

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月22日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22650116

研究課題名（和文） 超低磁場マルチモダリティ磁気共鳴画像システムの開発

研究課題名（英文） Development of ultra-low field multimodal MRI system

研究代表者

小林 哲生 (KOBAYASHI TETSUO)

京都大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：40175336

研究成果の概要（和文）：

本研究では、超高感度な光ポンピング原子磁気センサ(OPAM)により脳磁図などの他のモダリティと融合可能な超低磁場マルチモダリティ MRI システムの開発を目的に研究を行った。まず OPAM の高感度化のため K 原子または Rb 原子を混合したハイブリッド型を提案し高感度化が可能であることが実証した。次に、超低磁場 MRI の実現に向けて、フラックストランスフォーマと OPAM を組み合わせた MR 信号の遠隔計測に関して理論的検討と実測による検証を行った。その後、日本初となる MR 信号とヒトの心磁図分布の計測に成功した。

研究成果の概要（英文）：

In recent years, optically pumped atomic magnetometers (OPAMs) have reached sensitivities comparable to and even surpassing those of super-conducting quantum interference devices (SQUIDs). In this study, we developed an ultrahigh-sensitivity OPAM as a magnetic sensor for an ultra-low field (ULF) MRI system, which can measure biomagnetic fields and magnetic resonance (MR) signals simultaneously. First, we demonstrated that our newly developed K-Rb hybrid OPAM achieved high sensitivity. In addition, we demonstrated measurements of human magnetocardiograms with our OPAM. Finally, we successfully detected MR signals using the OPAM.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	0	2,100,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	270,000	3,270,000

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：原子磁気センサ, MRI, MCG, 光ポンピング, 医用イメージング, MEG

1. 研究開始当初の背景

医用イメージングシステムの中で磁気共鳴画像 (MRI) システムは臨床の現場で広く用いられ非常に重要な地位を占めている。現在の MRI システムにおいては、磁気共鳴信号の検出に RF 誘導コイル (ピックアップコイ

ル) を用いているおり信号強度を大きくするため超伝導磁石などによる強磁場の印加が必要であり、大型・高額なシステムとなっている。また、静磁場強度の増大に伴い勾配磁場も大きくなり、その変動に伴い人体に誘導される電流の健康への影響が懸念される。

このような背景のもと、超伝導量子干渉素子(SQUID)を用いた超低磁場MRIの試みが報告されている。しかし、SQUIDは液体ヘリウムによって冷却する必要があるため、装置の小型、低価格化が困難である。

2. 研究の目的

本研究では、脳磁図などの他のモダリティと融合可能な超低磁場マルチモダリティMRIシステムの実現に向けて、SQUIDを凌ぐ新たな超高感度光ポンピング原子磁気センサ(Atomic magnetometer)を開発し、この新規センサを用いた生体磁気信号ならびに磁気共鳴信号の検出を行うことを目的とした。中でも、光ポンピング原子磁気センサの感度を上げるため、K原子とRb原子という2種類のアルカリ金属を混合したハイブリッド型センサを提案し、Rb原子をポンピングし、そのスピン偏極をカリウムに移すことにより計測系のノイズ低減を図ることにより高感度化の達成を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、我々がこれまで開発してきた光ポンピング原子磁気センサのさらなる高感度化を図り、この磁気センサを用いて脳磁図などとの同時計測を可能とするマルチモダリティの超低磁場磁気共鳴画像システムを世界に先駆けて実現するための実験的、理論的検証を行なう。

初年度はK原子とRb原子のハイブリッド型によるセンサの高感度化を中心に研究を進め、次年度は磁気共鳴信号の検出ならびに画像化のため、静磁場強度が $300\mu\text{T}$ 以下である超低磁場ならびに3軸の勾配磁場の印加と制御可能な電磁石システムを用いてMRIの実現可能性を実験的に示す。また、光ポンピング原子磁気センサを用いて同じ実験系において脳磁図計測も計画しておりマルチモダリティMRIシステムとしての可能性を示す。

3.1 原子磁気センサの原理と高感度化

本研究で用いる光ポンピング原子磁気センサ(Atomic magnetometer)は、光ポンピング法により生成したアルカリ金属原子のスピン偏極を用いて磁場を測定するという原理で動作する。

光ポンピングとは近接した2つのエネルギー準位における原子の占拠数に光を用いて大きな差を作る方法である。図1に示す様に光ポンピングされたアルカリ金属原子(K原子やRb原子)はスピン偏極し、そこに印加される磁場が直線偏光の偏光面を回転させるため、この回転角により磁場を検出できる。

このセンサは、特にスピン偏極の緩和レー

スが小さくなる状態において原理的にSQUIDを凌ぐ超高感度($\sim 0.01\text{ fT/Hz}^{1/2}$)が達成でき、かつ冷却装置を必要としないことから、新たな磁気センサとして期待されている。

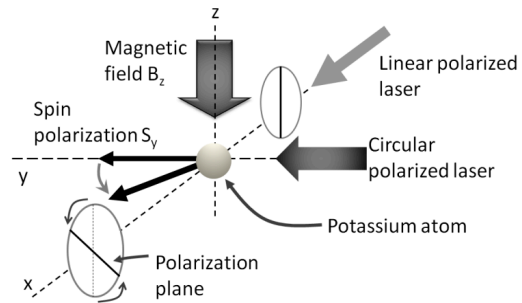


図1 原子磁気センサの原理

本研究では、この原子磁気センサの感度を上げるため、K原子とRb原子という2種類のアルカリ金属を混合したハイブリッド型を提案し、K原子を直接ポンピングする代わりにRb原子をポンピングし、Rb原子のスピン偏極をK原子とRb原子のスピン交換衝突によりK原子に移すことにより計測系のノイズ低減を図ることにより高感度化の達成を目指す。併せてセルの作成の諸条件、最適なレーザのパワーなどを理論と実験の両面から明らかにする。

センサの動作原理ならびに本研究の高感度化のアイデアを現在使用している計測システム(図2)により説明する。図3に示すようなアルカリ金属のK原子とHe, N₂を混合した緩衝ガスを封入したガラスセル(27 cm³)を3層磁気シールドボックス内に設置されたオープン内で加熱する。磁気シールドを通過する微弱な磁場は、シールド内に設置された3軸ヘルムホルツコイルによって相殺される。図中に示すように、円偏光されたポンプレーザをK原子のD1遷移の共鳴波長である770.1 nmに調整し、ゼロ磁場中に存在するK蒸気にy軸方向から照射する。

電子を選択的に励起することによって電子スピンの向きがy軸方向に揃い、K原子のスピン偏極 S_y が生じる。 S_y が生じている状態でz軸方向へ測定対象磁場 B_z を印加すると、 B_z によってy軸方向のスピン偏極 S_y は $S_y \times B_z$ で表されるトルクを受け、x-y平面上で回転する。この回転によりスピン偏極のx成分 S_x が生じる。

S_x の存在下で、KのD1共鳴波長770.1nmから若干離調させ(769.9 nm)、直線偏光されたプローブレーザをx軸方向から照射すると、プローブレーザの偏光面が S_x に応じて角度 ϕ だけ回転する。プローブレーザはセルを透過後、偏光ビームスプリッターを用いてP偏光成分とS偏光成分に分けられる。それぞれ

の成分をフォトダイオードで検知し、差動増幅して得られる電気信号は偏光面の回転角 ϕ に比例する。偏光面の回転角 ϕ は B_z によって決まるので、差動増幅の電気信号から B_z の大きさが得られる。

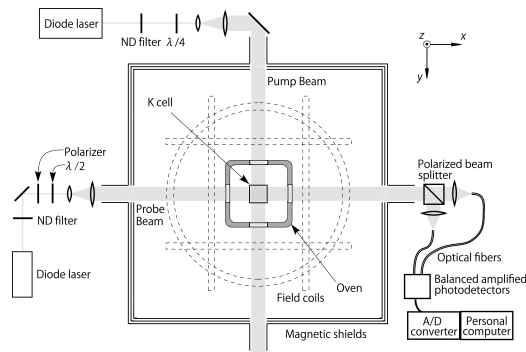


図2 計測システムの概要

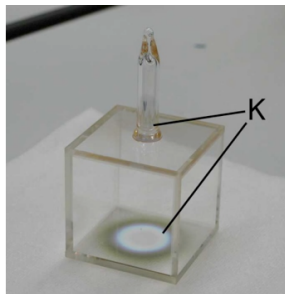


図3 カリウム封入ガラスセル

3.2 MR 信号の計測

本研究で開発する光ポンピング原子磁気センサは計測しようとする磁気共鳴周波数に依存せず、一定の感度を有するセンサであるため、信号の検出のために強い静磁場を加える必要がない。すなわち、軽量のコンパクトな電磁石の使用で磁気共鳴信号が計測可能である。この実験には図4に示す3層ミューメタルの磁気シールドボックス中に図5に示す静磁場と3軸勾配磁場を印加可能なコイルシステムを用いる。



図4 磁気シールドボックス

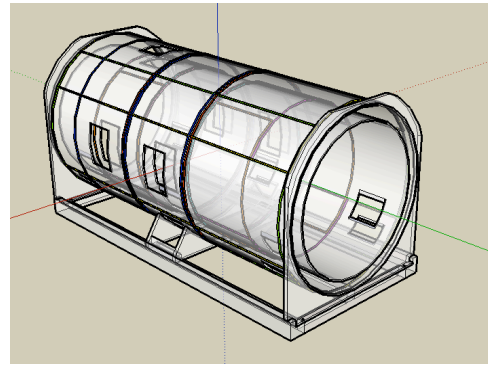


図5 実験用磁場印加コイルシステム

図5の磁場印加コイルシステムでは円筒の軸方向に $300 \mu\text{T}$ の静磁場を加えることができる。このコイルシステムの中心に直径 2cm 、長さ 5cm 円筒状サンプル資料を配置し、その直下に図2のガラスセルを置き、シールドボックスの外部に配置するポンピングレーザーならびにプローブレーザーからのレーザー光をガラスセル中心で交差させる。

さらに磁気共鳴画像を取得するため、このコイルシステムを用いて磁気共鳴信号検出のために静磁場、勾配磁場制御のためのパルスシーケンスの開発を行った。

3.3 生体磁気計測

原子磁気センサを用いた生体磁気計測に先立ち、ヒトの頭部を模擬した生理食塩水の入った球状のガラス容器内に電流ダイポール型の微小電極を配置したファントムを作成し、それをセンサ近傍の平面上でスキャンすることにより磁場分布を計測する。計測結果の妥当性ならびに信頼性を検証するため理論値との比較を行った。

続いて、生体磁気信号として信号強度の大きい心磁図の計測を行った。被験者は年齢 $25\text{-}33$ 才の健常男性3名である。原子磁気センサ上面に非磁性の木製ベッドを配置し、被験者はベッドにうつ伏せ状態で横たわり、心臓近傍の $20\text{cm} \times 20\text{cm}$ の領域において 5cm 間隔で計 25 箇所得心臓から発生する磁気信号を計測した。

4. 研究成果

2010年度は、光ポンピング原子磁気センサの高感度化に主眼をおいて研究を進めた。高感度化のため、まず計測感度と帯域幅のセンサ動作条件依存性に関する理論的・実験的検討を行った。

実験においては、K原子とRb原子という2種類のアルカリ金属をまず単体で用いた場合に関して、特に低周波数帯域における環境磁気ノイズや計測システム系の磁気ノイズの低減を図った。その後、K原子とRb原子という2種類のアルカリ金属を混合した

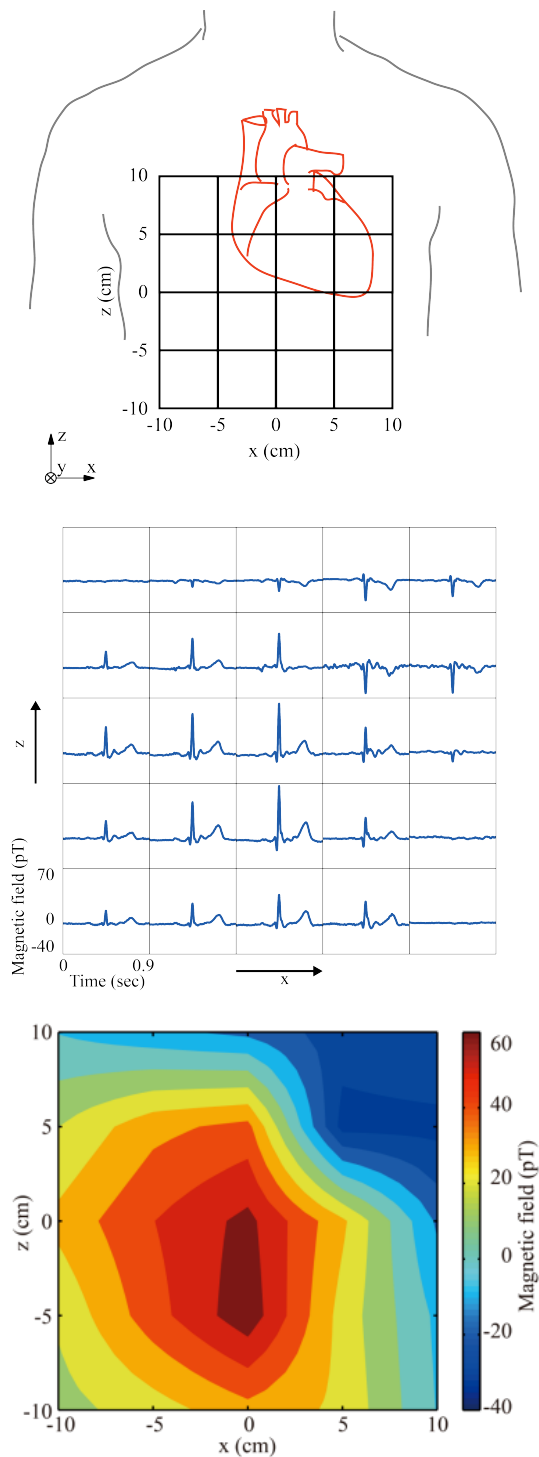


図6 MCG信号測定領域(上段)と全計測点における加算平均後のMCG波形(中段), R波のピーク時間における心磁図分布(下段)

ハイブリッド型セルを作成し、ポンピングされた原子のスピンの偏極をスピン交換衝突によりもう一方の原子に移すことによりノイズを低減し高感度化が図れる事を示した。併せてセルの作成の諸条件、最適なレーザーのパワーなどを理論と実験の両面から明らかに

した。

2011年度はまず前年度の研究成果を踏まえ、引き続き光ポンピング原子磁気センサの高感度化の研究を進めた。2010年度の研究においてアルカリ金属のK原子またはRb原子を混合したハイブリッド型の新たなガラスセルを作成し、ポンピングする原子とプローブする原子を別にする事で高感度化が可能であることが実証できたので、2011年度は両原子の混合比やレーザーのパワー、波長といった実験パラメータの最適化について理論的、実験的な検討を行ってさらなる高感度化を図った。

次に、超低磁場MRIの実現に向けて、フラックストランスフォーマと光ポンピング原子磁気センサを組み合わせたMR信号の遠隔計測に関して理論的検討と実測による検証を行った。フラックストランスフォーマはピックアップコイル、インプットコイルと、それに直列に接続した可変コンデンサからなる。本研究では、原子磁気センサの物理的制約を考慮したフラックストランスフォーマのコイルの位置、形状、サイズを、SNRを最大にするようシミュレーションによって決定し実測により妥当性を実証した。

2011年度実施したMR信号の遠隔計測実験には300 μ Tの静磁場と3軸勾配磁場を印加可能なコイルシステムを用いた。このコイルシステムを中心に、さらに30mTのプリポーラライズ磁場を印加可能なコイルを設置し、MR信号検出のために静磁場、勾配磁場制御のためのパルスシーケンスの開発を行った。

一方、マルチモダリティシステムに向けヒトの生体磁気信号の計測を試み、日本初となる原子磁気センサによる心磁図分布計測(図6)に成功した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計14件)

1. Tatsuya Yamashita, Takenori Oida, Shoji Hamada and Tetsuo Kobayashi: "A thermal noise calculation method for precise estimation of signal-to-noise ratio of ULF-MRI", Journal of Magnetic Resonance, Vol.215, pp.100-108 (2012) DOI: 10.1016/j.jmr.2012.01.015 査読有
2. Takenori Oida, Yosuke Ito, Keigo Kamada and Tetsuo Kobayashi: "Detecting rotating magnetic fields using optically pumped atomic magnetometers for measuring ultra-low-field magnetic resonance signals", Journal of Magnetic Resonance, Vol.217, pp.6-9 (2012) DOI: 10.1016/j.jmr.2011.12.014 査読有
3. 土田昌宏, 笈田武範, 小林哲生: "光ポンピング原子磁気センサを用いたMR信号検出のための磁場分布解析", 電気学会論文誌

- A、Vol.132、No.3、pp.220-226 (2012) DOI: <http://dx.doi.org/10.1541/ieejfms.132.220> 査読有
4. Shuji Taue, Yasuyuki Sugihara, Tetsuo Kobayashi, Kiyoshi Ishikawa and Keigo Kamada: "Magnetic field mapping and biaxial vector operation for biomagnetic applications using high-sensitivity optically pumped atomic magnetometers", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.50, 116604-1-7 (2011) DOI: 10.1143/JJAP.50.116604 査読有
 5. Yousuke Ito, Hiroyuki Ohnishi, Keigo Kamada, Tetsuo Kobayashi: "Sensitivity improvement of spin-exchange relaxation free atomic magnetometers by hybrid optical pumping of potassium and rubidium", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.47, No.10, pp.3550-3553 (2011) DOI: 10.1109/TMAG.2011.2148191 査読有
 6. Takenori Oida, Yuta Kawamura and Tetsuo Kobayashi: "Optimization of flux transformer for ultra-low field MRI systems with optically pumped atomic magnetometers", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.47, No.10, pp.3074-3077 (2011) DOI: 10.1109/TMAG.2011.2156765 査読有
 7. Keigo Kamada, Shuji Taue, Tetsuo Kobayashi: "Pump laser power dependent bandwidth and sensitivity of optically pumped atomic magnetometers", Japanese Journal of Applied Physics, Vol.50, (2011) 056602-1-7 DOI: 10.1143/JJAP.50.056602 査読有
 8. 小林哲生: "高感度光ポンピング原子磁気センサ", 応用物理学会誌, Vol.80, No.3, pp.211-215 (2011) DOI: <http://www.jsap.or.jp/ap/2011/ob8003/p800211.html>
- バイオサイバネティクス研究会、(徳島、2011.7.8-9)
5. 土田昌宏、笈田武範、小林哲生: "光ポンピング原子磁気センサを用いたMR信号検出のための磁場分布解析", 平成23年電気学会基礎・材料・共通部門大会、(東京、2011.9.21-22)
 6. 大西宏征、伊藤陽介、鎌田啓吾、小林哲生: "K-Rb ハイブリッドセルを用いた光ポンピング原子磁気センサの基礎的検討", 2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会 (山形、2011.8.29-9.2)
 7. 伊藤陽介、大西宏征、鎌田啓吾、小林哲生: "K-Rb ハイブリッドセルを用いた光ポンピング原子磁気センサの周波数特性", 2011年秋季第72回応用物理学会学術講演会 (山形、2011.8.29-9.2)
 8. 笈田武範、河村雄太、鎌田啓吾、伊藤陽介、小林哲生: "超低磁場マルチモダリティMRIを目指した原子磁気センサによりMR信号の遠隔計測法", 第39回日本磁気共鳴医学会大会 (小倉、2011-9.29-10.1)
 9. 山下達也、笈田武範、濱田昌司、小林哲生: "原子磁気センサを用いた生体熱雑音磁場計測の理論的検討", 電子情報通信学会MEとバイオサイバネティクス研究会 (名古屋、2011.12.20)
 10. 市原直、鎌田啓吾、伊藤陽介、水谷夏彦、小林哲生: "光ポンピング原子磁気センサにおける2光軸型配置と1光軸配置の実験的比較", 第59回応用物理学関係連合講演会 (東京、2012.3.15-18)
 11. 伊藤陽介、大西宏征、鎌田啓吾、小林哲生: "K-Rb ハイブリッドセルを用いた光ポンピング原子磁気センサにおけるポンプ光強度の減衰に伴う磁場応答の変化", 第59回応用物理学関係連合講演会 (東京、2012.3.15-18)

[学会発表] (計 23 件)

1. Tetsuo Kobayashi: "Optically pumped atomic magnetometer toward ultra-low field MRI systems", Black Forest Focus on Soft Matter 6 (Freiburg, Germany, 2011, 7/26-29)
2. Yousuke Ito, Hiroyuki Ohnishi, Keigo Kamada, Tetsuo Kobayashi: "Sensitivity improvement of spin-exchange relaxation free atomic magnetometers by hybrid optical pumping of potassium and rubidium", Intermag 2011, (Taipei, Taiwan, 2011, 4.25-29)
3. Takenori Oida, Yuta Kawamura and Tetsuo Kobayashi: "Optimization of flux transformer for ultra-low field MRI systems with optically pumped atomic magnetometers", Intermag 2011, (Taipei, Taiwan, 2011, 4.25-29)
4. 鎌田啓吾、伊藤陽介、小林哲生: "超高感度光ポンピング原子磁気センサによるヒト心磁図の計測", 電子情報通信学会 ME と

[その他]
ホームページ等
<http://bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp/publications03.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

小林 哲生 (KOBAYASHI TETSUO)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：40175336

(2)連携研究者

笈田武範 (OIDA TAKENORI)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：70447910