交流磁界の光学投影による三次元情報取得

研究代表者 田上周路 高知工科大学 システム工学群 准教授

1 背景・目的

数十 kHz から数百 kHz の低周波電磁波は、モバイル機器や EV へのワイヤレス充電に利用されており、デバ イスの高効率化による送電電力の増加や伝送距離の伸長が期待されている.磁界分布を画像化することは、 電磁波をはじめとする交流磁界の信号やノイズ成分を、パターン認識的に空間評価することが可能となるた め、産業分野において大きな意義を有する.さらに、物質内部の見えない位置に存在する発生源の位置特定 も、漏出した磁界分布から可能となる.しかし、送信デバイスから発する電磁界分布の空間的な評価には、 コイルやアンテナの機械的な走査の必要性や対象電磁界への侵襲性といった課題がある.

磁界センサには実用化されているものだけでも,誘導起電力を利用したコイルや,半導体の特性を利用した電子素子といった多くの種類が存在する.これらのセンサで磁界を測定する場合,センサ部の金属配線によって測定対象となる磁界に空間的な歪みや強度減衰が生じる.このため,センサを密に配置して多点を同時に測定することは精度の低下を招いてしまう.

アルカリ金属原子(蒸気)は、そのエネルギー準位の間隔に応じた周波数の光や電波を吸収・放出するこ とで、準位間の原子数差を作り出せることが知られている。特にマイクロ波帯の準位間隔は周波数標準等に 利用されており、原子時計としてよく知られている。また、ゼーマン準位のように近接した準位間であって も、円偏光を用いることで大きな原子数の差を作ることができる(光ポンピング)¹⁾.このゼーマン準位の 間隔は原子に印加される磁界の強度によって変化する。このため、印加される磁界を光によって計測するこ とが可能となり²⁾、製品化もされている。この光学式磁界センサは 1970 年代から研究されており、ガラス セル内に封入した極微量のアルカリ金属蒸気に光を通してスピン偏極を行うことで、その透過光の強度や偏 光状態から、ガラスセル内部に印加される磁界が光学的に測定できる。このため、従来センサで問題となっ ていたセンサ内金属による磁界への影響を極限まで減らすことができる

我々は、これまでアルカリ金属を用いた光磁界計測が従来のコイルよりも高感度で空間分解能に優れる事 を示し³⁾、その応用として、数+kHzの交流磁界信号に対して、光学式磁界センサによる非侵襲で高精細な 二次元磁界分布の光学投影を実証した.画像化には、画素構造を有するミラーアレイデバイス (DMD: Digital Mirror Device)を適用し、光で投影される磁界分布信号の空間分解を行った.本研究では、磁界分布の3 次元取得を目指し、磁界分布から逆問題を解くことで得られる信号源位置の高精度推定を実証する.さらに、 磁界強度のみならず各画素における磁界の方向成分を取り出すことを試み、磁界のベクトル分布画像につい ても検討を行う.

2 実験方法

2-1 光学系の構築

図1に構築した光学系の概略図を示す. 光源と して出力波長をセシウムのD2線(852.2 nm)に調 整した Distributed FeedBack (DFB)レーザを用い, 出力光は偏光保持(Polarization Maintaining: PM)ファイバを介して出力される.出力光のビーム 径は、レンズL1とアイリスによって10 mmの平行 光に調整される. 光強度は $\lambda/2$ 板(Half-Wave Plate: HWP)と偏光ビームスプリッタ(Polarizing Beam Splitter: PBS)によって調整され, $\lambda/4$ 板

(Quarter Wave Plate: QWP)を用いて円偏光にし, ガラスセルに入射する. 今回, ガラスセルには光 路長 10 mm の製品を用いてセシウムを封入したも



のを用いた. ガラスセルは直径 300 mm の 3 軸ヘルムホル ツコイルの中央に配置し, ガラスセルの中央を z 方向に 光が透過するように調整する. 3 軸ヘルムホルツコイル は, セシウムが磁気共鳴することでセンサが高感度に動 作する上で必要となる静磁界 (B_0)を印加する. セルを 透過した光はレンズ L2 と L3 によって DMD のミラー面上 に縮小結像される. DMD の全ミラー608×684 を 50×50 の画素に分割して画像を取得する. DMD の各画素からの 反射光はレンズ L4 によって集光されて Photo Detector (PD)によって受光される. 得られた信号は Lock-In Amp. (LIA)によって位相検波された後に PC へ取り込まれる. PC に取得された信号はソフトウェア (Labview)を用い て画像化される.

2-2 測定対象磁界の発生

測定対象となる磁界信号として,空間的に均一な磁 界信号と不均一な磁界信号を発生させ,それぞれの磁 界信号に対するセンサ出力を測定する.空間的に均一 な磁界信号として,3 軸ヘルムホルツコイルのうち印 加静磁界 *B*₀に垂直な x 軸と s 軸に信号用コイルを巻く ことで,それぞれの軸方向に空間的に均一な磁界を印 加する.また,不均一な磁界信号として,図2に示す ようにガラスセルの横に z 方向と平行に張り付けた直 径 0.5 mm の金属線を用い磁界信号を発生させる.発生 した磁界の一部はガラスセル内を透過し,センサ領域 における磁界信号の測定を行う.それぞれのコイルと 金属線は Function Generator (FG)に接続し,70 kHz の信号を印加することで,交流磁界信号を発生させる.

3 測定結果

3-1 ヘルムホルツコイルによる均一磁界の測定結果 x 軸方向への信号磁界印加用ヘルムホルツコイルに 対して FG から 0 V, 10 V の 70 kHz 交流電圧を印加し

た場合の、ミラー走査によって得られたセンサ出力の 分布画像を図3(a)、(b)にそれぞれ示す. x軸に平行な 点線で囲まれた領域がガラスセルの内部(横幅10mm) を投影しており、その中を円形にレーザ光が透過して いる.コイルへの印加電圧が0Vの時、システムや外 来の磁界ノイズによる影響はほとんど見られず、ガラ スセルの内外やレーザ光の照射領域に関係なく一定の 低い出力が得られた.印加電圧が10Vの時には、ガラ スセル内部の領域のうち、レーザ光が透過した円形の 領域においてのみ、センサ出力の増加が確認できた. また、図3(b)のレーザ光の透過領域における出力値の 平均値を算出し、測定対象信号の印加電圧を変化させ た時の値を図4にプロットした.青いプロットがセン サ出力の平均値で左側の軸に対応しており、オレンジ 色のプロットは磁界校正用の市販テスタ(Narda S. T. S



図 2. ガラスセルに張り付けた信号発生用の金属線



図 3. ヘルムホルツコイルへの印加電圧 (a)0 V(b)10 Vの時の AC 磁界分布画像



図 4. 印加信号強度に対するセンサの出力値

ELT-400)の測定値は右側の軸に対応している.市販テスタのノイズレベルである 60 nT よりも低い磁界強度 領域において、本センサの出力は印加信号強度に対して線形に推移している.

3-2 金属線から生じる不均一磁界の測定結果と信号源の深さ位置推定

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 5 に示す. 金属線は画像の左側中央には位置してあり、 得られた画像は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 加が見られる.特に金属線付近でのセンサ出 力の増大が確認できており,信号源位置の直 感的な理解が可能となる.この画像全体を用 いて信号源の深さ位置推定を行う場合、先述 のセンサとして動作する光照射領域の形状が 推定誤差を引き起こす.このため、図5の赤 い点線で示した長方形 (4.6×9.7 mm, 23×33 画素)の領域を信号源の深さ位置推定に用い た. 比較対象として用いる計算による磁界強 度分布を図6に示す.計算にはアンペールの 法則を用い、センサ感度が最も高くなる x 軸 方向のみの磁界強度を各点において算出しプ ロットした. この計算によって得られた磁界 強度分布と測定によって得られた結果をそれ ぞれ正規化して強度プロファイルを比較し, 最も差が少ない位置を導出することで信号源 の深さ位置推定を行った.

推定結果はガラスセル内壁より 1.41 mm の 深さとなり、実際の深さである 1.25 mm より も少しだけ大きな値となった.しかし、用い た金属線の直径が 0.5 mm である事を考慮する と、十分に高い精度で深さ位置が推定できて いることがわかる.





図 5. 金属線への印加電流 20 mA の時の AC 磁界分布画像

図 6. 計算によって得られた, x 軸方向にのみ感度を 有する場合の磁界強度分布

3-3 2方向磁界成分の分離

本研究で用いる磁界センサは原理上,印加する静磁界 B₀に垂直な方向の磁界成分に感度を有する.このため,先述の実験では x 軸方向への磁界に対するセンサ出力を用いて画像化を行っていた.一方で,本センサは図 1 に示す s 軸にも感度を有するため,それら 2 方向の磁界成分の分離が可能であれば,信号源位置検出 精度の向上が期待できる.2 方向を分離するアイデアとして,位相検波による分離を採用した⁴.本手法は ロックインアンプの In-phase と Quadrature の出力成分を取得するだけで容易に可能であり,1 度の測定で 2 方向を同時に検出可能となる.

はじめに,原理確認実験として, x 軸と s 軸に対応する 3 軸ヘルムホルツコイルにそれぞれに巻かれた測 定信号発生用のヘルムホルツコイルを用いて各軸から空間的に一様な磁界を発生させ,それらの出力を観測 した. 観測には DMD の機能をキャンセルし,センサからの出力全体を取得した.センサの磁気共鳴現象によ る出力特性を理解するため,各軸からの信号磁界を印加した状態で,静磁界 B₀の強度を変化させて,ロック インアンプの出力を観測した.

x軸とs軸それぞれのコイルから信号磁界を発生させた測定結果を図7(a),(b)に示す.ロックインアンプのIn-phase成分を黒丸で,Quadrature成分を白丸でプロットした.静磁界 B₀の強度を変化させることで,x 軸の信号に対してはQuadrature成分が,s軸の信号に対してはIn-phase成分が同じ静磁界強度約2.6において信号強度の増大を示している.このことから,この静磁界強度において磁気共鳴が生じており,x軸の 信号に対しては In-phase 成分が, s軸の信号に対し ては Quadrature 成分が分散曲線のような特性を示 すことが確認できた.これらの特性はセンサ原理に 直接関係しており,センサ出力の周波数帯域幅や感 度といった重要なパラメータを示している²⁾.これ らの結果から,静磁界強度を最も磁気共鳴が生じる 値に調整することで,ロックインアンプの In-phase 成分は s軸からの信号のみを出力し,Quadrature 成 分は x軸からの信号のみを出力することが分かる. 実際の出力では振幅と位相角が出力されるため,位 相角から 2 方向成分の分離が可能となる.

2 方向磁界成分の分離の一例として、図7 に金属 線から出力された磁界の振幅分布画像(上)と位相 角の分布画像(下)を示す.金属線は z 軸方向に設 置されており、それを取り囲む磁界は x 軸方向の成 分が多くを占める.しかし,金属線のx軸位置より も上もしくは下の領域では y 軸方向の磁界成分が上 下で逆方向に生じる. センサが感度を有する s 軸方 向の成分は y 軸方向の成分の 1/√2 となる. 図 7 (下) の位相角の変動は検出される s 軸成分によるもので, 金属線を取り囲む磁界の方向により,金属線の x 軸 位置の上下で逆方向に生じている. その結果, 計測 される位相角も金属線の x 軸位置が 90 度となり,上 側がより大きく、下側がより小さく出力されている. 得られた位相角の値から, s 軸方向の磁界成分を換 算でき,その値から y軸方向の磁界成分も算出でき る.これらの結果から、図7に示す磁界強度分布の ベクトル表示を実証できており、現在論文執筆中で ある.

4 まとめ

これまでのアルカリ金属を用いた光磁界計測は 1 つのガラスセルで1つの信号しか得られなかったが, 光の並列性を利用することで,単一セル内における 磁界の空間分布を得る事ができる.我々は,DMD を 画像化デバイスとして用いることで,70 kHz の交流 磁界に対して高感度(nT オーダー)で高分解能(サ ブ mm)な磁界分布の画像化に成功した.磁界分布の 画像化は空間分布の直感的な理解だけでなく,強度



図 6. 計算によって得られた, x 軸方向にのみ 感度を有する場合の磁界強度分布



図 7. ロックインアンプの振幅出力(上)と 位相出力(下)によって得られた分布画像

のプロファイルから磁界の発生源を推定できる.本研究では、金属線の位置を高精度に推定することに成功 した.数チャンネルのデータから信号源を推定していた従来技術と比較すると、画像化によって情報量が飛 躍的に増大し、位置推定精度の向上は明らかである.本技術は位置推定プロセスを改良することで、複雑な 形状や複数個の信号源にも対応可能である.また、磁界強度のみならず各画素における磁界の方向成分を取 り出せることを実証し、ベクトル画像の取得に取り組んだ.磁界の方向を示すことで、磁界を発生させる信 号源の方向や位置が推定できる可能性があり、信号源の位置だけでなく3次元形状も再構成によって推定で きる.

現在,本技術を用いた磁界分布の画像化に関して,より高速に高 SN 比での測定を目指して新たなアイデア の導入を検討している.磁界分布を画像化することで,学生への教育のみならず産業界や医療業界への応用 展開は必須であり、今後はより応用を目指した測定対象を用いて研究に取り組む予定である.

【参考文献】

- 1. レーザー光による原子物理, 藪崎 努 著, 岩波書店, 2007.
- 2. Optical Magnetometry, D. Budker and D. F. J. Kimball, Eds. Cambridge University Press, New York, 2013.
- 3. 「アルカリ金属を用いた交流磁界の光学検出 ~市販の磁界テスタとの比較と永久磁石を用いたプローブ 化の検討~」田上周路, 篠原 優, 豊田啓孝, 藤森和博, 深野秀樹, 電子情報通信学会和文論文誌 B, J100-B(3), pp. 158-165, 2017.
- "Magnetic Field Mapping and Biaxial Vector Operation for Biomagnetic Applications Using High-Sensitivity Optically Pumped Atomic Magnetometers," Shuji Taue, Yasuyuki Sugihara, Tetsuo Kobayashi, Kiyoshi Ishikawa, and Keigo Kamada, Jap. J. Appl. Phys., 50(11)(1), pp. 116604-1-6, 2011.

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
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 -信号源位置推 定に向けた検討-	信学技報 IEICE Technical Report, EMCJ2017-91(2018-01), pp. 19-23	2018 年 7 月
AC Magnetic Field Projection with Atomic Magnetometer	Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS2018), 2P15b-1	2018年8月
Magnetic field imaging with micro mirror array	The 8 th Japan-Korea Workshop on Digital Holography and Information Photonics (DHHIP2018)	2018年12月
光を用いた磁界分布測定	四国オープンイノベーションワー クショップ	2018年12月

〈発表資料〉