

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610171

研究課題名(和文) 生体磁気計測を目指した高感度光ポンピングヘリウム原子磁気センサの開発

研究課題名(英文) Development of high-sensitivity optically pumped helium atomic magnetometers toward biomagnetic measurements

研究代表者

伊藤 陽介 (Ito, Yosuke)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20589189

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)：生体磁気計測を目指し、大気圧マイクロプラズマを利用した光ポンピングヘリウム原子磁気センサの開発を行った。従来どおりのアルカリ金属を用いた光ポンピング原子磁気センサにより生体磁気の多点同時計測への道筋をつけた。光ポンピングにより生じるスピン偏極の挙動をBloch方程式で表し、それを解くことでヘリウム原子磁気センサの周波数特性を導出し、ヘリウム準安定励起原子の寿命がセンサの特性に与える影響を調べた。実際にヘリウム原子磁気センサを構築し、加算平均等の処理をすれば生体磁気信号の検出が可能となる感度が得られた。

研究成果の概要(英文)：Optically pumped helium atomic magnetometers with atmospheric-pressure plasmas have been developed toward biomagnetic measurements. Conventional atomic magnetometers with alkali-metal atoms were examined for exploring the feasibility of biomagnetic measurements with the magnetometers. By solving the Bloch equation, we obtained the characteristics of the magnetometers and found that the lifetime of helium metastable atoms essentially influences the frequency characteristics. We developed the helium atomic magnetometer, which can measure the biomagnetic fields with post-processing such as signal averaging.

研究分野：数物系科学

キーワード：光ポンピング プラズマ 磁気センサ 生体磁気計測

1. 研究開始当初の背景

生体磁場は、人体の比透磁率が部位によらず一定であるため、生体活動の情報を得るために非常に有効な方法である。生体磁場の計測には、微弱な磁場を検出可能な超伝導量子干渉素子 (SQUID) が実用されている。また、近年では SQUID を用いて、インプラント等により金属を体内に有する被験者にも適用可能な超低磁場 MRI の研究も進んでいる。これは磁場が弱い場合強度の小さい信号を高感度な SQUID により検出する技術である。しかしながら、SQUID は超伝導を利用するため、液体ヘリウム等の冷媒により莫大な維持コストが必要とされる。このため、生体磁気計測及び超低磁場 MRI は幅広い普及につなげていない。

これに対し、近年では冷媒を必要としない超高感度な磁気センサである光ポンピング原子磁気センサが注目を集めている。これはアルカリ金属原子にレーザー光を照射し、光ポンピングによりスピン偏極を生じさせ磁場を計測するものである。アルカリ金属原子は最外殻電子が1個と原子構造が単純であるため、よく利用される。しかしながら、常温で固体であるアルカリ金属原子を磁気センサに利用するためには、気化させるために昇温する必要があり、その昇温機構が複雑になるとともに、動作前に十分な昇温時間が必要となる。加えて、昇温プロセスを繰り返し行うことによりセンサセルが劣化し、原子密度が減少するという問題点が知られている。

2. 研究の目的

本研究では、上記問題点を解消するために、大気圧プラズマにより生成したヘリウム準安定励起原子をセンサ原子とする光ポンピング原子磁気センサについて検討をする。具体的にはマイクロプラズマにより微小領域に生成したヘリウム準安定励起原子を利用することにより、小型かつ高感度な磁気センサの開発をし、その生体磁気計測や超低磁場 MRI への応用に向けた検討を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

まず、従来のアルカリ金属原子を用いた光ポンピング原子磁気センサにより生体磁気計測を実施し、光ポンピング原子磁気センサを生体磁気計測に利用する場合の問題点等について検討する。

その後、大気圧マイクロプラズマを用いた光ポンピングヘリウム原子磁気センサを構築し、その生体磁気計測への応用可能性について研究を進めていく。また、バイアス磁場を変化させることで、動作周波数帯域を高周波側へシフトさせ、その時の感度等について検討する。

最後にそれらを総括し、研究をまとめる。

4. 研究成果

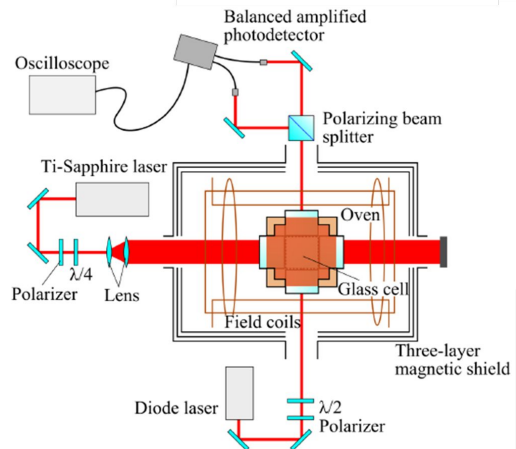


図1：光ポンピング原子磁気センサの構成

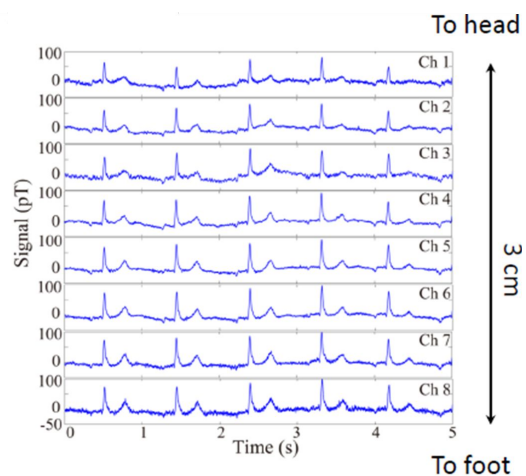


図2：計測した心磁図

まず、図1に示すような従来のアルカリ金属原子を用いた光ポンピング原子磁気センサにより生体磁場計測系を構築し、心磁および脳磁を計測した。ヒト心磁計測では、プローブ光を分割し、フォトダイオードアレイにより多点同時計測が可能になった。このとき、それぞれのチャンネルの感度は約 $200 \text{ fT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ であった。子の感度は、単チャンネルで動作させた場合に比べて悪化しており、計測体積が信号に与える影響が大きいことを示している。これは、計測領域が小さくなるマイクロプラズマを利用した時に、感度の低下が起こることを示唆している。このセンサにより計測された心磁図が図2である。各チャンネルで同期した心磁図が得られ、それぞれに心磁図で特徴的な波形が観測された。脳磁計測では、信号自体が非常に微弱であるため、センサ自体の感度もさることながら、センサと信号源との距離も非常に重要となる。このため、頭皮とセンサとの距離が 2.2 cm となるような小型のセンサを構築し、それによって脳磁を計測した。図3には、このセンサで計測した、目の開閉に伴う視覚野におけるアルファ波の抑制を示している。信号が非常に微弱であるため、100 試行分のデータの平均

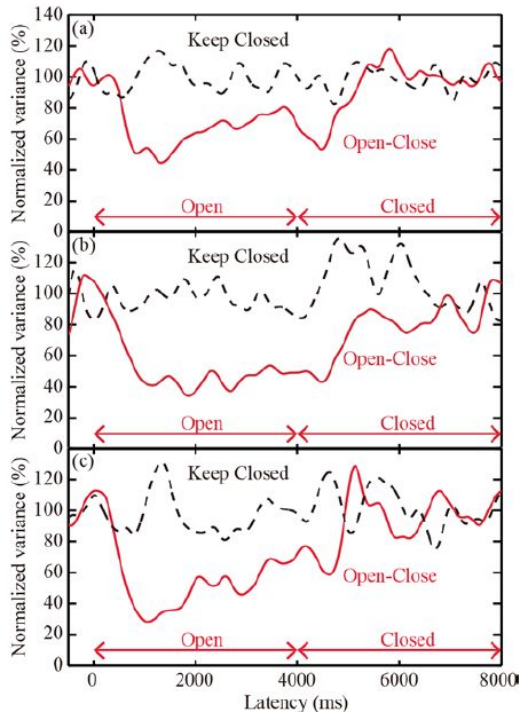


図 3 : 計測した脳磁 (アルファ波帯の変化)

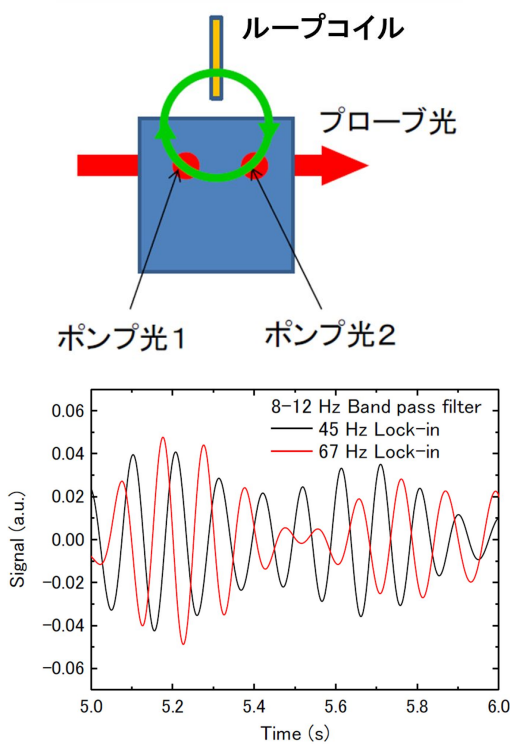


図 4 : ループコイルが形成する磁場分布計測の概観と計測結果

をとっている。上記の通り、脳磁では得られる信号が非常に微弱であり、信号源とセンサを近づける必要があるが、マイクロプラズマを用いた場合、高電圧が頭部近傍に位置するため、安全や電磁波の影響について考慮する必要があることがわかる。

心磁計測で構成した光ポンピング原子磁

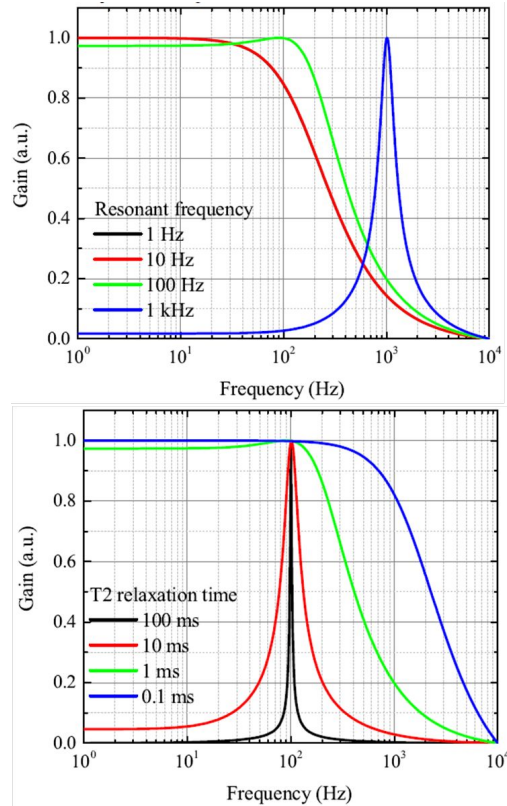


図 5 : 中心周波数および緩和時間の変化による周波数応答の変化

気センサでは、ポンプ光伝播方向の磁場分布を計測することは可能であるが、プローブ光伝播方向の分布については計測することができない。それを解消するため、ポンプ光を分割し、それぞれについて強度変調をかけ、検出器側で復調することで、それぞれの位置の信号を得ることができる手法を提案した。これを確かめるため、図 4 のようにコイルを配置し、そのコイルが形成する磁場を計測した。それぞれのポンプ光は 45 Hz と 67 Hz とで変調をかけ、その後ロックインアンプで検出した。その結果、コイルを挟んだ左右で位相の 180 度反転した信号が得られ、提案手法により、光ポンピング原子磁気センサの生体磁気計測の適用範囲を拡張することができると思われる。

従来の光ポンピング原子磁気センサで得られた知見に基づき、ヘリウム原子磁気センサを構築した。構築した原子磁気センサに対して Bloch 方程式を求め、それをラプラス変換することにより構築した原子磁気センサの伝達関数 $F(s)$ が得られる。

$$F(s) = K' \frac{s + \frac{1}{T_2}}{\omega_{\text{Bias}}^2 + \left(s + \frac{1}{T_2}\right)^2}$$

ここで、 K' は比例定数、 ω_{Bias} は印加している静磁場に対応するラーモア周波数、 T_2 はスピン偏極の緩和時間である。この伝達関数により周波数関数をプロットしたものが図 5 であり、 ω_{Bias} により中心周波数が、 T_2 により帯

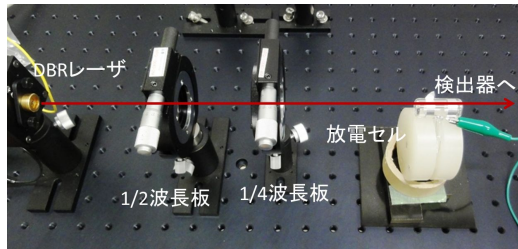


図 6：一軸型の光ポンピングヘリウム原子磁気センサの構成

域幅が決定される。ヘリウム準安定励起原子のような T_2 が非常に短い場合、周波数特性は低域通過フィルタのようになり、生体磁気計測に向けた特性となることがわかった。

本研究ではバイポーラインパルス電源により、大気圧マイクロプラズマを発生させた。これにより得られるヘリウム準安定励起原子の密度は、およそ 10^{13} cm^{-3} 程度であり、アルカリ金属原子の光ポンピング原子磁気センサで十分な感度が得られていた原子密度とほぼ同等である。今回はポンプ光としてヘリウムランプを使用したが、この場合十分なポンピングレートが得られず、計測可能な感度が得られなかった。そこで、図 6 に示すように、ポンプ光とプローブ光を 1 方向から入射する一軸型とし、レーザー光によりポンプする方式へと変更をした。通常、ヘリウム準安定励起原子の寿命は $10 \mu\text{s}$ 弱であり、生成されてから数 μs の間に十分なスピン偏極率を得る必要がある。このことから、ポンプ光は十分に強く入射させる必要がある。実際にセンサセルに入射させた光の強度は 50 mW 程度であり、これによって見積もられたセンサの感度は 100 Hz で $10 \text{ nT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ 程度であり、生体磁気計測を行うには加算平均等、事後処理が必要となる。これを改善するためには、より強力なレーザー光を用いる等、さらなる改良をする必要がある。

MR 信号の検出を目指し、上記と同じ構成にて、バイアス磁場を印加して高周波側に中心周波数をずらした。MR 信号は、測定対象物に印加する静磁場の強度によって、出てくる信号の周波数帯域が変化するが、プロトンの場合、 1 T では約 42 MHz ほどである。今回の実験系では電源の制限から、 42 MHz に設定することは不可能であったので低磁場 MRI をターゲットに 10 kHz が中心周波数となるように設定した。周波数特性は低域通過フィルタのように低域側に広い形となったが、感度としては低周波帯と同じく十分とは言えなかった。高周波帯にシフトさせることで、 $1/f$ ノイズの影響が抑えられるが、スピン偏極を生じさせるのにより強力なポンプ光が必要とさせることが原因であると考えられる。

従来の光ポンピング原子磁気センサによる検討で、生体磁気多点同時計測および微

弱な脳磁場の計測が可能であることを示すことができた。また、これまでのポンプ光伝播方向の磁場分布のみでなく、ポンプ光を変調する方法を用いて、プローブ光伝播方向の磁場分布を計測する手法を提案し、実験により検証を行った。アルカリ金属原子を用いた光ポンピング原子磁気センサの検討結果をもとに、ヘリウム準安定励起原子を用いた光ポンピング原子磁気センサを構築した。ポンプ光の強度が不十分ではあったが、約 $10 \text{ nT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ の感度が得られた。生体磁気計測に本センサを利用するためには、ノイズの低減やより強力なポンプ光を用いる必要がある。現在これらを踏まえ、より高感度なセンサを開発中であり、その結果を含め、光ポンピングヘリウム原子磁気センサの生体磁気計測への応用を進めていきたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 6 件)

佐藤大地、鎌田啓吾、伊藤陽介、小林哲生、“光ポンピング K-Rb ハイブリッド原子磁気センサにおけるアルカリ金属原子の密度比に関する検討”、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、Vol. 114、No. 361、2014、pp. 33-38、<http://www.ieice.org/ken/paper/201412130BUN/>

鎌田啓吾、伊藤陽介、夏川浩明、岡野一久、水谷夏彦、小林哲生、“原子磁気センサモジュールによる事象関連脱同期及び事象関連脳磁気計測”、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、Vol. 114、No. 258、2014、pp. 31-36、<http://www.ieice.org/ken/paper/201410181BrN/>

Y. Ito, D. Sato, K. Kamada and T. Kobayashi, “Measurements of Magnetic Field Distributions With an Optically Pumped K-Rb Hybrid Atomic Magnetometer”, IEEE Transactions on Magnetics, 査読有、Vol. 50, No. 11, 2014, 4006903, 10.1109/TMAG.2014.2329856

佐藤大地、鎌田啓吾、伊藤陽介、小林哲生、“生体磁気計測に向けた光ポンピング K-Rb ハイブリッド原子磁気センサのスピン偏極空間均一性の理論的検討”、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、Vol. 113、No. 499、2013、pp. 91-96、<http://www.ieice.org/ken/paper/20140312mBld/>

佐藤大地、大西宏征、鎌田啓吾、伊藤陽介、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よる生体磁気多点同時計測に向けた検討”、日本生体磁気学会誌、査読無、Vol. 26、2013、pp. 230-231

伊藤陽介、大西宏征、鎌田啓吾、小林哲

生、“超高感度光ポンピング原子磁気センサの開発とヒト MCG への応用”、日本生体磁気学会誌、査読無、Vol. 26、2013、pp. 226-227

〔学会発表〕(計 13 件)

佐藤大地、鎌田啓吾、伊藤陽介、小林哲生、“光ポンピング K-Rb ハイブリッド原子磁気センサにおけるアルカリ金属原子の密度比に関する検討”、電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティクス研究会、MBE-2(8)、2014 年 12 月 13 日、名古屋大学(愛知県)

鎌田啓吾、伊藤陽介、夏川浩明、岡野一久、水谷夏彦、小林哲生、“原子磁気センサモジュールによる事象関連脱同期及び事象関連脳磁気の計測”、電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティクス研究会、MBE(10)、2014 年 10 月 18 日、大阪電気通信大学(大阪府)

Y. Ito, D. Sato, K. Kamada and T. Kobayashi, “Simultaneous measurement of human MCG distribution with an optically pumped K-Rb hybrid atomic magnetometer”, 生体医工学シンポジウム 2014、2A-08、2014 年 9 月 27 日、東京農工大学(東京都)

佐藤大地、鎌田啓吾、伊藤陽介、小林哲生、“光ポンピング K-Rb ハイブリッド原子磁気センサによるヒト MCG の多点同時計測”、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、19a-C1-3、2014 年 9 月 19 日、北海道大学(北海道)

伊藤陽介、佐藤大地、鎌田啓吾、小林哲生、“光ポンピング原子磁気センサを用いたポンプ光変調による磁場分布計測に向けた検討”、第 75 回応用物理学会秋季学術講演会、19a-C1-1、2014 年 9 月 19 日、北海道大学(北海道)

Y. Ito, D. Sato, K. Kamada and T. Kobayashi, “Measurements of magnetic field distributions with an optically pumped K-Rb hybrid atomic magnetometer”, IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG2014), BU-15, 2014 年 5 月 5 日、Dresden, Germany

佐藤大地、鎌田啓吾、伊藤陽介、小林哲生、“生体磁気計測に向けた光ポンピング K-Rb ハイブリッド原子磁気センサのスピン偏極空間均一性の理論的検討”、電子情報通信学会 ME とバイオサイバネティクス研究会、MBE2-1(18)、2014 年 3 月 18 日、玉川大学(東京都)

鎌田啓吾、佐藤大地、伊藤陽介、夏川浩明、岡野一久、水谷夏彦、小林哲生、“モジュール型光ポンピング原子磁気センサによる MEG 計測”第 61 回応用物理学会春季学術講演会、17p-F6-1、2014

年 3 月 17 日、青山学院大学(神奈川県) 佐藤大地、鎌田啓吾、伊藤陽介、小林哲生、“光ポンピング K-Rb ハイブリッド原子磁気センサを用いた頭部ファントムから生じる微弱磁場の多点同時計測”、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、19p-C14-3、2013 年 9 月 19 日、同志社大学(京都府)

伊藤陽介、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ロックイン検出による感度向上”、第 74 回応用物理学会秋季学術講演会、16p-A8-9、2013 年 9 月 16 日、同志社大学(京都府)

Y. Ito, D. Sato, K. Kamada and T. Kobayashi, “Biomagnetic field measurements with an optically pumped atomic magnetometer using a hybrid cell of K and Rb atoms”, 1st International conference on Basic and Clinical multimodal Imaging (BaCI), P029, 2013 年 9 月 5 日、Geneva, Switzerland

佐藤大地、大西宏征、鎌田啓吾、伊藤陽介、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よる生体磁気多点同時計測に向けた検討”、第 28 回日本生体磁気学会大会、B3004、2013 年 6 月 7 日、朱鷺メッセ(新潟県)

伊藤陽介、大西宏征、鎌田啓吾、小林哲生、“超高感度光ポンピング原子磁気センサの開発とヒト MCG への応用”、第 28 回日本生体磁気学会大会、B3002、2013 年 6 月 7 日、朱鷺メッセ(新潟県)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称：ポンプ光変調による磁場分布計測方法
発明者：伊藤陽介、小林哲生、市原直、水谷夏彦

権利者：同上

種類：特許

番号：特願 2014-175881

出願年月日：2014 年 8 月 29 日

国内外の別：国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 陽介 (ITO YOSUKE)

京都大学・工学研究科・助教

研究者番号：20589189

(2)研究分担者
()

研究者番号：

(3)連携研究者
()

研究者番号：