

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 関 悠介

本論文は、心磁計システムの小型化および低コスト化を目的として、超伝導量子干渉素子 (SQUID) を用いたグラジオメータと簡易磁気シールドを用いた心磁計システムについて報告している。

第1章では、導入として心磁計の背景が述べられている。心磁計は、心臓から発生する微弱な磁場を計測することにより、心臓の電氣的活動を非侵襲かつ非接触に診断する装置である。心臓から発生する磁場の強度は数 10 pT 以下であるため、心磁図計測は通常 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device: 超伝導量子干渉素子) グラジオメータを用いて磁気シールドルーム内で行われる。従来型の磁気シールドルームは高性能で安定した計測環境を実現するが、一方で、その大きさや費用が病院導入への障壁となっている。そのため、心磁計システムの大きさや費用を抑えるために磁気シールドの簡易化が求められている。このような背景から、本研究は、SQUID グラジオメータと簡易磁気シールドを用いた心磁計システムを開発し、その有効性を実証することを目的としている。

第2章では、円筒型磁気シールドと 64 個の同軸 1 次微分型 low- $T_c$  SQUID グラジオメータを用いたオープン心磁計システムについて述べられている。円筒型磁気シールドは、従来型の磁気シールドルームに比べて 5 分の 1 以下の大きさで、回転扉によって円筒側面からシールド内にアクセス可能な構造に設計された。磁気シールド率の周波数依存性および空間分布が計測され、磁気シールド中心付近における磁気シールド率は 50 Hz 以下の周波数帯域において 46 dB 以上であった。また、オープン心磁計システムを用いて心磁図計測を行い、P 波のピークを明瞭に検出し、電流分布図も正確に表示することが確認された。これらの実験結果により、オープン心磁計システムが十分な性能を持つことが実証された。

第3章では、超伝導リングを用いたハイブリッド磁気シールドについて述べられている。具体的には、オープン心磁計システムをさらに小型化するために、超伝導リングを用いて磁気シールド開口端からの磁場侵入を低減する方法が検討された。超伝導リングは高温超伝導テープ線材  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  で作製され、円筒型磁気シールドはナノ結晶軟磁性シートを用いて作製された。この円筒型磁気シールドに対する超伝導リングの効果が実験的に評価され、超伝導リングが円筒型磁気シールドの小型化に有効であることが明らかにされた。

第4章では、2 方向の磁場勾配を検出する 2 次元グラジオメータについて述べられている。具体的には、コイル軸方向に 2 次微分され、かつコイル面内で 1 次微分された磁場勾配を検出する検出コイルと low- $T_c$  SQUID を用いて 2 次元グラジオメータが作製され、その特性が評価された。作製された 2 次元グラジオメータの感度は  $53 \text{ fT}/\sqrt{\text{Hz}}$  であり、計算値とよく一致した。また、2 次元グラジオメータによる環境磁場の低減率は 54 dB であった。さらに、この 2 次元グラジオメータを用いて、磁気シールドレス環境において成人の心磁図波形がリアルタイムで検出された。この結果は、2 次元グラジオメータが磁気シールドレス

計測に有効であることを示している。また、章末では SQUID グラジオメータと磁気シールドの最適化が総合的に述べられている。

第 5 章では、2 次元グラジオメータを用いて開発した磁気シールドレス胎児心磁計システムについて述べられている。胎児心臓から発生する磁場強度は母体腹壁において数 pT 以下と非常に微弱であるが、開発された心磁計システムを用いて胎児の心磁図波形を病院の磁気シールドレス環境でリアルタイムに検出することに成功している。さらに、加算平均処理によって心磁図波形の P 波や T 波の検出にも成功している。胎児心磁図を磁気シールドレス環境で計測したことは特筆すべき結果であり、第 4 章で提案された 2 次元グラジオメータの有効性を実証している。

第 6 章では、64 個の同軸 1 次微分型 low- $T_c$  SQUID グラジオメータと小型磁気シールドルームを用いた動物用心磁計システムについて述べられている。さらに、開発した心磁計システムを用いて計 95 頭の正常なカニクイザルの心磁図が計測され、正常な心磁図パラメータが得られた。この結果により、霊長類を用いた動物実験を心磁図計測に適用することが初めて可能となった。

第 7 章では、本論文をまとめている。

以上を要すると、本研究は、新しい SQUID グラジオメータの手法と新しい磁気シールドの手法を組み合わせることにより、従来にはない高性能な心磁計システムを実現したものである。さらに、開発された心磁計システムを用いて実際に心磁図波形を計測することにより、本研究で提案された新しい手法の有効性が実証された。以上の結果は、心磁図計測のみならず、広く磁気計測分野の研究に一石を投じるものであり、物理工学および医用工学の発展に寄与するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認められる。