

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23700577

研究課題名（和文） 家庭内脳診断に向けた高精度地磁気MRI装置の開発

研究課題名（英文） Development of Earth's field MRI system for diagnosis at home

研究代表者

廿日出 好(HATSUKADE YOSHIMI)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90339713

研究成果の概要（和文）：本研究では、高温超伝導 SQUID センサと結合させた高温超伝導線材から構成される磁束トランス方式の計測回路を構築した。本回路では  $30 \mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$  の低ノイズレベルが得られた。次に、超低磁場 NMR/MRI 装置の開発を行い、磁束トランスで NMR 信号を計測し、結合した SQUID センサで読み出しを行う方式により、地磁気中で水ファントムのプロトン NMR 信号計測および 1 次元 MRI 撮影が可能となった。また、高温超伝導バルク円筒の磁気遮蔽特性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a magnetic flux transformers, which was composed of high-temperature superconductor (HTS) wire, to measure weak magnetic signal. It was shown that the noise level of the transformer was about  $30 \mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$ . We utilized the transformer to construct a ultra-low field (ULF) NMR/MRI system. Based on the system, we measured proton-NMR signal and 1-dimensional MRI of water phantom in Earth's magnetic field. We also clarified property of magnetic shielding of HTS cylindrical bulks.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・医用システム

キーワード：画像診断システム、画像診断システム、超伝導トランス、SQUID 磁気センサ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、高齢化や生活習慣病の増加に伴い、脳疾患患者は増加傾向にある。このため脳疾患の早期発見が望まれているが、体温や血圧のように、日常的に脳の健康状態を把握するような手段はまだ開発されていない。脳の画像化・診断技術である MRI は中規模以上の病院に配置されている大変優れた装置であるが、超伝導マグネットによる 1.5 T 以上の高磁場、莫大な電力を消費する励起・勾配磁場、複雑なシミング機構などによる大規模な装置であり、家庭への設置は困難であった。そのため、家庭用 MRI を実現するには、高磁場

の代わりに低磁場を用いることが必須であるが、これにより大変微弱となり低周波数帯域に発生する MRI 信号を検出できる高感度な計測装置が必要であった。

## 2. 研究の目的

以上の背景より、本研究では、将来的な家庭での脳検診実現に向けて、低周波数帯域で超高感度な磁気センサ SQUID と高温超伝導 (HTS) 線材を用いたコイルや高温超伝導バルク体などを応用し、約  $50 \mu\text{T}$  の地磁気を静磁場として用いる高精度かつ小型な地磁気 MRI 装置の試験用プロトタイプの開発を目的

とした。具体的には、平成 23 年度は、HTS 線材を用いた、磁束検出コイルおよび SQUID センサへ磁束を伝達する入力コイルからなる超伝導磁束トランスを開発すること、このトランスを組み合わせる超低磁場 NMR/MRI 装置の開発を目的とした。平成 24 年度は、上記超低磁場 NMR/MRI 装置に磁束トランスを組み込んだ装置の高感度化と測定範囲拡張、および装置の S/N 向上のため、高温超伝導バルク円筒の磁気遮蔽効果を明らかにすることを目的とした。

### 3. 研究の方法

平成 23 年度上半期は、5~10 cm 立方ほどの計測範囲（指や卵をまずは対象として想定）を有するコンパクトな二次元 MRI 装置のベースとなる、超伝導方式の信号計測回路の設計・作製・評価を行った。ここでは、環境磁気雑音をキャンセルするため、高温超伝導（HTS）線材から構成される、差分型の軸型ラジオメータコイル（直径 85 mm）を設計・作製し、入力コイルを介して高温超伝導 SQUID ラジオメータと結合させた超伝導磁束トランス式の計測回路（図 1）を構築、そのノイズ特性を評価した。

平成 23 年度下半期は、上記計測回路を受信器として用いる超低磁場 NMR/MRI 装置の開発を行った。まず SQUID 磁気センサ単体を受信器として用いた、前分極磁場を用いる NMR 計測装置とパルスシーケンスを開発し（図 2）、10 ml の水ファントムを用いてプロトン NMR 計測を行った。また、磁場勾配コイルを導入し、1 次元 MRI 計測を行った。

平成 24 年度上半期は、上記超低磁場 NMR/MRI 装置において静磁場を地磁気とし、磁束トランスで NMR 信号を計測し、結合した SQUID センサで読み出しを行う方式（図 3）に改良し、感度向上と想定範囲拡大を図った。

下半期は、高温超伝導（HTS）バルク円筒、およびドーム状底付 HTS バルク円筒の磁気遮蔽特性等を調べた。

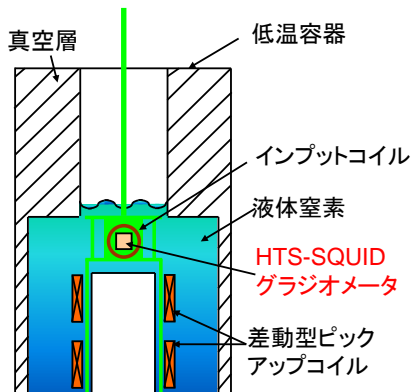


図 1 高温超伝導線材を用いた差動型ピックアップコイルを有する磁束トランス

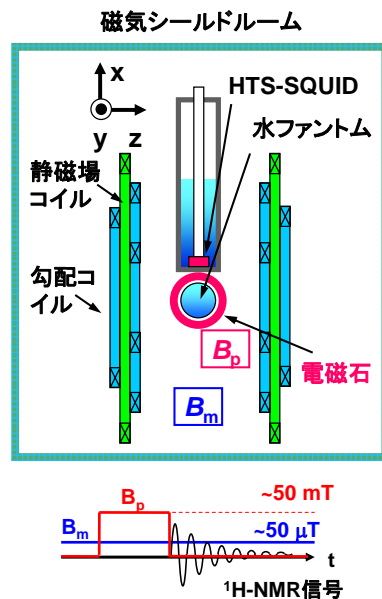


図 2 (上) 高温超伝導 SQUID を用いた超低磁場 NMR/MRI 装置プロトタイプ (下) パルスシーケンス

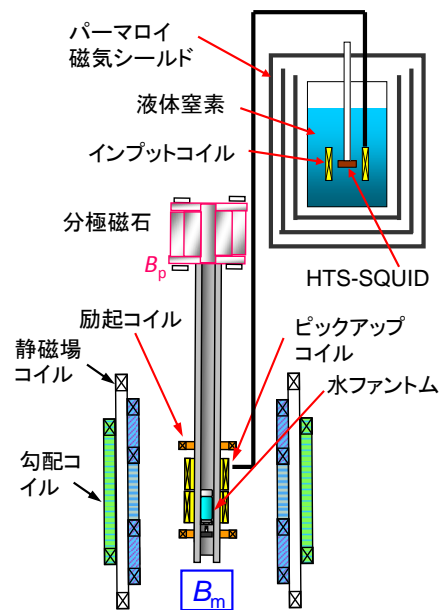


図 3 高温超伝導 SQUID と結合した磁束トランスを用いた超低磁場 NMR/MRI 装置

### 4. 研究成果

図 1 に示した高温超伝導線材を用いた磁束トランスを高温超伝導（HTS）SQUID に結合させたときの磁束ノイズ特性を図 4 に示す。比較のため、SQUID 単体で用いた場合についても示した。図に示すように、トランスにより磁束捕獲面積が SQUID 単体よりはるかに大きくなったため、環境中の電磁ノイズが結合し、ノイズレベルは増大した。しかしコイル周辺に電磁シールドを施すことで、1 kHz で

のノイズレベルを  $30 \mu\phi_0/\text{Hz}^{1/2}$  まで低減することができた。また本トランスにより磁束信号を検出できることを実証した。

次に、上記トランスを受信器として用いる超低磁場 NMR/MRI 装置のベースとなる、SQUID 磁気センサ単体を受信器として用いた NMR/MRI 計測装置を開発した(図2の上図)。ここでは、電磁石により発生させた矩形パルス磁場を前分極磁場として用いるパルスシーケンスを開発し(図2の下図)、10 ml の水ファントムを用いてプロトン NMR 計測を行った。ここでは静磁場として  $45 \mu\text{T}$  の超低磁場を用いた。この結果、図5に示すように、1912 Hz を中心周波数としたライン線幅約 1 Hz のプロトン NMR 信号が得られた。また、二つの区域に水を分割したファントムについて、磁場勾配コイルから約 11 nT/cm の磁場勾配を印可して 1次元 MRI 計測を行った結果、同図に見られるような水の分離に対応した 1次元 MRI が得られた。この他、磁場勾配と MRI 信号の強度と線幅の関係を明らかにした。また、水や油の縦緩和時定数  $T_1$  の計測などが行えることを示した。

次に、上記超低磁場 NMR/MRI 装置において、静磁場を地磁気とし、磁束トランスで NMR 信号を計測し、結合した SQUID センサで読み出しを行う方式(図3)に改良し、感度向上と想定範囲拡大を図った。約  $32 \mu\text{T}$  の地磁気中で計測した水 10 ml のプロトン NMR 信号を図6に示す。また、地磁気は環境の影響を受けて不均一な磁場分布を有するため、勾配磁場による磁場補償を行った。この時の NMR 信号も同図に示す。磁場補償を行うことにより地磁気の均一性が向上し、信号中心周波数が少し変化したが、信号強度を約 3 倍増大することができた。

次に、高温超伝導 (HTS) バルク円筒、およびドーム状底付 HTS バルク円筒(図7)の磁気遮蔽特性等を調べた。環境磁気中で HTS バルク円筒を液体窒素内で冷却し、その中に HTS-SQUID を挿入して内部の磁気環境を測定した。この結果、当初、円筒内部の磁気は量子化され、HTS バルクのマイスナー効果(完全反磁性)により安定状態にあると考えていたが、図8に示すように、円筒のみでは円筒内部のノイズは増加した。これは、外部の磁気ノイズ(もしくは磁気ノイズにより発生する遮蔽電流のつくる磁場)からのローレンツ力により、円筒内の磁束量子が変動したことにより発生したノイズと考えられる。一方、底付 HTS バルク円筒の場合、バルク円筒と比べると大幅に内部磁気ノイズが低減された。これは、バルクの底部を通過する量子磁束が底部でトラップされ、保持力が働いたことにより量子磁束の変動が抑制されたからと考えられる。以上より、円筒バルクを超低磁場 NMR/MRI 計測に応用

するには、磁気遮蔽特性の高い底付バルク円筒を用いることが有効であることが示唆された。

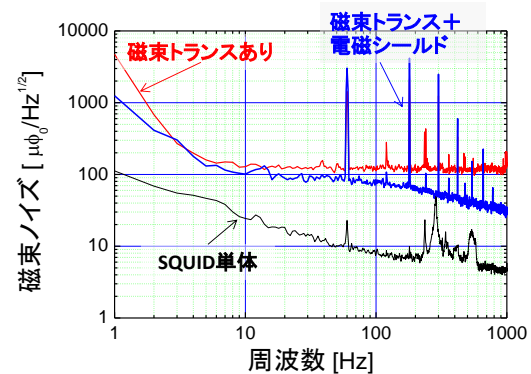


図4 磁束トランスと結合した HTS-SQUID の磁束ノイズ特性。

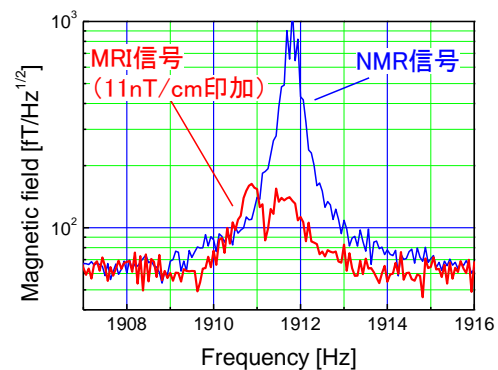
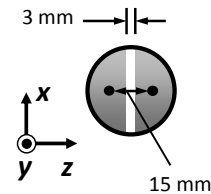


図5  $45 \mu\text{T}$  中での超低磁場 NMR 信号と MRI 信号。約 10ml の水ファントムを使用。

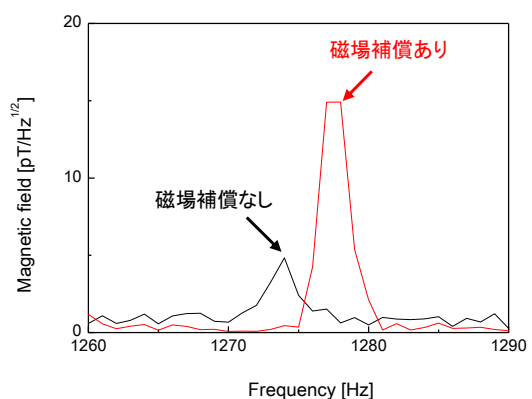


図6 地磁気(約  $32 \mu\text{T}$ ) 中での水の超低磁場 NMR 信号。磁場補償を行うことで、信号強度が約 4 倍となった。



底なしバルク円筒 ドーム状底付バルク円筒  
 図7 高温超伝導 (HTS) バルク円筒 (左)、およびドーム状底付 HTS バルク円筒 (右)

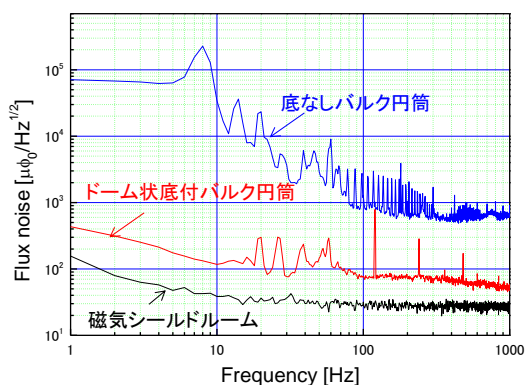


図8 高温超伝導 (HTS) バルク円筒、およびドーム状底付 HTS バルク円筒中での SQUID のノイズスペクトラム。比較のため、高性能磁気シールドルーム内のノイズスペクトラムを示した。

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2件)

- (1) Y. Hatsukade, T. Abe, S. Tsunaki, M. Yamamoto, H. Murata, and S. Tanaka, "Application of ultra-low field HTS-SQUID NMR/MRI to contaminant detection in food", accepted by IEEE Trans. Appl. Supercond., in press, 2013.
- (2) S. Fukumoto, S. Tsunaki, T. Chigasaki, Y. Hatsukade, and S. Tanaka, "ULF-NMR system using HTS-SQUID and permanent magnet", Physica C, Vol. 484, pp. 202-205, March, 2013.

[学会発表] (計5件)

- (1) Y. Hatsukade, T. Abe, S. Tsunaki, M.

Yamamoto, H. Murata, and S. Tanaka, "Ultra-low field HTS-SQUID MRI with permanent magnet", 2012 Applied Superconductivity Conference, Conference Program book, p.80, Oct. 9, 2012, Oregon, USA.

- (2) Y. Hatsukade, "Ultra-Low Field NMR System Using HTS-SQUID for Food Safety", ICEC24-ICMC2012 Conference Program and Abstract Booklet, p.142, 17 May, 2012, Fukuoka, Japan.
- (3) 廿日出 好, 村田 隼基, 綱木 辰悟, 田中 三郎, 「常温磁束トランスと高温超伝導 SQUID を用いた地磁気 NMR 計測装置の試作」, 2012 年秋季低温工学・超電導学会, 講演概要集, p. 227, 3D-a04, 2012 年 11 月 9 日, いわて県民情報交流センター, 岩手.
- (4) 廿日出 好, 今村 啓佑, 村田 隼基, 安達成司, 田辺 圭一, 田中 三郎, 「超低磁場 SQUID-NMR/MRI 応用のための磁気ノイズ低減に関する研究」, 2012 年秋季低温工学・超電導学会, 講演概要集, p. 228, 3D-a05, 2012 年 11 月 9 日, いわて県民情報交流センター, 岩手.
- (5) 廿日出 好, 綱木辰悟, 牧野晃, 村田隼基, 田中 三郎, 「高温超伝導 SQUID を用いた超低磁場 MRI 装置の開発」, 第 27 回日本生体磁気学会大会論文集, pp. 100-101, O4-6, 2012 年 6 月 1 日, 東京電機大学, 東京.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

Applied Sensing Technology Laboratory

<http://ens.tut.ac.jp/squid/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

廿日出 好 (HATSUKADE YOSHIMI)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号 : 9 0 3 3 9 7 1 3