

生体磁場計測を目的とした高温超伝導 SQUID 磁束計の 高感度化に関する研究

学位論文内容の要旨

生体磁場計測システムは、人間の脳や心臓がその活動に伴い発生する磁場を体表面上で多点同時計測するシステムである。生体から発生する磁場は極めて微弱であり、磁気センサには SQUID(超伝導量子干渉素子)磁束計が使われている。SQUID を用いた生体磁場計測は、①神経細胞の活動電位の伝搬や心筋の刺激伝導など、生体の電気生理学的な活動を実時間で計測できること、②信号源の推定が可能で、その結果を MRI や超音波診断装置などの画像と重ね合わせることで、解剖学的な活動部位が推定できること、③無侵襲であることの特徴がある。近年、生体磁場計測による臨床医学や生理学の研究が盛んになり、例えば脳磁場計測による脳外科手術の術前検査や脳機能のマッピング、心臓磁場計測による刺激伝導系や心筋梗塞部位の推定などが行われている。

現在普及しつつある生体磁場計測システムのほとんどは、金属系の超伝導体で構成される SQUID を用いている。しかし、冷媒として液体ヘリウムを必要とするため、ランニングコストがかかること、取り扱いが煩雑であること、低温槽が大型になることなど、広範な普及を妨げる問題点がある。一方、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 等に代表される酸化物超伝導体を用いた高温超伝導 SQUID 磁束計は、液体窒素を冷媒とすることができる。しかし、金属系 SQUID 磁束計に比べてまだ雑音が大きく、感度の向上が主要な技術課題とされている。本論文は、将来型の生体磁場計測システムの開発を目指し高温超伝導 SQUID の感度を向上することを目的とした実験的検討に関するものである。

本論文は全6章から構成される。第1章では序論として生体磁場計測システムの特徴を述べている。また、生体磁場計測システム用センサとしての高温超伝導 SQUID 磁束計の有用性と問題点について触れ、本研究の目的を導き、本論文の構成を述べている。

第2章は本研究の背景であり、第1章を補足して金属系 SQUID 磁束計、高温超伝導 SQUID 磁束計、及びこれらを用いた生体磁場計測システムについて、動作原理、構造の例、研究の現状、解決すべき技術課題等を説明している。特に多チャンネル生体磁場計測システムのセンサとして用いられる高温超伝導 SQUID 磁束計に関して、その高感度化を実現するためには環境雑音磁場の低減と磁束計固有雑音の低減が重要な技術課題であることを述べている。ここで、環境雑音磁場の低減には2点間の空間差分磁場を計測するグラジオメータが有効であり、生体磁場計測には磁場の方向と同一方向の空間差分を得る軸型グラジオメータが望ましい。また、磁束計固有雑音を低減させるためには、検出コイルから SQUID への磁束伝達効率を向上させる必要がある。

第3章から第5章が研究の内容である。第3章では従来の高温超伝導 SQUID 磁束計で構成が困難であった軸型グラジオメータを実現する磁束計方式として「直結帰還形グラジオメータ」の提案と評価実験について述べている。

直結帰還形グラジオメータは雑音検出マグネトメータと信号検出マグネトメータからなり、雑音検出マグネトメータの帰還磁束を、その検出コイルとともに信号検出マグネトメータの検出コイルにも帰還することで信号検出マグネトメータの環境雑音磁場を除去する方式である。両マグネトメータ間の接続は常伝導配線がよく、グラジオメータとしての空間差分方向やベースライン長も任意という特長がある。また、各々のマグネトメータには検出コイルと SQUID を1枚の基板上に薄膜一体形成した形状が適しているが、これは高温超伝導 SQUID 磁束計で最も一般的な形状である。つぎに、提案した「直結帰還形グラジオメータ」の動作を確認するための原理実験として、金属系超伝導体で製作した検出コイルと SQUID からなる磁束計を2組用いてグラジオメータを構成し、磁気シールドルーム中で計測実験を行い、環境雑音磁場が 1Hz で 1/550、50Hz のピークで 1/120 に低減する結果を得た。また、心臓磁場、脳磁場(聴性誘発反応)の計測実験により、生体磁場計測が可能な性能を有することを確認した。本章の最後には、本方式への適用を目的とした高温超伝導 SQUID 磁束計の試作についても述べている。

第4章、第5章では磁束伝達効率の向上を目的とした、「Double-Pickup-Coil 型磁束計」の提案と評価実験について述べている。第4章はその前半部分で、構造の提案と検出コイル及び SQUID の形状の検討に関する部分である。Double Pickup Coil 型磁束計は高温超伝導体の単層膜で製作が可能で再現性や歩留まりが良好な直結型磁束計の一種であり、バイクリスタル基板上の1つの SQUID に検出コイルが2つ接続する構造を持つ。SQUID のインダクタンスがジョゼフソン接合を除いてすべて検出コイルとの磁気結合に寄与するため、磁束計の実効面積が大きくなるという特長をもっている。ここで、検出コイルについては常伝導金属を用いて原寸大のモデルを製作し、実効面積を指標として実験により適切な形状を求めた。一方、SQUID についてはバイクリスタル SrTiO₃ 基板上に成膜した YBa₂Cu₃O_x 薄膜を加工して製作し、これを液体窒素中で動作させて検出コイルとの磁気結合係数を実測した。

第5章は Double Pickup Coil 型磁束計の試作と評価実験に関する部分である。まず、SrTiO₃ 基板上に電極用の Au 薄膜が積層した YBa₂Cu₃O_x 薄膜を成膜する方法と、積層膜を加工して検出コイルや SQUID を形成する方法について述べている。その後、第4章で検討した結果に基づいた、以下のような Double Pickup Coil 型磁束計用デバイスの試作を行った。検出コイルは 10mm 角の SrTiO₃ 基板上に磁場検出面積 27 mm² をもつワッシャ型で形成し、SQUID との磁気結合度を上げるために低インダクタンス (6.18 nH) となっている。高温超伝導 SQUID はストリップライン構造をしており、バイクリスタル線に平行な低インダクタンス (96 pH) のスリット状のホールからなっている。検出コイルとの磁気結合係数の計算値は 0.94 である。つぎに、試作したデバイスを液体窒素で冷却し、駆動回路に接続して磁束計として動作させ、既知の磁場を与えて実効面積を実測した結果、最高水準の 0.42 mm² の値を得た。これらの結果より、低雑音 SQUID 実現のためのデバイス形状とパラメータが確定された。

最後の第6章は結論であり、主に第3章から第5章の内容が要約されている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 栗 城 真 也
副 査 教 授 山 本 克 之
副 査 教 授 伊 福 部 達
副 査 教 授 狩 野 猛

学 位 論 文 題 名

生体磁場計測を目的とした高温超伝導 SQUID 磁束計の 高感度化に関する研究

生体磁場計測システムは、人間の脳や心臓からその活動に伴い発生する磁場を体表面上で多点同時計測するシステムである。近年、生体磁場計測システムを用いた臨床医学や生理学の研究が盛んになり、例えば脳磁場計測による脳外科手術の術前検査や脳機能のマッピング、心臓磁場計測による刺激伝導系や心筋梗塞部位の推定などが行われている。

現在普及しつつある生体磁場計測システムのほとんどは、微弱な磁気信号を検出するセンサとして金属系の超伝導体で構成される SQUID (超伝導量子干渉素子) を用いている。しかし、冷媒として液体ヘリウムを必要とするため、ランニングコストがかかること、取り扱いが煩雑であること、低温槽が大型になることが生体磁場計測システムの普及を妨げる要因であった。一方、 $YBa_2Cu_3O_x$ 等に代表される酸化物超伝導体を用いた高温超伝導 SQUID 磁束計は、液体窒素を冷媒とすることができ、上述の問題点が解決できる。しかし、高温超伝導 SQUID 磁束計は金属系 SQUID 磁束計に比べてまだ感度が低く、感度の向上が主要な技術課題とされている。低減すべき雑音には環境磁場雑音と SQUID 磁束計の固有雑音がある。本論文は、この 2 つの雑音を低減して高温超伝導 SQUID の感度を向上することを目的とした実験的検討に関するものである。本論文の主な成果は、以下にまとめられる。

(1) 環境磁場雑音の低減

環境磁場雑音の低減には、2 点間の空間差分磁場を計測するグラジオメータを用いることが有効であり、生体磁場システムにはベースライン(差分をとる 2 点間の距離)が 30mm 以上の軸型グラジオメータ(磁場の方向と同一方向の空間差分を得るグラジオメータ)が適している。そこで、従来の高温超伝導 SQUID 磁束計で構成が困難であった軸型グラジオメータを実現する磁束計方式として「直結帰還型グラジオメータ」を提案している。これは雑音検出用と信号用の二つのマグネトメータからなり、雑音検出マグネトメータの帰還磁束を、その検出コイルとともに信号検出マグネトメータの検出コイルにも帰還すること

で信号検出マグネトメータの環境磁場雑音を除去するものである。各々のマグネトメータには、その検出コイルと SQUID を 1 枚の基板上に薄膜一体形成した形状が適しており、これは高温超伝導 SQUID 磁束計で実現できるものである。さらに、「直結帰還型ラジオメータ」の動作を確認するために、金属系の Nb/AlO_x/Nb SQUID で 1 チャンネル直結帰還型ラジオメータを試作し、駆動回路を含めた固有雑音 $4.5 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$ のマグネトメータ 2 個を使用して磁気シールドルーム内で作動させ、1Hz で 1/550、50Hz のピークで 1/120 の環境磁場雑音の低減効果を観測した。さらに、構成したラジオメータを用いて心臓磁場、脳磁場(聴性誘発反応)を計測し、生体磁場計測が可能な性能を有することを確認している。

(2) 磁束計固有雑音の低減

検出コイルから SQUID への磁束伝達効率を向上させ、磁束計の実効面積を大きくすることで固有雑音が低減できることから、バイクリスタル基板上の 1 つの SQUID に検出コイルが 2 つ接続する「Double Pickup Coil 磁束計」を提案している。その原理に基づき、磁束計の実効面積を指標として、検出コイルの形状について常伝導金属を用いたスケールモデル実験により検討し、最適な形状を決定した。また、バイクリスタル SrTiO₃ 基板上に形成した YBa₂Cu₃O_x 膜を加工して、ストリップ線状の超伝導膜とバイクリスタル線に平行なスリット状のホールからなる高温超伝導 SQUID を製作し、これを液体窒素中で動作させている。以上の実験で得られた知見に基づいて「Double Pickup Coil 磁束計」デバイスを試作し、既知の磁場を与えて実効面積を実測した結果、最高水準値である 0.42mm^2 の大きな面積が得られ、本磁束計の有効性を確認した。また、この磁束計では、検出コイルと SQUID が基板上で対称的に配置できるため周辺の磁場の歪が等方的である特長を有し、そのため(1)で検討した直結帰還型ラジオメータを構成するのに適した構造であることを指摘している。

以上を要するに、著者は生体磁場計測を目的とした高温超伝導 SQUID 磁束計の重要課題である高感度化に関して研究を行い、新方式の提案により有効な知見を得たものであり、生体工学に寄与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。