

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月15日現在

機関番号：17102
 研究種目：基盤研究（A）
 研究期間：2010 - 2012
 課題番号：22246055
 研究課題名（和文）外乱磁界源の可視化に基づく高機能・高性能アクティブ磁気シールドの開発とその応用
 研究課題名（英文）Development of high-performance active magnetic shield for bio-magnetic applications
 研究代表者
 笹田 一郎（SASADA ICHIRO）
 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）：

心磁界計測を主目的として、円筒分離型磁気シェルを持つ能動磁気シールドをアモルファス磁性薄帯とFRPの複合材を用いて試作開発した。水平床置きで、奥行き2.4m、高さ、幅はそれぞれ1.4m、総重量は560kgであるが、容易に移動・移設可能である。このシールドの性能を実証するために、16ch SQUID心磁計と、本研究で新たに開発した6ch一次元アレイフラックスゲート心磁計によって健常男性の心磁計測に成功した。能動磁気シールドのために、フラックスゲートとサーチコイルを一体化した広帯域高分解能磁気センサを新たに開発した。磁気マーカを用いるバイオイメージングのための卓上型シールドを製作した。3次元で磁気マーカの集積点を同定する方法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

We have developed an active magnetic shield using a pair of magnetic shells of half cylindrical structure made of amorphous tapes and FRP composite. Active compensation technique to expel magnetic noises coming from outside has been developed. We have also developed a wide-band, high resolution magnetic sensor and low-noise power amplifiers for the compensation system. We applied the said shield for the MCG measurement by a SQUID system and, for the first time, by a fluxgate sensor array of 6 channels. A method has been developed by which accumulated location of magnetic markers in a phantom can be identified by mapping magnetic fields in the developed magnetic shield.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	20,600,000	6,180,000	26,780,000
2011年度	10,700,000	3,210,000	13,910,000
2012年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
年度			
年度			
総計	37,500,000	11,250,000	48,750,000

研究分野：

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：能動磁気シールド、電磁雑音可視化、生体磁気計測、生体イメージング

1. 研究開始当初の背景
生体磁気(脳磁界, 心磁界等)は 30 Hz 以下の

帯域にその主要部があり, 強度は, およそ
50 fT~100 pT の範囲にある. この帯域には,

エレベータ, ドアの開閉, 自動車・地下鉄・列車の走行, 各種電源など雑音となる環境磁界源が多く存在し, これらを磁界強度で $1\sim 10$ pT 程度に低減し, 勾配を 100 fT/5 cm 程度(心磁界計測の場合)にする磁気シールドが不可欠である。

現在主流のパーマロイ部屋型磁気シールドルーム(以降 MSR と略す)技術は, ドイツ PTB の パーマロイ壁 6 重, 総重量 20 トンの MSR およびヘルシンキ工科大学のパーマロイ壁 3 重の MSR の建設によってほぼ確立され, その後, 日本とドイツで重厚な MSR が建設され 1 つの到達点に達した。しかし, これらは利便性・低コストとは一線を画するものであった。能動磁気シールドは, 外部から到来する磁気ノイズをコイルによって発生させた磁界でキャンセルする。キャンセル磁界は到来する雑音を正確に模擬するものでなければならない。これまでも MSR の性能の不足分を補う目的で試されているが, ほとんどキャンセル効果は得られなかった。従来, 磁気シールドは MSR を軸に展開されてきていることもあり, 能動磁気シールドを主体とした生体磁気計測用のシールドはまだ無い。能動磁気シールドは比較的安価であるので, IC の電子ビーム露光装置のシールドには導入されつつあるが, 目指す雑音レベル ($0.1 \mu\text{T}$) は生体磁気計測に比べ 4 桁大きく, この技術の延長上に生体磁気計測用シールドはない。

2. 研究の目的

磁気シールドは科学の進歩, 特に医学(生体機能イメージング・診断)の進歩のために不可欠である。しかし部屋型の磁気シールドは極めて高価で不便である。例えば心筋梗塞の初期診断に有用な SQUID 心磁計は, 磁気シールドの高いコストが普及の障害となっている。本研究では, 心磁界計測への適用を第一に, 開放型で軽く, 高性能な磁気シールドを低コストで社会に提供するために, 新しい視点から能動磁気シールド技術を見直し, ニーズに合ったシールドを効率よく設計製作するための技術開発を行う。新しい視点とは, 能動磁気シールド技術の組込により磁性部材を非結合的に利用し, 開放性, アクセシ性を最大限確保し, 必要最小限の領域をシールドすることである。3 年の期間で, 円筒型実用規模改良のモデルと計測点追尾型能動磁気シールドの縮小実証モデルを完成させ, 心磁計測, バイオイメージングを通してその能力と利便性を実証する。

3. 研究の方法

以下の 4 つの項目に沿って実施する。

1. 床水平置き円筒型分離シェルを用いる能動磁気シールドを 3 年間の期間で試作完了す

る。その大きさ長さ 2.4 m, 高さ 1.4 m. 幅 1.4 m とする。シェル構造は外層と内層に分離できるようにし, 外層はさらにアモルファス薄帯(厚み約 $20 \mu\text{m}$)を 20 枚程の厚さに重ねた各層を 3 個持ち, 中間層に磁気シェイキングを施す。内層は比透磁率 4 万程度の磁性シート 10 枚を重ねて製作する。また cap & cup 型でバイオイメージングのための卓上サイズ能動磁気シールドを開発する。

2. 能動補償は分離面に垂直な方向(x軸)と鉛直方向(y軸)に, および必要に応じて円筒軸方向(z軸)に対して行う。高い能動磁気シールド効果を得るためにはキャンセル誤差を小さくする必要があるが, このためには制御回路がフィードバックループゲインを高くしても発振しないように, 位相遅れを小さくする必要がある。また, フィードバック電流を供給する電力増幅器を低雑音化する必要がある。このため, シールド内で磁気雑音を監視する磁界センサとしてフラックスゲートとサーチコイルを一体化して帯域を 30 kHz 以上, 磁気雑音が高々数 pT のセンサを開発する。また, 電力増幅器は NF 回路との共同で開発する。

3. 外乱磁界源の特定のために, 基本波型直交フラックスゲート構造で 3 軸磁界センサを作り, パソコンと簡単に情報をやり取りできる USB 結合のデジタルインターフェイスを開発する。

4. 性能実証のために, SQUID 心磁計と fluxgate アレイによる心磁界計測を行う。バイオイメージングは磁気マーカーからの微弱磁界の計測を元に進める。とくに, 表面磁界データからファントム内部 3 次元位置推定を行う。

4. 研究成果

1. 大型分離型シールドの改良型(2号機)を設計製作した。左右の磁気シェルの完全対称性, 磁気シェルを主シェルとその内側に取り付ける副シェルに分離し, 主シェル内に銅メッシュを組み込んだ構造とした点が改良点である。総重量は約 560 kg で, 部屋型シールドの重量の約 $1/5$ と軽量化されている。また, cap & cup 型上下分離構造で卓上型シールドを開発した。

2. 能動補償用電力増幅器は, 主に電源トランス部分を別の筐体としたことで出力電流に電源ライン周波数の基本波および高調波を全く含まない要求性能にそうものを開発できた。

3. 能動補償系の安定化を図るためにフラックスゲートとサーチコイルをハイブリッド

化し、高分解能で広帯域 (fc=30 kHz)な新たな仕組みを考案した (特許出願)。

4. これらの改良の結果初めて分離型磁気シールド内で 16ch DROS-SQUID 心磁計を用いて健常男性の心磁界を計測できた。

5. 基本波型直交フラックスゲートを 1次元アレイ (6 ch)化し世界で始めて複数チャンネル同時心磁界計測に成功した。しかも R 波、T 波が充分識別可能な測定ができることを示すことができた。

6. 磁気イメージングについては磁気マーカーの非線形特性を利用して励起磁界の周波数と信号周波数を分離する磁気マーカーの好感度検出法を開発し、本方法に基づく磁気バイオイメージングシステムを試作した。また、このシステムを用いてファントムの表面磁界のマッピングを行い、この磁界マップからファントム内部の磁気マーカーの 3次元位置推定を行うための解析手法を開発した。

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 12 件)

- ① A. Mahgoub, I. Sasada, T. Takeda, M. Shimada, Desktop Shielding System, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 査読有、2013、VOL. 49、NO. 7 (印刷中 4 ページ)
- ② Mattia Butta and Ichiro Sasada, Orthogonal Fluxgate With Annealed Wire Core, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 査読有、2013、VOL. 49、NO. 1, pp. 62-65
- ③ 原田翔夢、笹田一郎、韓峰、一次元フラックスゲートアレイの製作と心臓磁界測定への適用、電気学会論文誌 A、査読有、2013、Vol. 133 No. 6 pp. 333-338
- ④ Han Feng, Harada Shoumu, Sasada Ichiro, Fluxgate and Search Coil Hybrid: A Low-Noise Wide-Band Magnetometer, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 査読有、2012、Vol. 48、No. 11, pp. 3700-3703, DOI: 10.1109/TMAG.2012.21967622012
- ⑤ Butta, M, Sasada, I., Noise correlation in fundamental mode orthogonal fluxgate, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 査読有、2012、Vol. 111、No. 7, DOI: 10.1063/1.3679421
- ⑥ Butta Mattia, Sasada Ichiro, Effect of Terminations in Magnetic Wire on the Noise of Orthogonal Fluxgate Operated in Fundamental Mode, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 査読有、2012、Vol. 48、No. 4, pp. 1477-1480, DOI: 10.1109/TMAG.2011.2173176
- ⑦ Butta Mattia, Sasada Ichiro, Sources

of Noise in a Magnetometer Based on Orthogonal Fluxgate Operated in Fundamental Mode, IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, 査読有、2012、Vol. 48、No. 4, pp. 1508-1511, DOI: 10.1109/TMAG.2011.2173177

- ⑧ Mahgoub A, Suzuki Y, Nishimura M, Sasada I., The effect of overcompensation on magnetic field gradients in a separate shell magnetic shield, JEC-ECC, 2012 Japan-Egypt Conference on, 2012, pp. 200-204, DOI: 10.1109/JEC-ECC.2012.6186983
- ⑨ M. Butta, S. Yamashita, I. Sasada, Reduction of Noise in Fundamental Mode Orthogonal Fluxgates by Optimization of Excitation Current, IEEE Transactions on Magnetism, 査読有、2011、Vol. 47, pp. 3748-3751
- ⑩ M. Nakano, I. Sasada, A PC-controlled low power tri-axial fluxgate magnetometer, Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有、2011、Vol. 19、No. 3, pp. 527-530
- ⑪ 中野雅俊、笹田一郎、スイッチトキャパシタ同期整流器を用いた簡易基本波型直交フラックスゲート、Journal of the Magnetism Society of Japan, 査読有、2010、Vol.34、No. 3, pp.352-355
- ⑫ T. Yoshida and K. Enpuku et al., Detection of magnetic nanoparticles using the second-harmonic signal, IEEE Trans. Magn, 査読有、2011、vol. 47、pp.2863-2866, DOI: 10.1109/TMAG.2011.2157805

[学会発表] (計 19 件)

- ①花田智紀、笹田一郎、高感度磁界センサ出力の USB 結合高分解デジタル化と環境磁気計測への応用、電気学会研究会、2013/2、東京都
- ②A. U. Mahgoub, I. Sasada, T. Takeda, M. Shimada, Desktop Shielding System, The 12th Joint MMM/Intermag Conference, 2013/1、アメリカ合衆国・イリノイ州
- ③田島哲也、原田翔夢、笹田一郎、磁気シェイキングを適用したシェル分離型電動磁気シールドの特性、電気学会研究会、2012/12、大阪市
- ④マハゴブアブデルモメン、笹田一郎、Performance Investigation of Desktop Shielding System, 電気学会 医用・生体工学合同研究会、2012/11、福岡市

⑤山口 崇、笹田一郎、ワイヤ磁心をもつ磁界センサの空間感度分布 — 一次元モデルによる解析 —、電気学会 医用・生体工学合同研究会、2012/11、福岡市

⑥原田翔夢、韓 峰、笹田一郎、フラックスゲートアレイの製作と心臓磁界測定への適用、電気学会研究会。2012/9、仙台市

⑦Ichiro Sasada, Shoumu Harada, Feng Han, Toshikaze Takeda, Masaki Shimada, Abdelmomen Mahgoub, A barrier free magnetic shield and its application to MCG measurements by a flux-gate array, 18th International Conference on Biomagnetism, 2012/8 フランス・パリ (Biomag2012)

⑧Ichiro Sasada, Beat interferences in fundamental mode orthogonal fluxgates, EMSA2012, 2012/7、チェコ共和国・プラハ

⑨F. Hang, S. Harada, I. Sasada, Fluxgate and search coil hybrid: a low-noise wide-band magnetometer, INTERMAG2012, 2012/5、カナダ・バンクーバー

⑩Mahgoub A, Suzuki Y, Nishimura M, Sasada I, The Effect of Overcompensation On Magnetic Field Gradients in a Separate Shell Magnetic Shield, JEC-ECC2012, 2012/3、エジプト・アラブ共和国・カイロ

⑪韓 峰、原田翔夢、笹田一郎、複合磁界センサの高分解能化・広帯域化、電気学会研究会、2012/2、金沢市

⑫M. Butta, I. Sasada, Orthogonal fluxgates for medical applications, 電気学会研究会、2012/2、金沢市

⑬笹田一郎、西村匡史、田島哲也、原田翔夢、竹田敏和、島田政紀、分離型大型磁気シールド2号機の特性と心磁界計測、2011/11、我孫子市

⑭西村匡史、韓 峰、笹田一郎、能動磁気シールドのための複合磁界センサ、電気学会研究会、2011/9、福岡市

⑮Mattia Butta, Ichiro Sasada, Modelling of fundamental mode orthogonal fluxgate open loop sensitivity, 電気学会研究会、2011/9、福岡市

⑯N. B. Othman, T. Tsubaki, T. Yoshida and K. Enpuku, Magnetic particle imaging using

the second harmonic signal detection for biomedical application, 電気学会 A 部門大会、2011/9、東京都

⑰I. Sasada, Low-noise, low-cutoff frequency induction magnetometer with a high-Tc superconductor search coil, InterMag 2011, 2011/5、中華民国・台北

⑱T. Yoshida and K. Enpuku et al, Detection of magnetic nanoparticles using the second-harmonic signal, INTERMAG 2011, 2011/4, 中華民国・台北

⑲I. Sasada, Fluxgate magnetometers for an active magnetic shield with separate magnetic shells, EMSA2010, 2010/6、トルコ共和国・ボドルム

[産業財産権]
○出願状況 (計 3 件)

名称: 磁界センサ
発明者: 笹田一郎
権利者: 国立大学法人九州大学
種類: 特許
番号: 特開 2013-57645 (P2013-57645A)
出願年月日: 平成 23 年 9 月 9 日 (2011-9.9)
国内外の別: 国内

名称: 分離型磁気シールド装置 (公開前)
発明者: 笹田一郎, 竹田敏和
権利者: 国立大学法人九州大学, 新日鉄マテリアルズ株式会社
種類: 特許
番号: 特願 2012-145984
出願年月日: 平成 23 年 9 月 9 日 (2011-9.9)
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/> 研究

6. 研究組織

(1) 研究代表者

笹田 一郎 (SASADA ICHIRO)
九州大学・大学院総合理工学研究院・教授
研究者番号: 20117120

(2) 研究分担者

圓福 敬二 (ENPUKU KEIJI)
九州大学・超伝導システム科学研究センター・教授
研究者番号: 20150493
山口 崇 (YAMAGUCHI TAKASHI)
久留米工業高等専門学校・助教

研究者番号：90248344

(3) 連携研究者 ()

研究者番号