

学位論文題名

生体磁気計測のための低磁場空間の生成に関する研究

学位論文内容の要旨

我々を取り巻く環境磁気は約 $50\ \mu\text{T}$ の地磁気、 $1/f$ 特性を示し μT から nT の大きさをもつ都市雑音、磁性体が移動や振動することによって生じる移動性磁気雑音、商用電源に伴う商用電源磁気雑音、電子機器から発生する高周波磁気雑音など複数のノイズ源から構成されている。そのため生体磁気計測に代表される、高温超伝導体 SQUID (HTS-SQUID) などの高感度磁気センサをもちいた微小磁場計測では、一般に、パーマロイ等の磁性体壁で構成される磁気シールドルーム (MSR) を用いて低磁場環境を実現している。しかしながら、MSR の遮蔽率は周波数に依存するため、地磁気や都市雑音が存在する低周波帯では遮蔽効果が弱くなる。

有用な信号がこの帯域に存在する生体磁気計測用の MSR では強磁性体壁の層数を増やすことで高い遮蔽率を実現するため、MSR は重厚長大になり計測システムの価格を大きく引き上げている。臨床応用での心臓磁界 (MCG) などの生体磁気計測普及のためには MSR を簡素化もしくは使用しないコンパクトで低価格な高感度磁気計測システムを構築することが期待され、これを実現するための新たな低磁場空間の生成技術を開発する必要がある。

磁気遮蔽方法の一つに能動的磁気遮蔽方法 (アクティブシールド) がある。アクティブシールドは計測空間の環境磁気を高感度なセンサで検出し、検出した磁気信号と逆位相の磁場を補償磁場として計測空間に作用させることで低磁場空間を生成する方法である。生成される低磁場空間の磁界強度とその広さは環境磁気検出センサの特性と補償磁場を生成する補償コイルで決定されるため、必要とする低磁場空間の質に応じて検出センサと補償コイルを検討しなければならない。本論文では、生体磁気計測のためのアクティブシールドを用いた低磁場空間の生成方法について検討し、システムを試作し、実証実験をおこなった結果について述べる。

本論文は、第一章 序論、第二章 背景、第三章 簡易型 MSR を用いる磁気遮蔽方法の検討、第四章 中規模 MSR における磁気遮蔽方法の検討、第五章 誘導型コイルによる環境磁気方法の検討、第六章 結論の六章で構成される。第一章では本研究の背景と必要性について述べる。第二章では、環境磁気の特性、MSR の遮蔽特性、環境磁気検出センサの種類とその特性、アクティブシールドにおける過去の研究とそれぞれの特徴について述べる。第三章では一層のパーマロイで構成する簡易型 MSR の遮蔽特性の改善に重点を置き、環境磁気検出センサとして MSR 外側

面に設置した誘導コイル (MSR 一体型コイル) の有用性について検討を行う。MSR 一体型コイルの検出信号は MSR 内部と非常に高い時間相関を示し、環境磁気検出センサとして有用であることを見いだした。MSR 一体型コイルと MSR 外部に設置した補償コイルの組み合わせで 0.1 ~ 100 Hz にわたって 10 ~ 20 dB の改善効果を得ることができた。また、MSR 内部での大きなノイズとなる商用電源磁気雑音は MSR 一体型コイルと内部補償コイルの組み合わせで 40 dB の改善効果を得ることができた。提案した低磁場空間の生成技術を用いて、HTS-SQUID 磁束計を MCG センサとした、単チャンネル MCG 計測システムを構築して、MCG 波形の実時間計測を行った。

第四章ではパーマロイが二層で構成する MSR の遮蔽特性の改善方法について述べる。パーマロイが二層で構成される場合、MSR 内部の磁界と外部の磁界の時間相関が低く、第三章で検討した環境磁界の検出方法で低減効果が低いという知見が得られた。そのため、MSR 内部で環境磁気を検出し信号用センサからノイズ成分を差分する電氣的差分方法の検討を行った。その結果、0.1 ~ 100 Hz にわたって HTS-SQUID 磁束計の感度まで環境磁気を低減することができた。また、商用電源磁気雑音については 40 dB の低減効果を得ることができた。検討を行った電気差分法を用い、HTS-SQUID 磁束計を MCG センサとした、10 チャンネル MCG 計測システムを構築した。

第五章では MSR を用いずに低磁場空間の生成を行う方法について述べる。環境磁気は独立した二つの誘導コイルで検出しこれら加算信号と差分信号を組み合わせ、補償コイルを用いた環境磁気の低減を提案した。その結果、0.1 ~ 100 Hz 周波数帯域で 10 ~ 20 dB の低減効果を得ることができた。提案した磁気遮蔽方法と第四章で提案した電気差分法を組み合わせ、小動物用 MCG 計測システムを構築した。

第六章では、本研究で得られた結果について考察を行う。

最後に、本論文は、生体磁気計測を目的とした低磁場空間の生成技術についての新方法を提案し、あわせて高温超伝導体 SQUID 磁束計を生体磁気検出センサとした計測システムの構築を行ったものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 栗 城 眞 也

副 査 教 授 清 水 孝 一

副 査 教 授 河 原 剛 一

学 位 論 文 題 名

生体磁気計測のための低磁場空間の生成に関する研究

我々を取り巻く環境磁気は約 $50\mu\text{T}$ の地磁気、 $1/f$ 特性を示し μT から nT の大きさをもつ都市雑音、磁性体が移動や振動することによって生じる移動性磁気雑音、商用電源に伴う商用電源磁気雑音、電子機器から発生する高周波磁気雑音など複数の雑音磁気から構成されている。そのため生体磁気計測に代表される、高温超伝導体 SQUID (HTS-SQUID) などの高感度磁気センサをもちいた微小磁場計測では、一般に、パーマロイ等の多層磁性体壁で構成される磁気シールドルーム (MSR) を用いて低磁場環境を実現している。しかしながら、MSR の遮蔽率は周波数に依存するため、地磁気や都市雑音が存在する低周波帯では遮蔽効果が弱くなる。HTS-SQUID により心臓磁界 (MCG) 計測などの臨床応用を実現するためには、MSR を簡素化もしくは使用しないコンパクトで低価格な高感度磁気計測システムを構築することが必須である。

磁気遮蔽方法の一つに能動的磁気遮蔽方法 (アクティブシールド) がある。アクティブシールドは計測空間の環境磁気を高感度なセンサで検出し、検出した磁気信号と逆位相の磁場を補償磁場として計測空間に加えることで低磁場空間を生成する方法である。生成される低磁場空間の磁界強度とその大きさは環境磁気検出センサの特性と補償磁場を生成する補償コイルで決定されるため、必要とする低磁場空間に応じて検出センサと補償コイルを検討しなければならない。本論文は、生体磁気計測のためのアクティブシールドを用いた低磁場空間の生成方法について検討し、システムを試作し、実証実験をおこなった結果について述べたものである。

著者は、まず一層のパーマロイで構成する簡易型 MSR の遮蔽特性の改善に着目し、環境磁気検出センサとして MSR 外側面に設置する誘導コイル (MSR 一体型コイル) について検討を行っている。その結果、MSR 一体型コイルの検出信号は MSR 内部と非常に高い時間相関を示し、環境磁気検出センサとして有用であることを見だし、MSR 外部に設置した補償コイルとの組み合わせで

0.1 ~ 100 Hz にわたって 10 ~ 20 dB の改善効果を得た。また、大きなノイズである商用電源磁気雑音は、MSR 一体型コイルと内部補償コイルの組み合わせで 40 dB の改善を得た。さらに、提案した低磁場空間の生成技術を用いて、HTS-SQUID 磁束計を生体磁気検出センサとして単チャンネル MCG 計測を行い、MCG 波形の実時間記録を行った。

次に、二層のパーマロイで構成される MSR の遮蔽特性の改善について検討している。そして、パーマロイが二層の場合、MSR 内部磁界と外部磁界の時間相関が低く、MSR 外側面の誘導コイルでは低減効果が低いという知見を得た。そのため、MSR 内部で環境磁気を検出し信号用センサからノイズ成分を差分する電氣的グラジオメータについて検討した。その結果、0.1 ~ 100 Hz にわたって HTS-SQUID 磁束計の感度まで環境磁気を低減でき、また、商用電源磁気雑音については 40 dB の低減効果を得た。この方法を用い、1 個の HTS-SQUID 磁束計をノイズ検出用とし、10 個の信号用 HTS-SQUID に補償する方法を考案し、10 チャンネル MCG 計測システムを構築している。そしてこのシステムを用いて、MCG マッピング計測を行い、本方式の有効性を確認した。

著者は、また MSR を用いずに低磁場空間の生成を行う方法に関し、独立した二つの誘導コイルで環境磁気を検出し、これら加算信号と差分信号を組み合わせ補償コイルによりそれぞれ空間的に一様磁界と傾斜磁界を補償する方法を提案している。システムの試作と実験の結果、0.1 ~ 100 Hz 周波数帯域で 10 ~ 20 dB の低減効果を得ることができることを示し、電氣的グラジオメータが動作可能な程度の大きさの空間についてパーマロイ層の MSR と同等の性能を得ている。

以上を要するに、著者は、生体磁気計測を目的とした低磁場空間の生成技術についての新方法を提案し、あわせて高温超伝導体 SQUID 磁束計を生体磁気検出センサとした計測システムの構築を行ったものであり、生体工学ならびに超伝導工学に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。