

報告番号	甲 第 12296 号
------	-------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 アクティブ磁気シールドによる MI グラジ
 オメータの高性能化
 (Improve Performance of MI Gradiometer
 with Active Magnetic Shielding)

氏 名 滝谷 貴史

論 文 内 容 の 要 旨

磁気センサは被検出量である磁界を電圧に変換する電子デバイスである。その用途は、コンピュータハードディスクの磁気記録用磁気ヘッド、自動車、工業用ロボット、電流センサ、非破壊検査、磁気方位センサなど多岐にわたり、産業に不可欠なデバイスの一つである。近年注目されているのは高感度磁気センサの医療用生体計測への応用である。医療用磁気センサの最大の特徴は、完全非侵襲的に生体の情報を得られることである。このことから、患部の切開範囲を狭めることや不要な手術を回避でき、患者の肉体的負担の軽減が期待されている。既に後述する SQUID 磁気センサが医療用機器として認可され、医療の現場で活躍しているが、それに伴いいくつかの課題も見出されてきた。この課題へのアプローチの一つとして、我々はアモルファス磁性ワイヤの磁気インピーダンス (Magneto-Impedance: MI) 効果を利用した MI センサを提案している。MI 効果は、交流通電した軟磁性素子の表皮効果によって、磁界印加時の素子のインピーダンスが変化する電磁現象である。

本研究では、一次グラジオメータによる MI センサの高感度化とアクティブ磁気シールドによる外乱磁界に対するロバスト性の改善に取り組み、医療用生体計測への可能性を検討した。

第 1 章では、昨今の高感度磁気センサにおける開発動向を交えながら、アモルファス磁性ワイヤの巨大磁気インピーダンス効果とこの現象を動作原理としたパルス励磁型 CMOS-MI センサの特徴を述べた。

従来、生体磁気レベルの微小磁気の検出には超伝導量子干渉素子（Superconducting QUantum Interference Devise: SQUID）磁気センサが用いられてきた。SQUID 磁気センサは、磁界に対してフェムトテスラ: fT (10^{-15} T) オーダと超高感度であるものの、超伝導素子冷却のために液体ヘリウムによって極低温状態にして動作させる必要がある。また、外乱磁界による影響を除くために磁気シールドルーム内での測定に限定されることから、ランニングコストと装置価格の高騰が短所とされている。このような背景から、SQUID 磁気センサに代わる新たな高感度磁気センサの開発が盛んに行われており、我々の研究グループでは高周波パルス通電によって生じるアモルファス磁性ワイヤの巨大磁気インピーダンス効果を利用した CMOS-MI センサの生体磁気計測への応用を検討している。このセンサの特徴としては、高出力、高速応答かつマイクロ寸法性を有することが挙げられ、既に携帯電話やスマートフォン等の電子磁気コンパスとして製品化されている。しかし、CMOS-MI センサ単体で生体磁気のような地磁気未満の微小磁気信号を明確に検知することは難しく、目標のシグナルをそのままに、ノイズのみを減衰可能な高 SN 比を実現するセンシングデバイスを開発する必要がある。このアプローチとして、MI センサによるグラジオメータ（MI グラジオメータ）に着目した。

第 2 章では、開発した MI グラジオメータの構成と環境磁界中における微小磁気信号の検出能力を実験と理論の両面から検証した。MI グラジオメータは二か所に設置した MI 素子によって地磁気のような計測空間内で一様な背景磁界を相殺して、比較的小さな急峻な磁界の変化を検出するシステムである。本研究では検出 MI 素子と参照 MI 素子と同軸状に 30 mm 離して設置し、両素子の出力の差分を取る一次微分型を採用した。この場合、両素子の磁界検出特性の差は 2%以内であった。

ワンターンコイルを用いて、2 nT 程度の正弦波微小磁気信号を発生させ、ビオ・サバールの法則から導かれる磁気信号の理論値と MI グラジオメータの測定値を比較することで、検出 MI 素子と参照 MI 素子の差分を出力していることを確認した。環境磁界下における微小磁気検出能力の検証として、数十 μ T の地磁気が存在する実験室の環境下で SUS304 ステンレス鋼球検知を行った。この実験では、SUS304 を回転台の縁に取り付け、一定の速度で回転させたときの磁界変化を作製した MI グラジオメータにより測定すると共に、鋼球内磁化を一つの磁気双極子として仮定した簡易モデルから導いた鋼球外部磁界の理論式の結果と比較した。MI グラジオメータが検出した直径 1.5 mm から 0.15 mm までの各鋼球の移動に伴う磁界変化の大きさは、SUS304 のヒステリシス曲線から求めた残留磁化の大きさと比例していることを見出した。また、この磁界変化の大きさは SUS304 とセンサヘッドとの距離の三乗に半比例して減衰しており、これらの結果は理論式の傾向と一致することから、60 nT から 1 nT 程度の微小磁気を実験室の環境磁界中で正確に測定できることを示した。同時に、1 nT 以下の微小磁気を検知するためには、地磁気のような背景磁界だけでなく、MI グラジオメータが出力するノイズ成分を減衰させる必要性を見出した。

第3章では、環境磁界中でも1 nT以下の微小磁気信号を検知可能とするために、MI グラジオメータが出力するノイズ成分を素子、回路、計測空間内の磁気ノイズの3点から考察・比較し、最も影響の大きい計測空間内の磁気ノイズの低減を目的としたアクティブ磁気シールドを開発し、その効果と有用性を検証した。

アクティブ磁気シールドは、検出コイルを用いて計測空間内の磁界を検出し、補償コイルによって逆相の磁界を発生させることで、計測空間内の磁界を打ち消す装置である。これに対してパーマロイ等の高透磁率磁性材料によって計測空間を囲うことをパッシブ磁気シールドと呼ぶ。アクティブ磁気シールドは小型で安価に構成できることから、簡易的な磁気シールドルームのシールド率を向上させる補助装置として利用される。この点に着目し、MI グラジオメータに組み込むことでそのシールド率を改善することを3章のねらいとした。すなわち、地磁気のような比較的大きな環境磁界をグラジオメータにより除き、地磁気より小さい電源ラインから生じる環境磁界をアクティブ磁気シールドによって補正することで、パッシブ磁気シールド並みのシールド率を得られると期待できる。

MI グラジオメータ用アクティブ磁気シールドは参照 MI 素子の出力をセンサヘッドに装着したソレノイドコイルに負帰還させ、ヘッド長手方向の環境磁界を相殺する効果を有する。アクティブ磁気シールドを適用した MI グラジオメータの環境磁界のシールド率は60 Hzの電源ノイズにおいて40 dBに達し、このシステムの伝達関数から見積もった理論値とほぼ一致した。また、このシールド率は厚さ1 mmのパーマロイと同程度のシールド性能であった。アクティブ磁気シールド型 MI グラジオメータの出力ノイズレベルは10 pT/Hz^{1/2}であり、この値はパーマロイ製パッシブ磁気シールド内で環境磁界を50-60 dB減衰させて測定した MI グラジオメータ単体のノイズレベルとほぼ一致した。すなわち、計測空間の磁気ノイズの影響が除かれ、MI グラジオメータの出力ノイズに寄与する成分は回路を構成する素子の電気ノイズであることを示唆している。第2章の SUS304 鋼球（直径0.3 mm）検知の実験をアクティブ磁気シールド型 MI グラジオメータでも行った結果、MI グラジオメータ単体では3程度であった SN 比が8以上に改善でき、0.7 nTの微小磁気信号をより明確に検知することができた。以上より、開発したアクティブ磁気シールドが環境磁界を選択的に減衰させ、MI グラジオメータの性能を現状のセンサ回路が有する電氣的なノイズレベルにまで高感度化できることを見出した。

第4章は高感度磁気センサの生体磁気計測への応用として、心臓の活動に伴う電気現象から計測できる心電図 (ElectroCardioGram: ECG) と心磁図 (MagnetoCardioGram: MCG) を比較し、MCGの優位性について紹介した。また、MI グラジオメータによる MCG 計測の試みとして、座った状態の成人男性被験者の MCG を実験室の環境磁界下で測定した。ECG と同期計測した結果、鳩尾から左に25 mmの体表面垂直方向の MCG には、R ピークを基準にした一周期分の ECG 波形のサンプリング間隔で50回の加算平均処理を施すこ

とで R ピークに対応した約 100 pT の負の磁気ピークが確認でき、この磁気ピークの大きさと極性が SQUID 磁気センサやフラックスゲートセンサによる先行研究の結果と一致することを確認した。加算回数と計測時間の短縮を目的にアクティブ磁気シールドを MCG 計測にも適用した。この場合、MI グラジオメータの出力ノイズを 1/3 に減衰させ、30 回の加算平均処理で 80 pT の磁気ピークを検出することに成功し、磁気シールドルーム外の環境下における MCG リアルタイム計測の可能性を示すことができた。

第 5 章は本研究の総括と今後の課題についてまとめた。

本研究の大きな成果は、従来の MI グラジオメータでは完全に取り除くことが難しかった電源等の環境磁気ノイズの影響を、センサヘッドと一体化したアクティブ磁気シールドによって、パーマロイ製パッシブ磁気シールド内のノイズレベルにまで減衰できたことである。このことから今後、測定環境の外乱磁界に影響されない堅牢な MI グラジオメータによって、パッシブ磁気シールド内に限定されていた微小磁気計測の自由度が向上すると期待でき、その応用は MCG 計測をはじめとした生体磁気計測の在宅医療への発展につながると考える。以上の重要な知見を得ると共に、本研究を通して見えてきた今後の課題と研究の方向性としては、アクティブ磁気シールドの効果が及ばない MI 素子を含めたセンサ回路の電気ノイズの低減が挙げられる。これによりセンサ自身のもつノイズレベルが下がることから、アクティブ磁気シールドを適用した際に数 pT オーダまで高感度化できることが期待される。