

平成21年 6月 17日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19760048

研究課題名(和文) 心臓磁界計測用インダクション磁気センサシステムの開発

研究課題名(英文) Development of induction magnetometer for magnetocardiography

研究代表者

田代 晋久 (TASHIRO Kuniyisa)

信州大学・工学部・助教

研究者番号：50325487

研究成果の概要：ヒトの心臓から発生する微弱磁界を検出し、初期の心疾患等を診断する心臓磁界計測は、医療分野で注目されており日本でも保険適用が開始されています。この計測技術には液体冷媒を必要とする超電導量子干渉素子を用いた SQUID センサが通常用いられています。本研究では、液体冷媒が不要で SQUID センサと同程度の感度を有し、コイルと電子回路のみで構成できる超高感度なインダクション磁気センサの開発を行いました。

交付額

(金額単位：円)

|        | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 2,400,000 | 0       | 2,400,000 |
| 2008年度 | 900,000   | 270,000 | 1,170,000 |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 年度     |           |         |           |
| 総計     | 3,300,000 | 270,000 | 3,570,000 |

研究分野：生体磁気計測

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用物理学一般

キーワード：磁気センサ、心臓磁界計測、低周波微弱磁界

## 1. 研究開始当初の背景

10 kHz 以下の低周波、地磁気の 100 万分の 1 以下の微弱磁界を検出する微弱磁界検出技術は、宇宙工学、岩石磁気学、ナノ磁気ビーズを用いた免疫検定法、磁性材料工学をはじめとする先端物理応用分野において極めて重要である。中でもヒトの脳や心臓から発生する微弱磁界を検出して、癲癇や初期の心疾患等を診断する生体磁気計測分野は医療分野で注目されており、日本でも保険適用が開始されている。

これまでに様々な磁気センサが提案されているが、1pT 以下の磁界を検出できるものは、SQUID センサ、光ポンピング磁力計、イ

ンダクション磁気センサの 3 つしかない。生体磁気計測に通常用いられるのは SQUID センサであるが、超電導量子干渉素子を用いているため、素子を冷却するための大きなデュワー、液体ヘリウムあるいは液体窒素のメンテナンス、そして携帯電話等が発生する都市の高周波電磁界は SQUID センサの変調信号を抑圧するためこうした環境では動作しないという問題点がある。光ポンピング磁力計は近年注目される高感度磁気センサの一つだが、現在はまだ開発段階であり、大出力のレーザを必要とし、磁界の方向成分を検出できないスカラー磁力計である。一方、インダクション磁気センサは、コイルと電子回路のみを用

いて構成する安価な磁気センサであり、その基本原理も極めて簡単である。コイルに鎖交する磁束を検出する方法には、コイル両端の電圧を検出する方法と、電流を検出する方法の2通りがある。高周波磁界を対象とする場合には、ファラデーの法則により磁界の周波数に比例した出力電圧が得られる前者が有効だが、低周波磁界を対象にする場合、インダクタンスの定理により磁界に比例した電流を検出する後者が有利であり、本研究ではこれを対象とする。

従来のインダクション磁気センサの問題点として、考慮すべきパラメータが極めて多いため最適設計法が存在しない点にある。たとえばコイルのインダクタンスを例に挙げると、コイル形状の違いによりその見積り式が異なる。そのため、形状を無視したインダクタンス見積り式を用いた最適化法（例えば、S. A. Macintyre, IEEE Trans. Magn., 16, pp. 761-763, 1980.）や、見積りを行わず実験的に得られた結果を元に他のパラメータを設定していく手法がとられる（例えば、R. J. Prance et al, Sensors and Actuators, 76, pp. 117-121, 1999.）。また、コイル抵抗  $R$  とインダクタンス  $L$  で決まるカットオフ周波数  $f = R/2\pi L$  が存在し、この値を小さくする必要がある。磁性コアを用いることで  $L$  を増加できるが、コア形状によって決まる反磁界により、見かけの透磁率を大きくするために細長いコア形状となる（たとえば、R. J. Prance, Rev. Sci. Instrum., 74, pp. 3735-3739, 2003. では 18mm の直径に対して長さは 300 mm）。また磁性材料は測定したい磁界分布を乱し、磁界の大きさに対して透磁率は一定でないため、センサのアレー化には向かない。

本研究代表者は、上記の問題を解決するため、正方断面を持つ円形の空芯コイルに問題を絞ったインダクション磁気センサの最適設計法を提案している。コイル幅を  $c$  とすると、このコイルは内径  $2c$ 、外径  $4c$  となるコイル形状のとき、与えられた巻線長さに対して最大のインダクタンスをもつ（Brooks コイル）。つまり、このコイル形状を用いると、インダクション磁気センサのカットオフ周波数  $f$  を、最小のコイルサイズ  $c$  で作製することができる。また、このコイルを作製するのに必要なもう一つのパラメータ、コイル巻線直径  $\delta$  は電流-電圧変換 ( $I/V$ ) 回路に使用するオペアンプの電圧ノイズ、電流ノイズを与えることで決定でき、すべてのパラメータを一意に決めることができる。実用面からの要求として、空間分解能、周波数応答、ノイズフロアレベルの3点が挙げられる。例えば SQUID センサと同程度の空間分解能を仮定してコイル外径 2 cm を仮定した場合、 $c = 0.5$  cm、 $\delta = 0.07$  mm が本手法より導き出さ

れる。この場合、周波数応答として  $f = 656$  Hz、ノイズフロアレベルは  $1.31$  pT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  となり、生体磁気計測への使用は難しい。本問題を解決する手法として、幾つかのアプローチを提案しているが、ノイズフロアレベルを悪化させない電子回路技術を用いた周波数補償  $I/V$  変換回路の導入による周波数応答改善と、コイル占積率をパラメータとしたノイズフロアレベル改善を用いて、心臓磁界計測用計測システム構築を目標とした。

## 2. 研究の目的

### (1) 心臓磁界計測の実証

$c = 3$  cm、 $5$  cm、 $7$  cm のインダクション磁気センサをすでに開発済みであり、周波数応答は  $0.2$  Hz $\sim$  $10$  kHz、ノイズフロアレベルは  $300$  fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  $\sim$  $100$  fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  とセンサ性能としては心臓磁界計測に十分な性能を有するが、本センサを用いて実際の心臓磁界計測を行ったことは無い。そこで金網を用いたファラデーケージ、一様磁界発生コイルを用いた磁気シールドを用いて、心臓磁界計測に最低限と思われる微弱磁界測定環境を安価に作製し、心臓磁界のリアルタイム計測が行えるかを実証する。

### (2) 高分解能インダクション磁気センサの作製

生体磁気計測で使用される SQUID センサと同程度となるコイル外径 2 cm のインダクション磁気センサを作成する。現在すでに見出した設計パラメータでは周波数応答  $0.2$  Hz $\sim$  $10$  kHz、ノイズフロアレベルは  $148$  fT/ $\sqrt{\text{Hz}}$  以下と算出されているが、まだこのサイズのセンサを作製していない。そこで、実際にセンサを試作し、高性能磁気シールドと一様磁界発生コイルを用いた性能評価を行い、提案している最適設計法の有用性を確認する。

### (3) 多チャンネル計測システムを用いた心臓磁界計測

高分解能インダクション磁気センサをアレー化した多チャンネル計測システムを構築する。LabView を用いた安価な多チャンネルデータ計測システムを心臓磁界計測用に開発し、心磁図のリアルタイムマッピングと同時に、信号源同定が行えることを実証する。

## 3. 研究の方法

### (1) 安価な心臓磁界計測環境の作製

ヒトを許容できるサイズを有する銅金網を用いたファラデーケージと一様磁界発生コイルを用いた安価なアクティブ磁気シールドを作製する。

## (2) 心臓磁界計測の実証

開発済みのインダクション磁気センサ（検出コイルの直径 120 mm）のセンサ性能は心臓磁界計測に十分な性能を有する。これらを用いて心臓磁界のリアルタイム計測が行えるかを実証する。

## (3) センサ校正システムの作製

今回新たに作製するインダクション磁気センサのため、一様磁界発生コイルを設計・作製する。

## (4) 高分解能インダクション磁気センサの作製

生体磁気計測で使用される SQUID センサと同程度となるコイル外径 2 cm のインダクション磁気センサを作成する。

## (5) 多チャンネル同時測定システムの構築

LabView による安価な PC ベースの計測装置を用いてリアルタイム多チャンネル計測システムの構築を開始し、心臓磁界計測のために必要な機能をそろえる。

## 4. 研究成果

### (1) 安価な心臓磁界計測環境の作製

ヒトを許容できるサイズを有する一様磁界発生コイルの設計を行った。同じ大きさの正方形コイル、簡単な巻数比で一様磁界発生が行えるコイルシステムの設計法を提案し、試作したコイルシステムで地磁気をヒトが許容できる範囲で  $1 \mu\text{T}$  以下の低減に成功した。このコイルはセンサ校正システムとしても利用した。

### (2) ファラデーケージ製作の製作

図 1 に一辺 1.8 m のファラデーケージ（静電シールド）を製作し、インダクション磁気センサに混入していると思われる電界ノイズの同定と除去を行った。計測システムを全て静電シールド内に入れ、静電シールドを中性接地点とすることで、心臓磁界計測用の計装アンプを飽和させることなく安定に磁気センサを動作させることに成功した。

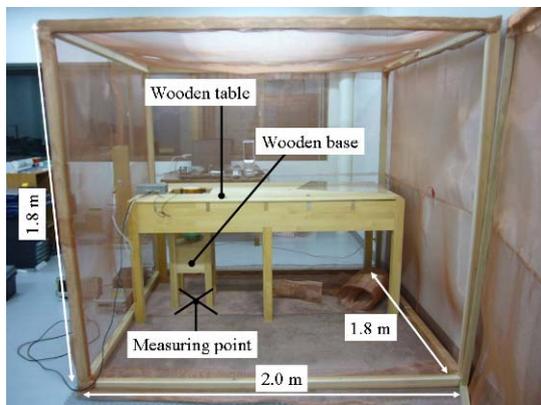


図 1 製作したファラデーケージ

### (3) 円形コイルを検出コイルとしたインダ

## クション磁気センサの理論設計法の提案

一般的な形状の検出コイルにも適用可能なインダクション磁気センサの理論設計法を提案した。この設計法を用いて、本研究で提案している電流検出方式が従来の電圧検出方式に比べ 1000 倍以上の感度を有することを理論的に示し、実験結果を通じて実証した。

## (4) ファラデーケージ外におけるインダクション磁気センサの安定駆動

計装アンプの飽和を避け、およびファラデーケージ外でもインダクション磁気センサを動作させるため、電子回路の改良を行った。検出コイルを図 2 のようにグラジオ構造とし、差動入力型の電流-電圧変換回路を導入することで、ファラデーケージ外でも心臓磁界計測用のインダクション磁気センサを駆動することに成功した。

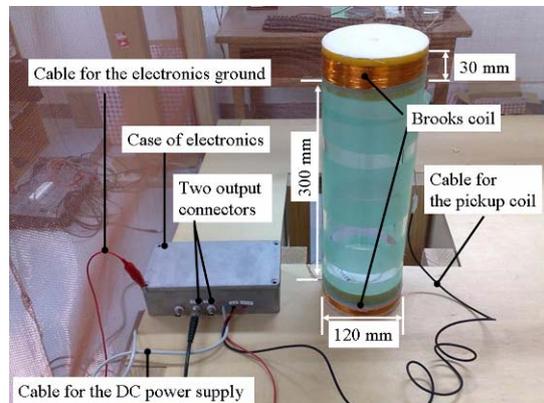


図 2 直径 120 mm の検出コイルを有するインダクション磁気センサ

## (5) 多チャンネルインダクション磁気センサシステムの製作

図 3 に示すような直径 2 cm の検出コイルを 9 つ用いた心臓磁界計測用 9 ch センサシステムを作製した。LabView による安価な PC ベースの計測装置を用いてシステム構築を行った。

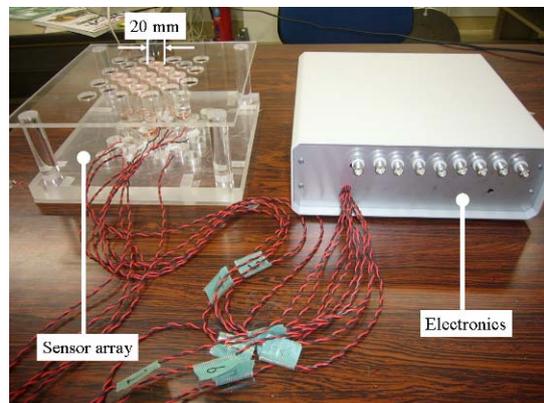


図 3 直径 20 mm の検出コイルを有する多チャンネルインダクション磁気センサ

#### ⑥心臓磁界計測の挑戦

100 pT, 1 Hz のファントム磁界を用いた実証試験には成功したが、ヒトを対象とした心臓磁界計測の実証に至らなかった。図4に心臓磁界計測挑戦の風景を示す。開発した一様磁界発生コイルにより、100 nT以下の地磁気環境を実現した中で行った。心臓磁界らしき信号もいくつか見られたが、主に微小な振動に起因する磁気ノイズとの分別が難しく、現段階では心臓磁界計測を行えたという結論は出せていない。



図4 心臓磁界計測挑戦の風景

心臓磁界計測の普及には液体冷媒を用いない安価かつ取扱が容易な本センサの有用性はきわめて大きい。本研究により SQUID センサの検出コイルと同程度サイズ、感度を有するインダクション磁気センサの開発に成功した。今回製作した安価なシールドでは補えないノイズ対策を引き続き行い、心臓磁界計測の実証を目指す。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

①田代晋久, 垣内厚弥, 森泉建一, 脇若弘之, “インダクション磁気センサの動作原理に関する一考察”, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-09-32, 2009, 査読無

②垣内厚弥, 松岡信仁, 田代晋久, 脇若弘之, “心臓磁界計測を目指したインダクショングラジオメータの開発”, 第20回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 519-522, 2008, 査読無

③K. Tashiro, H. Wakiwaka, A. Kakiuchi, and A. Matsuoka, “Comparative study of air-core coil design for induction magnetometer with current-to-voltage

converter”, *Proc. of second international conference on sensing technology (ICST2007)*, pp. 590-594, 2008, 査読有

④田代晋久, 松岡信仁, 垣内厚弥, 久保田晃弘, 脇若弘之, “正方形コイルを等間隔に配置した一様磁界発生コイルシステム”, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-08-55, pp. 41-46, 2008, 査読無

⑤田代晋久, 脇若弘之, 垣内厚弥, 松岡信仁, “インダクション磁気センサ用空芯円形コイル設計法の比較検討”, 電気学会マグネティックス研究会資料, MAG-07-112, pp. 19-23, 2007, 査読無

⑥田代晋久, 脇若弘之, “空間分解能 2 cm を有する空芯 Brooks コイルインダクション磁気センサ”, 第19回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, pp. 255-258, 2007, 査読無

[学会発表] (計 11 件)

①田代晋久, 垣内厚弥, 森泉建一, 脇若弘之, “インダクション磁気センサの動作原理に関する一考察”, 電気学会マグネティックス研究会, 2009. 3. 27 (ウエルハートピア熱海)

②K. Tashiro, A. Kakiuchi, K. Moriizumi, and H. Wakiwaka, “An experimental study of stable operating condition on a high sensitivity induction gradiometer”, Asian magnetism conference 2008 (AMC2008), 2008.12.12 (Paradise Hotel, Busan, Korea)

③垣内厚弥, 森泉建一, 田代晋久, 脇若弘之, “空間分解能2 cmを有するインダクショングラジオメータ”, 第32回日本応用磁気学会学術講演会, 2008.9.13 (東北学院大学多賀城キャンパス)

④垣内厚弥, 松岡信仁, 田代晋久, 脇若弘之, “心臓磁界計測を目指したインダクショングラジオメータの開発”, 第20回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2008.5.22 (別府ビーコンプラザ)

⑤田代晋久, 松岡信仁, 垣内厚弥, 久保田晃弘, 脇若弘之, “正方形コイルを等間隔に配置した一様磁界発生コイルシステム”, 電気学会マグネティックス研究会, 2008.3.27 (金沢大学)

⑥田代晋久, 脇若弘之, “一様磁界発生コイルの設計”, 第3回電気学会東海支部若手セミナー～磁気応用デバイスの基礎と最前線～, 20

08.2.15 (信州大学)

⑦ K. Tashiro, H. Wakiwaka, A. Kakiuchi, and A. Matsuoka, “Comparative study of air-core coil design for induction magnetometer with current-to-voltage converter”, The 2nd International Conference on Sensing Technology, 2007.11.28 (Palmerston North, New Zealand)

⑧ 田代晋久, 脇若弘之, 垣内厚弥, 松岡信仁, “インダクション磁気センサ用空芯円形コイル設計法の比較検討”, 電気学会マグネティックス研究会, 2007.10.11 (電気学会 第1～第5会議室)

⑨ 田代晋久, 垣内厚弥, 松岡信二, 脇若弘之, “インダクションラジオメータ用検出コイルの設計”, 第31回日本応用磁気学会学術講演会, 2007.9.13 (学習院大学)

⑩ 田代晋久, 脇若弘之, “空間分解能 2 cm を有する空芯 Brooks コイルインダクション磁気センサ”, 第19回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2007.5.17 (早稲田大学)

⑪ K. Tashiro, H. Wakiwaka, “Simple cubic-3 coil system”, The Bioelectromagnetic Society 29th Annual Meeting (BEMS2007), 2007.6.11 (Kanazawa-shi Bunka Hall, Japan)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田代 晋久 (Tashiro Kunihisa)  
信州大学・工学部・助教  
研究者番号: 50325487

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし