

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03807

研究課題名（和文）マルチモーダルシステムに向けた光ポンピング磁気センサの高感度化と広帯域化

研究課題名（英文）Improving Sensitivity and Bandwidth of Optically Pumped Magnetometers for Multimodal Systems

研究代表者

伊藤 陽介（Ito, Yosuke）

京都大学・工学研究科・講師

研究者番号：20589189

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,700,000円

研究成果の概要（和文）：MEG/MRIのマルチモーダルシステムの実現に向けて、光ポンピング磁気センサの高感度化および広帯域化を行った。ハイブリッドセルを用いた広帯域化として、アルカリ金属原子の封入割合による帯域の変化を調査した。また、多点計測の手法としてM系列変調を提案し、その有効性を検証した。ソフトウェアの面からノイズ低減手法を検討し、経験的モード分解をOPMの信号に適用し、その効果を検証した。さらにはスカラー型OPMについて理論的、実験的に検討を行い、その動作条件について調べた。最後にMEG/MRIシステムのプロトタイプを作製し、マルチモーダルシステムの実現可能性について確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光ポンピング磁気センサは、超高感度な磁気センサとして近年非常に注目を集めているが、その計測感度のみが注目を集めており、その特性の詳細な検討や他のモダリティへの応用についての検討が少ないのが実情である。本研究では、MEG/MRIのマルチモーダルシステムの試作も行っており、このシステムにより生体磁気計測の普及と生体活動の詳細なデータの取得に貢献できる。本研究の進展により、光ポンピング磁気センサの可能性を広げ、生体磁気計測の分野のみならず、他の分野、モダリティへと波及が期待できる。

研究成果の概要（英文）：We improved the sensitivity and expanded the bandwidth of optically pumped magnetometers (OPMs) to achieve a multimodal MEG/MRI system. For bandwidth expansion using a hybrid cell, we investigated the changes in bandwidth due to the encapsulation ratio of alkali metal atoms. Additionally, we proposed M-sequence modulation as a method for multi-point measurement and verified its effectiveness. From a software perspective, we explored noise reduction techniques, applying empirical mode decomposition to OPM signals and validating its effectiveness. Furthermore, we theoretically and experimentally examined scalar OPMs, investigating their operating conditions. Finally, we developed a prototype of the MEG/MRI system and confirmed the feasibility of a multimodal system.

研究分野：生体磁気計測

キーワード：光ポンピング磁気センサ 生体磁気計測 MRI マルチモーダルシステム

1. 研究開始当初の背景

心磁図計測 (MCG) や脳磁図計測 (MEG) などの生体磁気計測は、人体の透磁率が部位に寄らずほぼ一定であり、逆計算による信号源の推定が容易で生体の活動を正確に捉えられると期待されている。生体磁気計測に適しているセンサは超伝導量子干渉素子 (SQUID) であるが、その動作には極低温の冷媒が必要であるため、ランニングコストが高く、生体磁気計測の普及は進んでいない。近年、この SQUID に代わり光ポンピング原子磁気センサ (OPM) の研究が進んでいる。OPM はレーザー光によりアルカリ金属原子の量子状態を制御し、電子スピンのエネルギー分布を偏らせること (スピン偏極) で磁場を計測するセンサであり、冷媒を必要とせず、原理的に SQUID を超える磁場感度を有する。これまで OPM を用いた MCG が実現され、現在では、低周波数帯域に特化した OPM (SERF OPM) を用いた MEG の研究が Nottingham 大学を中心に進んでおり、新たな生体磁気計測用センサとして注目されている。脳機能情報を取得する手法のうち、時空間分解の最も良いのは、図 1 に示すとおり侵襲的手法である皮質脳波 (ECoG) であるが、非侵襲的手法では時間分解能と空間分解能を両立するものはない。そこで、それら両方の結果を用いる統合的な解析が一般的に用いられ、脳波計測 (EEG) や MEG の結果と機能的 MRI (fMRI) の結果を合わせ、実効的な高時空間分解が実現されている。しかしながら、それらの計測に用いられる装置は異なるため、同時計測ができず正確な情報は得られない。MEG, fMRI, MRI など

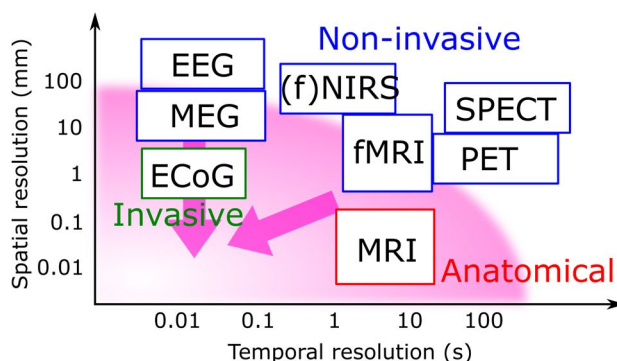


図 1. 機能情報取得手法

同一のマルチモーダルシステムで計測することができれば脳機能に関する新たな知見が得られると期待されている。OPM は計測感度が非常に高く、磁気共鳴信号の弱い低磁場・超低磁場環境下 (LF/ULF) でも MRI が撮像できる。申請者は、LF/ULF 環境下でも計測可能な fMRI の手法を提案しており、これらを用いることにより、MEG, fMRI および MRI が計測可能な超高感度マルチモダリティ生体磁気計測システムの実現が期待できる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マルチモダリティを有する生体磁気計測システムの実現を目指し、超高感度で多点計測可能な、MRI の高周波信号に対応可能な広い周波数帯域を有し、広いダイナミックレンジをもつ磁気センサの開発を行なうことである。MRI は実空間上の核磁化からの磁気信号を周波数領域に投射して画像化するため、広い周波数帯域をセンサが有することで画像の高精細化や SN 比の向上が見込める。しかしながら、OPM は超高感度であることからダイナミックレンジが狭いという制限があるため、この改善を狙う。本手法における多点計測は、図 2 に示す通り、1 つのセンサセル内に複数チャンネルを設ける手法である。これは従来の方法 (小さな磁気センサを並べて多チャンネル化を行なう方法) と

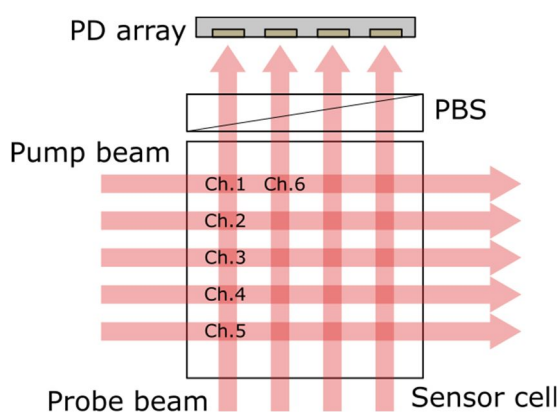


図 2. 1 つのセンサセルによる多点計測

比べ、チャンネル間距離が原子の拡散距離に依存することから 1 mm 以下にすることができ、非常に高い空間分解能を実現できる。このことから、本研究で提案するシステムは、MCG, MEG のみならず、高い空間分解能が必要な小動物 MEG および MRI 等に対応しうるため、汎用性が高い生体磁気システムとなる。例えば MCG は胎児の心臓の発育を観測するのに超音波検査などより有効とされている。また、MEG は SQUID の高価さから普及が進んでいないが、皮質における活動だけでなく、脳内のより深い領域の活動を捉えられると期待されている。本研究は、工学分野のみならず、医学、神経科学、認知科学等の医工学の幅広い分野で大きく貢献し、健康や福祉、さらには高次脳機能を明らかにするための重要なツールとなると考えられる。

3. 研究の方法

(1) ハイブリッドセルを用いた多点計測の検討

2 種類のアルカリ金属原子を含んだセンサセル（ハイブリッドセル）の挙動について、Bloch 方程式を用いた数値解析を行う。これにより、高感度で計測できる条件および多点計測可能なレーザ光の減衰を抑えられる条件を導出する。また、多点計測手法として M 系列により変調されたポンプ光を用いる手法を提案する。図 2 に示すようにポンプ光伝播方向のチャンネルはフォトダイオードアレイによって分離することができるが、プローブ光伝播方向についてはそのままでは分離できない。これを分離するため、申請者はポンプ光を変調し、周波数領域で分離する手法を提案している。しかし、その場合はセンサの周波数特性により高周波領域で信号の低下を引き起こすことが分かっている。そこで、本研究ではポンプ光を M 系列で変調することにより、スペクトル拡散方式により分離することを試みる。

(2) 経験的モード分解を用いたノイズ除去手法の提案

ソフトウェア的にノイズを低減する手法として、経験的モード分解を用いる。経験的モード分解は 1 チャンネル信号でも信号の分離が可能である。今回は、その発展形である CEEMDAN を適用した。

(3) スカラー型 OPM の理論的・実験的検討

(1) で検討したのは SERF 型 OPM と呼ばれる、計測感度は高いがダイナミックレンジが非常に狭い方式である。これに対してスカラー型 OPM はスピン偏極の歳差運動の周波数を計測することで磁場を計測する手法であり、計測感度は SERF 型 OPM より低い、ダイナミックレンジは高い。しかしながら、そのスピン偏極の挙動や動作条件などについてはほとんど明らかになっていないため、理論的・実験的に検討した。

(4) MEG/MRI システムへの応用

本研究の最終目的である MEG/MRI システムのプロトタイプを作製し、その有用性を確認する。

4. 研究成果

(1) 多点計測の検討

Bloch 方程式を用いた数値解析から、ポンプに用いる原子の密度に対して 10-100 倍程度プローブに使用する原子の密度が高い場合に高い感度が得られることが分かった。また、多点計測についても上記の条件のときに多くのチャンネル数をとることが可能であった。しかしながら、計測帯域幅については、ポンプに使用する原子の密度が高いほうが良く、さらにスピン偏極を生成するポンプ光の強度が大きい必要があった。

M 系列を用いたポンプ光の変調に関して、理論的に検討した結果を示す。ポンプ光を変調しても、それがスピン偏極に伝わる際には、スピン偏極に緩和時間があるため波形がなまってしまう。そのため、M 系列内の 1 つのパルスの幅に制限がかかる。図 3 にパルス幅を 0.1 ms、0.2 ms としたものを示す。スピン偏極の緩和時間が 0.1 ms 前後であることから 0.1 ms の場合はスピン偏極が十分追従せず、信号強度が小さくなってしまったと考えられる。しかしながら、パルス幅をあまり小さくするとサンプリング点 1 点の計測に時間がかかってしまうため、適切なパルス幅と周期が必要である。図 4 に疑似心磁波形を本手法で計測した場合の出力波形を示す。パルス幅を 0.1 ms としたため、計測信号の強度が 1/4 - 1/3 程度になってしまっているが、概形はきちんと捉えられている。

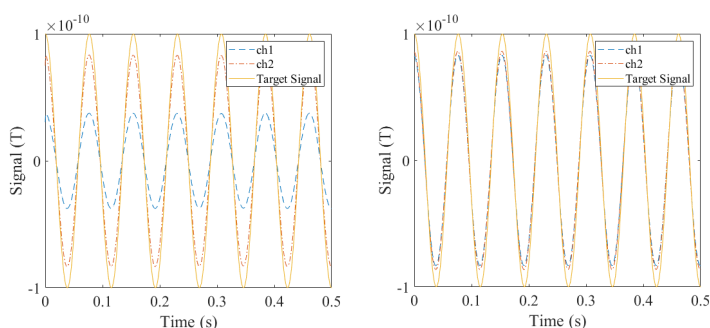


図 3. パルス幅 0.1 ms (左) と 0.2 ms (右) の場合の信号強度。0.1 ms の場合は、ch1 で計測対象の磁場と比べて、半分以下の強度となっている。

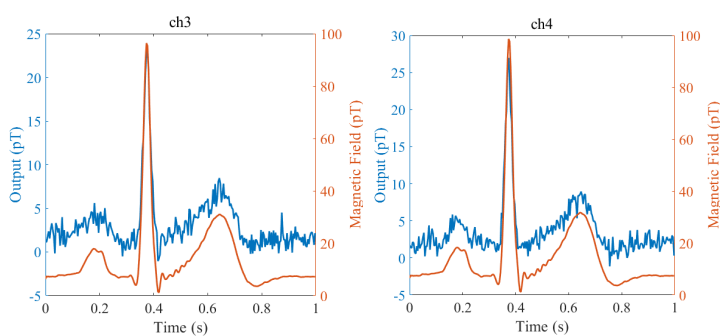


図 4. 疑似心磁波形を本手法で計測した結果。

(2) 経験的モード分解を用いたノイズ除去手法の提案

OPM を用いて計測したヒト MCG に対して、CEEMDAN を適用した。図 5 に結果を示す。原波形も

ノイズが少なく、CEEMDAN による大きな改善は見られないが、基線のゆらぎが抑えられ、R 波前後の負方向のピークである Q ピークや S ピークが強調された。不整脈などの診断にはこの手法が有効である可能性がある。しかしながら、QRS 波前後にあるはずの P 波や T 波が観測されなかった。これは原信号でも大きくは見られないが、CEEMDAN では R 波を基準に IMF を選択したためであると考えられる。IMF の選択の方法に改善が必要である。

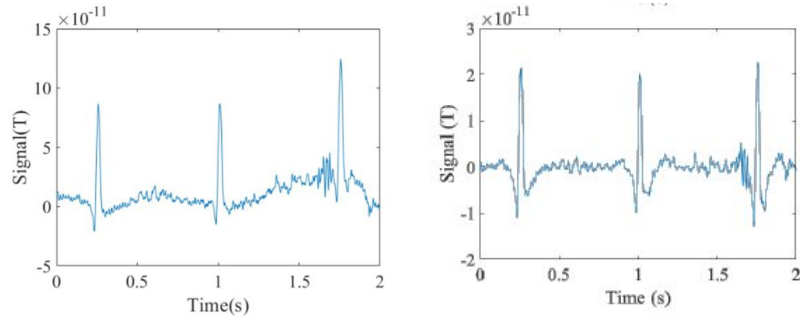


図 5. ヒト MCG 波形 (左) . ヒト MCG 波形に CEEMDAN を適用した結果 .

(3) スカラー型 OPM の理論的・実験的検討

スカラー型 OPM は、ポンプ光の照射ののちに 90° パルスの照射をして、その後のスピン偏極の自由誘導減衰を計測するものである。Bloch 方程式によりこの挙動を計算した結果を図 6 に示す。ピンクの領域がポンプ光照射領域であり、このときに S_z 成分が大きくなっていくことが分かる。次の緑の領域で 90° パルスが照射され、 S_z のみ存在したスピン偏極が歳差運動をしながら xy 平面に倒れ、計測を実施する青の領域でも歳差運動しながら減衰することがわかる。このときポンプ光の照射時間を、 S_z 成分が飽和する程度取らないと計測が安定しないことが分かった。図 7 に 40 Hz の磁場を印

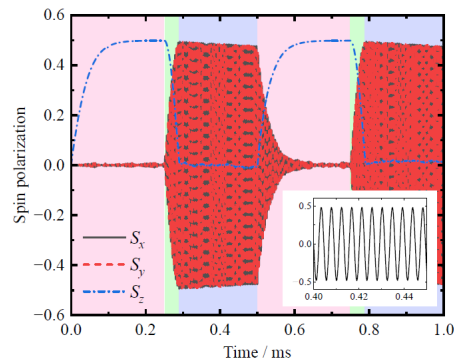


図 6. スカラー型 OPM のスピン偏極の挙動 .

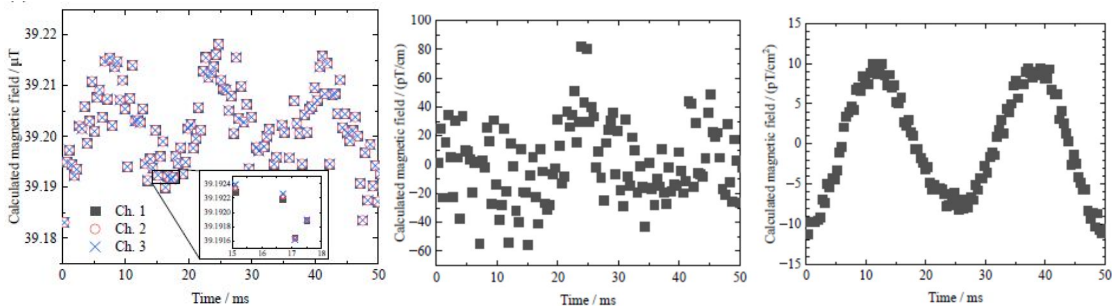


図 7. スカラー型 OPM の出力の数値計算結果 . マグネトメータの出力 (左) , 1 次のグラジオメータ (中) , 2 次のグラジオメータ (右) . 計測対象として 40 Hz の磁場を印加している .

加したときのスカラー型 OPM の出力を示す。左の図は、スカラー型 OPM の出力そのもので、プローブ光を複数入れることで 3 チャンネルとしている。すべてのチャンネルで 40 Hz の信号は観測されず、商用電源ノイズである 60 Hz が観測されている。真ん中の図は 1 次のグラジオメータで左図の ch1 と ch2 の差分で構成されている。この状態でも 60 Hz の影響が大きく出ているが、40 Hz の信号も混ざってきている。右図は 2 次のグラジオメータであり、ch1, ch2, ch3 の差分で構成されている。この場合は、60 Hz の影響はだいぶ抑えられ、40 Hz の波形がしっかりと確認できる。本数値計算は、実際の実験室の環境を模擬したものであり、ノイズを落として計測する場合には 2 次のグラジオメータ構成が必要であることを示唆している。

(4) MEG/MRI システムへの応用

MEG/MRI のプロトタイプを作製した。今回は高周波帯での OPM の安定動作ができなかったため、MR 信号の検出には誘導コイルを用いた。図 8 に装置の外観を示す。アルミニウムと簡易な磁気シールドのみで囲われたシールド内に MRI 用のコイルセットが配置され、その中央部に参

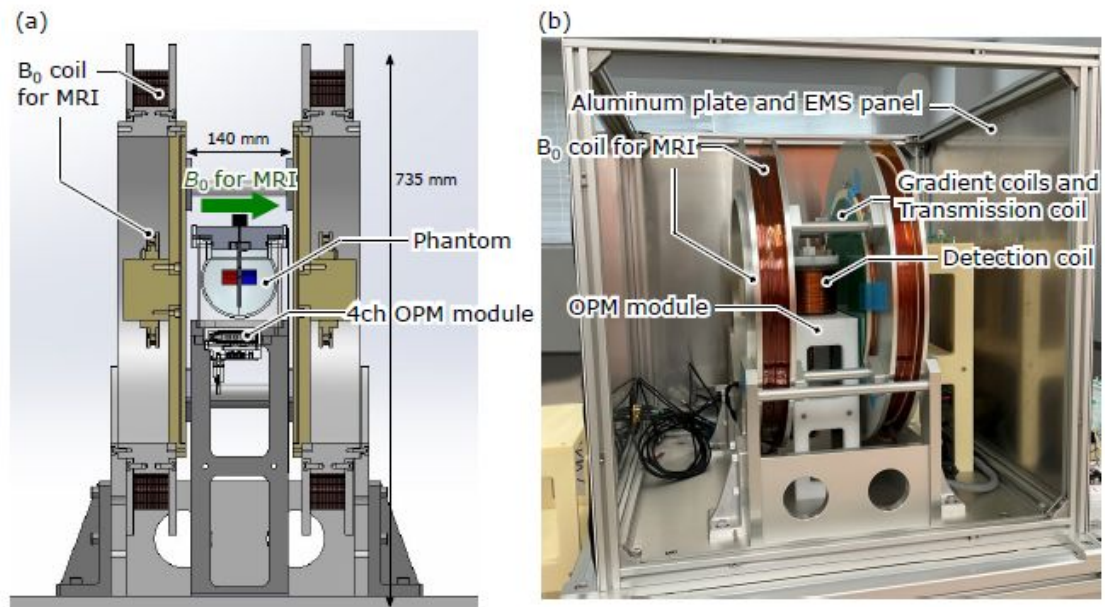


図 8. MEG/MRI システムのプロトタイプ .

照用の生体ファントムが置かれている .ファントムの下には 4ch のスカラー型 OPM が置かれ ,磁気計測が可能となっている .MRI はスピンエコーシーケンスによって NEX=8 で 6 - 7 程度の SNR の画像が撮像できた .撮像前後で OPM の計測感度に影響はなく , 1 次のグラジオメータで 200 - 400 fT/cm/Hz^{1/2} 程度の計測感度が実現できた .

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 伊藤陽介	4. 巻 35
2. 論文標題 光ポンピング磁気センサのMCGおよびMEGへの応用と展望	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本生体磁気学会誌	6. 最初と最後の頁 78-79
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 南部康太, 伊藤陽介	4. 巻 35
2. 論文標題 経験的モード分解による光ポンピング磁気センサのノイズ低減に関する検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本生体磁気学会誌	6. 最初と最後の頁 110-111
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大村剛史, 伊藤陽介	4. 巻 35
2. 論文標題 M系列を用いたポンプ光変調による光ポンピング磁気センサの多チャンネル化に関する検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本生体磁気学会誌	6. 最初と最後の頁 112-113
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 堀拓真, 伊藤陽介	4. 巻 35
2. 論文標題 パルス光を用いたスカラー型OPMにおける動作温度に関する検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本生体磁気学会誌	6. 最初と最後の頁 114-115
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 堀拓真, 伊藤陽介	4. 巻 MAG-22-160-179
2. 論文標題 パルス光を用いたスカラー型OPMにおける最適動作パラメータに関する検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会マグネティックス研究会資料	6. 最初と最後の頁 57-62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 大村剛史, 上田博之, 伊藤陽介	4. 巻 MAG-22-160-179
2. 論文標題 M系列を用いたポンプ光変調による光ポンピング磁気センサの多点同時計測に関する検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会マグネティックス研究会資料	6. 最初と最後の頁 69-74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 南部康太, 伊藤陽介	4. 巻 MAG-22-160-179
2. 論文標題 デジタル信号処理による光ポンピング磁気センサのノイズ低減に関する検討	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会マグネティックス研究会資料	6. 最初と最後の頁 93-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 伊藤陽介	4. 巻 -
2. 論文標題 光ポンピング磁気センサの基礎と生体磁気計測への応用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電子情報通信学会総合大会講演論文集	6. 最初と最後の頁 SS-19-22
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ITO Yosuke, GOTO Tatsuya, HORI Takuma	4. 巻 E107.C
2. 論文標題 Simulation of Scalar-Mode Optically Pumped Magnetometers to Search Optimal Operating Conditions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 164 ~ 170
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.2023SEI0002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yosuke Ito, Hiroyuki Ueda, Takenori Oida, Takahiro Moriya, Akinori Saito, Motohiro Suyama	4. 巻 physics
2. 論文標題 Simplified Shielded MEG-MRI Multimodal System with Scalar-mode Optically Pumped Magnetometers as MEG Sensors	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 arXiv (学術雑誌投稿中)	6. 最初と最後の頁 1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.48550/arXiv.2401.13287	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 南部康太, 伊藤陽介	4. 巻 144
2. 論文標題 デジタル信号処理による光ポンピング磁気センサのノイズ低減に関する検討	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 電気学会論文誌A	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 山下寛人, 伊藤陽介	4. 巻 36
2. 論文標題 光ポンピング磁気センサによる自発運動に伴う生体磁気計測に関する研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本生体磁気学会誌	6. 最初と最後の頁 168-169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 日高颯哉、豊田みなみ、占部継一郎、伊藤陽介	4. 巻 MAG-23
2. 論文標題 準安定励起ヘリウム原子を用いた光ポンピング磁気センサの磁場感受性についての検討	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会マグネティックス研究会資料	6. 最初と最後の頁 75-80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 池田早織、上田博之、伊藤陽介	4. 巻 MAG-23
2. 論文標題 ダイヤモンド中NVcとスカラー型OPMIにおける磁気シールドレス環境下での周波数特性の比較	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 電気学会マグネティックス研究会資料	6. 最初と最後の頁 69-73
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 4件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 伊藤陽介
2. 発表標題 光ポンピング磁気センサのMCGおよびMEGへの応用と展望
3. 学会等名 第37回日本生体磁気学会大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南部康太, 伊藤陽介
2. 発表標題 経験的モード分解による光ポンピング磁気センサのノイズ低減に関する検討
3. 学会等名 第37回日本生体磁気学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大村剛史, 伊藤陽介
2. 発表標題 M系列を用いたポンプ光変調による光ポンピング磁気センサの多チャンネル化に関する検討
3. 学会等名 第37回日本生体磁気学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀拓真, 伊藤陽介
2. 発表標題 パルス光を用いたスカラー型OPMにおける動作温度に関する検討
3. 学会等名 第37回日本生体磁気学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Ito, T. Goto and T. Kobayashi
2. 発表標題 Numerical simulation of operating condition for scalar-mode
3. 学会等名 WOPM-2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yosuke Ito, Kosuke, Ohtani and Tetsuo Kobayashi
2. 発表標題 Simultaneous multi-channel measurements of magnetoencephalography using optically pumped magnetometers comparing between a multi-channel OPM and multiple OPM modules
3. 学会等名 BIOMAG2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuki Namita and Yosuke Ito
2. 発表標題 Detection of 3-axis biomagnetic-field direction using optically pumped magnetometer by continuous variation of pump and probe beam direction
3. 学会等名 BIOMAG2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 日高颯哉, 伊藤陽介, 占部継一郎
2. 発表標題 光ポンピング磁気センサへの応用に向けた準安定励起ヘリウム原子の密度及び寿命に関する検討
3. 学会等名 2022年 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀拓真, 伊藤陽介
2. 発表標題 パルス光を用いたスカラー型OPMにおける最適動作パラメータに関する検討
3. 学会等名 電気学会マグネティックス/マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大村剛史, 上田博之, 伊藤陽介
2. 発表標題 M系列を用いたポンプ光変調による光ポンピング磁気センサの多点同時計測に関する検討
3. 学会等名 電気学会マグネティックス/マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 南部康太, 伊藤陽介
2. 発表標題 デジタル信号処理による光ポンピング磁気センサのノイズ低減に関する検討
3. 学会等名 電気学会マグネティックス/マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤陽介
2. 発表標題 光ポンピング磁気センサの基礎と生体磁気計測への応用
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤陽介
2. 発表標題 光ポンピング磁気センサの生体磁場計測への応用
3. 学会等名 2023年 第70回応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazuki Namita and Yosuke Ito
2. 発表標題 Detection of 3-axis Magnetic-field Direction Using Optically Pumped Magnetometer by Continuous Variation of Pump and Probe Beam Direction
3. 学会等名 International Symposium on Creation of Advanced Photonic and Electronic Devices 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大谷康介、江田大輝、伊藤陽介、小林哲生
2. 発表標題 ハイブリッド型光ポンピング磁気センサによるMEGのガラスセル内多点同時計測
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会・第36回日本生体磁気学会大会 2021合同開催 in Kyoto
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 南部康太、伊藤陽介、小林哲生
2. 発表標題 ハイブリッドセルを用いた光ポンピング磁気センサのグラジオメータ構成に関する検討
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会・第36回日本生体磁気学会大会 2021合同開催 in Kyoto
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤達哉、伊藤陽介、小林哲生
2. 発表標題 地磁気環境下におけるスカラー型光ポンピング磁気センサの原子種の違いによる計測感度の比較
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会・第36回日本生体磁気学会大会 2021合同開催 in Kyoto
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀拓真、後藤達哉、伊藤陽介、小林哲生
2. 発表標題 RFパルスを用いたスカラー型光ポンピング磁気センサの原理実証に向けた実験及びその性能評価
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会・第36回日本生体磁気学会大会 2021合同開催 in Kyoto
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大村剛史、伊藤陽介、小林哲生
2. 発表標題 ポンプ光変調を用いた光ポンピング磁気センサによる平面型多点同時計測
3. 学会等名 第60回日本生体医工学会大会・第36回日本生体磁気学会大会 2021合同開催 in Kyoto
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yosuke Ito and Tetsuo Kobayashi
2. 発表標題 Approaches to noise reduction of optically pumped magnetometers
3. 学会等名 第45回日本磁気学会学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 日高颯哉、豊田みなみ、占部継一郎、伊藤陽介
2. 発表標題 準安定励起ヘリウム原子を用いた光ポンピング磁気センサの磁場感受性についての検討
3. 学会等名 電気学会マグネティックス/マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池田早織、上田博之、伊藤陽介
2. 発表標題 ダイヤモンド中NVcとスカラー型OPMにおける磁気シールドレス環境下での周波数特性の比較
3. 学会等名 電気学会マグネティックス/マイクロマシン・センサシステム/バイオ・マイクロシステム合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日高颯哉、豊田みなみ、占部継一郎、伊藤陽介
2. 発表標題 準安定励起ヘリウム原子を用いた光ポンピング磁気センサの原子密度計測及び磁場感受性に関する検討
3. 学会等名 2023年 第84回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 池田早織、伊藤陽介
2. 発表標題 ダイヤモンド中窒素空孔中心とスカラー型光ポンピング磁気センサにおける周波数特性の比較
3. 学会等名 2023年 第84回応用物理学会 秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Ito and T. Hori
2. 発表標題 Investigation of optimal operating conditions in scalar-mode optically pumped magnetometers using pulsed lights
3. 学会等名 10th Workshop on Optically Pumped Magnetometers (WOPM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Yamashita and Y. Ito
2. 発表標題 Study on Biomagnetic-field Measurements during Spontaneous Movements with Optically Pumped Magnetometers
3. 学会等名 ISACM and JBBS 2023 OSAKA (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Ito, T. Ohmura, and H. Ueda
2. 発表標題 Multi-channel Optically Pumped Magnetometers with a Large Sensor Cell for Magnetocardiography
3. 学会等名 ISACM and JBBS 2023 OSAKA (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 伊藤 陽介 (分担)	4. 発行年 2023年
2. 出版社 株式会社オプトロニクス	5. 総ページ数 6
3. 書名 月刊オプトロニクス2023年2月号 (全154ページ)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>京都大学大学院工学研究科電気工学専攻生体機能工学研究室 https://bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html researchmap (研究代表者) https://researchmap.jp/yosuke_ito/ 京都大学大学院工学研究科電気工学専攻生体機能工学研究室 https://bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp/index.html researchmap (研究代表者) https://researchmap.jp/yosuke_ito/</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------