

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820156

研究課題名(和文) 光ポンピング原子磁気センサのシールドレス計測に向けた磁場調整システムの開発

研究課題名(英文) Development of bias magnetic field tuning system for optically pumped atomic magnetometer toward extremely minute magnetic field detection without magnetic shielding

研究代表者

笈田 武範(Oida, Takenori)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：70447910

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：光ポンピング原子磁気センサ(OPAM)は、非常に高い感度を有する磁気センサであるが、感度維持のためにはバイアス磁場を計測対象に合わせて調整する必要がある。本研究では、高価な磁気シールドを用いない環境においてOPAMを用いた微小磁場計測を実現するためのバイアス磁場調整・帯域制御システムの構築を目指した。アクティブシールド型バイアス磁場調整コイルでは、計測対象への不要な磁場の印加を抑制した調整が可能であった。また、勾配磁場による帯域制御やコイル群により発生する磁気ノイズを抑制するシステムについても検討を行い、ローパスフィルタおよびフィードフォワード型の磁場ノイズ抑制が有効であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：Optically pumped atomic magnetometer (OPAM) is one of the highly sensitive magnetic sensors. However, bias magnetic field tuning of an OPAM is required to detect extremely minute magnetic fields. In this study, control system of the bias magnetic field and the bandwidth of an OPAM were proposed to measure extremely minute magnetic fields using an OPAM without magnetic shielding.

The bias magnetic fields were able to be tuned by actively shielded bias magnetic field tuning coils with suppressing the magnetic fields applied to measured objects by the tuning coils. In addition, the bandwidth of an OPAM was able to be controlled by gradient magnetic field. On the other hand, since magnetic noises generated by the bias tuning coils and the gradient coils deteriorated the sensitivity of an OPAM, low pass filter and feedforward noise reduction were effective to improve the sensitivity of an OPAM.

研究分野：磁気計測・磁気共鳴画像

キーワード：光ポンピング原子磁気センサ アクティブシールド バイアス磁場調整システム 勾配磁場 計測帯域制御 外乱抑制

## 1. 研究開始当初の背景

光ポンピング原子磁気センサ (optically pumped atomic magnetometer : OPAM) は理論感度限界が  $0.01 \text{ fT/Hz}^{1/2}$  とも言われる高い感度を持った磁気センサである。OPAM はポンプ光方向のバイアス磁場の大きさに応じて共鳴周波数が変化するため、計測対象磁場の周波数に合わせてバイアス磁場を調整する必要がある。また、地磁気をはじめとする計測対象以外の磁場が存在する環境では、バイアス磁場の調整と合わせて、それらの磁場をキャンセルする必要がある。そのため、OPAM を用いた微小磁場計測では、パーマロイなどの高い透磁率を持つ磁気シールド内で計測を行う事が一般的である。しかしながら、高価な磁気シールドの使用は OPAM の応用を制限してしまうという課題がある。

また、低周波数の微小磁場に対して高い感度を有する OPAM の応用の 1 つとして、超低磁場 MRI (ultra-low field MRI : ULF-MRI) が挙げられるが、MRI のように磁場を用いて信号を生成する計測環境下で、OPAM を高感度に運用するためには、外部の磁場に与える影響を小さく抑制した状態で、OPAM のバイアス磁場を調整する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、上記のような課題および OPAM を用いた微小磁場計測の高感度計測の応用範囲拡大のため、パーマロイのような高価な磁気シールドを用いない環境でも OPAM を用いて様々な周波数の磁気信号を高感度に計測できるよう、OPAM のバイアス磁場調整や計測帯域制御を行う磁場調整システムを開発する。

## 3. 研究の方法

本研究では、上記の目的を達成するため、主に以下の 3 つの項目について検討を行う。

- (1) 計測対象外一様磁場キャンセルおよびバイアス磁場調整システムの構築
- (2) 計測帯域調整用勾配磁場調整およびバイアス磁場シミングシステム
- (3) 上記コイル群由来の磁気ノイズの抑制  
上記のコイルの設計・磁場分布解析などを通して、提案手法の有効性を理論的、実験的に検討した。

## 4. 研究成果

- (1) 本研究では、最初に OPAM の共鳴周波数を調整するためのバイアス磁場に関して、計測対象外一様磁場キャンセルおよびバイアス磁場調整システムの構築に関する検討を進めた。その中で、バイアス磁場調整コイルにアクティブシールドを施すことによって、漏洩磁場を抑制しつつ OPAM の共鳴周波数の調整が可能となるアクティブ磁気シールド

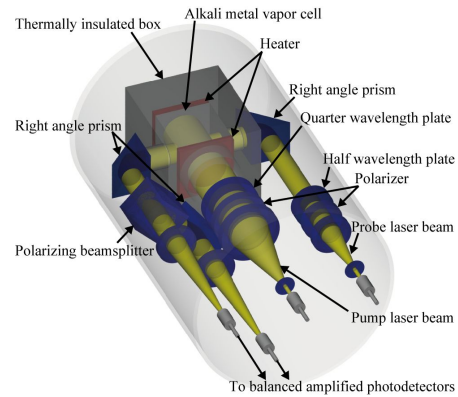


図 1: 本研究で用いた OPAM モジュールの模式図。

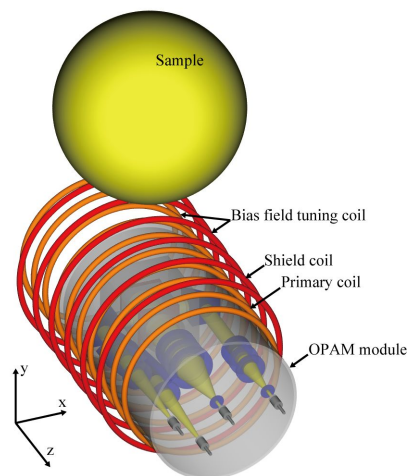


図 2: アクティブシールド型バイアス磁場調整コイルの模式図。

ド型のバイアス磁場調整コイルについて検討を行った。

本研究では、図 1 の模式図に示すような OPAM モジュールに対して、図 2 に示すような主コイルとシールドコイルからなるアクティブ磁気シールド型のバイアス磁場調整コイルを設計し、Biot-Savart の法則を用いた磁場分布解析を行うことにより、OPAM のガラスセルに対して均一なバイアス磁場を印加することによって共鳴周波数の調整を可能としつつ、計測対象に対する不要な磁場の印加を抑制したバイアス磁場調整コイルの設計が可能であることを示した。

この際、コイルの巻線位置の誤差を抑制する必要があること、コイルに流す電流にノイズが多いと光ポンピング原子磁気センサの感度に影響が出ることも確認された。

- (2) 次に、OPAM では上記のようにバイアス磁場の大きさに応じて共鳴周波数が決まるが、OPAM のガラスセル内に故意に磁場勾配を印加することにより、ガラスセル内の各位置における共鳴周波数に勾配を持たせ、

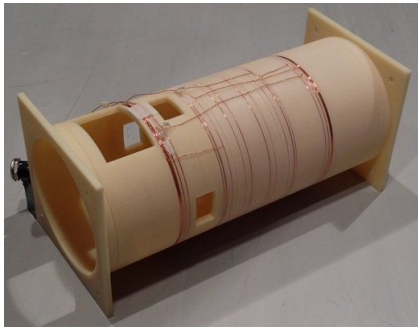


図 3 : 実装したシムコイル群 .

OPAM の計測帯域を制御することが考えられる . このような勾配磁場を用いた帯域制御 , 4 次以下の勾配バイアス磁場を補正可能なシミングコイルの設計を行い , OPAM モジュールに対して図 3 に示すように上記コイル群の実装を行った . さらにフラックスゲートセンサーを用いて磁場分布を計測し , 設計値に対する誤差の評価を行った ( 図 4 参照 ) .

その結果 , 設計した勾配磁場コイル・シムコイルを用いて OPAM のバイアス磁場に含まれる不均一性の抑制を行うことによって高感度化を実現したり , 勾配磁場を用いて計測周波数帯域を広帯域に制御したりすることが可能となった . この際 , 実装時にコイルの巻き線同士が干渉したり , 各コイルから出力される磁気ノイズが増加したりするという課題を確認した . 磁気ノイズに関しては光ポンピング原子磁気センサの感度に直接影響を与える重要な要素であるため , バイアス磁場調整コイルや勾配磁場コイルなどから出力される磁気ノイズの低減についても検討する .

(3) また , 本研究では , OPAM の計測感度を低下させる要因となるバイアス磁場調整コイルをはじめとするコイル群に起因する磁気ノイズを抑制するため , 以下の 2 種類の手法について検討を行った . 本研究では , 特に , コイル群の中で大きな磁場を発生するバイアス磁場調整コイルから出力される磁気ノイズを抑制することを目指した .

【手法 1】低域通過フィルタを用いたノイズ低減

【手法 2】フィードフォワード制御を用いたノイズ低減

各手法で用いた回路図またはブロック図を図 5 に示す . これらの回路を実装し , 我々が開発を進めている超低磁場 MRI への応用を念頭に , 周波数が 1 kHz や 10 kHz の磁気信号取得時のノイズレベルについて評価を行った .

各回路を用いた参照磁場計測の結果を図 6 に示す . 図 6 の 1 kHz および 10 kHz 付近のノイズレベルを評価すると , フィードフォワード型のノイズ抑制を適用する手法では 1.3 倍以上 , 低域通過フィルタを適用する手法で

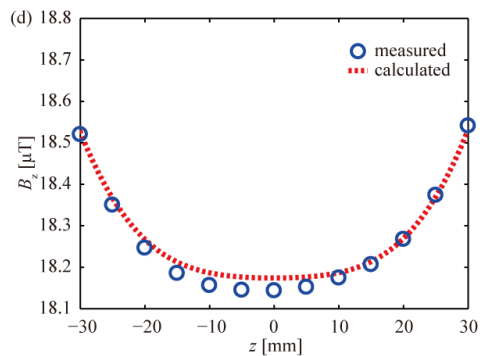
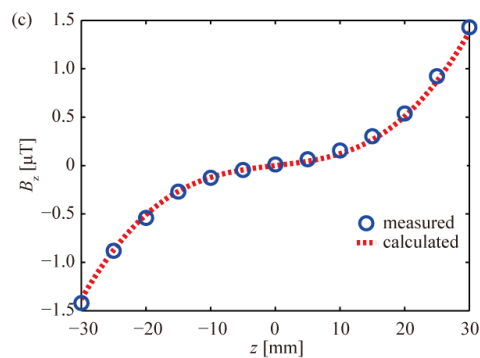
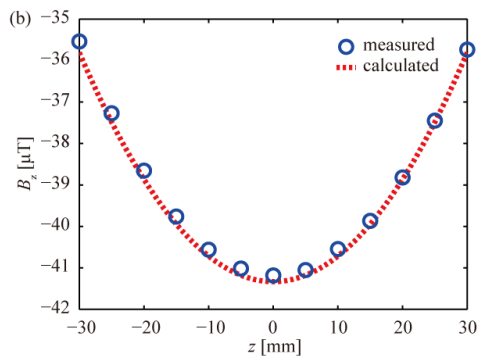
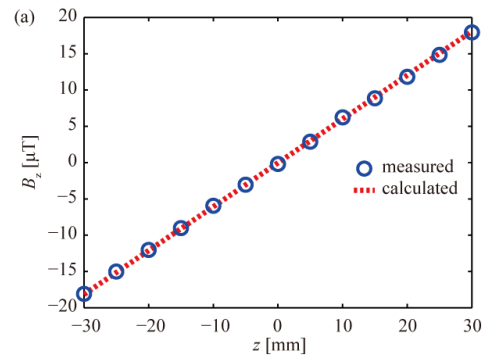


図 4 : 各シムコイルの磁束密度計測結果および磁場分布の数値解析結果 . 1 次 (a) , 2 次 (b) , 3 次 (c) , 4 次 (d)シムコイルの結果 .

は 2.2 倍以上のノイズ抑制効果が得られることが確認された . 本研究では , 1 kHz および 10 kHz 付近のノイズ低減効果を確認したが , 今後より低い周波数への応用やフィードフォワード制御の高域通過フィルタ , 移相器および増幅器の設定方法について検討が必要である .

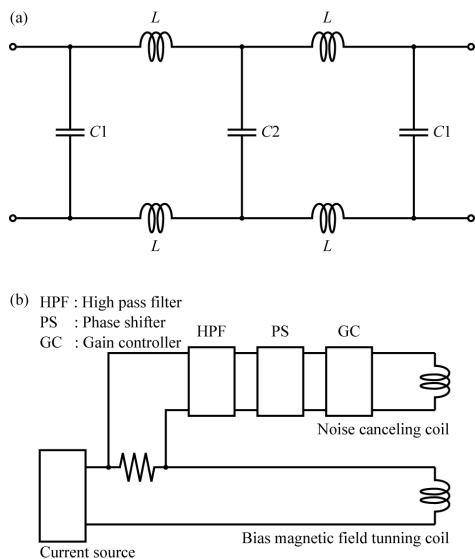


図 5 : ノイズ抑制回路の回路図・ブロック図 .  
5 次低域通過フィルタ (a) およびフィード  
フォワード制御型ノイズ低減回路 .

(4) 最後に、これまでに試作・研究してきたシステムは、計測対象のシステムに合わせて最適化する必要があることが予測されるため、本研究課題で試作した OPAM システムの応用として、超低磁場 MRI や磁気粒子イメージングへの応用を検討した .OPAM は特定の周波数を持った磁気信号に対して高い感度を有するため、計測すべき周波数帯域を設定できる計測対象には親和性が高い . また、これまでに試作してきたノイズ抑制機構なども周波数選択的に適用することが可能であり、計測対象の周波数を特定し、最適化することによる有効性が予測される . 本検討の中では、このような OPAM の応用および計測可能性についても検討を行った .

#### 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 6 件 )

Ingo Hilschenz, Hiroaki Natsukawa, Yosuke Ito, Takenori Oida, Tetsuya Yamamoto and Tetsuo Kobayashi, Remote detected low-field MRI using an optically pumped atomic magnetometer combined with a liquid cooled pre-polarization coil, Journal of Magnetic Resonance, 査読有, Vol.274, 2017, 89 - 94,

DOI : 10.1016/j.jmr.2016.11.006

加藤 健太郎、笈田 武範、伊藤 陽介、小林 哲生、光ポンピング磁気センサを用いた磁気粒子イメージングに向けた磁気信

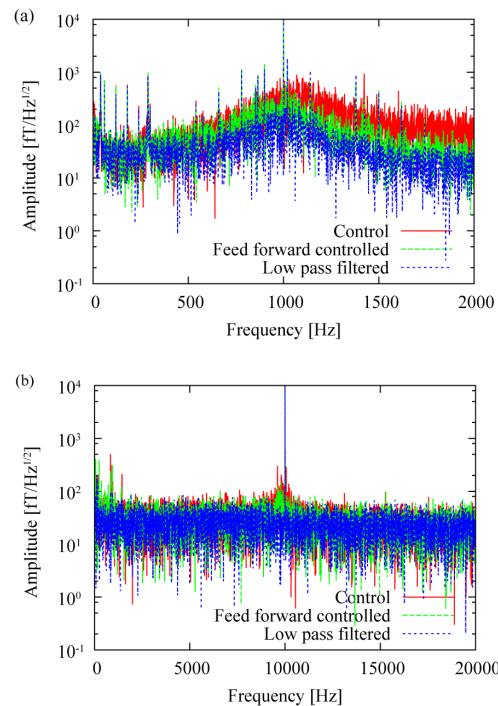


図 6 : 1 kHz ( a ) および 10 kHz ( b ) の参照磁  
場信号に対する OPAM の周波数 ( 振幅 ) 応答特  
性 . 各参照磁場の周波数に一致するように  
OPAM の共鳴周波数を調整 .

号の遠隔計測、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、Vol.116、No.520、2017、65 - 70

笈田 武範、上田 博之、圧縮センシングを用いた超低磁場・低磁場 MRI における T1 強調画像のコントラスト改善、電子情報通信学会技術研究報告、査読なし、Vol.116、No.520、2017、59 - 64

笈田 武範、加賀 裕人、山本 哲也、小林 哲生、光ポンピング原子磁気センサ用バイアス磁場制御コイルに起因する磁気ノイズの低減、電子情報通信学会技術研究報告、査読なし、Vol.115、No.513、2016、73 - 76

Takenori Oida, Masahiro Tsuchida, Hiroto Takata and Tetsuo Kobayashi, Actively shielded bias field tuning coil for optically pumped atomic magnetometer toward ultra-low field MRI, IEEE Sensors Journal, 査読有, Vol.15, No.3, 2015, 1732 - 1737, DOI : 10.1109/JSEN.2014.2365011

高田 裕人、笈田 武範、小林 哲生、超低磁場 MRI に向けた光ポンピング原子磁気センサの周波数帯域制御用シムコイルシステム、電子情報通信学会技術研究報告、査読なし、Vol.114、No.361、2014、21 - 26

〔学会発表〕(計 6 件)

加藤 健太郎、笈田 武範、伊藤 陽介、小林 哲生、光ポンピング磁気センサを用いた磁気粒子イメージングに向けた磁気信号の遠隔計測、電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティックス研究会、2017 年 3 月 13 日～14 日、機械振興会館（東京都・港区）

笈田 武範、上田 博之、圧縮センシングを用いた超低磁場・低磁場 MRI における T1 強調画像のコントラスト改善、電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティックス研究会、2017 年 3 月 13 日～14 日、機械振興会館（東京都・港区）

笈田 武範、加賀 裕人、山本 哲也、小林 哲生、光ポンピング原子磁気センサ用バイアス磁場制御コイルに起因する磁気ノイズの低減、電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティックス研究会、2016 年 3 月 22～23 日、玉川大学（東京都・町田市）

笈田 武範、高田 裕人、小林 哲生、超低磁場 MRI に向けた光ポンピング原子磁気センサの勾配バイアス磁場を用いた計測帯域制御、第 43 回日本磁気共鳴医学会大会、2015 年 9 月 10 日～12 日、東京ドームホテル（東京都・文京区）

Takenori Oida, Masahiro Tsuchida, Tetsuo Kobayashi, Actively shielded bias magnetic field tuning coil for optically pumped atomic magnetometer toward direct MR signal detection in ultra-low field MRI, Joint Annual Meeting ISMRM-ESMRMB 2014, 2014, 5.10-16, Miran (Italy)

高田 裕人、笈田 武範、小林 哲生、超低磁場 MRI に向けた光ポンピング原子磁気センサの周波数帯域制御用シムコイルシステム、電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティックス研究会、2014 年 12 月 13 日、名古屋大学（愛知県名古屋市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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：7 0 4 4 7 9 1 0