

平成 22 年 5 月 25 日現在

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007 ～ 2009

課題番号：19206045

研究課題名（和文）新しいアイデアに基づく分離型高性能磁気シールドの開発と生体磁気計測の実証

研究課題名（英文）Development of a new active magnetic shield consisting of a pair of light-weight separate magnetic shells and its application to the bio-magnetic field measurement

研究代表者

笹田 一郎（ICHIRO SASADA）

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：20117120

研究成果の概要（和文）：

病院環境で心磁界イメージングに利用することを前提に、新規な能動磁気シールドを実規模で試作し、諸問題の解決を図ると共に心磁界の実証計測を行った。磁気シールドの中核をなす磁気シェルは 2 分割され、SQUID の設置とシールド内への患者の搬入を容易にしている。シェルの分割で低化するシールド性能は、新規に開発した能動補償によって増強している。各磁気シェルは長さ 2.4 m、高さ 1.4 m、重量約 170 kg で狭スペース 3 層構造とし、外側 2 層には磁気シェイキングを施し高性能軽量化を実現した。

研究成果の概要（英文）：A new type of the magnetic shielding system aiming for the MCG measurement has been developed in a real-scale. Magnetic shells are separated to accommodate SQUID sensor system partially into the shield through the spacing and to make loading of a patient to the inside of the shield easy. A new active compensation method has been developed to restore a high shielding performance to the separate shell structure. Magnetic field from a human heart has been measured with this magnetic shield.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	18,400,000	5,520,000	23,920,000
2008 年度	13,000,000	3,900,000	16,900,000
2009 年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
年度			
総計	35,500,000	10,650,000	46,150,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：分離型磁気シールド，能動磁気シールド，心磁界，SQUID 磁束計，生体磁気

1. 研究開始当初の背景

脳や心臓からの人の身体から発せられる磁界は重要なリアルタイム生体情報で、しかも多くの情報を含んでいる。例えば、心臓磁界

を 64 チャンネルで検出すれば、心臓の電気生理学的機能を 2 次元マップすることが可能である。また、その刺激伝導系を伝って流れる電流ベクトルの時間的空間的情報など、

心電図の波形分析による方法に比べ圧倒的に的確で多様な診断情報の獲得が可能である。虚血性心疾患の典型である急性心筋梗塞は日本人の3大死亡原因とされている。そして、その治療には高額なハイテクの医療技術が用いられているが、的確な診断が早期に可能であれば医療費の大幅な軽減は元より救命に大きな効果があるものと思われる。心磁計の開発はまだ日も浅いこともあり、上記のような多くの可能性を秘めながら普及はあまり進んでいない。この原因の1つは高価で不便なパーマロイでできた部屋型の磁気シールドルームにある。磁気遮蔽性能は脳磁界計測に要求されるほど高い必要はなく、ベッドごと患者を運び込んで計測できる融通のきく磁気シールドが強く望まれている。

2. 研究の目的

健常者はもちろん、寝たきりの患者からも、その身体から発せられる生体磁気の計測に無理なく使用できる、部屋形ではない、分離可動式の高性能な磁気シールド(図1)を開発することを目的とする。これによって、磁界を当面のターゲットとして本開発の磁気シールドの有用性を実証し、生体磁気計測技術の足枷となっている磁気シールド技術の発展に資する。

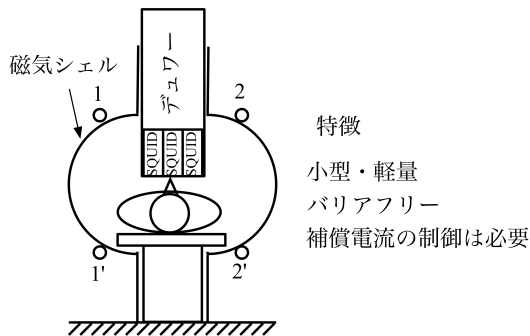


図1 目指す分離型磁気シールド

3. 研究の方法

以下の6項目を重点的に取りあげ研究を行った。

- (1) 補償電流配置, 磁気シールド構造に関する最適設計法の確立。
- (2) 分離型磁気シールドの詳細構造決定(内径65cm, 長さ240cmと定めた), 製作法の確立。
- (3) シールド性能1000の達成および電流値最適化によるシールド中央での磁界勾配ゼロ化。
- (4) 外乱磁界に応じて電流を制御する回路系の設計製作さらに磁気シェイキング装置と一体組み上げ。
- (5) 最終的に16チャンネル程度のSQUIDシステムの導入およびシールド構造に合ったガントレーの製作。
- (6) 上記シールドを利用した心臓磁界の計測

4. 研究成果

(1) 磁気シールド構造設計・製作

日鉄コンポジットと協力して、図2に示す3層構造のシールドを設計製作した。最外層2つにはアモルファス薄帯(Metglas2705M)を使用し、最内層には同(Metglas2714A)を使用した。これらは各層あたり30枚の薄帯を重ねている。最外, 中間の2つの層には400 Hzの弱い交流磁界(磁気シェイキング)を与えるためのコイルが付加されている。磁気シールドの重量は2つで約350 kg(シールドの大きさは図3参照)。開発した磁気シールドの概略図を図3に示す。

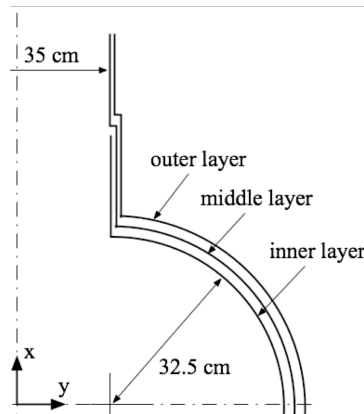


図2 分離型磁気シールドの断面構造(1/4領域)。シールド間にはガラスエポキシが充填され一体化構造となっている。

(2) 能動補償

水平方向(Y方向)の能動補償コイルのみ示している。縦方向の能動補償コイルは上下の平行に対峙したフランジの外周を取り囲むように巻いたコイルを使用する。能動的に外乱磁界をキャンセルするために本研究ではフィードフォワードとフィードバックの両制御法を試したが、性能的に後者を採用した。シールド内に漏れてくる外乱磁界をシールド中心線上の中心点から約20 cm 離隔した

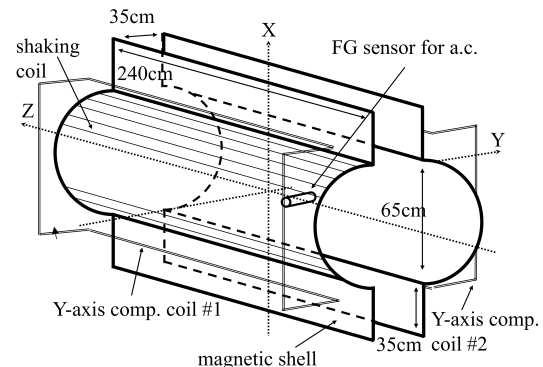


図3 分離型磁気シールドシステムの概略図。

所に設置した基本波型直交フラックスゲート（基本波型 OFG，本研究で開発）によって検出した．垂直方向に対しても同様の位置に OFG を配置した．このように超高感度な SQUID センサのすぐ横に配置するのを可能にするためには，100 kHz の励磁電流で駆動される OFG のセンサヘッドから磁界が漏れ無いにしなければならないが，我々は U 字型にアモルファス磁性ワイヤを曲げたセンサヘッドを用いることでこの問題を解決した．

図 4 に制御回路系のブロック図を示す．制御回路（controller）には単なる誤差増幅回路を用いた．

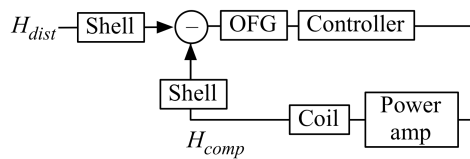


図 4 負帰還能動補償回路のブロック図．

(3) 能動補償効果とシールド性能（基本波型直交フラックスゲートによる評価）

① 水平方向

水平方向の磁界に対する能動補償の効果を図 5, 6 に示す．これらの結果は九州大学産学連携センタ実験室 2 の環境磁界についての結果である．この実験室の階下にはクリーンルームがあり，その電気室は我々の実験室の隣にある．そこからは図 7 に顕著であるが 8, 20, 30 Hz の近傍に線スペクトル性の雑音磁界が発生している．水平方向については能動補償が無いとシールド性能が出ないので，垂直方向の図 7 に対応するシェイキング無し，能動補償無しの場合のはのせていない．図 5, 6 の比較から，能動補償の効果が大きいことがわかる．別の実験から 100 Hz 以下帯ではシールド比が 100 以上であった．

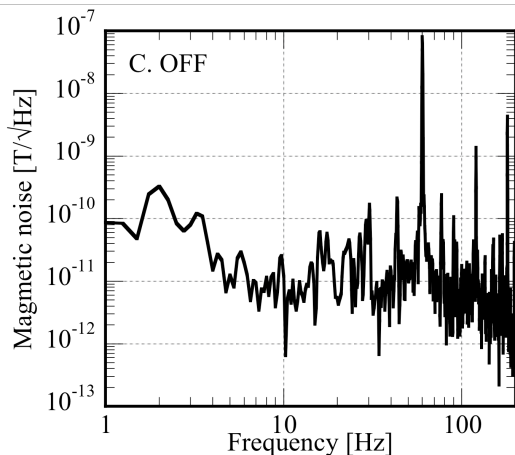


図 5 シールド内の水平方向(Y 軸)雑音磁界．（能動補償無し，磁気シェイキング有り）

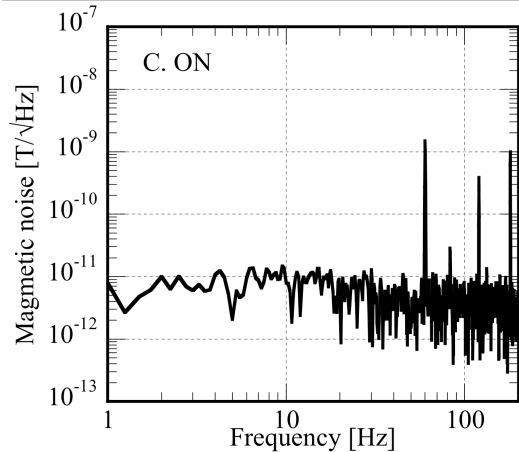


図 6 シールド内の水平方向(Y 軸)雑音磁界．（能動補償有り，磁気シェイキング有り）

② 垂直方向

垂直方向については図 7～9 に示す．垂直方向は能動補償をしなくてもシールド比（外乱磁界／シールド後の外乱磁界）がある程度期待される構造であるので，補償無しシェイキング無し，とシェイキング有りの比較も行った．シェイキングのみでシールド比が 10 倍ほど向上する．図 8, 9 の比較から，能動補償を ON にすることによって電気室からの 8, 20 Hz の雑音は 1 桁以上低減することがわかる．

これらのことから能動補償の優れた効果が実証できた．

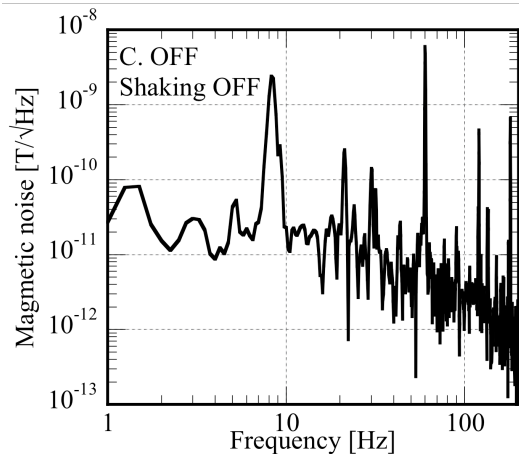


図 7 シールド内の垂直方向(X 軸)雑音磁界．（能動補償無し，シェイキング無し）

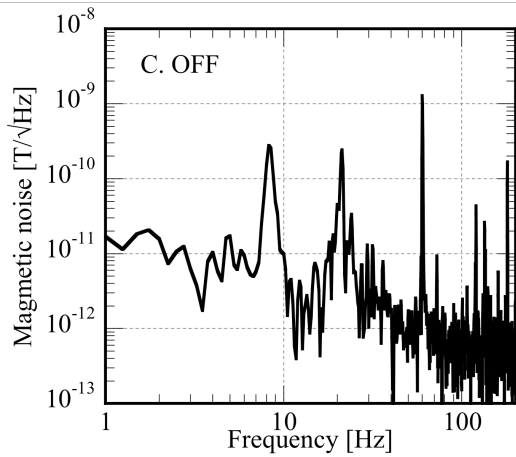


図 8 シールド内の垂直方向(X 軸)雑音磁界.
(能動補償無し, 磁気シェイキング有り)

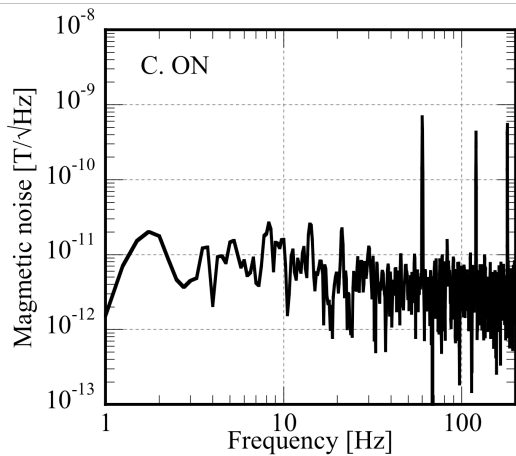


図 9 シールド内の垂直方向(X 軸)雑音磁界.
(能動補償有り, 磁気シェイキング有り)

(4) SQUID, ガントレー, RF シールド

写真 1 に本研究で製作した, 磁気シールド, 木製ガントレー, 16 ch SQUID 用デューおよびシールドの両サイドに銅金網による RF シールドの一部を示す. シールドの上部には



写真 1 中央に磁気シェルを広げているときの分離型磁気シールドと, 木製のガントレーに固定されている 16 ch SQUID (アルミ箔で覆われている).

アルミの天井板を取付け, シールドの床には銅板を敷いている. 分割型のシールドのシールド内は波長の短い電磁波に対してはほぼ開空間であるので, 別途 RF シールドが必要になった. 図 10 にこの簡易型 RF シールドの電磁波遮蔽効果を示す. この計測では磁気シールドは移動させ, 30~300 MHz 帯に感度を持つバイコンカルアンテナを使用している. アンテナの長手方向は, 本来その位置におかれる分離型磁気シールドの円筒軸方向にあわせている.

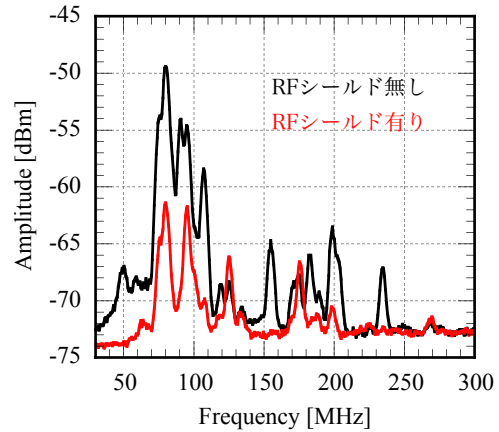


図 10 銅金網 RF シールドの効果. 電磁波は放送波などの通常環境に存在するものを利用.

(5) 心磁界計測実験

現段階では, シェイキング磁界の漏洩の勾配が SQUID のピックアップコイルの所で 500 pT 程度あり, FLL(Flux Locked Loop)後に装備されているフィルターと 100 倍の後置増幅器が飽和する. そのために SQUID システムのマッピング機能を利用するまでに至らなかったが, FLL 直後の心磁界波形の計測結果を示す. 移動平均によって雑音を除去しているために心磁界のピーク値は, 処理前に -20 pT あったものが減衰しているが, 明瞭に計測できていることが分かる. ただ, 上記理由で組み込まれているフィルターが使用できなかったこともあり SN 比は十分ではない.

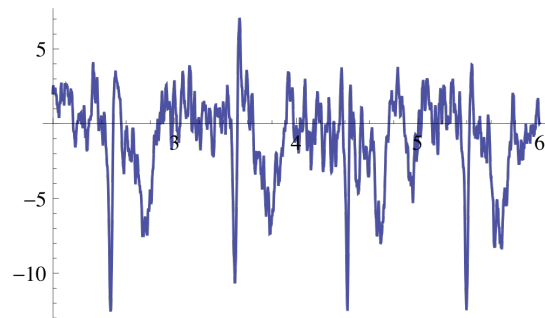


図 11 1 チャンネルによる心磁波形計測結果

(6) まとめ

シェル分離型という全く新規で、イノベティブな動作原理に基づく能動磁気シールドを実規模で設計試作し、心磁界の計測に成功し、本方法による磁気シールドの可能性と、有用性を充分に実証できた。しかし、現状で500 pT ある磁気シェイキングの漏洩磁界を更に1/100程度低減し、pTオーダーまで持つて行くのはかなり難しく、この問題を回避するためにFLLと後置増幅器の間にシェイキング漏洩磁界除去のノッチフィルターを挿入することが現実的方法であることを指摘する。これは2010年度で改良する予定である。また、簡単なRFシールドを組み合わせることで、SQUIDの動作が安定し、本磁気シールドを運用する上で必須であることも分かった。更に優れた能動磁気シールドを実現するために、フィードバック用のフラックスゲートの雑音を更に下げることが今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計9件、全て査読有り)

- ① Y. Nakashima, Y. Suzuki, I. Sasada, M. Shimada T. Takeda, "Experimental study of the active compensation to a full size separate-shell magnetic shield", IEEE Transaction on Magnetics, Vol.46, No. 6 (2010)掲載決定 (4ページ)
- ② 鈴木優輔・中嶋祥博・笹田一郎, "分離型磁気シールドにおける磁気シェイキング効果,"Journal of the Magnetics Society of Japan Vol. 34, No. 3, pp440-443 (2010)
- ③ Y. Nakashima, I. Sasada, "Coil geometry for efficient active compensation with separated magnetic shields," Journal of Applied Physics, vol. 105, (2009), 07A336 (3p)
- ④ I. Sasada, H. Kashima, "Simple Design for Orthogonal Fluxgate Magnetometer in Fundamental Mode,"Journal of the Magnetics Society of Japan, vol. 33 (2009), page 43-45
- ⑤ I. Sasada, Y. Nakashima, "A New method of magnetic shielding: Combination of flux repulsion and backing up magnetic pathways," Journal of Applied Physics, vol. 103, (2008) 07E932 (3p)

[学会発表] (計31件)

- ① 鈴木優輔, 西村匡史, 弓山英朗, 笹田一郎, 林則行, "インダクションマグネットメータに

よる低・中周波数帯域の環境磁界評価", 電気学会マグネティックス研究会, MAG-10-068, 2010.3.29, KKR 湯沢ゆきぐに

- ② Y. Nakashima, Y. Suzuki, I. Sasada, M. Shimada, T. Takeda, "Experimental study of the active compensation to a full-size separate-shell magnetic shield," 11th Joint MMM-Intermag Conference 2010.1.22 Washington DC, USA

- ③ 笹田一郎, "特別講演 生体磁気計測とEMI--冷凍機駆動雑音と環境磁気雑音の低減を中心にして,"電気学会マグネティックス研究 MAG-09-94, IEICE-EMCJ2009-44, 2009.10.22, 岩手大学

- ④ I. Sasada, T. Horie, Y. Nakashima, T. Takeda, M. Shimada, (N3-01) Large scale removable magnetic shield consisting of separate magnetic shells and active magnetic compensation, 19th Soft Magnetic Materials Conference (SMM 19), 2009.9.9, Torino, Italy

- ⑤ I. Sasada, Y. Nakashima, "A New method of magnetic shielding: Combination of flux repulsion and backing up magnetic pathways," Magnetism and Magnetic Materials 2007 FP-11, 2007.11.8, アメリカ合衆国

[産業財産権]

○出願状況 (計3件)

名称: 電磁誘導センサ

発明者: 笹田一郎

権利者: 九州大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-225372

出願年月日: 2009-09-29

国内外の別: 国内

名称: 同期検波回路、フラックスゲートセンサ、及びFM復調装置

発明者: 笹田一郎, 中野雅俊

権利者: 九州大学

種類: 特許

番号: 特願 2009-183634

出願年月日: 2009-08-06

国内外の別: 国内

名称: 分離型磁気シールド装置

発明者: 笹田一郎, 竹田敏和

権利者: 九州大学, 日鉄コンポジット

種類: 特許

番号: 特願 2009-298902

出願年月日: 2009-12-28

国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://vega.ence.kyushu-u.ac.jp/wiki>

6. 研究組織

(1)研究代表者

笹田 一郎 (ICHIRO SASADA)

九州大学・総合理工学研究院・教授

研究者番号：20117120

(2)研究分担者

林 則行 (NORIYUKI HAYASHI)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：30156450

□2009.12 までは九州大学・総合理工学研究院・准教授

(3)連携研究者

神鳥 明彦 (AKIHIKO KANDORI)

(株)日立製作所・基礎研究所・主任研究員

研究者番号：90416991

□2007 年度は研究分担者，2008 年以降上記.

(4) 研究協力者

竹田 敏和 (TOSHIKAZU TAKEDA)

日鉄コンポジット(株)

島田 政紀 (MASAKI SHIMADA)

新日鐵マテリアルズ

中嶋 祥博 (YOSHIHIRO NAKASHIMA)

九州大学大学院総合理工学府博士課程後期

Dr. Yong-Ho Lee, KRISS (韓国標準科学院)
Principal Researcher

Dr. Jin-Mok Kim, KRISS (韓国標準科学院)
Senior Scientist