

磁気的非破壊検査に関するシールド方法の検討

松本 和健* · 中本 涼介** · 細野 陽* · 佐藤 将志***

Shield System for Magnetically Non-Destructive Evaluation

Kazutake MATSUMOTO, Ryosuke NAKAMOTO, Yoh HOSONO and Masashi SATO

Abstract — A method for the cancellation of environmental magnetic noise is described for Non-Destructive Evaluation (NDE) system based on a SQUID magnetometer. NDE system related to a measuring the conductivity of the shallow subsoil is characterized by the signal detecting at specialized frequency and the use in the field. Therefore, we discuss the shield systems with NDE which have the performance of noise reduction in low- and high-frequency region except for this specialized frequency, and the construction with moving ability around anywhere. These shield systems are successfully resulted in both a SQUID based active shielding method in the low-frequency region and a metal foil wrapped shielding method in the high-frequency region.

Key words : SQUID magnetometer, NDE, magnetically shielding, active compensation

1. はじめに

SQUID磁束計を利用して非破壊検査や資源探査を応用目的とした様々な微小磁界計測システムが提案されている^[1]。高感度磁界計測を実現するためには、磁束計システム全体のダイナミックレンジとスルーレートを確保する必要がある^[2]。このような高感度磁界計測を実現するために、十分な環境雑音除去性能を持つシールド技術が要求される。本研究では、屋外への携帯が可能な構造で、測定対象の特定周波数以外の周波数帯域で80dB以上のシールドニングファクター（磁気雑音を1/10,000以下にシールドする性能に相当）を実現することを目的としている。

我々は、SQUID磁束計を用いた非破壊検査の屋外応用として、磁界無線探査法による土壌インピーダンスの計測^[3]を研究している。この応用では、屋外での微小磁界計測を環境磁気雑音の影響なしに行うことはもちろんであるが、典型的な微小磁界応用である生体磁気計測で対象とする周波数領域^[1]よりも二桁以上も高い周波数^[3]（500 [kHz] ～ 2 [MHz] 程度）での動作

が要求される。但し、この磁界計測で測定対象となる周波数はラジオの中波帯であり、離散した特定の周波数の信号が対象であるといった特徴を持っている。そこで、本研究では、この特定の周波数以外の低周波領域と高周波領域の雑音を除去できる、二種類のシールド方法について検討した。

SQUID磁束計を用いた動的磁気シールド法は低周波領域で大きなシールド性能を示すので^[4]、本研究の応用でも低周波領域のシールド方法に用いることにした。本研究では、動的磁気シールド法の磁束帰還回路系の伝達特性の設計及び補正磁界の均一度向上可能なコイル構成の設計を行った。特に、可搬性のため可能な限り小型のコイルで、より高周波まで雑音除去可能な動的磁気シールド技術の実現に関して検討した。

一方、計測信号よりも高周波側の電磁波のシールドについては金属箔による電磁波シールドを用いることにした。本研究では、金属シールドの周波数特性について実験値と近似式の比較検討を行った。また、導体シールド面の大きさ又は、導電率を温度等によってコントロールすることで、シールド周波数を計測信号に合わせて可変できる方法の実現を目的としている。そこで今回は、金属シールドの形状や抵抗率による基礎的なシールド特性変化の実験的評価を行った。

* 釧路高専電子工学科

** 釧路高専電子情報システム工学専攻

*** 現在、北海道電力に勤務

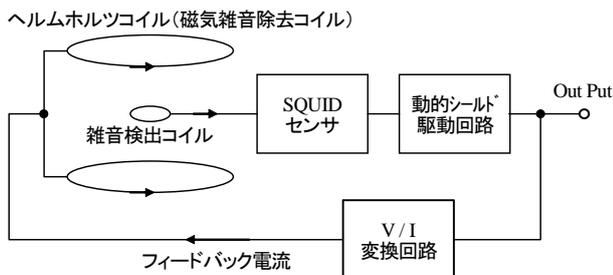


図1. 動的磁気シールドの構成

2. 低周波領域におけるシールド方法

低周波領域の磁氣的シールド方法の典型的な手法は、高透磁率材料を用いた磁気シールドである。

SQUID磁束計による生体磁気計測などの応用では、磁気シールドルームは欠かせないものとなっている^[2]。しかし、磁気シールドルームには、磁性材料の性質上高周波でのシールド効果に期待できず、さらに十分なシールド効果を得るには非常に高価で移動が不可能なシステムになる。本研究では、比較的安価で持ち運びが可能なSQUID 磁束計を用いた動的磁気シールドシステムについて検討することにする。但し、動的磁気シールドシステムも低周波域側でのみシールド効果が有効であることから、高周波域の雑音に対しては別のシールドシステムで補完する必要がある。

動的磁気シールドシステムの構成は、SQUID磁束計の磁束フィードバックループと同じである。図1.に動的磁気シールドシステムの構成の概略図を示す。図に示される検出コイル周辺に雑音除去コイルが作る磁界が負帰還され、検出コイルのある空間でゼロ磁場にバランスする構成になっている。図1. に示すように、均一磁界を作るためにヘルムホルツコイルを雑音除去コイルに用いた場合、均一磁界雑音 (0 次勾配の磁界) を対象として除去することになる。検出コイルの周辺空間に比べて遠方の雑音が作る磁界は、検出コイル空間では 0 次勾配成分を主として低次の勾配成分が支配的である。そのため、均一磁界で打ち消される磁界は遠方の雑音が対象となり、より高次の勾配を持つ近傍の信号磁界は残るために、シールドシステムとして用いることができる^[4]。

動的磁気シールドシステムの性能は、大きく分けて主に二つの要因で決定されている。一つ目は、雑音除去コイルの作る磁界の磁束密度均一度である。0 次勾配の補正をする場合、磁界除去空間内に帰還される磁界が均一であることが必要である。この均一度は静磁界の性質に起因するので、動的磁気シールドの静特性

と呼ぶことにする。特に環境雑音は低周波領域で大きな値となるため、非破壊検査や土壌インピーダンスの微小磁界計測を行う場合には、80 ~100 [dB] 程度の磁界除去性能が要求される。

二つ目のシールド性能の決定要因は、フィードバック系の伝達特性である。伝達関数は周波数により変化する。従って、この特性で決められるシールド性能は周波数に依存し、動的磁気シールドの動特性と呼ぶことにする。応用によって要求される周波数領域は異なるが、土壌インピーダンスの計測では数百 [kHz] 程度の比較的高周波までのシールド性能の動特性が要求される。以下に、動的磁気シールドの静特性と動特性のそれぞれについて検討を行う。

2.1. 動的磁気シールドの静特性に関する検討

動的磁気シールドの雑音除去コイルのつくる磁界の空間変化は、検出コイルの配置される計測空間内でいかに均一な静磁界を作れるかを決定している。従って、計測空間に比べて非常に大きな雑音除去コイルを作成すると均一度は良くなり、シールド性能は向上することになる。ところが、屋外での可搬性を考慮する場合、動的磁気シールドの雑音除去コイルはできるだけ小さいことが望ましい。そこで、今回のコイル設計に際しては、最小限の寸法で計測空間内の均一度を高くする方法を検討する。但し、雑音除去コイルの設計の前提条件として今回の実験で使用するデュワー(図2 (a)参照) が入らなければいけない。デュワーが入り、最小限のサイズとなることを設計目標として寸法を決

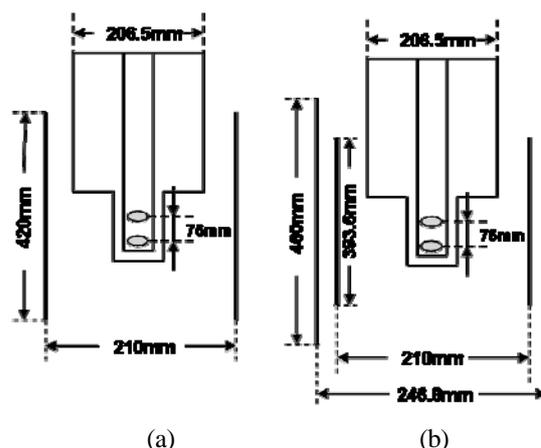


図2. 磁気雑音除去コイルの設計図

- (a) ヘルムホルツコイルで構成した磁気雑音除去コイル(一辺の長さ 420mm コイル間隔 210mm)
- (b) 付加的磁気補正コイル付きの磁気雑音除去コイル (外側コイル: 一辺の長さ 460mm コイル間隔 246.8mm 内側コイル: 一辺の長さ 369.3mm コイル間隔 210mm)

める。計測空間の大きさは、検出コイルのベースライン長を一辺とする 75 [mm] の空間とした。

デュワーの最大直径は 206.5 [mm] であるので、コイル間隔は 206.5 [mm] が最小である。試作機作成に際して、コイル巻枠等の構造材料には、非磁性で絶縁性の材料であり、加工が容易であることが求められる。これらの要求事項から木材を使用する予定である。木材の加工精度を数 [mm] 程度と考えるとコイルの各寸法を決めることにする。そこで、デュワー幅 206.5 [mm] に対して 210 [mm] をコイル間隔とする。磁気雑音除去コイルに用いる四角形ヘルムホルツ型コイルの一辺はコイル間隔の2倍の 420 [mm] とした(図2(a)参照)。コイル間隔 210 [mm] コイル一辺 420 [mm] の磁気雑音除去コイルの磁束密度均一度 (MH) の計算値は $MH = 3.29373 \times 10^{-3}$ であった。ここで、 MH は以下の式で定義した。

$$MH = \frac{\langle \text{検出空間内の最大磁束密度差} \rangle}{\langle \text{検出空間内の最大磁束密度} \rangle} \quad (1)$$

MH を用いて、動的磁気シールドの静特性によるシールド性能として、シールドニングファクター (SF_s) を以下の式で定義する。

$$SF_s = 20 \log_{10} \left(\frac{1}{MH} \right) [\text{dB}] \quad (2)$$

ヘルムホルツ型コイルで得られる磁束密度均一度は、式(2)より $SF_s = 49.6$ [dB] に相当し、雑音除去コイルのシールドニングファクターが 80 [dB] 以上という要求を満たしていない。すなわち、 MH は 10^{-5} の桁であることが設計目標となる。

ヘルムホルツ型コイルの構成で、最小限のサイズの雑音除去コイルを設計する場合、必要な均一度を得ることができないことが判った。そこで、磁界強度の形状を補正する目的で付加的補償コイルを追加して、磁束密度均一度を向上する方法を検討した。ヘルムホルツコイルの構成条件から少しずつ寸法を変化させたような擬似ヘルムホルツコイルを二組使用する。図2.(b)に示されるような、外側コイルと内側コイルの二組のコイルを用いる。内側コイルのコイル間隔は前述と同様の理由から 210 [mm] とすると、数値計算の結果から外側コイルは一辺の長さ 460 [mm] コイル間隔 246.8 [mm]、内側コイルは一辺の長さ 369.3 [mm] コイル間隔 210 [mm] が最適であった。この磁気補正コイルが発生させる磁束密度均一度の値は、 $MH = 2.53111 \times 10^{-6}$ であった。(この値は $SF_s = 112$ [dB] に相当するので、設計目標を満たしている。)

図3. は提案する二組の磁気補正コイルが発生する

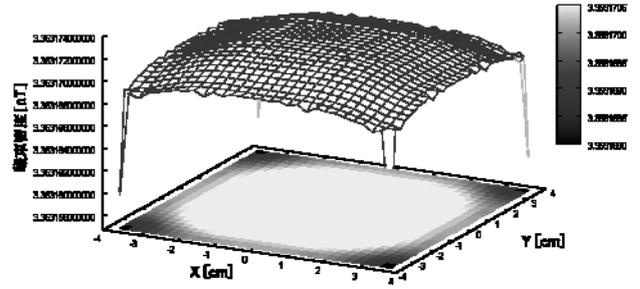


図 3. x-y 平面上の磁束密度分布図

磁気雑音除去コイルの構造は図 2. (b)参照, x-y 平面は磁気雑音除去コイルの中心軸方向を z 軸としてそれに直交する面である。

x-y 平面上の B_z の磁束密度の分布を示す(検出コイルは z 軸方向のマグネトメータ)。図からわかるとおり、中央付近に均一な磁界が発生し ± 30 [mm] 以上外側で急激に磁束密度が変化する。実験をする際には出来るだけ中央に検出コイルを正確に配置することが望まれる。

2.2. 動的磁気シールドの動特性に関する検討

動的磁気シールドの各要素のブロック図を図4. に示す。図中の ϕ_n は雑音磁束を、 ϕ_f は雑音除去コイルからフィードバックされる補正磁束を、 ϕ_d はシールドされて残る磁束を表している。 τ_0 はSQUIDデバイスの時定数なので、他の時定数に比べて小さく無視できる。従って、補正磁束を示す伝達関数は

$$\frac{\phi_f}{\phi_n} = \frac{1}{1 + \frac{R_f}{V_\phi G_a M_f} \frac{s \tau_1 (1 + s \tau_2) (1 + s \tau_3)}{e^{-s \tau_d}}} \quad (3)$$

となる。ここで、 V_ϕ はSQUID素子の磁束-電圧変換係数、 G_a は駆動回路のアンプ全体のゲイン、 M_f は雑音除去コイルと検出コイルの相互インダクタンス、 R_f はVI変換係数、 τ_1 は積分器の時定数、 τ_2 はVI変換器、 τ_3 は雑音除去コイルの時定数、 τ_d は雑音除去コイル及び配線の伝送遅延(約10 [ns/m])を表している。さらに図4.より、検出コイルで検出される磁束 ϕ_d は

$$\phi_d = \phi_n - \phi_f \quad (4)$$

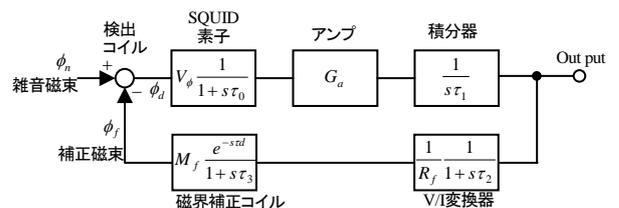


図4. 磁気シールドのフィードバック系のブロック図
動的磁気シールドにおける雑音磁束と検出磁束の伝達

特性は、式(3)と(4)より

$$\frac{\phi_d}{\phi_n} = \frac{1}{1 + \frac{V_\phi G_a M_f}{R_f} \frac{e^{-s\tau_d}}{s\tau_1(1+s\tau_2)(1+s\tau_3)}} \quad (5)$$

となる。式(5)より動的磁気シールドの動特性のシールドインデックス SF_d が以下のように定義できる。

$$SF_d = 20 \log_{10} \left(\frac{\phi_n}{\phi_d} \right) [\text{dB}] \quad (6)$$

アンプと積分器及び V/I 変換器を含む動的磁気シールドの駆動回路の設計を行い、式(7)の SF_d の伝達特性に対する評価を行った。設計した回路の主な仕様は、積分器の時定数を $\tau_1 = 200$ [ps], 20 [ns], 2 [μs] から選択できるようにした。また、 $\tau_2 = 10$ [μs], $\tau_3 = 1.37$ [μs], $\tau_d = 140$ [ns] として、式(7)より、 SF_d を数値計算した。図5. に SF_d の周波数特性の計算結果を示す。その結果、 $\tau_1 = 200$ [ps] のとき、100 [kHz] 程度までの周波数でシールド性能を実現できることが判った。図5. 中には参考のために、静特性の SF_s を100 [dB] と仮定した場合のレベルも太い実線で記入してある。

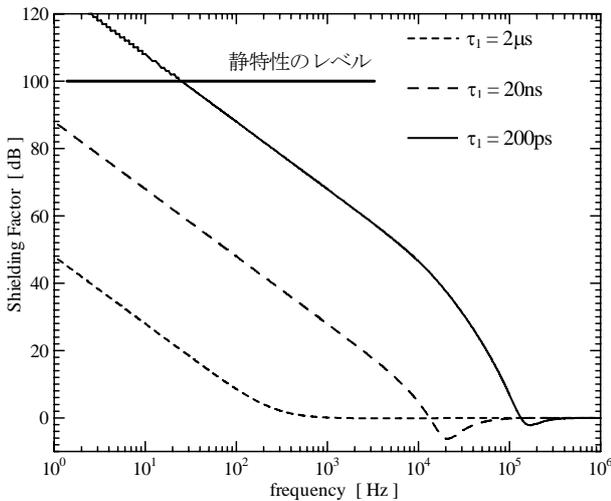


図5. 動的磁気シールドの動特性 ($\tau_2 = 10$ [μs])

3. 高周波領域におけるシールド方法

本研究では、計測対象周波数帯域が 500 [kHz] ~ 1.5 [MHz] であることから、約 1 [MHz] 以上の周波数域の高周波の環境磁気雑音は、除去する必要がある。しかも、測定対象周波数が特定の周波数であることから、その周波数にあわせて、シールド可能な周波数にある程度の可変性と、正確な遮断周波数の設計が要求される。そこで本論文では、金属箔による電磁波シールドの遮断周波数を実験値と近似式の比較から明確に

するとともに、シールドの遮断周波数の可変が可能な方法について検討することにする。

本研究で対象とする電磁界は、自由空間中の平面波で周波数帯は1 [MHz] 前後であり、特に計測対象は磁界である。そこで、低インピーダンス界での磁界のシールド効果の測定手法であるスモールループコイル^[5]を採用した。この方法は、100 [Hz] ~ 20 [MHz] の周波数帯で使用可能で、シールド材料の壁の両側近傍に送信コイルと受信コイルを設置してシールド効果を評価する。但し、今回のシールド効果の測定対象の金属箔は、図2. に示すようなFRPデュワールのテールの細い部分の周りに設置することを想定しているため、φ90 [mm]、高さ300 [mm] 程度のアクリル製の円筒の周りに設置された。従って、スモールループ測定で規定されている φ300 [mm] のループコイル^[5]は設置不可能である。従って、FRPデュワールのテール φ35 [mm] 内に設置可能な寸法から、図6. に示すような φ32 [mm] × 2 [turn] のコイルを送信側と受信側に用いた。両方のコイルの中心間隔は 50 [mm]、300 [mm]の高さの円筒シールドのほぼ中央くらいの高さに設置した。送信側コイルには30 [Ω] の抵抗を介して発振器を接続し、400 [Hz] ~ 15 [MHz] の正弦波を入力した。抵抗の両端の電圧を測定してコイルへの入力電流をモニタしている。一方、受信側コイルの両端の電圧は、OPアンプ

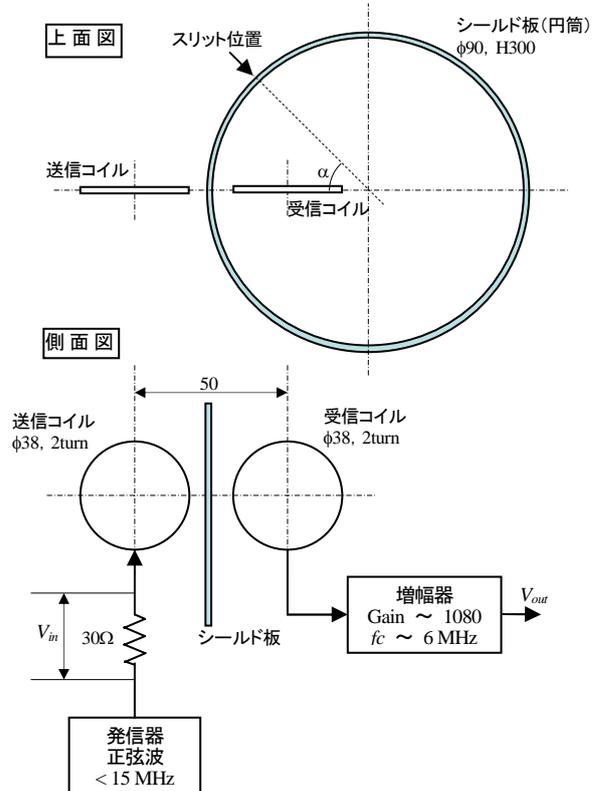


図6. スモールループ法によるシールド効果の評価 AD829による非反転増幅器を4段構成して1080倍に増

幅した後にデジタルオシロスコープで加算平均して計測した。作成した増幅器の遮断周波数は約 6 [MHz] である。

シールド効果の評価は、低周波域のシールド方法と同じ評価をするために、シールド材料がない場合の測定値 $v_n(f)$ とシールド材を設置した場合の測定値 $v_s(f)$ より（両方の測定値は、電流のモニタ値と増幅度の周波数特性を考慮し、 $v_n(f)$ は電磁誘導の計算値とフィッティングしている）シールドファクターを

$$SF_m = 20 \log_{10} \left(\frac{v_n(f)}{v_s(f)} \right) [\text{dB}] \quad (7)$$

と定義した。

シールド効果の計算値には、非磁性金属材料の低インピーダンス界の吸収項の近似式⁵⁾を用い、シールドファクターの計算値 SF_c として

$$SF_c = 1.7t \sqrt{\frac{f}{\rho}} [\text{dB}] \quad (8)$$

を用いた。ここで、 ρ はシールド材の抵抗率 [Ωm]、 f は周波数 [MHz]、 t はシールド材の厚さ [cm] である。

高周波領域の磁気シールドについては、各種材料に検討すること、材料に対するスリットの影響、温度変化によるシールド特性への影響などについて実験的に検討した。特に、微小磁界計測応用において金属材料の存在は熱雑音の発生源として磁界測定に制限を加えることになる。これに対する対策として、検出コイルと熱雑音電流の磁氣的結合を小さくする目的で、スリット状のシールドが用いられる。検出コイル近傍に設置される場合には、金属線を板状に束ねたコイルフォイルが用いられることもある。

まず、入手可能な各種材料のシールド効果 SF_m と式 (7) の近似式 SF_c の比較検討を行った。図7. (a)~(c) に各種材料および温度の違いによるシールドファクターの周波数特性を示す。これらの結果より、抵抗率の温度による変化、材料による抵抗率の変化、材料の厚さの変化に対して、式(7)の低インピーダンス界の吸収項の近似式でシールドファクターを予想可能であることがわかる。図7. 中の 1 [MHz] 程度を境にしたシールドファクターの実験値の低下は測定系の遮断周波数が影響していると予想されシールドファクターを反映したものではないと考えている。

次に、シールド効果に対するスリットの影響について実験的な確認を行った。使用したシールド材料は厚

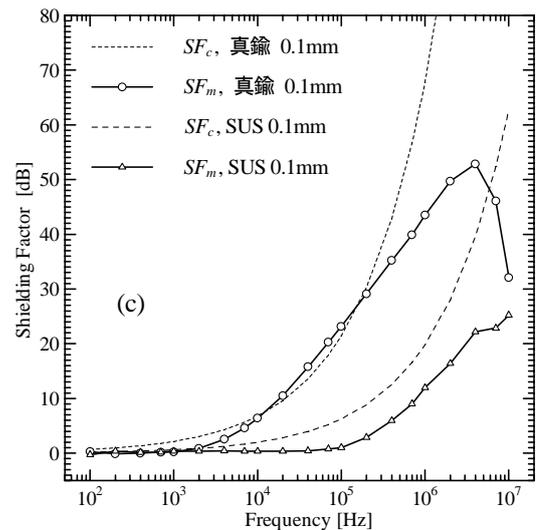
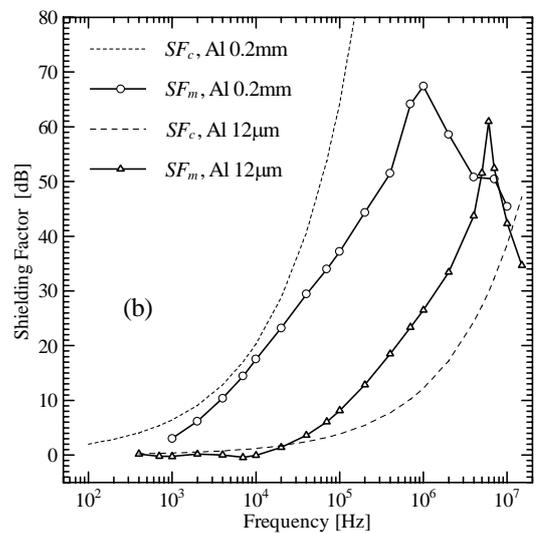
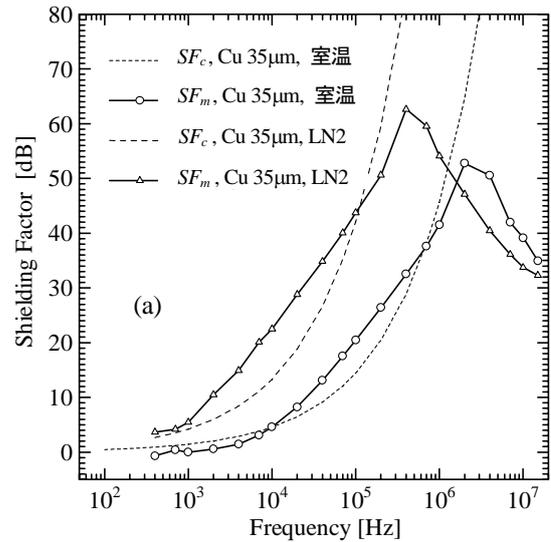


図7. 材料によるシールド効果の比較

- (a) : 35 [μm] 厚の銅箔, 室温と液体窒素温度
- (b) : 0.2 [mm] と 12 [μm] 厚のアルミ箔
- (c) : 0.1 [mm] 厚の真鍮とステンレス箔

(破線は式(7)の近似値, シンボルと実線は実験値)

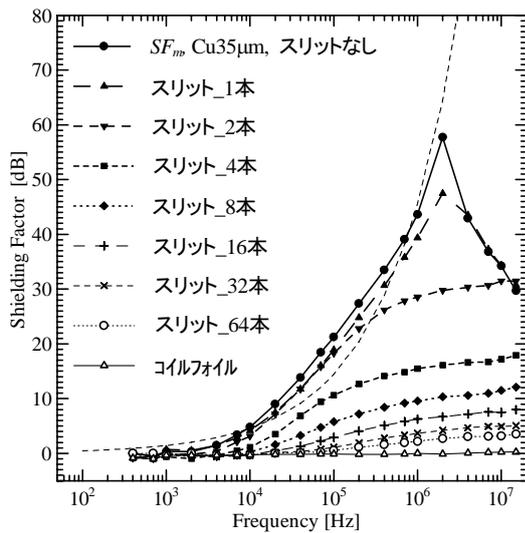


図8. シールド効果に対するスリットの影響

さ 35 [μm] の銅箔テープ (幅 250 [mm]) である。φ90 [mm], 高さ 300 [mm] のアクリル円筒の周りに銅箔を貼り付け、スリットはナイフエッジを用いて円筒の高さ方向に向けて直線状に、円周上で均等に作成した。測定は、図6. の上面図に示されるように送信コイルと受信コイルを結ぶ中心線に対してシールドの円周上に作成されたスリットが、1本のときに $\alpha=180$ [deg], 2本のとき $\alpha=90$ [deg] というようにスリットがコイルから最も遠くなるように設置して測定した。図8. に示す測定結果から、スリット数が4本以上になった場合に極端にシールド効果が減衰することがわかった。スリット数に従ってシールドファクターは減少しているため、スリットの本数に従ってシールドが効果的となる周波数に変化しているか否かについては判断できなかった。また、比較のために、φ0.3 [mm] の銅線を用いて円筒シールドの高さ方向に密に並べたコイルフォイルを作成してシールド効果を調べてみた。図8. に示されるように、この周波数範囲ではシールド効果はまったく確認されなかった。

4. まとめ

SQUID磁束計を用いた微小磁界の計測において、システムのダイナミックレンジとスルーレートを確保するために適切な磁気シールドが必要となる。本研究では、計測対象となる周波数以外の環境雑音を除去するとともに持ち運びが可能なことを条件に、低周波領域に動的磁気シールド法を高周波領域に導体シールドを用いることを提案し、シールド性能の検討を試みた。

動的磁気シールドは均一磁界の向上を目的に擬似ヘルムホルツ二組のコイルを組み合わせた。この構成

によって 100 [dB] 以上のシールドファクターの静特性が実現可能であることがわかった。また、伝達特性の検討から、100 [kHz] 程度までの動特性が可能であることも示した。今後は、シールド効果の実証試験および、計測空間における環境磁界の1次勾配成分以上を対象に動的磁気シールドの検討を進める。

導体箔シールドを用いて計測対象に適合するシールド材料と厚さの設計指針となる近似式の検討を行い、金属箔からの熱雑音の影響避けるためのスリット構造とシールド効果の関係を調べた。結果として、スリットがシールド性能の低下に与える影響は大きいことを示した。今後、スリットなしで金属を薄くした場合に、検出コイルに結合する熱雑音磁束の検討を進めるべきである。また、温度による抵抗率の変化を利用することによって、シールド特性の周波数特性が大きく変化することがわかった。今後、金属箔と液体窒素およびヒーターを組合わせて、シールド性能の遮断周波数を可変する方法について検討を進める。

今回のシールド方法の構成は、磁気的な非破壊検査のように特定の周波数を対象とする計測応用はもちろん、様々な磁界計測の応用分野でも有効な方法であるといえる。

本研究は、独立行政法人科学技術振興機構 (JST) による平成19年度シーズ発掘試験、課題番号01-004、で実施された受託研究による成果を中心としてまとめられたものである。

参考文献

- [1] “SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications”, H. Weinstock eds., Kluwer Academic Publishers, 1996
- [2] “The SQUID Handbook”, J. Clarke and A. I. Braginski eds., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004
- [3] D. Drung, T. Radic, H. Matz and H. Koch, IEEE tras. on Appl. Super., Vol. 7, No. 2, pp3283-3286, 1997
- [4] K. Matsumoto, Y. Yamagishi, A. Wakusawa, T. Noda, K. Fujioka and Y. Kuraoka, International Congress Series 988, Biomagnetism: Clinical aspect, M. Hoke et al. eds., Elsevier science publishers B. V., pp857-861, 1991
- [5] “電磁波シールドの基礎”, 友野利平他 編, シーエムシー, 1984