

# アルカリ金属を用いた電磁環境計測

代表研究者 田上周路 岡山大学大学院 自然科学研究科 助教

## Abstract

アルカリ金属を用いて交流磁界を光学検出できる光ポンピング原子磁気センサを構築し、数十 kHz の低周波領域における特性評価を行った。センサの動作に必要な印加静磁界の強度と角度が磁気応答に及ぼす影響について検討し、磁気応答が最大となる条件について明らかにした。また、ポンプ光の波長や強度がセンサの出力特性に与える影響について検証した。構築したセンサのノイズレベルは 20 nT を示し、交流磁界の強度に対する線形な応答特性を確認した。

## 1 はじめに

電磁波の人体に及ぼす影響について低周波領域である 100 kHz までの周波数範囲（家電製品、車載機器）の影響が国際的に認められ、この領域における正確な電磁界検出が求められている。低周波電磁波の発生源を完全に排除することは事実上不可能なため、それらがどのくらいの強度で発生、存在しているのかを測定することが重要になる。従来、低周波数電磁波センサとしてコイルによる電磁誘導を利用したものがあげられるが、コイル自体を構成する金属の電磁界への影響や、過大入力によるコイルの損傷などが問題となっている。低周波電磁波計測を目的とした従来の計測機器として Narda S.T.S.社製の EFA-300 に代表される製品が販売されている。これは、3 軸のコイルを利用して磁界を測定しており、5Hz～32kHz の域帯において 10 nT のノイズレベルで測定可能である。

他方、光によるアルカリ金属原子のスピン偏極を利用し光学的な磁界検出を可能とする光ポンピング原子磁気センサ(Optically Pumped Atomic Magnetometer : OPAM)が注目されている。このセンサは、アルカリ金属として K を使い、200℃付近まで加熱することで、～数百 Hz までの極低周波領域において従来の磁気センサと同等かそれ以上の超高感度が実証されている[1, 2]。また、OPAM はアルカリ金属原子の密度や、同時にセル内に封入するバッファガスおよびクエンチングガスの種類や圧力、励起に用いるポンプ光の波長や強度、印加静磁界の向きや強度など、多くの動作条件によって出力特性が変化することが知られている。

我々は、この OPAM を構築し、数十 kHz の低周波領域への適用を検討している。OPAM を低周波電磁波計測に用いることで、従来よりも小型で高感度な測定が期待できる。また、センサ部に用いる金属量が圧倒的に少なく、電源や信号伝送用の金属ケーブル等も不要であるため、非侵襲で高精度な測定が可能になる。さらに、原理的に過大入力による損傷が生じないため、エネルギー伝送などの強磁界の測定に対応可能である。

我々はこれまでアルカリ金属として融点の低い  $^{133}\text{Cs}$  を使い、室温での磁界検出を実験的に実証することで、低周波電磁波領域への適応可能性について検証した[3]。検証過程において、測定感度と帯域幅がトレードオフの関係となることや、光強度によって帯域が変化すること、バッファガス圧が光強度の低減や帯域のコントロールを可能にすることを示した。

本報告において、3 軸ヘルムホルツコイルを用いて印加静磁場をコントロールすることで、これまで示していなかったセンサの動作に必要な印加静磁界の強度と角度がセンサ応答に及ぼす影響について検討する。また、ポンプ光波長と強度の変化による、帯域と感度といったセンサ出力の特性に与える影響について検証し、各パラメータの最適化を実施し、実用化に向けた検討を行う。

## 2 低周波電磁波計測の実験

実験光学系の概要を図 1 に示し、用いるアルカリ金属、実験光学系、印加する磁場とデータの取得方法について説明する。

実験に用いる  $^{133}\text{Cs}$  原子は、大気中で反応してしまうため、真空装置内において光路長 10 mm のガラスセル内に封入した。ガラスセル内には  $^{133}\text{Cs}$  原子の他に光ポンピングの効率向上と衝突による緩和の抑制を目的に、He を 80 kPa、N<sub>2</sub> を 10 kPa それぞれ同時に封入した。

光源には、電流値をコントロールすることでレーザ波長を掃引でき、D2 遷移に対応した波長（852 nm）の狭帯域光を出射可能な Distributed Feedback (DFB) レーザを使用した。偏光保持ファイバ（Polarization maintaining fiber : PM fiber）から出射された直線偏光のレーザ光がレンズを通して平行光にされ、 $\lambda/4$  板で円偏光となり、センサ本体となるガラスセルを通過した後、レンズで集光されてフォトディテクタに入射する。可変フィルタ（Variable Filter）は入射光強度のコントロールのために使用している。

3 軸ヘルムホルツコイルは外部磁場の影響を低減する役割と光軸を中心にラーモア方程式で定義される周波数で歳差運動するための静磁界を発生させる役割を担っている。セルに印加される静磁界  $B$  は、地磁気をキャンセルした上で、図 2 に示すように、3 軸ヘルムホルツコイルで生成される静磁界  $B_x, B_y, B_z$  の合成ベクトル  $B$  で表される。交流磁界検出時、スピンはこの静磁界  $B$  を軸に歳差運動をしていると考えられる。3 軸ヘルムホルツコイルの Z 軸方向には図 1 の点線で表される 1 巻きのヘルムホルツコイルが追加されており、ファンクションジェネレーターに接続される。このコイルによって光軸に垂直な交流磁界が印加され、測定対象磁界となる。測定対象磁界により変動した透過光強度は、A/D 変換器により PC に取り込まれ、得られた信号をフーリエ変換することで透過光に含まれる周波数情報を解析する。

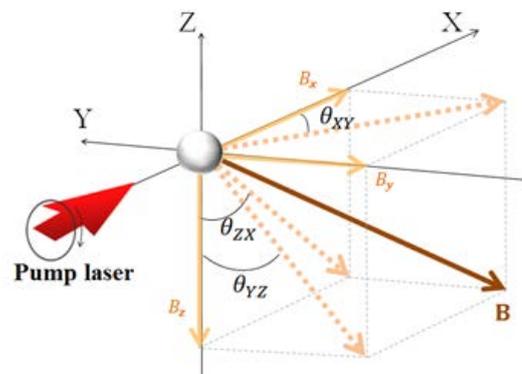
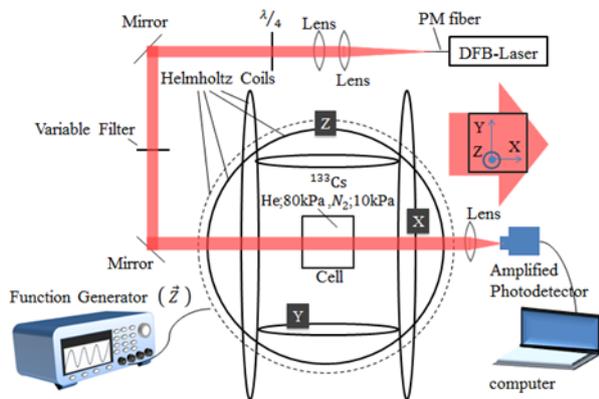


図 1 : 3 軸ヘルムホルツコイルを用いた実験光学系 図 2 : 3 軸ヘルムホルツコイルより生成される静磁界  $B$

### 3 印加静磁界の強度と角度による磁気応答特性

電磁波を交流磁界として検出する際、高い周波数の測定ほど、ラーモア方程式に示されるように、より大きな静磁界  $B$  を与える必要がある。実験における静磁界  $B$  は  $B_z$  をゼロ付近に設定し  $B_x, B_y$  の値を共鳴周波数で変化させている。測定対象である交流磁界の向きが Z 軸方向であるため、スピンは静磁界  $B$  を中心に XY 平面方向に傾くことで歳差運動する。よって XY 平面上に静磁界  $B$  を設定することで、光軸に対するスピンの傾きが最大となり、出力される信号強度も最大となる。

結果の 1 例として、共鳴周波数 80 kHz となる静磁場  $B$  を印加した際に、角度  $\theta_{XY}$  を変化させたときの、80 kHz の磁気応答信号強度の変化を図 3 に示す。この時、セル温度 24°C、ポンプ光強度 1.1 mW、ポンプ光の波長 852.35 nm、A/D 変換器のサンプリング周波数は 1 MHz とした。結果より、 $\theta_{XY}$  が 60° 付近で磁気応答信号強度が最大となることが確認できる。

このように最適化された印加静磁場角度において、印加静磁場強度に対する共鳴周波数の関係を図 4 に示す。本研究で構築したセンサにおいて印加磁場の値が理論式で得られた値と同様に静磁界  $B$  が共鳴周波数に比例することが確認できた。実験結果が理論値に比べて強磁場方向にオフセットされている理由として、地磁気キャンセル時に用いた別の磁気センサの精度不足によって、地磁気成分の残留が影響していると考えられる。

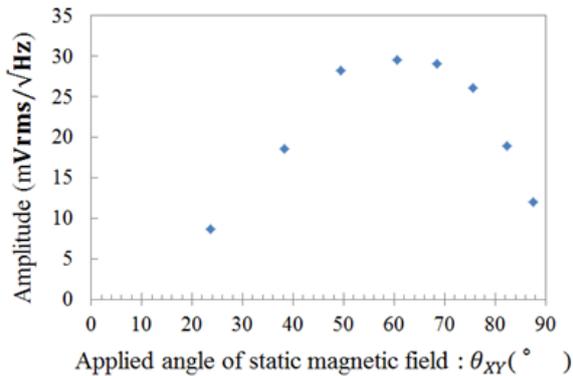


図 3：共鳴周波数 80 kHz 時の角度  $\theta_{XY}$  を変化させたときの磁気応答信号強度の変化

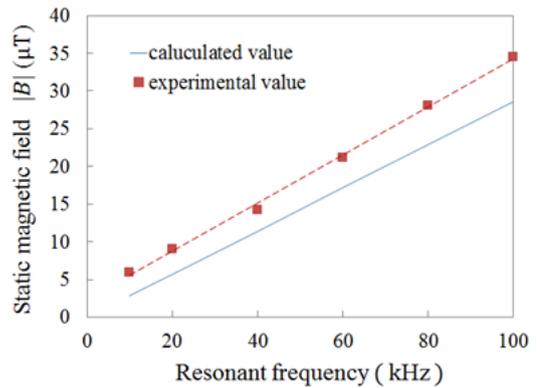


図 4：共鳴周波数に対する静磁界強度  $B$

#### 4 感度と帯域評価

光ポンピング原子磁気センサの感度と帯域はトレードオフの関係にあり、帯域が広くなることは感度の低下につながるため、単純に帯域を広げるのではなく、磁場信号を測定できるだけの感度を同時に保つことが必要になる。ここでは印加する静磁界による共鳴周波数を 10 kHz に設定し、ポンプ光の波長と強度  $I_p$  が感度と帯域に与える影響について検討する。

ポンプ光の波長は、光の吸収特性を介して感度に大きく影響する。ポンプ光の強度は強いほど透過光強度が増加するため、信号強度は大きくなると考えられる。一方で、光軸にスピンを向けようとする力によるスピン緩和が働くため、ポンプ光強度が強くなれば帯域は広がっていく。以上のことから波長およびポンプ光強度の両側が信号および感度に及ぼす影響を考えることが必要になる。図 5 にはポンプ光波長変化に対する磁気応答信号強度の変化を示す。

この結果からポンプ光の強度が強くなるほど、波長による信号強度の変動が大きくなっている事が確認できる。また、ポンプ光の強度に対して異なる最適波長を持つことが分かる。これは、波長の変化により原子が吸収する光子の数が増加し、光ポンピングの効率が変化するため、信号強度が最大となる波長が存在することを意味する。

さらに、信号強度が最大となる波長はポンプ光強度が強くなるほど高エネルギー側となる短波長側に移っているのが確認された。これは、ポンピングレートの上昇が、基底状態  $F = 3$  から励起状態  $F' = 4$  への遷移を示す吸収頻度が増加していることを意味する。同時に、強すぎる光強度により、ポンプ光自身の緩和も強くなっていると予想される。

図 6 に、この時のポンプ光波長の変化に対する帯域幅 ( $\Delta\nu_{\text{HWHM}}$ ) の変化の例として、ポンプ光強度が 0.5 mW と 2 mW の結果を示す。

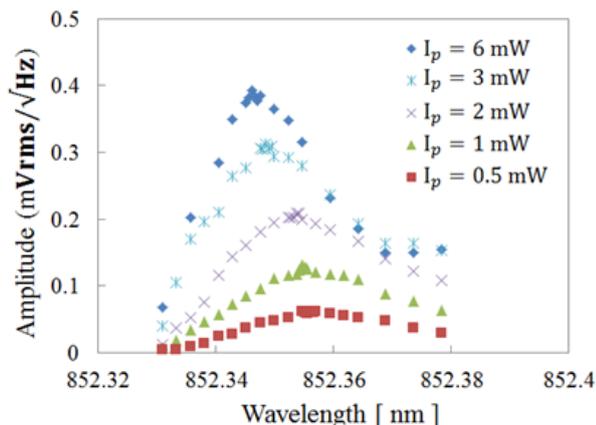


図 5：ポンプ光波長変化に対する磁気応答信号強度の変化

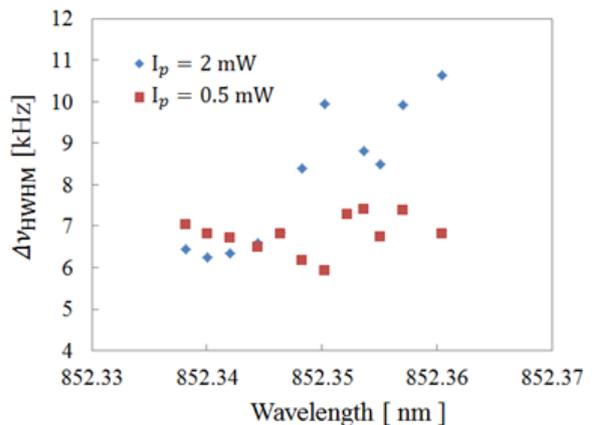


図 6：ポンプ光波長の変化に対する帯域幅 ( $\Delta\nu_{\text{HWHM}}$ ) の変化。

弱いポンプ光強度 0.5 mW の場合は、波長による帯域幅の変動は少ないが、より強いポンプ光強度 2 mW の場合は、信号強度がピークとなる波長域において帯域幅の増大が確認できる。ポンプ光強度の増加によってポンピングレート  $R_{op}$  が増大し、同様に縦スピン緩和レート  $T_1^{-1}$  の増加によって帯域幅の増加に繋がったと考えられる。よって、光ポンピングが過剰とならないポンプ光強度や波長では帯域が狭まっている。このことは、選択するポンプ光波長によっては帯域幅がポンプ光強度でコントロール可能であることを示唆している。次に、ポンプ光強度を 1.4 mW、セル温度 25°C の時の、測定対象交流磁界の大きさに対するセンサ応答の変化を図 7 に示す。交流磁界強度が高くなるにつれて少し飽和する傾向が見られるが、センサ応答が印加交流磁界の大きさにほぼ比例して大きくなることが確認できた。

図 8 にはファンクションジェネレーターによって Z 軸ヘルムホルツコイルの中心に測定対象となる交流磁界（周波数 10 kHz、振幅 3  $\mu$ T の正弦波）を印加し、そのセンサ出力が最大となるように、他の条件を最適化したときのノイズスペクトルを示す。この結果から信号磁場は 10 kHz に確認でき、信号磁場周辺のノイズレベルを評価すると、約 20 nT であった。これは従来のセンサ（EFA-300）のノイズレベルと同等であり、加熱などの手法を用いてアルカリ金属の蒸気密度を増加させることで、さらなる高感度化は容易に可能である。

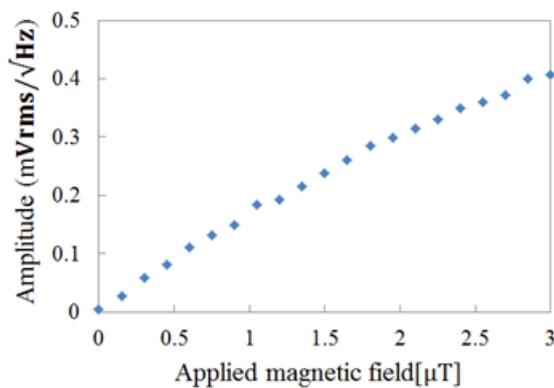


図 7：印加磁場に対する信号磁場応答

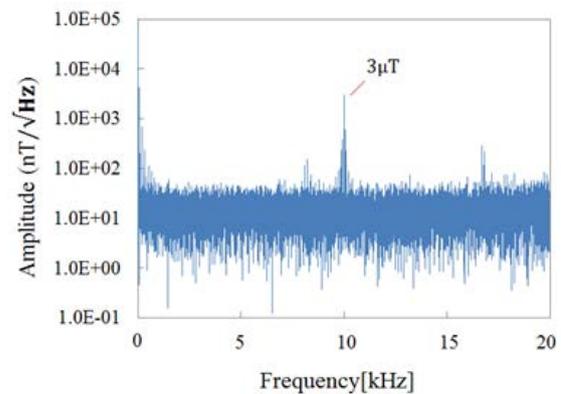


図 8：信号磁場（共鳴周波数 10 kHz、振幅 3  $\mu$ T の正弦波）を印加したときのノイズスペクトル（ポンプ光強度 1.6 mW、動作温度 26°C）

## 5 まとめ

本研究ではアルカリ金属として Cs を用いて、数十 kHz の低周波磁界を光学検出できる原子磁気センサを構築し、センサとして重要な特性である帯域と感度について実験的に検証した。検証結果より、共鳴周波数、ポンプ光強度、ポンプ光の波長といった動作条件によってセンサの応答が変化し、測定対象交流磁界と垂直に、光軸と 60° の角度で静磁界を印加した際にセンサ出力が最大となった。構築したセンサは既存のセンサと同等のノイズレベルであった。また、3  $\mu$ T までの交流磁界強度に対して、ほぼ線形な応答が得られた。本研究では室温での応答特性について検証したが、光学的な加熱などの手法を用いて動作温度を高くすることで、アルカリ金属の蒸気密度を増加させ、更なる感度の向上が期待できる。また、今回は静磁界の印加角度や強度を調整するためにヘルムホルツコイルを用いたが、今後、小型の永久磁石をセル側面に配置することで静磁界を印加し、小型で非侵襲な測定プローブの製作と性能評価を行う。

### 【参考文献】

- [1] I. K. Kominis, T. W. Kornack, J. C. Allred and M. V. Romalis, Nature, 422, 2003.
- [2] S. Taue, Y. Sugihara, T. Kobayashi, S. Ichihara, K. Ishikawa, and N. Mizutani, “Development of a Highly Sensitive Optically Pumped Atomic Magnetometer for Biomagnetic Field Measurements: A Phantom Study”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 46, No. 9, 2010.
- [3] 長岡ほか, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-4-5 (2014)
- [4] W. Happer, “Opical pumping”, Review of Modem Physics, Vol. 44, No. 2, 169-249, 1972.

- [5] David R. Lide (Ed.), CRC Handbook of Chemistry and Physics, 82nd ed., CRC Press, Boca Raton, 2001.
- [6] S. J. Seltzer, “Developments in Alkali-Metal Atomic Magnetometry,” The Faculty of Princeton University in Candidacy for the degree of doctor of philosophy, 2008.
- [7] J. C. Allred, R. N. Lyman, T. W. Kornack, & M. V. Romalis, “High-sensitivity atomic magnetometer unaffected by spin-exchange relaxation,” Physical Review Letters, Vol. 89, No. 13, p. 130801, 2002.
- [8] S. Appelt, A. B. A. Baranga, C. J. Erickson, M. V. Romalis, A. R. Young, and W. Happer, “Theory of spin-exchange optical pumping of  $^3\text{He}$  and  $^{129}\text{Xe}$ ,” Physical Review A, Vol. 58, No. 2, pp. 1412-1439, 1998.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
アルカリ金属を用いた低周波電磁波計測の検討	電子情報通信学会 ソサイエティ大会	2014年9月
アルカリ金属のスピンの偏極を用いた低周波電磁波計測の検討	IEICE Technical Report EMCJ2015-15 (2015-05)	2015年5月