性は、平面形状としてx方向がy方向より寸法が小さいことから（短辺方向または弱辺方向）弱くなっており、振動すると考えられるためである。また、天井パネルの上下方向(z方向)については、コンクリート床に対して振幅が認められずガントリとの相

関が生じないため、磁気ノイズは現れないと推定される。したがって、MSR内の磁気ノイズとの相関は振動が大きいMSRのx方向に限定して実験を行った。

まず、TACMI無稼働時（除振機能なし）に、基礎(No.2)を4段階（強、中、弱、極弱）の強度（レベル）でヒールインパクト加振させ、MSRのx方向振動加速度(No.3)と磁気信号の相関を評価するとともに、MSRの振動増幅特性を評価した。また、振動に起因する磁気ノイズの大きさが依存すると考えられ、磁化されたシールドパネルによって形成されるMSR内残留磁気分布を、SQUID磁束計センサとほぼ同じ高さの $H=1,200\text{mm}$ 、 500mm 間隔で、x、y、zの各方向別に、フラックスゲート型磁力計を用いて測定した。

次に、同じくTACMI無稼働時に、コンクリートフロアスラブ(No.1)をヒールインパクト加振させ、磁気信号、加速度の周波数スペクトルを測定し、MSRの固有振動数を確認するとともに、磁気信号のピーク周波数について検討し、MSRの微振動に起因する磁気ノイズのメカニズムについて考察した。さらに、TACMI稼働時に、無稼働時と同じようにコンクリートフロアスラブ(No.1)をヒールインパクト加振させ、TACMI無稼働時の振動加速度、磁気信号と比較して、加振時における磁気ノイズ低減効果を評価した。

最後に、加振なしの磁気ノイズスペクトルを、TACMI無稼働時、稼働時と比較し、通常の状態におけるアクティブ微振動制御装置の磁気ノイズ低減効果を評価した。

3. 実験結果

<3.1> 磁気シールドルームにおける振動と磁気ノイズの相関 図2に、基礎をヒールインパクト加振した場合（加振レベル：中）の磁気信号、加速度の時系列変動を示す。No.3の加速度振幅はNo.2に比べて約2.5倍になっていること

図2. 磁気信号および振動の時系列波形（基礎加振、強度中）

Fig. 2. Fluctuations of magnetic signals measured with SQUID magnetometers and accelerations when artificial vibrations were applied by means of heel impacts on table (medium vibration level).

表1 MSR天井x方向加速度 (No.3) と磁気信号との相関係数
Table 1. The correlation coefficients between the acceleration at No.3 and the magnetic signals.

加振加速度の強度	B_x	B_y	B_z
強	0.74	0.14	0.80
中	0.73	0.04	0.80
弱	0.75	0.03	0.73

から、MSRの振動増幅率 τ は約2.5であると考えられる。簡易型MSRでは、 τ は約10であった⁽¹⁹⁾。これは、本MSRがアルミ9mmの板の接合部をチャンネルで締め付けた構造体であることに對し、簡易型MSRはパネルの組み合せのみでできているためである。また、磁気信号 B_x 、 B_z の波形は、No.2、No.3の加速度の波形と類似している。表1に、No.3加速度と磁気信号 B_x 、 B_y 、 B_z の相関係数 (CC) を示す。CCの解析にあたり加速度と磁気ノイズの位相差を考慮して、磁気ノイズ (16Hz) の1周期内における最大値を相関係数として用いた。No.3加速度と B_x 、 B_z とのCCは、それぞれ0.73、0.80で高い相関が認められたが、 B_y とのCCは0.04であり相関が認められなかった。

振動測定によりMSRの振動の主な方向はx方向であると認められたので、磁気ノイズはSQUID磁束計の測定点を通るx軸に沿った残留磁気 (B_x' 、 B_y' 、 B_z') の分布 (MSRパネルに起因する) から検討した。図3の(a)、(b)、(c)に、MSR内各方向 B_{rx} 、 B_{ry} 、 B_{rz} の残留磁気分布測定結果をそれぞれ示す。図3で、 B_{rx} 、 B_{ry} 、 B_{rz} とも入り口付近の勾配は大きい、(a)の B_{rx} 、(c)の B_{rz} にはSQUID磁束計のある中心付近で大きな勾配が存在しているのに対して、(b)の B_{ry} には大きな勾配は認められず一様であった。振動の主方向に沿ったMSR内残留磁気分布で、勾配の大きい方向であるx方向 (水平短辺方向)、z方向 (垂直方向) では、振動と磁気ノイズには高い相関があり、勾配の小さい方向であるy方向 (水平長辺方向) には、低い相関がある傾向が認められ、振動に起因する磁気ノイズの方向は、残留磁気分布にある程度依存していると考えられる。

図4に、No.3の加速度から求めたMSR天井パネルの変位 Δx と、磁気信号から求めた磁気ノイズ振幅 ΔB_x 、 ΔB_z との関係を示す。 ΔB_x 、 ΔB_z は Δx とほぼ比例して大きくなっており、MSRの天井パネルの水平変位振幅が約1 μm であった場合、x、z方向で約1.5 pTの磁気ノイズとなることが、回帰直線から推測することができる。MSRの水平変位振幅に対する磁気ノイズの大きさとしては、簡易型MSRを用いた実験で得た、同じく1 μm の微振動によって約1pTの磁気ノイズが生ずる結果⁽¹⁹⁾に比べて、やや大きくなっている。本MSRでは簡易型MSR⁽¹⁹⁾より、SQUID磁束計と天井、壁のシールドパネルの距離は大きくなっているにもかかわらず、上記の結果を得た理由としては、パーマロイ2mm、3mmの2層でMSRが構成され、1mm 2層の簡易型MSRより、パネルの磁化量が増大したからと考えられる。

図5に、コンクリートフロアスラブを加振した場合の磁

(a) x方向 (B_{rx})

(b) y方向 (B_{ry})

(c) z方向 (B_{rz})

図3 x軸に沿ったMSR内残留磁気各方向成分の分布 ($H=1,200$)

Fig.3 Distribution of directional residual magnetic field along x-axis ($H=1,200$).

図4. 磁気ノイズと磁気シールドルーム天井パネルx方向変位との関係
Fig. 4. Relationship between magnetic noise and displacement in x-direction of the MSR ceiling panel.

図5. 磁気信号および振動の周波数スペクトル
(コンクリートフロアスラブ加振、TACMI無稼働時)
Fig. 5. Spectrum densities of magnetic signals measured with SQUID magnetometers and accelerations when artificial vibrations were applied by means of heel impacts on concrete floor slab. (without TACMI's operation).

気信号、加速度の周波数スペクトルを示す。図5で、No.3 加速度には16 Hz、21.5 Hzのピークが認められるのに対して、No.1加速度には同じピークが存在しないことから、16 Hz、21.5 HzがMSRの固有振動数であると考えられる。別途測定したSQUIDガントレの固有振動数は、6 Hz、14 Hzであった。MSRの振動と相関が高かったBx、Bzの磁気信号の主なピーク周波数は、No.3加速度のピークと一致しており、6 Hz、14 Hzには認められなかった。これは、基礎に固定されているMSRの質量に対し、デュアの質量が数十分の一と小さいため、MSRの振動特性が支配的であることによるとと思われる。Bzには他に2.5 Hz、5 Hzにピークが認められたが、No.3加速度には同じピーク周波数が存在しなかったため、振動でない他の環境磁気ノイズに起因すると考えられる。MSR構造体の剛性と強度を向上させた場合、上で計測した固有振動数より高くなることが考えられるが¹⁶⁾、減衰定数には変化がないため振動増幅率の低減には寄与でき

図6. アクティブ微振動制御装置上に設置された磁気シールドルーム
Fig. 6. Magnetically shielded room mounted on TACMI.

ない。そこで、振動に起因する磁気ノイズを低減させるためには、MSRが設置された床からの振動を遮断することが最も効果的であると考えられ、TACMIをMSRの基礎として用いることにした。

<3.2> MSRの基礎としてアクティブ微振動制御装置を用いた場合の評価 図6に、郵政省通信総合研究所で実際に設置したアクティブ微振動制御装置（TACMI）を示す。TACMIには、約500mmのコンクリート板（基礎）と約10tのMSRが積載されており（図1）、基礎を1 Hz以下の低い振動数までの微振動に対して、6自由度（x, y, z, θ_x , θ_y , θ_z ）の制御を行っている。図6に示すように、TACMIの制御にはエアークチュエータを用いているが、エアークチュエータから発生する磁気ノイズについては、パーマロイ製ボックスを用いて十分な磁気遮蔽対策を行った。

図7に、TACMI稼働時のコンクリートフロアスラブ（No.1）から基礎（No.2）への伝達関数を示す。さらに、今回のアクティブ微振動制御装置では、アクティブ制御なしでエアークッションのパッシブ制御のみの場合についても、同様に伝達関数を測定した。図7に示すように、TACMIは、パッシブ制御のみの場合と比べても、10 Hz以下で大きな減衰特性を有している。

図8に、TACMI稼働時における、コンクリートフロアスラブ（No.1）をヒールインパクト加振させた場合の、加

図7. No.1(コンクリートフロアスラブ)から
No.2(基礎)への伝達関数測定結果
Fig. 7. Transfer function between the acceleration
at No.1(on floor slab) and No.2(on table).

図8. 磁気信号および振動の周波数スペクトル
(コンクリートフロアスラブ加振、TACMI稼働時)

Fig. 8. Spectrum densities of magnetic signals measured with SQUID magnetometers and accelerations when artificial vibrations were applied by means of heel impacts on concrete floor slab. (with TACMI's operation).

速度、磁気信号の周波数スペクトル測定結果を示す。図8の B_x 、 B_z 、No.3加速度では、図5で認められた16 Hz、21.5 Hzのピークが明瞭に低減された。しかしながら、TACMI稼働時にかかわらず、 B_z とNo.3加速度には29.5 Hzに小さなピークが認められたが、これはコンクリート基礎定盤のモード実験結果より、弾性モード(基盤がゆがむ)と考えられる⁽³⁰⁾。

図9,10に、暗振動でのTACMI無稼働時、稼働時の加速度、磁気信号の周波数スペクトル測定結果をそれぞれ示す。暗振動の状態でも、図9のTACMI無稼働時では、コンクリートフロアスラブをヒールインパクト加振させた場合に比べて、レベルは下がるが、基礎上 z 方向(No.2)、MSR天井 x 方向(No.3)の加速度と B_x 、 B_z にはMSRの x 方向の固有振動数と考えられる16 Hzと、24 Hz、29.5 Hz(図5では表示感度の違いより小さく見えている)には明瞭なピークが認

図9. 磁気信号および振動の周波数スペクトル
(暗振動、TACMI無稼働時)

Fig. 9. Spectrum densities of magnetic signals measured with SQUID magnetometers and accelerations when no artificial vibrations were applied. (without TACMI's operation).

図10. 磁気信号および振動の周波数スペクトル
(暗振動、TACMI稼働時)

Fig. 10. Spectrum densities of magnetic signals measured with SQUID magnetometers and accelerations when no artificial vibrations were applied. (with TACMI's operation).

められた。16 Hzのピークは B_y にも認められる。さらに、11 Hz付近にもNo.2、No.3と B_y 、 B_z にはピークが認められる。それに対して、図10のTACMI稼働時では、図9で認められた11 Hz、16 Hz、24 Hzのピークは振動、磁気信号で認められず、暗振動の状態でも、TACMI振動に起因する磁気ノイズの低減効果が確認された。TACMIを用いることによって、磁界計測感度の向上に有効である。ただし、29.5 Hzの

ピークは、加振の場合と同様に、TACMI稼働時でも振動、磁気信号で認められた。

4. まとめ

汎用の生体磁気計測システムで用いられている大型で高性能、長方形の形状を有する磁気シールドルームの水平方向（短辺方向）の加速度と、水平方向（短辺方向）、垂直方向の磁気ノイズにはそれぞれ高い相関が認められ、磁気ノイズ振幅は、シールドパネルの変位振幅にほぼ比例していた。本MSRの固有振動数は16Hz、振動増幅率 τ は約2.5であり、MSRを含む本生体磁気計測システムでは、天井パネルの水平変位振幅が約1 μ mであった場合、x、z方向で約1.5 pTの磁気ノイズとなっていた。一方、磁気ノイズのピーク周波数には、ガントレの固有振動数は認められなかった。このことから、本実験の微振動に起因する磁気ノイズは、主に1で述べた(1)の磁化されたシールドパネルの微振動に依存すると考えられる。

さらに、x方向に沿ったMSR内残留磁界分布で、勾配の大きい方向では振動と磁気ノイズには高い相関があり、勾配の小さい方向では低い相関がある傾向が認められた。振動に起因する磁気ノイズは、振動の主方向に沿った残留磁気分布勾配の大きい方向で大きくなると考えられる。

アクティブ微振動制御装置をMSRの基礎として用いることによって、MSRの固有振動数を含む低周波の振動に起因する磁気ノイズを低減できることが、コンクリートフロアスラブを加振した場合、暗振動の場合、それぞれの実験で確認できた。

今後、シールドパネルの磁化を仮定して、シミュレーションにより予め磁気ノイズを予測する手法をさらに検討したい。

（平成11年5月31日受付，平成11年8月2日再受付）

文 献

- (1) 松葉博則・藤巻則夫・宮内哲：「磁性体，電流線の及ぼす環境磁気雑音」，日本生体磁気学会論文誌，**10**，2，1～10（1997）
- (2) 山崎慶太・藤原耕二・高橋則雄・湯ノ口万友・鎌田清孝：「磁性体の移動に起因する磁気ノイズ解析」，電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-98-145（1998）
- (3) 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：「磁性体の移動に起因する磁気ノイズの考察」，日本応用磁気学誌，**23**，2，1509～1912（1999）
- (4) 山崎慶太・小谷誠・内川義則：「電車からの低周波磁気ノイズについての考察ー生体磁気計測用磁気シールドルームの設計のためにー」，日本応用磁気学誌，**15**，2，597～600（1991）
- (5) 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：「生体磁気計測のための低周波環境磁気ノイズに関する検討ー市電に起因する磁気ノイズー」，電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-97-223（1997）
- (6) 山崎慶太・湯ノ口万友・鎌田清孝・内川義則：「鹿児島市における市電に起因する低周波環境磁気ノイズに関する検討」，日本生体磁気学会論文誌，**10**，2，29～39（1997）
- (7) Vrba J.: "SQUID gradiometer in real environments", H. Weinstock (eds) SQUID Sensors, Fundamentals, Fabrication and Applications, Kluwer Academic Publishers, 117～178（1996）
- (8) 山崎慶太：「磁気シールドルームの開発動向」，電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-99-7（1999）
- (9) 山崎慶太・阿部隆之・海野健一：「生体磁気計測用磁気シールドルーム及びガントレの開発」，日本建築学会技術報告集，**1**，215～222（1996）
- (10) 柳田裕：環境振動工学入門，理工図書
- (11) 山原浩：環境保全のための防振設計，彰国社
- (12) V.O.Kelchä: "Construction and Performance of the Otaniemi Magnetically Shielded Room", IC SQUID / 3rd Workshop on Biomagnetism, Berlin, West Germany, March 6～9（1980）
- (13) A.Mager: "The Berlin Magnetically Shielded Room", Biomagnetism, 51～78（1981）
- (14) S.N.Erne, H.D.Halbohm, H.Scheer and Z.Trontelj: "The Berlin Magnetically Shielded Room (BMSR), Section B: Performances", Biomagnetism（1981）
- (15) A.Mager: "Magnetisch abgeschirmte Kabine zur Aufnahme Kleinster magnetischer und elektrischer Biosignale", Naturwissenschaften **69**，383～388（1982）
- (16) Y.P.Ma and J.P.Wikswow, Jr.: "Magnetic Shield for Wide-Bandth Magnetic Measurements for Nondestructive Testing and Biomagnetism", Rev. Sci. Instrum., **62**，11，2654～2661（1991）
- (17) 高橋正広・佐々木勇三・古賀清・中村彰：「高性能磁気シールドルームの試作」，応用物理**52**，1，59-68（1983）
- (18) 田中基八郎・大久保信行：振動をみる，テクノライフ選書，オーム社
- (19) 阿部隆之・山崎慶太・藤原耕二・中瀬知哉：「磁気シールドルームにおける振動と磁気ノイズに関する検討」，電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-97-224（1997）
- (20) 阿部隆之・山崎慶太・藤原耕二・中瀬知哉：「環境振動に起因する磁気シールドルームの磁気ノイズ」，第13回日本生体磁気学会大会論文集，**11**，1，180～181（1998）

- (21) TOKIN カタログ:「磁気シールドルーム/装置」, Cat. No. OT-02JE July 00, 1998 H300P2
- (22) NKK PLANT カタログ:「磁気シールドルーム」, NSS. '95.10-②-1 NSS
- (23) D.S. Buchanan and R.T. Johnson: "Recent Developments in Whole Head and Whole Body Magnetic Measurements," 第13回日本生体磁気学会大会論文集, 11, 1, 44~48 (1998)
- (24) Ahonen, A. I.: "New developments in MEG-instruments," 第13回日本生体磁気学会大会論文集, 11, 1, 50~53 (1998)
- (25) J. Vrba: "Optimization of SQUID Detectors for MEG Application," 第13回日本生体磁気学会大会論文集, 11, 1, 54~57 (1998)
- (26) 阿部隆之・山崎慶太・藤原耕二・中瀬知哉:「環境振動に起因する磁気シールドルームの磁気ノイズ解析」, 平10電気学会全国大会, No.512 (1998)
- (27) 阿部隆之・山崎慶太・藤巻則夫・宮内哲:「アクティブ除振装置を用いた磁気ノイズ低減」, 第22回日本応用磁気学会学術講演集, 21aF-6 (1998)
- (28) T. Abe, K. Yamazaki, N. Fujimaki and S. Miyauchi: "Magnetic Noise Due to Environmental Vibration in Magnetically Shielded Room," to be published in *Biomagnetism* 98.
- (29) 阿部隆之・山崎慶太・佐久間学・原川健一・東山一勇・上野照剛・伊良皆啓治・三原利通:「生体磁気計測用磁気シールドルームの研究(その3)ー環境振動の影響評価ー」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1705~1706 (1992)
- (30) 倉部誠・市原千治:「振動モード解析入門」, 日刊工業新聞社

阿部 隆之 (正員) 1957年10月5日生。80年3月東京理科大学理学部応用物理学科卒業。同年4月(株)竹中工務店入社、現在に至る。主として、環境振動の特性および制御に関する研究、固体伝搬音の予測技術に関する研究、環境振動に起因する磁気ノイズに関する研究に従事。日本建築学会、電気学会、日本応用磁気学会、日本生体磁気学会

山崎 慶太 (正員) 1957年4月24日生。82年3月早稲田大学大学院理工学研究科建設工学専攻修士課程修了。同年4月(株)竹中工務店入社、現在に至る。主として、建築物に対する磁場の影響とその評価法、および磁気応用技術に関する研究に従事。日本生体磁気学会、日本ME学会、日本応用磁気学会、日本機械学会、日本建築学会会員。博士(工学)。

藤巻 則夫 (非会員) 1957年2月15日生。80年3月東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年4月(株)富士通研究所に入社、99年4月郵政省通信総合研究所にはいる。主として、超伝導デバイス(マイクロ波・ミリ波検出器、論理素子、磁気センサーなど)の研究、EEG、MEG、fMRIによる脳機能計測の研究に従事。電子情報通信学会、IEEE、応用物理学会、日本生体磁気学会、日本ME学会、日本生理心理学会、Society for Neuroscience。博士(工学)。

宮内 哲 (非会員) 1954年9月24日生。77年3月早稲田大学第一文学部心理学科卒業。91年1月岡崎国立共同研究機構生理学研究所助手、93年10月郵政省通信総合研究所主任研究官、現在に至る。主として、脳波・脳磁図・fMRI・心理実験による人の脳活動の非侵襲的計測に関する研究に従事。日本神経科学会、日本心理学会、日本生理心理学会、日本生体磁気学会、日本睡眠学会会員。博士(医学)。

小林 宏一郎 (正員) 1968年4月3日生。94年3月東京電機大学理工学研究科応用電子工学専攻修士課程修了。同年4月池上通信機(株)入社、95年4月東京電機大学理工学部応用電子工学科助手、98年10月東京電機大学超電導応用研究所助手、現在に至る。主として、医用電子計測および信号処理に関する研究に従事。日本生体磁気学会、日本ME学会、日本応用磁気学会、ライフサポート学会会員。博士(工学)。