

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 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2011～2012

課題番号：23740407

研究課題名（和文） プラズマパラメータ制御による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 under controlled plasma parameters

研究代表者

伊藤 陽介（ITO YOSUKE）

京都大学・先端医工学研究ユニット・助教

研究者番号：20589189

研究成果の概要（和文）：

光ポンピング原子磁気センサは非常に高い磁場感度を有しているため、心磁図や脳磁図などの生体磁気計測への応用が期待され、これにより生体活動に関する新たな知見が得られると考えられている。本研究では、この光ポンピング原子磁気センサにマイクロプラズマを導入し、そのプラズマの各種パラメータを解析・制御することにより、従来のセンサでは不可能であった高速なスイッチングが可能なセンサを実現した。

研究成果の概要（英文）：

Optically pumped atomic magnetometers have high sensitivity, and have received considerable practical concern for their potential application to biomagnetic measurements such as magnetocardiography and magnetoencephalography, which bring us novel findings of biological activities. In this study, microplasmas are introduced to the magnetometers. As a result, we obtained fast switching sensor by analyzing and controlling parameters of the microplasmas

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	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：プラズマ応用、マイクロプラズマ、光ポンピング、磁気センサ

1. 研究開始当初の背景

これまで磁場測定には測定対象磁場の強度や周波数に応じて様々な手法が提案されてきた。電子機器等の発する比較的大きな磁場（ μT 以上）を測定する場合には、磁気抵抗素子やホール素子などの半導体磁気センサが、地磁気等の中程度の磁場（ nT から mT 程度）を測定する場合にはフラックスゲートセンサや磁気インピーダンス素子等が利用されてきている。そして、生体磁場等の微小磁場（ fT から nT 程度）の測定には超伝導量子干渉素子（SQUID）が実用されているが、SQUID は極低温で動作させる必要があるため

液体ヘリウム等の冷媒が必要不可欠になる。このため装置は大型になり、また莫大な維持コストがかかるので広い普及には繋がっていない。

そこで、近年では光ポンピングにより生じさせたスピン偏極を利用した磁気センサ（光ポンピング原子磁気センサ）が注目を集めている。光ポンピング原子磁気センサは冷媒を用いず、SQUID を超える測定感度を有する可能性があることが理論的に示されており、実験的な検証が進められている。これまでに提案されている光ポンピング原子磁気センサには、主にアルカリ金属原子が用いられてい

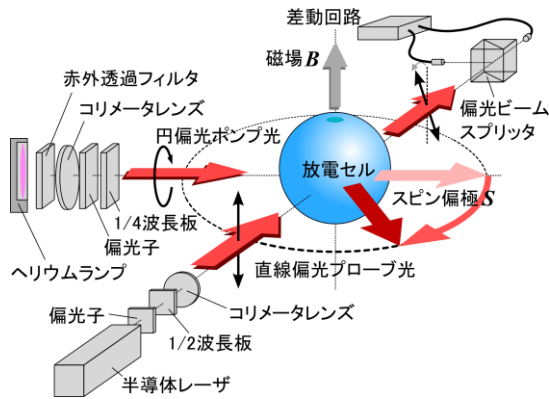


図 1 ヘリウムランプを用いた光ポンピング原子磁気センサの概略図

る。それは最外殻電子が1個であるためエネルギー準位構造が簡単であり、共鳴波長が可視光から近赤外光と利用しやすい領域にあるためである。しかし、アルカリ金属を蒸気とするための昇温機構が複雑になることや、昇温を繰り返すと生成されるアルカリ金属原子密度が減少するなどの問題点がある。この問題点を解決するには常温において気体の物質を利用することが望ましく、ヘリウムを用いることが考えられてきた。

$^4\text{He}(2^3\text{S}_1)$ 準安定励起原子はアルカリ金属原子と同じく、最外殻電子が1個で励起波長が近赤外領域にあり、センサ原子として適しており、 $^4\text{He}(2^3\text{S}_1)$ 準安定励起原子をセンサ原子とした研究はいくつか進められてきた。しかし、それらはポンピングの方法や信号検出の方法に着目したもののばかりであり、ヘリウムプラズマの内部状態に焦点を当てたものはないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究代表者らはこれまでアルカリ金属原子をセンサ原子とした光ポンピング原子磁気センサを研究してきており、数十 $\text{fT}/\text{Hz}^{1/2}$ の磁場感度を実現している。このとき、センサ原子の密度は測定感度に、緩和時間は測定帯域幅に重大な影響を与えることがわかっている。

本研究では、プラズマパラメータを制御することでセンサ原子の密度や寿命を変化させ、光ポンピング原子磁気センサの測定感度・測定帯域幅の動的な制御を実現し、プラズマの光ポンピング原子磁気センサへの応用を目指す。

3. 研究の方法

まず、従来型のアルカリ金属原子磁気センサを用いて、センサの基礎特性を調べ、磁気センサのセンサセルとして必要な原子密度とそれに対する磁場感度の相関について検討をする。

その後、放電セルを試作し、各放電セルに

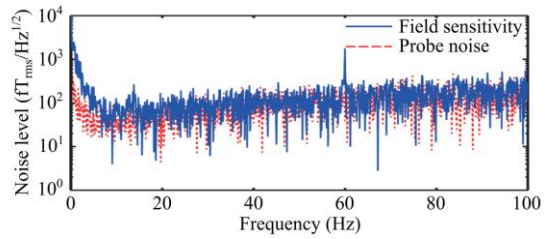


図 2 従来型のカリウムを用いた光ポンピング原子磁気センサで計測した磁気ノイズ

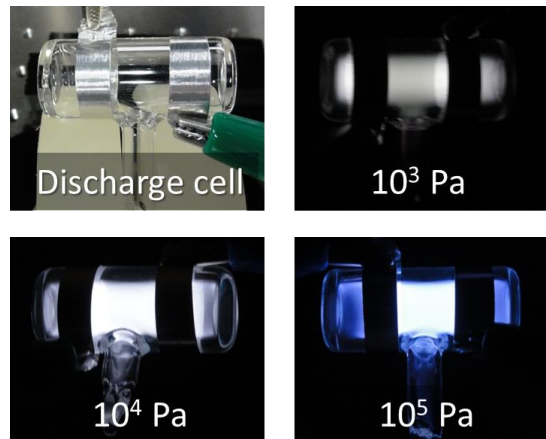


図 3 作製した放電セルと、それぞれのヘリウム圧力におけるプラズマの様子 (バイポーラパルス電源により 2-4 kV、5 kHz で放電)

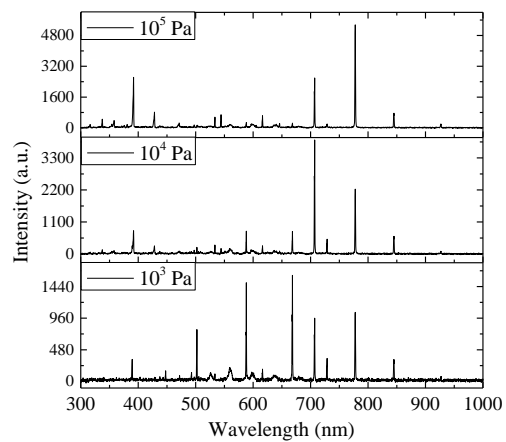


図 4 それぞれの放電セルの発光分光の結果

において $^4\text{He}(2^3\text{S}_1)$ 準安定励起原子の密度計測や素過程の解析を行う。放電セルは超高真空中にてガラスセルを 300°C で 24 時間程度加熱した後、その内部にヘリウムを封入し、残留大気成分を極力排した状態で作製した。

得られた放電セルを用いて、図 1 に示すような光学系を構築し、放電セルを実際に光ポンピング原子磁気センサとして動作させたときの測定感度について調べることにより、マイクロプラズマによる光ポンピングヘリウム原子磁気センサの実現可能性について検討する。また、内部にアルカリ金属原子を

封入した放電セルを作製し、スピン交換衝突によりスピン偏極をヘリウムからアルカリ金属に移行させるセンサについても検討する。このセンサであれば、従来型の理論を取り入れつつ、また放電によりアルカリ金属原子を気化させられるため、高速スイッチも可能である。

4. 研究成果

磁気センサの測定感度は環境磁場の大きさによって大きく変化するため、まず従来型のカリウムを用いた光ポンピング原子磁気センサを用いて環境磁場の計測とセンサ原子密度がセンサ感度に与える影響について調べた。その結果、今回実験を行った環境下では、環境磁場ノイズが低周波帯で約 $60 \text{ fT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ 程度であることがわかった (図 2)。また、このセンサの感度はセンサ原子密度の増加とともに上昇し、本装置で用いている昇温装置の上限である 180°C まで昇温した場合、つまり 10^{13} cm^{-3} 程度の密度の時に最大となった。このため、ヘリウムを用いたセンサにおいてもできるだけ高いセンサ原子密度を実現することが望ましいと考えられる。

図 3 に作製した放電セルの外観と、各ヘリウム圧力におけるプラズマの様子を示す。用いたセルは長さ 2 cm の円筒型であり、電極間隔 1 cm の誘電体バリア放電型である。これらのセルでは 4 kV 以下で放電が可能であった。それぞれのセルに対する発光分光計測の結果を図 4 に示す。どのセルでも 587 nm や 706 nm のヘリウムに由来する発光が観測される。しかしながら、セル作成時に極力排除した酸素に由来する発光も 777 nm 付近に観測された。これはもともとのヘリウムガス内に存在する不純物やガラス内壁に付着している酸素が徐々に脱離した影響によるものと考えられる。

図 5 には、 10^5 Pa の場合の ${}^4\text{He}(2^3\text{S}_1)$ 準安定励起原子の密度をレーザ吸収分光により計測した結果を示す。印加電圧の立ち上がりでは変位電流の影響が大きく、適切な計測ができていないが、その $1 \mu\text{s}$ 後には 10^{10} cm^{-3} 程度の密度が得られていることがわかる。これは先に確認した従来型のセンサの場合と比べ、 $1/1000$ 程度の密度となっている。これについて検討するために、数値計算により放電の素過程を解析した (図 6)。誘電体バリア放電では誘電体に電荷が蓄積され、ごく短い時間のうちに放電が終了する。しかしながら、放電の瞬間では電子温度は印加電圧にほぼ比例すると考えられる。電荷印加時から $1 \mu\text{s}$ の間では電子温度が 7 eV 程度になれば 10^{10} cm^{-3} 程度となり、今回の実験結果と非常に近い値となる。より高い密度を得るためには、瞬間的により高い電圧を印加する必要がある。そのほかにも、発光分光の結果から、酸

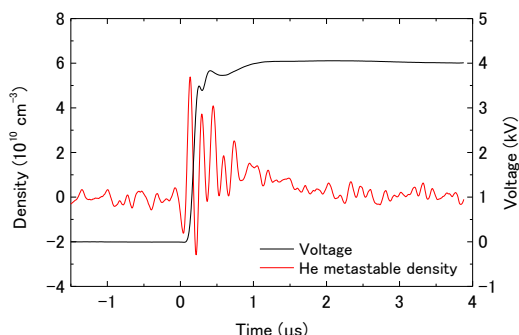


図 5 10^5 Pa のセルでの ${}^4\text{He}(2^3\text{S}_1)$ 準安定励起原子密度計測の結果

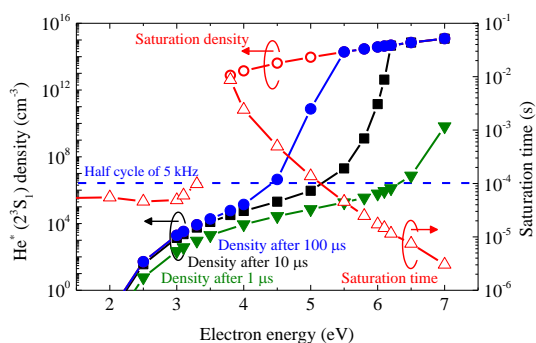


図 6 数値計算により得られた ${}^4\text{He}(2^3\text{S}_1)$ 準安定励起原子密度の電子温度依存性

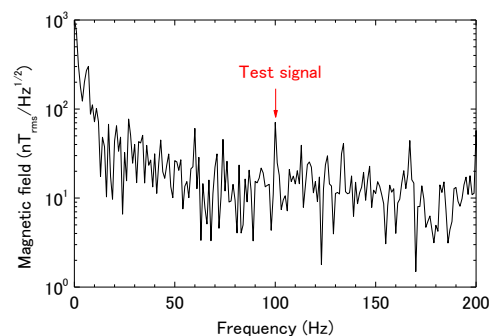


図 7 光ポンピングヘリウム原子磁気センサの磁場感度

素や窒素などの不純物が ${}^4\text{He}(2^3\text{S}_1)$ 準安定励起原子をクエンチしていることも考えられるため、さらなる解析をする必要があるだろう。

次に、 10^5 Pa のセルを実際に光ポンピング原子磁気センサとして動作させた。磁場感度を見積もるため、 100 nT 、 100 Hz の磁場を参照信号として印加した。このときの結果を図 7 に示す。図より、 100 Hz 付近のノイズは約 $20 \text{ nT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ 程度であり、磁場を検出することには成功した。しかしながら、従来型の磁気センサでの結果より、環境磁場ノイズは約 $60 \text{ fT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ 程度であるので、環境磁場により感度が制約されているわけではない。それ

よりも電氣的ノイズが大きいことと、さらにはセンサ原子の密度が低いため、感度が大きく低下していると考えられる。また、従来型の磁気センサでは、ポンプ光、プローブ光ともにレーザー光を用いていたが、今回はヘリウムランプを用いているため、十分な光ポンピングがされていないと考えられる。今後、光ポンピングヘリウム原子磁気センサを実用化するためには、感度の向上のために、不純物の除去や極短パルス放電の適用等によるセンサ原子密度の増加、電気ノイズの低下、レーザーの使用によるスピン偏極率の向上が必要となるだろう。

最後にスピン交換衝突を利用した光ポンピング原子磁気センサを構築した。手始めに2種類のアリカリ金属原子 (K, Rb) によりセンサセルを作製し、スピン交換衝突に適したポンプ・プローブ原子密度比について検討した。図8にK-Rb密度比に対する磁場応答信号の大きさをレート方程式により解析した結果を示す。ここでは、Rbをポンプ原子、Kをプローブ原子としている。実際にK-Rb密度比を変えたセルをいくつか作製して磁場応答信号を計測してみると、理論計算値と非常によく一致することがわかった。このときの最適な密度比は100程度であり、磁場感度を計測してみると、約 $30 \text{ fT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ であった。以上の知見を基に、Kを封入した放電セルによりセンサを動作させたところ、約 $600 \text{ nT}_{\text{rms}}/\text{Hz}^{1/2}$ と磁場感度はさらに低下し、安定な動作ができなくなった。これは不純物として存在している酸素がKを酸化させてしまい、十分なセンサ原子密度が得られなくなったことと、スピン交換衝突の効率があまり良くないことに由来するものと考えられ、酸化を防ぐためのセル内壁への高分子コーティング等の対策が必要である。

本研究により、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の可能性が示唆され、実用化へは感度の向上が必要であること等の課題が明らかとなった。従来型の光ポンピング原子磁気センサでは、センサの起動までに、セルの昇温時間(約2時間ほど)だけ待たなければならなかったが、本研究のセンサであれば、その待ち時間なくプラズマのオン・オフによる高速なスイッチングが可能であるため、扱いの容易なセンサの実現へと繋がる考えられる。

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3件)

- ① 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

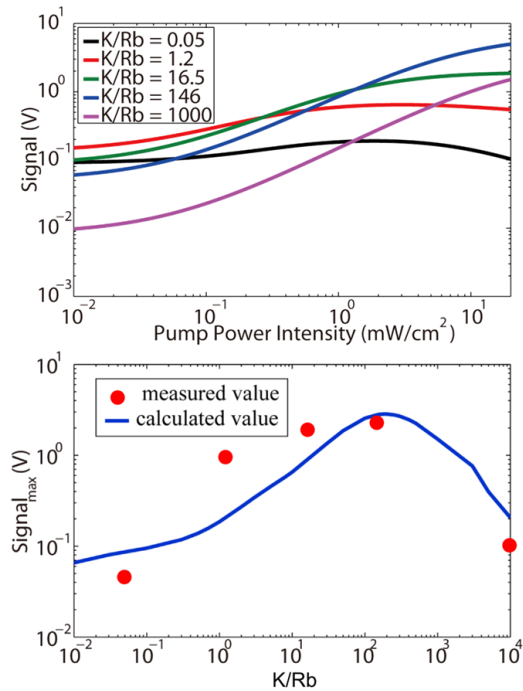


図8 K-Rb ハイブリッドセルにおけるK-Rb密度比と磁場応答信号強度との関係

ト心磁図の計測”、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、Vol. 111、No. 121、2011、pp. 71-76

- ② 大西宏征、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検討”、電気学会研究会資料(マグネティックス研究会)、査読無、MAG-12-081~101、2012、pp. 61-66
- ③ 伊藤陽介、佐藤大地、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よる生体磁気計測に向けた磁場分布計測”、電子情報通信学会技術研究報告、査読無、Vol. 112、No. 479、2013、pp. 31-34

[学会発表] (計9件)

- ① 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 とバイオサイバネティックス研究会、MBE2-1(14)、2011年7月9日、徳島大学(徳島県)
- ② 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、31p-ZJ-12、2011年8月31日、山形大学(山形県)
- ③ 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、31p-ZJ-13、2011年8月31日、山形大学（山形県）

- ④ 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”、2012年春季第59回応用物理学会学術講演会、17p-GP1-6、2012年3月17日、早稲田大学（東京都）
- ⑤ Yosuke Ito, Hiroyuki Ohnishi, Keigo Kamada and Tetsuo Kobayashi, "Effect of Spatial Homogeneity of Spin Polarization on Magnetic Field Response of an Optically Pumped Atomic Magnetometer Using a Hybrid Cell of K and Rb Atoms", IEEE International Magnetism Conference (INTERMAG2012), ET-13, 2012年5月10日, Vancouver, Canada
- ⑥ 伊藤陽介、小林哲生、“生体磁気計測に向けたヘリウム放電光ポンピング原子磁気センサの基礎的検討”、2012年秋季第73回応用物理学会学術講演会、13a-E1-20、2012年9月13日、愛媛大学（愛媛県）
- ⑦ 大西宏征、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検討”，電気学会 マグネティックス研究会、MAG-12-093、2012年9月25日、電磁材料研究所（宮城県）
- ⑧ Yosuke Ito and Tetsuo Kobayashi, "Development of Optically Pumped Helium Atomic Magnetometers toward Biomagnetic Measurements", 11th APCPST (Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology) and 25th SPSM (Symposium on Plasma Science for Materials), 3-P59, 2012年10月4日, Kyoto, Japan
- ⑨ 伊藤陽介、佐藤大地、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よる生体磁気計測に向けた磁場分布計測”、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、MBE1-2(25)、2013年3月13日、玉川大学（東京都）

[その他]

ホームページ等

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

1

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 陽介 (ITO YOSUKE)

京都大学・先端医工学研究ユニット・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：