

平成 30 年 5 月 1 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18113

研究課題名(和文) アルカリ金属蒸気を用いた交流磁界の光学検出

研究課題名(英文) Optical detection of AC magnetic field by using alkali metal atoms

研究代表者

田上 周路 (Taue, Shuji)

岡山大学・自然科学研究科・助教

研究者番号：80420503

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光学式磁界センサをkHz帯の交流磁界検出に適用できる測定システムの開発を実施した。静磁界印加用に小型の永久磁石を用い、従来用いていたコイルとの比較を実施した。コイルを用いた場合と比べて、永久磁石を用いた場合には約5%の空間的な不均一が生じた。これにより、信号強度の減衰や感度帯域幅の広がりが生じることを確認した。次に、微小領域における交流磁界の空間評価を実施するため、ミラーアレイデバイスを用いてサブミリメートルの分解能で画像化を実施した。コイルからの均一な磁界分布を画像化し、入力信号強度に対する出力信号強度の線形な変化が確認できた。また、金属線から生じる磁界分布画像を取得した。

研究成果の概要(英文)：We utilized an optical magnetometer to detect AC magnetic field. At first, small permanent magnets were used instead of big coils to generate static magnetic field around the sensor head. Non-uniform magnetic field from permanent magnets produced reduction of output signals and a higher bandwidth. Subsequently, we achieved to visualize magnetic field distributions with sub-millimeter resolutions by using a mirror array device. Uniform field distributions from Helmholtz coils and field decays from a fine wire were clearly obtained.

研究分野：光計測

キーワード：磁界分布 磁界計測 光学測定

### 1. 研究開始当初の背景

電磁波を使った計測や情報通信、電力伝送などがますます身近となり、電子機器の干渉問題(誤動作など)や人体への影響などを避けるためにも正確な電磁環境計測が重要になっている。特に、kHz帯の周波数を用いる電力伝送においては、無線急速充電等によって伝送するエネルギー量の増大が顕著であり、周囲への漏洩電磁界を計測するセンサシステムの開発は急務である。一方で、この周波数帯を人体へ積極的に照射することで、磁気微粒子の位置検出やハイパーサーミアに関する研究が近年盛んに行われており、特に位置検出においては感度やセンササイズといった課題が残されている。これらの電磁波を検出するセンサには金属性のコイルやアンテナが用いられており、測定周波数帯域に応じた設計やインピーダンス整合の必要性に加えて、センサへの配線やセンサ自身による電磁波の乱れが問題となっていた。

上記周波数帯における新たな磁界センサとして、アルカリ金属の光ポンピング現象を利用した原子磁気センサが注目されている。このセンサは従来のコイルを用いたセンサよりも高い感度を有することが実証され(I. M. Savukov et al.: JMR, 185 (2007)), 光学式磁気センサとして応用が期待されている。これら先行研究の装置構成は、アルカリ金属としてカリウムを用い、これを封入したガラスセル内で、ポンプ光とプローブ光を垂直に交差させることで高感度化を実現している。カリウムを用いる事でエネルギー準位の違いから他のアルカリ金属よりも高感度が期待できるが、セル内での金属蒸気の濃度を上げるために180℃の高温に熱する必要がある。これにより、センサと測定対象物の間に断熱材を配置させる必要があるため、距離の増加による信号強度の減衰や、加熱装置から発生するノイズによって信号雑音比の低下を引き起こしていた。さらに、セル内の空間分解測定による外来磁場ノイズの除去(I. K. Kominis et al.: Nature, 422 (2003))や磁界強度分布の画像化(K. Kim et al.: NeuroImage, 89 (2014))も実施されているが、光の並列性や原子磁気センサの測定原理を十分に生かした測定は行われていない。

### 2. 研究の目的

(1)本研究では、セシウム原子を用いた光学式磁界センサをkHz帯の交流磁界検出に適用することで、非侵襲(電磁界を乱さない)、高感度(微量でも計測できる)、高空間分解能(局所的な磁界も検出できる)といった特徴を有する測定システムの開発を目的とする。本研究で用いるアルカリ金属には、常温でも十分な金属蒸気密度を得られるセシウムを用いる。これにより、加熱なしで測定できるほか、断熱材を介さずにセンサを測定対象へ近接させて計測することが可能となる。さらに、数十pg程度のアルカリ金属蒸気以外に金属

体を用いない測定プローブが実現できる。蒸気となるアルカリ金属原子の密度は温度によって変動するが、我々が新たに開発した光ファイバ温度センサを用いることで、磁界を乱すことなく精度よく校正することができる。これらのデバイスを組み込んだモジュール化を想定し、実験室だけでなく実際の信号発生源に対するその場測定や、従来装置との比較測定が可能な測定プローブの構築を実施する。センサの特性上、静磁界を印加する必要があるため、静磁界印加用コイルをプローブ内に取り付ける必要があり、このコイルがプローブの大型化や金属両の増加を招いてしまう。そこで、静磁界印加用として小型の永久磁石を用い、コイルとの比較を新規検討事項として実施する。

(2)並列光処理デバイスであるデジタルミラーデバイス(DMD)を用いて、微少領域における磁界の空間評価について検討する。これにより、これまで得られなかったサブミリメートルオーダの分解能で磁界の分布画像を高感度取得する。得られた分布画像から信号源推定を行うことで、微少な信号源の位置検出が高精度に可能となる。

### 3. 研究の方法

(1)図1にセンサヘッドとなるガラスセルを示す。ガラスセル内部にはアルカリ金属としてセシウム蒸気が封入されている。これまでの研究において、静磁界の印加には図2に示す直径約250mmのヘルムホルツコイルを用いていた。本研究では永久磁石として、図3に示す直径13mm(厚さ1.2mm)の市販のフェライト磁石を2つ用い、コイルを用いた場合との比較を行った。実験のセットアップを図4に示す。



図1. セシウム封入ガラスセル

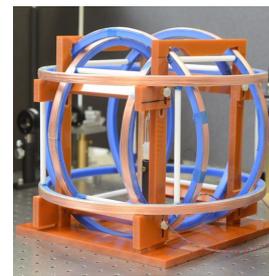


図2. 直径約250mmのヘルムホルツコイル



図3. 直径13mmのフェライト磁石

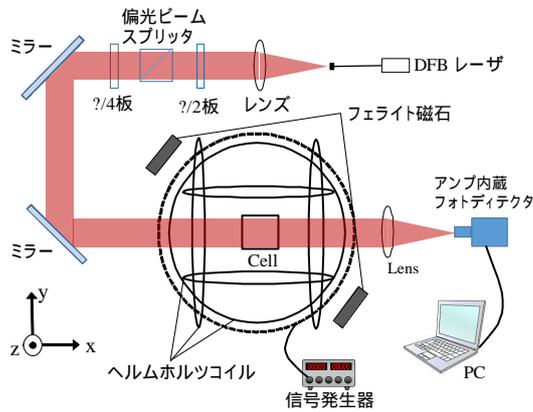


図4. 永久磁石を用いた実験光学系の概略図

2つのフェライト磁石は、樹脂製の治具を用いて、それぞれの磁極が対向し、xy平面上においてガラスセルと直線上に等間隔となり、光軸と45°の角度となるように配置した。ガラスセルの中心と磁石の間隔は、スピンの磁気共鳴周波数が測定対象周波数である約70 kHzとなるように調整し、93 mmとした。同様に、ヘルムホルツコイルを用いる場合にも、磁気共鳴周波数が約70 kHzとなるようにヘルムホルツコイルの印加静磁界強度を調整し、方向も光軸と45°の角度とした。

(2) 微小領域における交流磁界の空間評価を実施するため、構築した実験系を図5に示す。レーザからの光は直径10 mmの円形ビームに拡大し、センサヘッドとなるガラスセルを透過した後ミラーアレイデバイスへと照射される。レンズを用いてガラスセル内の透過光強度分布をミラー面上へ結像し、ミラー面の画素要素領域を走査することで像情報がフォトディテクタへ時分割されて取得される。取得された信号はロックインアンプを介してPCに取り込まれ、二次元分布画像として再構成される。本研究ではミラー面を50×50の画素要素領域に分割することで、10 mm×10 mmのガラスセル内をサブミリメートルの分解能で画像化した。測定対象磁界として、空間的に均一な信号磁界をヘルムホルツコイルから発生させ、観測した。また、太さ0.5 mmの金属線をセンサ横に配置し、そこから発生する磁界分布を観測した。

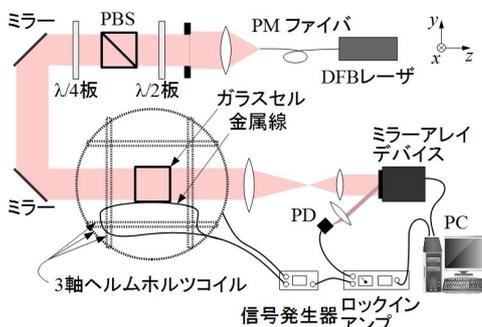


図5. 磁界強度分布取得実験の概略図

#### 4. 研究成果

(1) 永久磁石を用いたプローブの小型化による測定感度への影響に関して、静磁界の印加にヘルムホルツコイルとフェライト磁石を用いた場合の信号検出結果について、センサの出力信号強度と感度帯域について評価する。それぞれの静磁界印加方法を用いて、出力信号が71.5 kHzの周波数に共鳴するように静磁界強度を固定した状態で、各磁界信号周波数に対する出力信号強度を図6にプロットした。共鳴周波数である71.5 kHzの信号強度が最も大きくなったが、コイルの場合から永久磁石を用いることで出力が約81%に減少した。また、信号周波数を変化させたとき、永久磁石を用いることで半値全幅の値(感度帯域幅)は約126%に増加した。

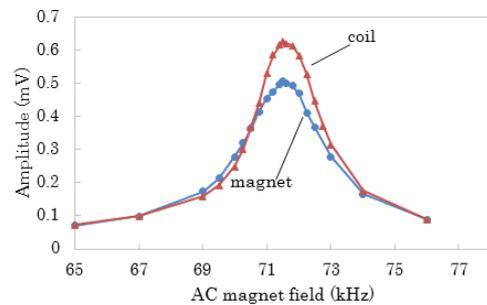


図6. ヘルムホルツコイルと永久磁石を用いた場合の各周波数信号に対する出力強度

静磁界の印加にヘルムホルツコイルと永久磁石を用いた場合の違いについて、センサとなるガラスセル内部の磁界強度の空間分布を計算によって求めた。計算には磁界シミュレーションソフト FEMM (Finite Element Method Magnetics) を使い、実験に用いるコイルと磁石のパラメータを適用した。得られた xy 平面におけるそれぞれの磁界強度分布を図7に示す。

計算結果から、コイルを用いた場合には、セル内における磁界強度は均一に分布しているが、永久磁石を用いた場合には空間的に不均一となっている。永久磁石を用いた場合の結果から、セル内部において約5%の違いが生じていた。

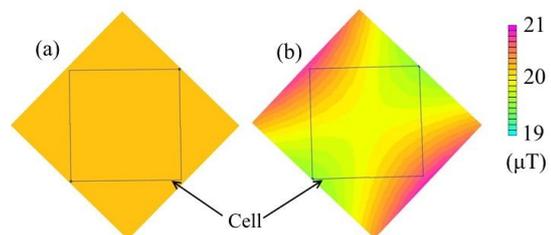


図7. (a) ヘルムホルツコイルを用いた場合と (b) 永久磁石を用いた場合の磁界強度分布

計算によって得られたセル内部の静磁界強度分布から、永久磁石を用いた場合には、セル内部において共鳴周波数が空間的に変

化しているため、信号強度の減衰や感度帯域幅の広がりが生じていると考えられる。ここで、コイルを用いた場合に得られた出力信号強度や感度帯域幅が、空間的に均一な静磁場によると仮定すると、永久磁石を用いた場合の出力信号強度や感度帯域幅を磁界強度分布から計算できる。永久磁石を用いた場合の磁界強度分布から計算された各周波数信号に対する出力強度を図 8 に示す。

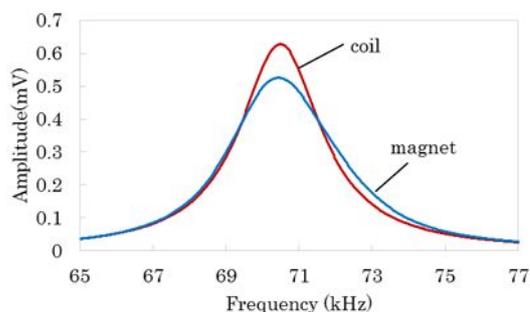


図 7. コイルと永久磁石を用いた場合の出力特性の計算結果

セル内での磁界分布の影響から、永久磁石の使用による信号強度は約 84% に減少し、感度帯域幅は約 130% に増加した。これらの計算結果は実測での値と良く一致しており、永久磁石の使用による出力信号特性の変化は、セル内部の静磁界の空間分布に起因するものであると確認できた。

本検討により、静磁界の空間分布によるセンサの出力信号特性への影響を明らかにした。今後、静磁界の印加方法を工夫することで、より小型の測定プローブの実現が期待できる。

(2) センサヘッドとなるガラスセル内部の交流磁界分布に関して、ヘルムホルツコイルからの印加信号磁界を画像化した結果を図 8 に示す。コイルへ 70 kHz の交流電圧を印加する前(図 8(a))はガラスセルの内部と外部で様に低いノイズレベルの分布画像が得られた。一方でコイルへの印加電圧を 15V とした場合(図 8(b))は、ガラスセル内部における光が透過した円形の領域において、一様

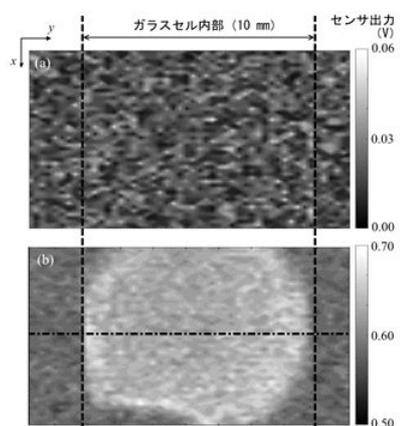


図 8. (a)交流電圧印加前と(b)15V 印加時の出力強度分布画像

な信号強度の上昇が見られた。この領域の信号強度は、コイルへの印加電圧に対して線形な出力を示した。

また、ガラスセルの横に金属線を配置し、交流電圧を印加した場合の測定結果を図 9 に示す。ヘルムホルツを用いた時と同様に、円形の光の照射領域でセンサ出力の増加が見られ、金属線付近でのセンサ出力の増大が確認できた。また、金属線からの距離による出力の減衰について、図中に示した一点差線の位置における強度プロファイルを図 10 に示す。

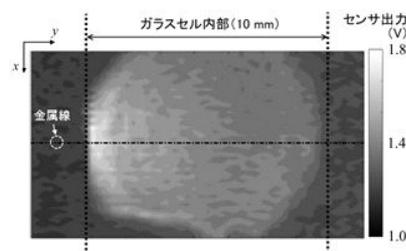


図 9. 金属線から生じる交流磁界分布画像

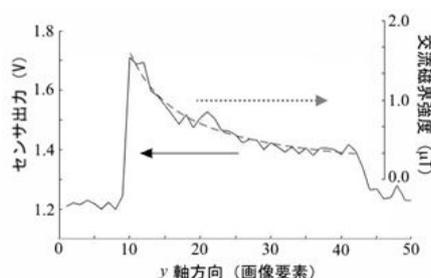


図 10. 金属線からの距離によるセンサ出力の減衰(実線)と、理論曲線(破線)

得られたセンサ出力のうち、光が透過した領域の y 軸方向の画素要素 10 から 42 における減衰曲線について、アンペールの法則から算出される減衰曲線とのフィッティングを行った。フィッティングには最小二乗近似法を用い、得られた結果を図 10 の破線に示す。実験値と理論値の減衰曲線は良く一致しているが、フィッティングによって得られた信号源の位置の計算結果は、実際の金属線の位置よりも約 1.3 mm 遠い結果となった。この結果の違いについて、センサ出力の空間的な変動によるフィッティング精度の低下が原因と考えられる。今後、センサ出力における変動成分の除去や、異なるフィッティング原理を用いることで、信号源位置の高精度推定に取り組む。

## 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)

田上周路, 豊田啓孝, 藤森和博, 深野秀樹, 「アルカリ金属を用いた光学式磁界センサによる交流磁界分布の投影」～ ミラ

ーアレイデバイスを用いた高解像イメージの取得～」,IEICE Technical Report, 査読無, EMCJ2017-91(2018-01), pp. 19-23, 2018.

田上周路,篠原 優, 豊田啓孝,藤森和博, 深野秀樹「アルカリ金属を用いた交流磁界の光学検出～市販の磁界テストとの比較と永久磁石を用いたプローブ化の検討～」,電子情報通信学会和文論文誌 B, 査読有, Vol. J100-B, No. 3, pp158-165, 2017.

DOI:10.14923/transcomj.2016PEP0010

田上周路,篠原 優, 豊田啓孝,藤森和博, 深野秀樹「アルカリ金属を用いた交流磁界の光学的検出における静磁界の空間的不均一による感度への影響」, IEICE Technical Report, 査読無, EMCJ2016-85, pp. 7-12, 2016.

〔学会発表〕(計 4件)

田上周路, 豊田啓孝, 藤森和博, 深野秀樹「アルカリ金属を用いた光学式磁界センサによる交流磁界分布の投影～ミラーアレイデバイスを用いた高解像イメージの取得～」電子情報通信学会研究会 EMCJ 研究会, 2018.1.18, 倉敷市芸文館(岡山県).

Shuji Taue, Yoshitaka Toyota, Kazuhiro Fujimori, and Hideki Fukano, "AC Magnetic Field Imaging by using Digital Micro-mirror Device," 22nd Microoptics Conference (MOC2017), 2017.11.21, 東京大学(東京都).

田上周路,篠原 優, 豊田啓孝, 藤森和博, 深野秀樹「アルカリ金属を用いた交流磁界の光学的検出における静磁界の空間不均一による感度への影響」電子情報通信学会 EMCJ,WPT,PEM 研究会, 2016.11.24, 機械振興会館(東京都).

Shuji Taue and Hideki Fukano, "Fiber-optic Multimode Interference for Sensing Applications," The 10th Asia-Pacific Laser Symposium (APLS2016), 2016.5.12, Jeju (Korea).

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

岡山大学大学院自然科学研究科 光電子・波動工学研究室ホームページ

<http://www.ec.okayama-u.ac.jp/~opt/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田上 周路 (TAUE, Shuji)