

論文の内容の要旨

論文題目 Development of Magnetocardiography System using SQUID Gradiometers and Simple Magnetic Shield

(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の開発)

氏名 Yusuke Seki

関 悠介

心磁計は、心臓から発生する微弱な磁場を測定することにより、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。心磁計は、心臓の電氣的活動を計測するという点で心電計と同様であるが、磁場を計測するという点で、体表面の電位を計測する心電計とは異なる。心磁計の特長は、非侵襲性に加えて、優れた空間分解能と胎児心臓の電氣的活動が測定可能である点にある。これらの特長は、人体の透磁率が組織に依らず空気の透磁率とほぼ等しいことに起因する。これまでに、心磁計の有効性を実証する臨床データが世界中で数多く報告され、心磁計に対するニーズは増加傾向にある。

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。心磁計に利用される磁気シールドルームは、1 辺が数 m 程度の箱形のタイプが一般的であり、透磁率の高いパーマロイと電気伝導率の高いアルミニウムから構成される。このタイプの磁気シールドルームは、磁気シールド率が 50 dB 以上と高性能であり、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、本研究では、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する。

第 1 に、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を開発した (第 2 章)。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とした。磁気シールド率の周波数依存性及び空間分布を計測した結果、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、開発し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を確認した。

更に、オープン心磁計システムを更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を検討した（第3章）。超伝導リングは高温超伝導テープ線材 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ を用いて作製し、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した。この円筒型磁気シールドに対して超伝導リングの効果について評価実験を行い、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を明らかにした。

第2に、磁気シールドレス心磁計システムの開発を目的として、2方向の磁場勾配を検出する2次元グラジオメータの検討を行った（第4章）。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(2+1)次微分型検出コイルと low-T_c SQUID を用いて2次元グラジオメータを作製し、その特性を評価した。作製した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。更に、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をリアルタイムに検出した。また、SQUID グラジオメータと磁気シールドの最適化について議論した。

次に、胎児の心磁図及び心拍数をモニタリングすることを目的として、2個の2次元グラジオメータを用いて磁気シールドレス胎児心磁計システムを開発した（第5章）。病院の磁気シールドレス環境において、開発した心磁計システムを用いて胎児の心磁図を計測した結果、25週の胎児の心磁図波形をリアルタイムに検出した。更に、加算平均処理によって心磁図波形のP波（25週）やT波（34週）も検出した。

最後に、心磁図検査を動物実験に適用することを目的として、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を開発した（第6章）。更に、カニクイザルの心磁図パラメータの正常値を得ることを目的として、開発した心磁計システムを用いて雄44頭、雌51頭の計95頭の正常なカニクイザルの心磁図を測定した。その結果、PQ時間、QRS幅、QT時間、及びQTcの平均値はそれぞれ、 $79 \pm 14 \text{ ms}$ 、 $42 \pm 7 \text{ ms}$ 、 $222 \pm 23 \text{ ms}$ 、及び 363 ± 25 (mean \pm SD) であり、雌雄間で有意差は見られなかった。