

修士論文

単一画素計測による光学式磁界イメージング

Optical measurement of magnetic field distribution

with single pixel imaging

報告者

学籍番号: 1245057

氏名: 田中 拓充

指導教員

田上 周路

令和4年2月18日

高知工科大学大学院工学研究科

基盤工学専攻電子・光工学コース

目次

・はじめに	1
第1章 光ポンピング原子磁気センサ(OPAM)	2
1-1 光ポンピングによるアルカリ金属のスピン偏極	2
1-2 静磁場印加によるラーモア歳差運動	4
1-3 磁気共鳴による光強度変調	6
第2章 磁界の強度分布出力に用いた画像処理	9
2-1 走査によるイメージング	10
2-2 計算機ゴーストイメージング(GI)	11
第3章 測定実験手順	14
第4章 光学式磁界センサとDMDの組み合わせによる磁界の計測	16
4-1 GIによる信号対雑音比の増加と極低周波磁界ノイズに対する ロバスト性の評価	16
4-1-1 バイナリランダムパターンによる高SN比の獲得	16
4-1-2 極低周波な環境磁界ノイズに対するGIのロバスト性の評価	19
4-2 ロックインアンプ(LIA)を用いた信号磁界の方向成分解析	22
4-3 コイルを用いた電磁誘導の可視化	27
・まとめ	34
・参考文献	35
・謝辞	36

・はじめに

近年、様々な電子デバイスが発達する中で、車やスマートフォンなどへの無線給電が導入されている。無線給電には大別すると磁界結合方式と磁界共鳴方式があり、どちらも送受信の対となるコイルを用いて空間中でエネルギーのやり取りをするものである。磁界結合方式では、送信用のコイルに電流を流し、受信用のコイルに近づけることで、電磁誘導によって受信用のコイルに誘導電流が生じ、デバイスの充電が可能となるものである。しかし、電磁誘導は受信用のコイルを鎖交する磁束によるものであるため、位置ずれによる伝送効率の低下が懸念される。一方で、磁界共鳴方式では共振を用いてエネルギーのやり取りを行うため、磁界結合方式よりは比較的位置ずれに強いことが知られている。しかし空間中に磁界が生じるため、空間的な磁界の分布を把握する必要がある。無線給電には数十 kHz 帯の電磁界を用いることが多く、強度によっては電磁誘導による熱作用により、人体に影響を与えることが懸念されている。[1]

機器から生じる電磁界の測定方法には、これまでコイルやアンテナを用いたプローブが使用されていた。これらのプローブを用いる際には、プローブ自身による測定対象電磁界への影響やプローブに接続される信号線への電磁界ノイズの影響を考慮する必要がある。このため、電磁界分布を測定するにはプローブを複数個配置できず、1つのプローブを走査するしか方法がなかった。一方で、電磁界に影響を及ぼさない非侵襲な測定手法が数多く提案されており、その中でも「光」を用いた電磁界計測方法が活発に研究されている。

本稿では、光学式磁界センサによって数十 kHz の磁界を測定し、ミラーアレイデバイスとの組み合わせによって強度分布の画像化を行うことで磁界の空間的評価を行うことを目的とする。光学式磁界センサにはアルカリ金属を用いた原子磁気センサを用いる。原子磁気センサは、センサ部となるアルカリ金属蒸気にも光ポンピングという手法でスピン偏極を生じさせ、任意磁場を印加することによって生じるラーモア歳差運動の周波数と、測定対象磁界との磁気共鳴によって高感度に測定を行う。強度分布の画像化に用いるミラーアレイデバイスは、画素構造のミラーアレイとなっており、任意の位置のミラー角度を変更することで光の空間分解を可能とする。このミラーアレイを用いて空間分解した光を、1つのディテクタで受光することで単一画素計測による画像化を実現する。画像化の手法として走査とランダムパターンを用いた計算機ゴーストイメージングを適用した。

実験では、光学式磁界センサによって交流磁界の強度分布測定を様々な条件で行い、それぞれについてまとめた。

第1章 光ポンピング原子磁気センサ

磁界センサは測定対象となる信号の強度や周波数などによって、コイルやホール素子、超伝導量子干渉計〔SQUID (superconducting quantum interference device)〕など様々なものが用いられる。例えば心磁場など pT オーダーの微弱な生体磁気計測を行う際は、SQUID を用いることで超高感度磁界測定による生体磁気の観測が可能となっている。また、光を用いた電磁界センサとしては、電気光学結晶や磁気光学結晶を用いたセンサが有名であり、小型化も可能で高周波領域での実用化も実現されている。

一方で、プローブ部分の金属量を極端に少なくできる光ポンピング原子磁気センサ (OPAM : Optically-Pumped Atomic Magnetometer) が注目を集めている。このセンサはアルカリ金属蒸気の光ポンピングによるスピンの偏極を利用したセンサであり、磁界の変化を光の強度や偏光方向の変化として高感度に捉えることが可能となる。

光ポンピングを利用した磁界センサは1960年代に開発され、センサ部分に用いるガスや高精度・高出力光源の誕生によって改良が重ねられており、近年では SQUID と同等かそれ以上の感度を有するセンサも実現できている。

本研究で用いる光ポンピング原子磁気センサは、センサ部分にアルカリ金属である Cs 蒸気を用いる。Cs の融点は28.44 °Cと比較的低いことから、室温でも測定に十分な Cs 蒸気を利用することが出来る。センサである Cs 蒸気に吸収波長レーザを円偏光にして入射し、任意の静磁場 B_0 を印加することで生じる磁気共鳴による光の強度変調を測定することで、対象磁界の測定が可能となる。

・ 1-1 光ポンピングによるアルカリ金属のスピン偏極

すべての原子はとびとびの値でエネルギーを持っており、熱や光などで特定のエネルギーを受けると励起準位へ状態が遷移する。そのエネルギー準位は原子によって異なり、最外殻電子に依存する。

本センサで用いる Cs の最外殻電子は P 殻の 1 つであり、基底準位、励起準位は Cs の原子核や電子のスピン相互作用によって超微細構造に細分化される。(図 1) [2]. この超微細構造は磁場中において、磁場方向に順方向と逆方向スピンの存在によりさらに複数の準位に分かれる (ゼーマン分裂)。この準位間に電子占拠数の差を作り出す方法として、基底準位と励起準位の差に相当する周波数を持つ光を円偏光にして照射する方法がある (光ポンピング)。電子占拠数の差を作ることで、スピンの向きを揃えること (スピン偏極) が可能となる (図 2)。偏極されたスピンは外部の磁界変動に応答するため、この応答を観測することで磁界計測が可能となる。

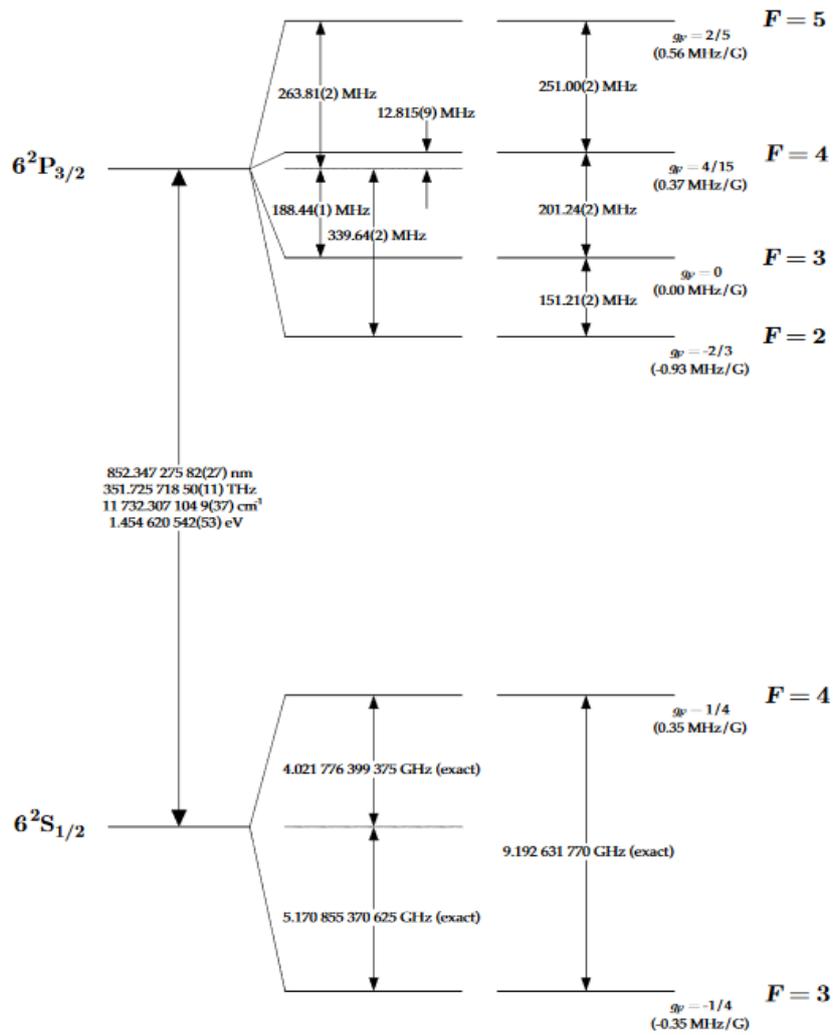


図 1. CsD2 線のエネルギー準位遷移図 [3]

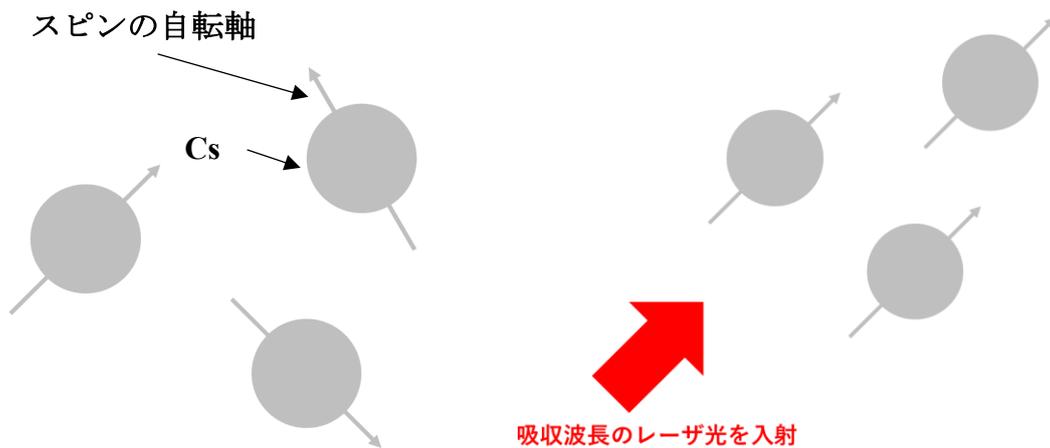


図 2. (左) Cs 原子のスピ軸,
(右) 吸収波長レーザー照射後の原子のスピ軸の一致

・1-2 静磁場印加によるラーモア歳差運動

センサ部となるガラスセル内に封入された Cs 原子は、吸収波長のレーザ光による光ポンピングによって光軸方向にスピンの偏極をされている。ガラスセルには、Cs とともにバッファガス（ヘリウムガス）とクエンチングガス（窒素分子）が封入されている。バッファガスは Cs 原子のスピンの衝突することでスピンの緩和を防ぐ緩衝材のような役割をしている。また、Cs 原子が光ポンピングするために光吸収をした場合、そのままでは自然放出光を発することで脱励起が生じる。この自然放出光はランダム方向に無偏光状態で生じるため、Cs 原子が再吸収を行いスピンの緩和される。この再吸収を防ぐため、自然放出に相当するエネルギーをクエンチングガスである窒素分子の振動や回転エネルギーとして消費させる。これらのガスは光ポンピングによるスピン偏極を効率的に生じさせるためにガラスセル内に封入されている。（図3）

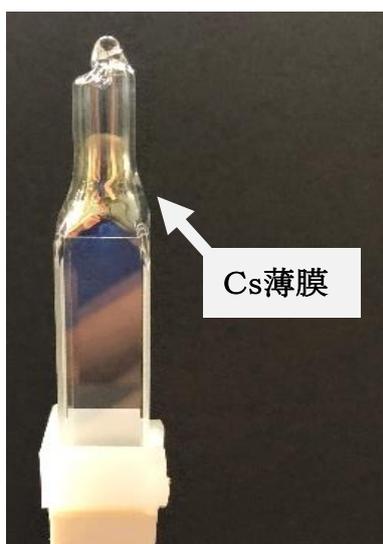


図3. Cs 蒸気とバッファガス，クエンチングガスの封入されたガラスセル

スピン偏極を行った Cs 原子をセンサとして扱うためには、レーザ入射方向に対して45度方向に適切な強度の静磁場 B_0 を印加する必要がある。 B_0 磁場を印加することで、スピンは磁場を中心に歳差運動を行う（図4）。

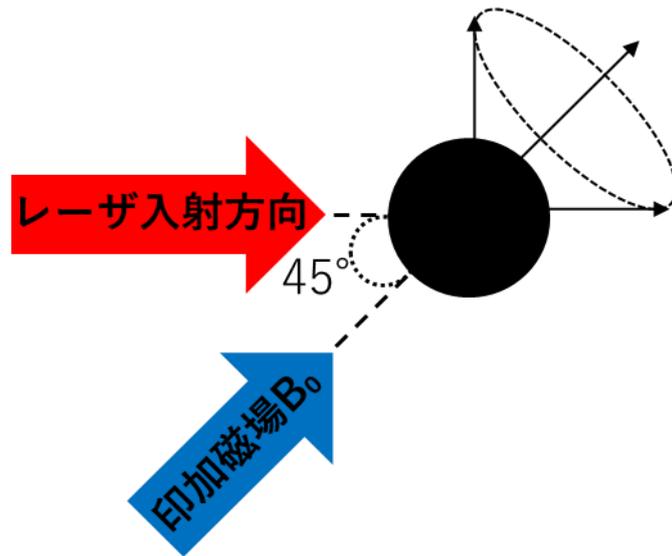


図 4. 任意静磁場 B_0 印加によるスピン軸の歳差運動

ここで、この歳差運動はラーモア歳差運動と定義され、その歳差運動周波数は式(1)のように示される。

$$f = \frac{\gamma}{2\pi} \times B_0 \quad (1)$$

式(1)より、 f は静磁場 B_0 印加時における歳差運動の角周波数、 γ は磁気回転比であり原子ごとに固有の値を持つ (Csの磁気回転比は $\gamma/2\pi = 3.5 \text{ Hz/nT}$)。

一般に、地球上のすべての空間には地磁気が作用しており、日本における強度はおよそ $45 \mu\text{T}$ である。しかし本研究では印加する静磁場 B_0 を、測定対象の交流磁界の周波数に応じてある強度で任意の方向に設定する必要がある。そこで、印加する磁場 B_0 以外の外部磁場をセンサ部に作用させないように3軸のヘルムホルツコイルを用いた。(図5) ヘルムホルツコイルは性質上、対となる2つのコイルの中心に任意の磁界を空間的に均一な強度で発生させることができる。各コイルには3つの定電流源から電流を流すことで磁界を発生させ、電流値を変調させることでセンサ部分に印加する磁界強度を調整した。センサとなるガラスセルは3軸ヘルムホルツコイルの中心に設置している。

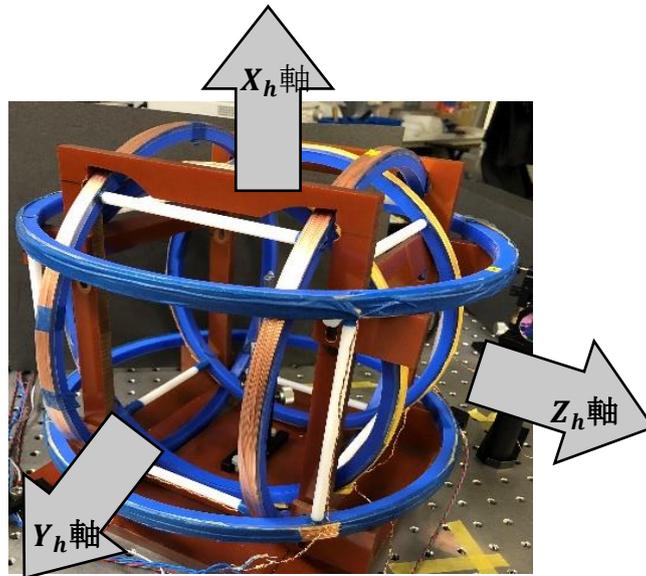


図 5. 任意静磁場 B_0 印加のための 3 軸ヘルムホルツコイル
(X_h 軸 : 30cm, Y_h 軸 : 24cm, Z_h 軸 : 26cm)

・ 1-3 磁気共鳴による光強度変調

設定した強度で静磁場 B_0 を印加することで、センサ部分に封入した Cs 原子のスピンはラーモア周波数で歳差運動しているが、その位相は不揃いである。そこに、 B_0 磁場に対して垂直な方向に交流磁界を印加する。ここで、印加した交流磁界の周波数が式(1)より求められるラーモア周波数と同値である時、電子スピンの歳差運動が最大となる (磁気共鳴)。

入射したレーザーのガラスセル透過光強度は、磁気共鳴した Cs 原子のラーモア歳差運動によって変調される。その透過光の強度は、スピンの軸が光軸と一致したとき最大となり、光軸と直交したときに最小となる。磁気共鳴が強いときこの変調の幅が大きくなり、光強度の変調の振幅として観測できる。(図6)

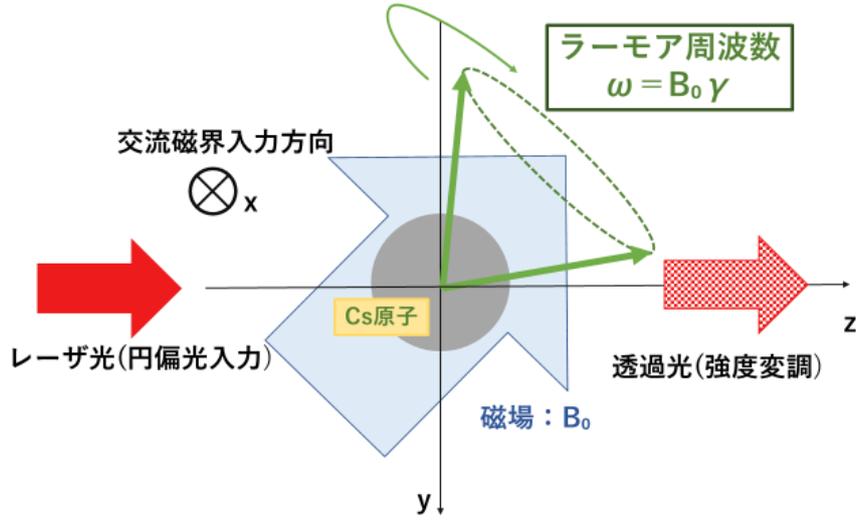


図 6. Cs の磁気共鳴による透過光強度の様子

また、本センサは静磁場 B_0 を軸として垂直な2方向に感度を持つ。[4]このことはブロッホ方程式(Bloch eq.)より導かれ、下に示す式(2)のように記述される。

式(2)より、最初の項は磁界中における歳差運動の緩和を示している。2項目は、 B_0 磁場を軸として生じる歳差運動の縦緩和(γ_1)と横緩和(γ_2)を表す。3項目は、円偏光を用いた光ポンピングに関する項である。

$$\begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \gamma_F B_{rf} 2 \cos \omega_{rf} t & & \\ & 0 & \\ & & \gamma_F B_0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \gamma_2 M_x \\ \gamma_2 M_y \\ \gamma_1 M_z \end{pmatrix} + \Gamma_P \begin{pmatrix} -M_x \\ M_0 \sin \theta - M_y \\ -M_0 \cos \theta - M_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

図 7 より光ポンピングに用いた CsD2 線のエネルギー準位に対応した吸収波長のレーザー光をアルカリ金属に照射し、歳差運動のための静磁場 B_0 は y-z 平面上で角度 θ をもって印加される。磁気共鳴に用いる交流磁界(B_{rf})は x 軸方向に印加する。

式(2)を解くと、式(3)、式(4)より出力 $P_{ip}(\delta)$ 及び $P_{qu}(\delta)$ が得られる。

$$P_{ip}(\delta) = -P_0 \sin(2\theta) \frac{\Omega_{rf} \delta}{\Omega_{rf}^2 \Gamma_2 / \Gamma_1 + \Gamma_2^2 + \delta^2} \quad (3)$$

$$P_{qu}(\delta) = -P_0 \sin(2\theta) \frac{\Omega_{rf} \Gamma_2}{\Omega_{rf}^2 \Gamma_2 / \Gamma_1 + \Gamma_2^2 + \delta^2} \quad (4)$$

(3)は同相成分, (4)は直交成分といい, それぞれ静磁場 B_0 に対して垂直な2軸を示す. ここで, $\Omega_{rf} = \gamma_F B_{rf}$ はラビ周波数を示し, $\delta = \omega_{rf} - \omega_L$ は印加交流磁界(B_{rf})とラビ周波数との差を表す. また, 定数 P_0 は入射光強度やアルカリ金属の原子数など様々な要因を含んでいる. 式(3),(4)より, 得られるセンサ出力が最大となるのは, 共鳴波長レーザ入射方向と静磁場 B_0 印加方向のなす角 θ が 45° の時であることが分かる. 印加する交流磁界 B_{rf} が式(1)で求めたラーモア歳差運動の角周波数と一致している時, P_{ip} と P_{qu} の式に含まれる δ は0に近い値をとる. このため, ラーモア歳差運動の角周波数と同値の交流磁界 B_{rf} をx軸から印加した際, 出力は直交成分 P_{qu} となる.

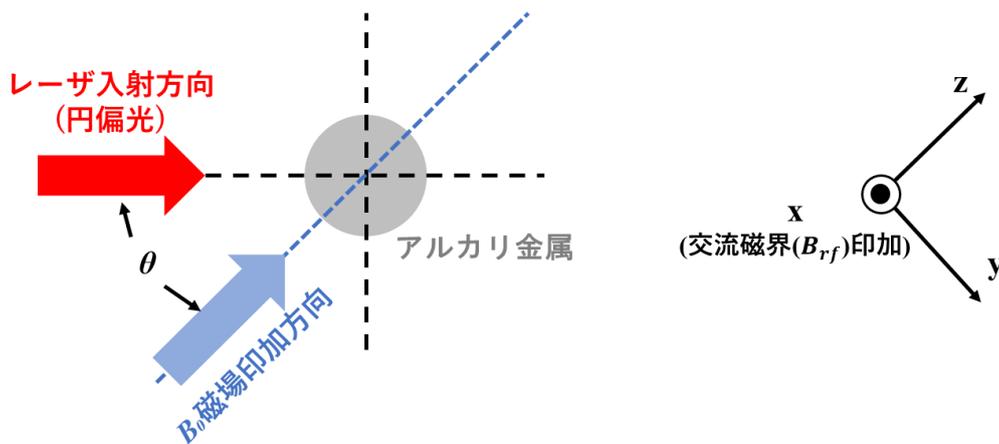


図 7. Mx-magnetometer セットアップ

これらの成分はロックインアンプ(LIA)を用いて印加する交流磁界との位相検波を行うことで検出することが可能であり, 空間的な磁界の解析が可能となる.

第2章 磁界の強度分布に用いた画像処理

本研究では、交流磁界の空間的な強度分布を画像化し、評価することを目的としている。そこで、第1章より Cs の磁気共鳴によって強度が変調された透過光を空間的に分解する必要がある（図 8(左)）。透過光の空間変調には、デジタルマイクロミラーデバイス（DMD）（図 8(右)）を用いる。

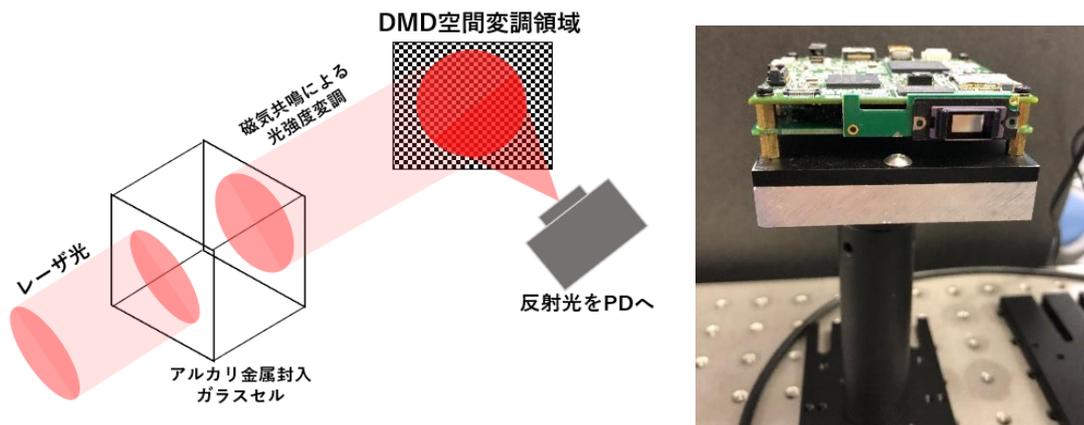


図 8 (左) ガラスセル透過光の空間的分解
(右) 使用した DMD [DLP 0.3 WVGA Chipset]

DMD のミラーアレイ面では 608×684 mm の領域にマイクロミラーアレイが配列されており、それらを制御することでガラスセル透過光の空間分解を行う。（図 9）制御は 0, 1 の信号で各ミラーの方向をデジタル的に操作する。

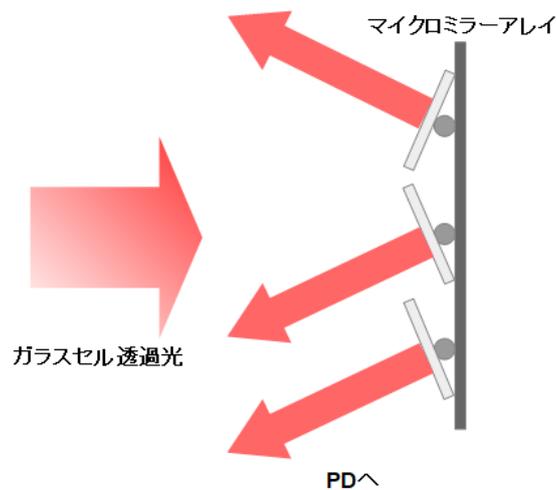


図 9. DMD のマイクロミラーアレイによるガラスセル透過光の空間分解

空間的に分解された光は，フォトディテクタ（PD）にて受光し，A/D変換ののちにLabviewによって処理され，PC上に画像を出力する．LabviewとはVI(Virtual Instruments)というアイコンを用いたグラフィック型言語によってプログラミングできる開発環境の事である．

・2-1 走査によるイメージング

画像構成方法の一つとして，DMDのミラーアレイに走査パターンを用いるイメージングを行った．動作としては，センサ部で磁気共鳴によって変調したガラスセル透過光を，ミラーアレイで1画素ずつ順にPDへ反射する．測定は出力画像の画素数と同じ回数行う．

Labview内の処理は図10のとおりである．走査パターン生成と記した部分にて1という信号を作成し，これがPDへ反射させる白パターンになる．これを指定画素数分繰り返し，すべての測定を終えると，配列して画像として出力する．

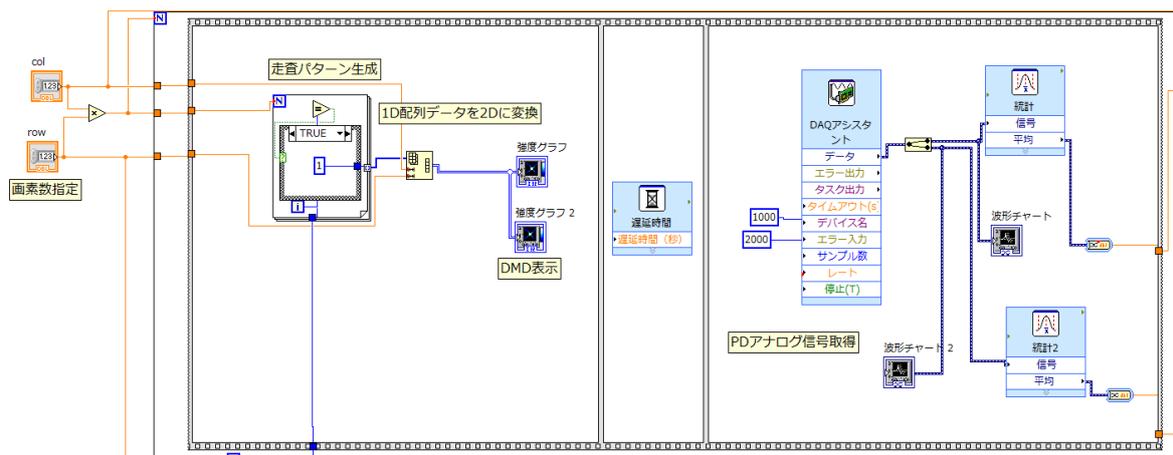


図 10. Labview ブロックダイアグラム (走査パターン生成)

図 11 はミラーアレイに走査パターンを表示した際のイメージである．白い部分がPDへ反射する部分であり，1画素ずつずらして測定する．各パターンは図 10 の遅延時間のシーケンスにて入力した時間表示を行い，指定した時間分サンプリングを行った．その後測定値を正規化し，255 階調で画像出力を行った．

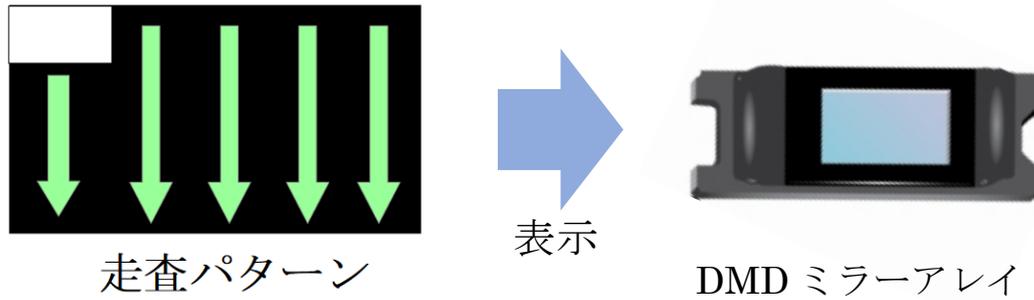


図 11. DMD ミラーアレイへの走査パターン表示

・ 2-2 計算機ゴーストイメージング (GI)

第2章-1より，走査によるイメージングでは，出力画像の画素数の増加に反して単位画素当たりのミラー面積が小さくなり，PD へ反射される光強度が弱くなる．そのため増幅無しでは信号が取得できないという問題が生じる．

そこで，バイナリランダムパターンを用いたイメージングによりこの課題を解決する．バイナリランダムパターンでは0，1の2値信号をランダムパターンとして生成する．つまり，おおよそ半分の光が PD へ反射されることより信号強度，信号対雑音 (SN) 比の増加が期待される．

ランダムパターンはミラーアレイの走査と同様に Labview を用いて測定回数分生成し，画像化の方式に沿った処理でイメージングを行った．図 12 にバイナリランダムパターンを生成するプログラムを示す．バイナリランダムパターン生成シーケンスでは乱数を 2 値化し，それを 255 階調，つまり白と黒のミラーパターンとしている．次シーケンスでは適当な表示待機時間を設け，指定した時間分サンプリングを行った．その後測定値を正規化し，255 階調で画像出力を行った．

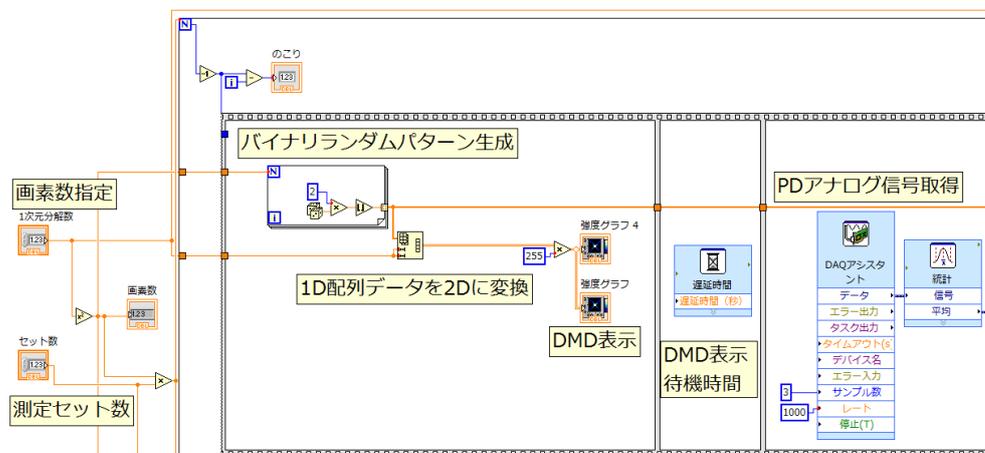


図 12. Labview ブロックダイアグラム (バイナリランダムパターン生成)

図13にバイナリランダムパターンを DMD ミラーアレイに表示した際のイメージを示す。図12のプログラムにより生成されたバイナリランダムパターンは出力画素数分、つまり測定回数分表示を行い、パターンごとに測定して演算処理を行った。

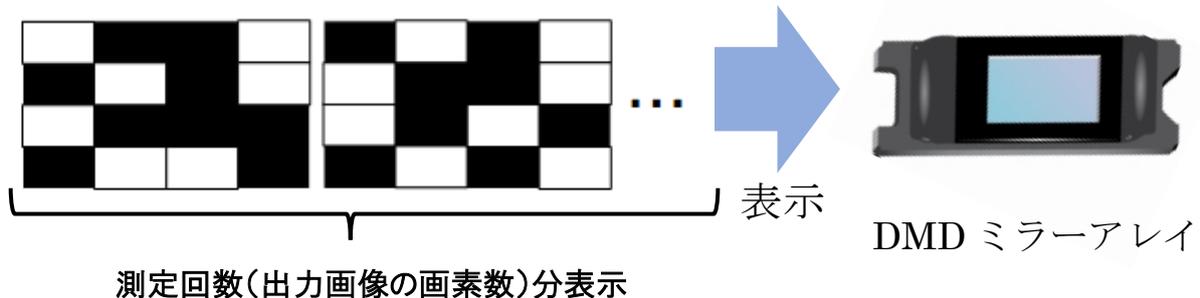


図 13. DMD ミラーアレイへのバイナリランダムパターン表示

なお、一般に単一画素検出器で測定し、イメージングする手法はシングルピクセルイメージングと称される。しかし、画像の構成方法によっては細かく分類されている。そこで、本項では計算機ゴーストイメージング(GI)について説明する。GIとはコヒーレント光の散乱特性を利用する光イメージング法であり、イメージセンサを用いずに測定対象の構造情報を得る事が最大の特徴である。[5]

ここで、GIにおける信号処理を説明する。GIでは式(5)に基づいて画像化を行った。

$$T(x,y) = \langle B_i R_i(x,y) \rangle - \langle B_i \rangle \langle R_i(x,y) \rangle \quad (5)$$

式(5)より、出力画像を $T(x,y)$ 、 B_i ($i=1,2\dots m$: 測定回数) は PD で得た測定強度データ、 $R_i(x,y)$ ($i=1,2\dots m$: 測定回数) は DMD に表示したランダムパターンの画像情報、 $\langle \rangle$ は測定回における集合平均を示している。第1項目では PD からの測定強度データと、その測定回の時のランダムパターンを2次元データ(画像情報)として掛け合わせ、測定回数 i で割ることで集合平均としている。第2項では、PD からの強度データとランダムパターンそれぞれの集合平均をとったのちに掛け合わせている。2つの項はそれぞれ指定出力画素分の画像情報を持っており、その差(ゆらぎ成分)を求めることで画像出力を行う。一般に、GIによる測定では測定回数に比例して出力画像の精度が上がるとされている。

図14に Labview での GI 実行ブロックダイアグラムを示す。測定までのシーケンスでは測定値 B はランダムパターンごと(測定回ごと)に指定サンプリング数測定し、

各回における測定値は平均をとって1つの値としている。この値は生成されるランダムパターンとともに一度外部ファイルへ書き出している。次のシーケンスでは、式(5)より、第1項目となる測定値 B と、ランダムパターン R を測定回ごとに掛け合わせたものの平均を求める過程と、第2項となる、それぞれの平均値を掛け合わせるプログラムを作成している。それぞれの値は測定回ごとに掛け合わされ、正規化したのちに255階調で画像出力している。

図15に走査と GI の処理フローをまとめた。

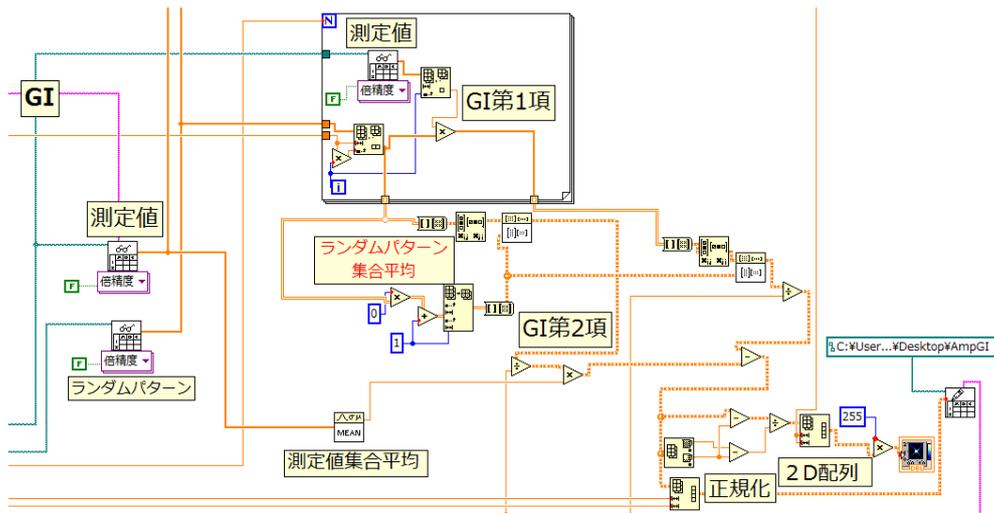


図 14. GI 実行プログラム

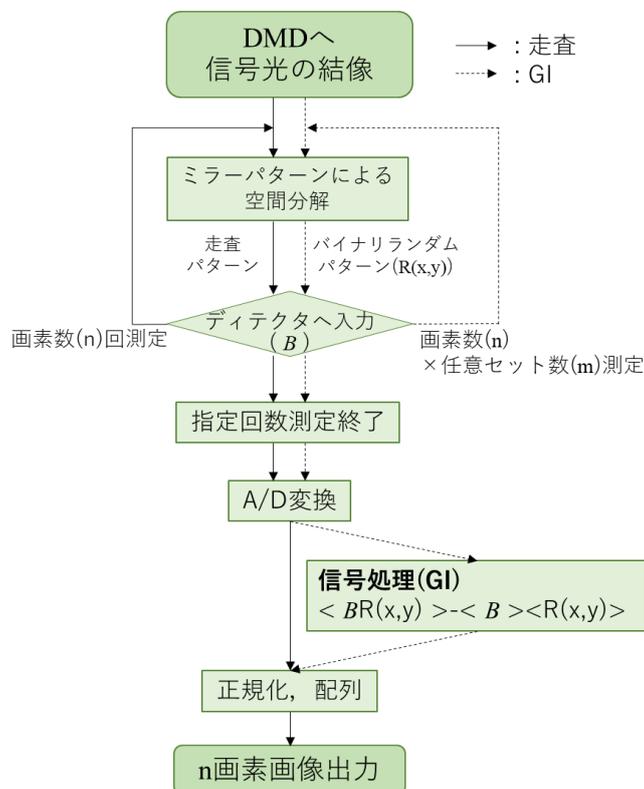


図 15. 走査と GI の処理フロー

第3章 測定実験手順

本研究で測定に用いた光学実験系の概略図とその実際の写真をそれぞれ示す。(図16,17)Cs の吸収波長である分布帰還型 (Distributed Feedback : DFB)レーザは光ポンピングのために $\lambda/4$ 波長板(QWP)で円偏光にした. 円偏光にしたレーザ光は Cs 封入ガラスセルの Cs 薄膜の付着していない領域に入射した. また, センサであるガラスセルにかかる磁場は静磁場 B_0 のみとしたい. そこで, 定電流源を接続した3軸ヘルムホルツコイルによって地磁気成分の縦方向を打ち消し, センサ部分にはレーザ入射方向に対して 45° 方向にかかる静磁場 B_0 のみになるように設定した. Cs 原子は吸収波長の円偏光レーザによって光ポンピングされスピン偏極する. 偏極されたスピンは印加静磁場 B_0 と, 測定対象となる交流磁界によって磁気共鳴を起こして歳差運動する. 磁気共鳴によるスピンの歳差運動の作用によって強度変調されたレーザ光は, 画像化するため 4f 光学系によって DMD ミラーアレイに結像され, 空間的に分解する. 空間分解は Labview より生成した走査パターン, バイナリランダムパターンを DMD のミラーアレイに表示することで行った. (第2章)各表示パターンによって反射された光は PD にて受光され, LIA において信号磁界との同期検波を行い, A/D 変換器 [BNC-2120]で アナログ-デジタル変換を行った. その後, 画像化手法に沿った処理を Labview 内で行い, PC 上で画像出力を行った.

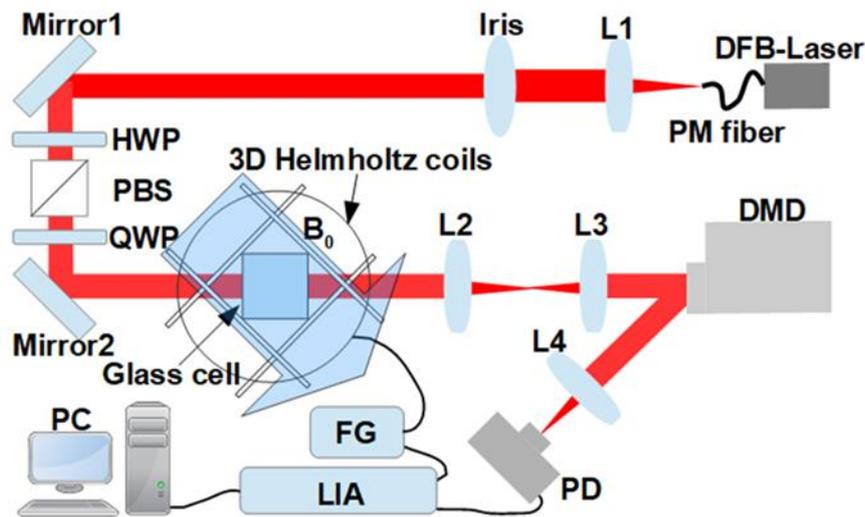


図 16. 実験光学系概略図

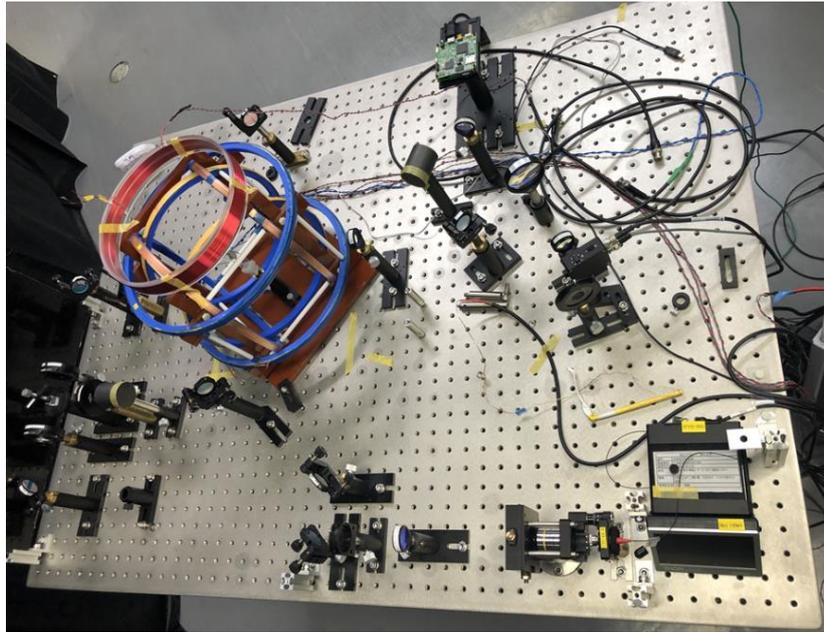


図 17. 実験光学系の写真

なお、本研究における計測系は単一画素計測(Single Pixel Imaging)と言われる構成であり、イメージセンサを用いる画像取得系のような光学結像系を必要としないことが特徴として挙げられる。

以降の4章では様々な測定を行うが、掲載している測定結果画像の評価方法は図18のようになる。図18はセンサ部分における光強度分布であり、センサ部分に照射される光は仕切り版で正方形に整形している。なお、正方形の一辺のサイズは4章-1,2では10mm, 4章-3では8mmに設定している。また、磁界センシングにおいては光を照射している領域で感度を持つ。

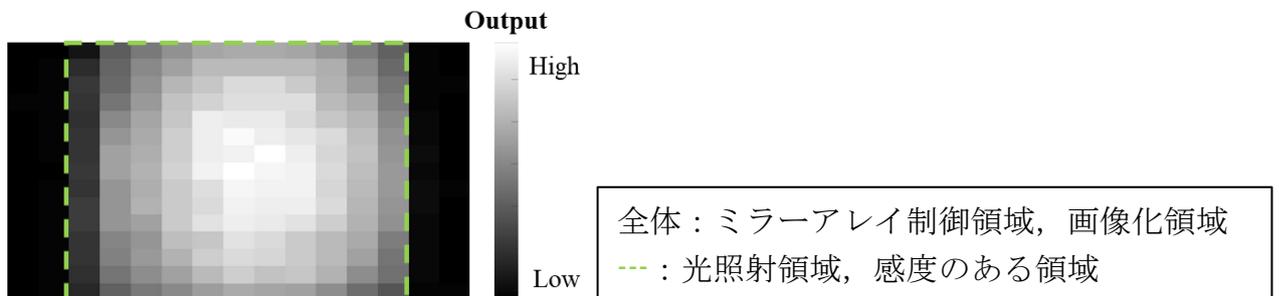


図 18. 出力画像の評価方法

第4章 光学式磁界センサと DMD の組み合わせによる磁界の計測

本稿では、光学式磁界センサと DMD の組み合わせによって交流磁界の測定を行い、空間的な強度分布の画像化によって評価を行っている。本実験系には非侵襲な測定やコンピュータシミュレーションをもちいることから、様々な特徴を有する。

そこで、以降3項に分けて特徴ごとの計測を行い、得られた結果をまとめた。

・4-1 GI による信号対雑音比の増加と極低周波磁界ノイズに対するロバスト性の評価

磁界センシングを行う際、環境磁界ノイズを削減するために磁気シールドを用いる。高周波の環境磁界ノイズに対してシールドは有効的に機能するが、極低周波な環境磁界ノイズに関してはシールドでキャンセルすることが困難である。磁界の空間的な評価を行うこと用途として、信号源の位置推定などに用いられる。この際、環境磁界ノイズが測定に影響すると、信号源の位置推定に支障が出ることが考えられる。

・4-1-1 バイナリランダムパターンによる高 SN 比の獲得

画像化に走査を用いた場合、単位画素あたりから得られる信号強度は画素数に反比例となる。そこで本稿では、画像処理に計算機ゴーストイメージング(GI)(第二章)を導入したコンピュータシミュレーションによって上記の課題の解決を実施した。GI では、磁気共鳴によって変調された信号光の空間分解にバイナリランダムパターンを用いる。バイナリランダムパターンでは、画素数によらず一定の光強度を得られることが期待できる。そこで、DMD のミラーアレイに走査パターンとバイナリランダムパターンを表示し、PD で受光した。ミラーアレイに表示する各パターンの画素数と PD で受光した光強度の関係を図 19 に示す。

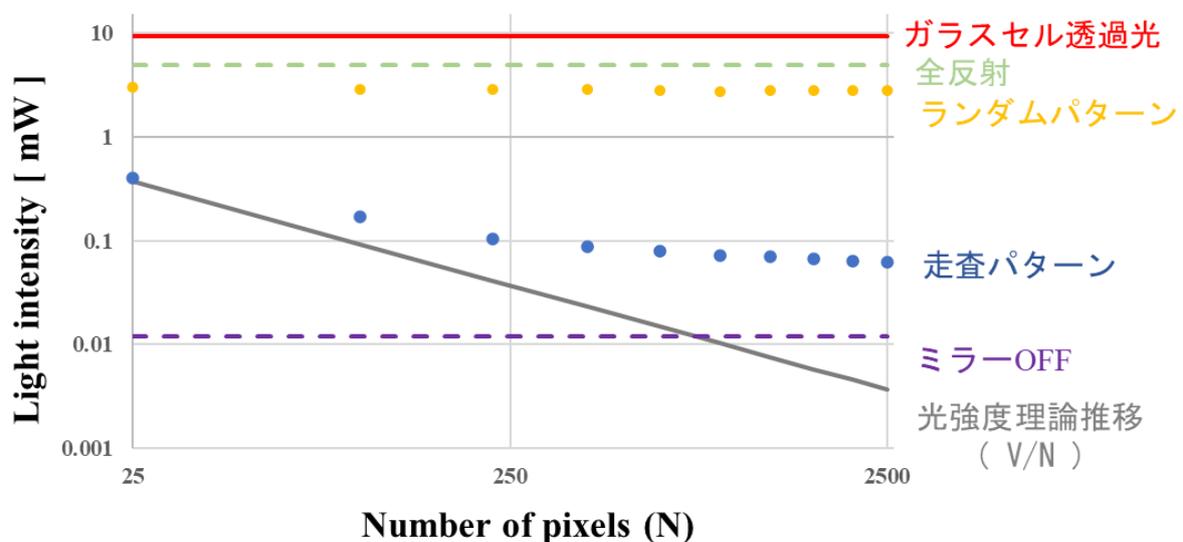


図 19. 表示パターンの画素数と取得光強度の関係

図 19 より, 横軸はミラーアレイに表示した画素数を, 縦軸は PD で受光した光強度を示す. 赤の実線が入力されるレーザ光の強度である. ミラーアレイ全反射を示す緑の破線において, 強度が下がっているのはミラーアレイの回折光によるロスのためである. 紫の破線はミラーアレイのすべてに 0 を入力した場合であり, PD への反射は無いが, ある一定の光強度が得られているのはミラーアレイの回折光によるものと考えられる. グレーの実線は予想される画素数による光強度の推移であり, 画素数に反して光強度が小さくなっていくような推移を示している. 青色のプロットは走査パターンによる画素数と光強度の関係を示しており, 250 画素を超えたあたりから光強度は一定の値を示している. これは, 単位画素当たりの光強度はグレーの理論推移の通りになるはずであるが, ミラーアレイの回折光によってある強度から下がらなくなっていることが分かる. このことから, ミラーアレイの走査では信号対雑音比が高画素で低くなることが予測される. 一方, 黄色のプロットで示されるランダムパターンでは, 変調がバイナリであるため, 画素数による光強度の変調が小さいことが分かる. これにより, 画素数によらず高い信号対雑音比が期待できる.

ここで, 解像度テストターゲット(図 20)をセンサ部分に設置し, 走査・GI でそれぞれ光強度分布の画像化を 50×50 画素で行い, 比較する. (図 21)

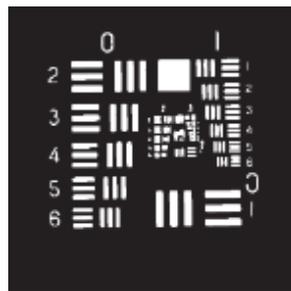


図 20. 解像度テスト用ターゲット(USAF-1951)

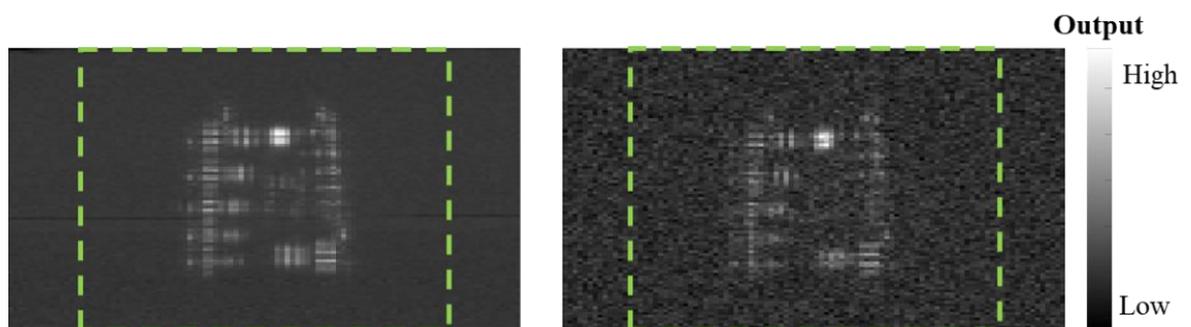


図 21. 解像度テスト用ターゲットを用いた光強度分布の画像化(左:走査, 右:GI)

図 21(左)より, 本実験系における走査では信号の増幅無しでは SN 比が悪く, 強度分布として評価できない. そのため, 受光部の PD で 50dB の信号増幅を行ったところ, ターゲットを認識することができた. 一方, GI では信号の増幅は必要なく, 測定セット数 1 回でも解像度テストと認識できる強度分布画像が得られた.

次に、GI では式(5)の第 2 項より、ノイズ成分を除去できることが期待されている。そこで、センサ部分に均一な磁界強度を発生させるようなヘルムホルツコイルを信号源とし、走査と GI で測定したものを市販の磁界強度テスタ(Narda S.T.S ELT-400)(図 22)との比較によって解析を行ったものを図 23 に示す。



図 22. 磁界強度の測定に用いた磁界暴露レベルテスタ

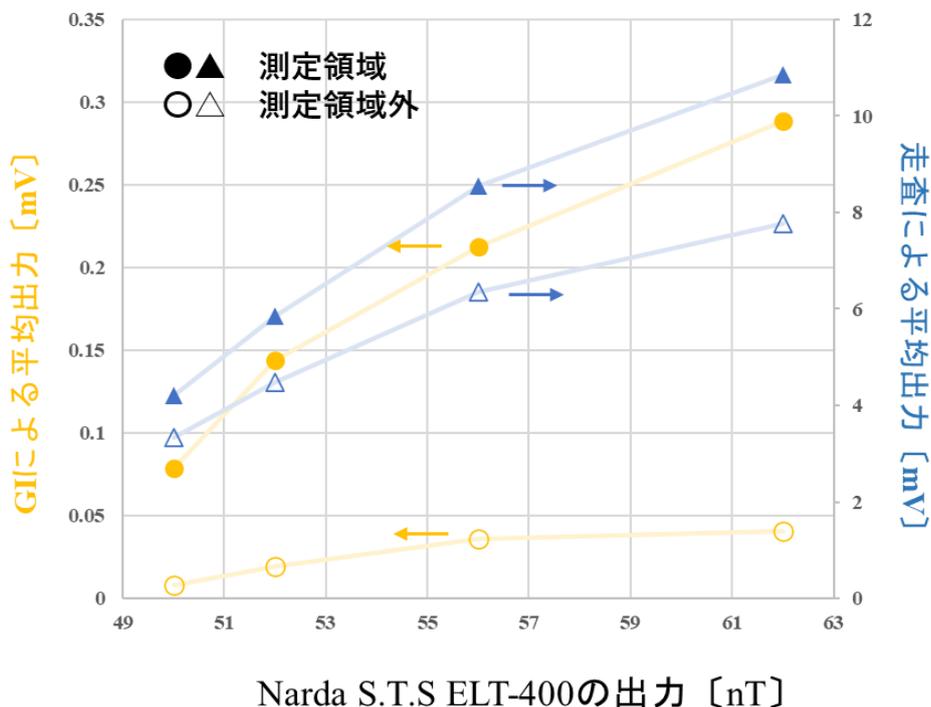


図 23. 入力磁界強度に対する走査と GI の出力

図 23 より、横軸は Narda S.T.S ELT-400 で測定した信号磁界強度の変化、両縦軸はそれぞれ GI と走査の出力を示している。走査では、測定領域の内側と外側ともに信号強度の増加につれて出力が増加している。測定領域外で出力が信号磁界強度に追従しているのは、

ミラーアレイの回折光によって測定外の領域にも磁界センサとしての出力が乗じているためと考えられる。一方 GI では、測定領域内では信号磁界の強度に追従しているが、測定領域外においてはおよそ一定の値に制限されている。測定領域外について、本研究の評価としてはノイズフロアとしているが、GI では走査に比べてノイズフロアが低減できていることが確認できた。

・4-1-2 極低周波な環境磁界ノイズに対する GI のロバスト性の評価

GI では回折光などのノイズに対するロバスト性が期待できる。そこで、センサ部分に極低周波な磁界ノイズのある環境下で測定を行い、GI のロバスト性を評価する。図 24 より、測定対象はセンサ付近に設置した金属線に 20mA の電流を流した際に生じる交流磁界とした。このとき、実験系の上側には空調が設置してあり、温度制御のために極低周波な磁界ノイズがある磁場環境となっている。この磁界ノイズが磁界強度分布に与える影響について、走査と GI で画像化することで評価を行った。

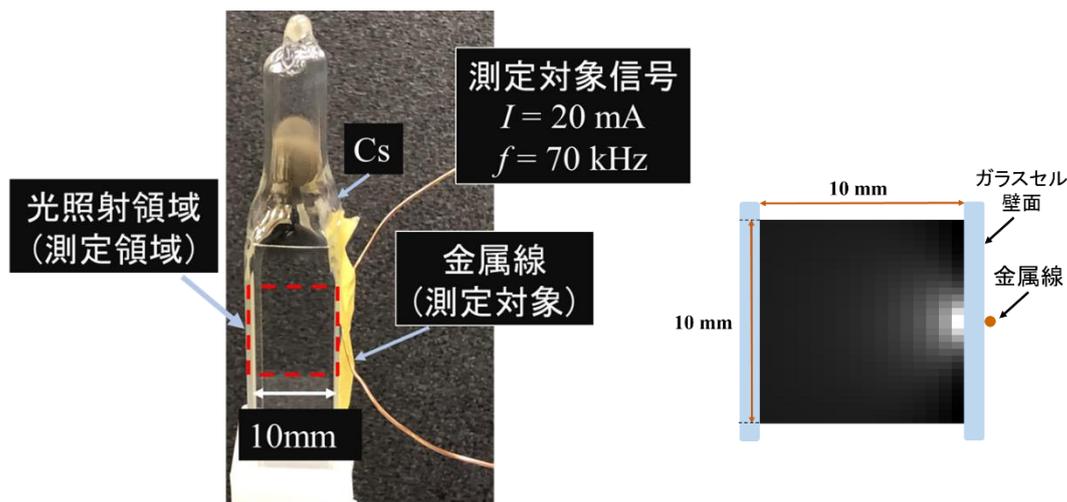


図 24. センサ付近に設置した金属線から生じる交流磁界の測定(左)と計算による磁界の強度分布(右)

図 25 に得られた磁界の強度分布画像を示す。走査・GI ともに 50×50 画素で出力しており、受光部の PD において適切な信号の増幅を行っている。赤い点線内側が光を照射している領域であり、感度を持つ。上側 2 枚の画像が空調稼働時、下側 2 枚が空調非稼働時であり、左側の 2 枚が走査による出力画像、右側の 2 枚が GI による出力画像である。

エアコン非稼働時について、走査・GI ともに金属線の位置する測定領域右側中心の強度が高くなるような分布画像が得られた。一方、空調稼働時については GI では非稼働時と同様の強度分布が得られたが、走査では空調の稼働による環境磁界ノイズが強度分布に縦縞として反映された。

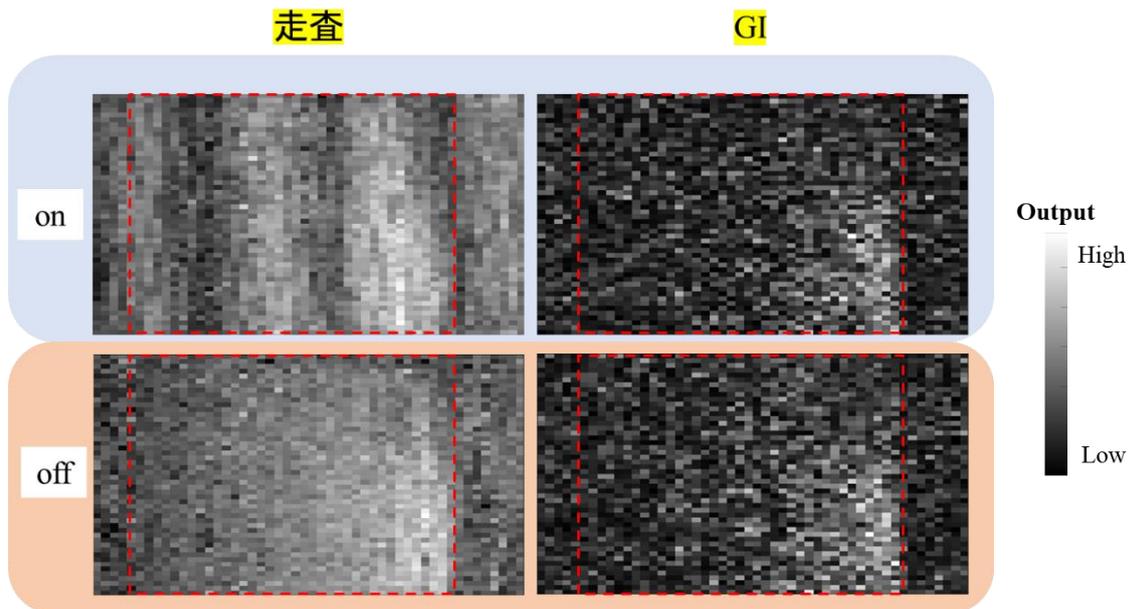


図 25. 測定領域右側に信号源を配置した時の走査と GI による磁界分布画像
 (上側)エアコン稼働時における走査(左)・GI(右),
 (下側)エアコン非稼働時における走査(左)・GI(右)による出力画像)

図 25 より、強度分布としては環境磁界ノイズが影響することが確認できたため、実際に測定データとして環境磁界ノイズが影響していることを確認したい。そこで、図 25 の 4 枚の強度分布画像を出力するにあたって得られた時系列データを図 26 にまとめた。

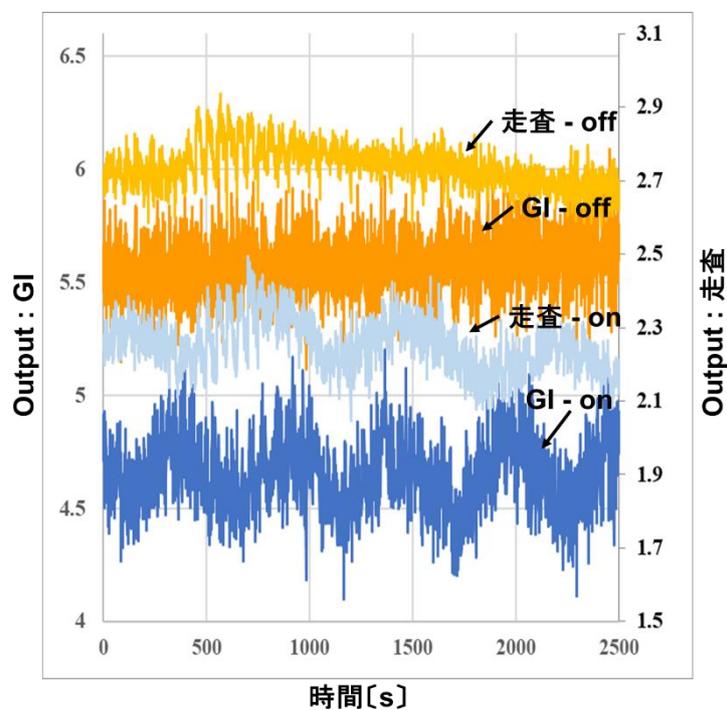


図 26. 測定時における出力信号の時系列データ

図 26 より、横軸が測定経過時間、縦軸の 2 軸が測定した時間ごとの取得信号強度を示しており、on が空調稼働時、off が空調非稼働時である。空調非稼働時のプロットについて、走査・GIともに低周波なノイズは乗じていないことが確認できる。一方、空調稼働時に関しては走査・GIともにゆらぎが測定時系列データに乗じており、その周波数はおよそ 0.002Hz の極低周波であることが確認できる。このような低周波な環境磁界ノイズが測定系に存在する場合、走査では強度分布に反映されるが、GI では極低周波な環境磁界ノイズの影響も少なく強度分布として評価が可能となる。

磁界強度の空間分布は信号源の位置推定に用いられる事がある。そこで、図 25 より得られた磁界の強度分布について、測定領域中の 6×3 mm の空間について、信号源から生じる交流磁界の計算強度分布(図 27)と得られた測定結果を比較し、定量的な評価を行った。比較には goodness of fit value(*g* 値) (式 6)を用いた。(式 6)より、 B'_i は計算結果の画素値、 B_i は測定結果の画素値を表し、*g* 値の値が高いほど一致しているという評価になる。[6]

$$g \text{ 値} = \left\{ 1 - \frac{\sum_i \{B'_i - B_i\}^2}{\sum_i B_i'^2} \right\} \times 100 \quad (6)$$

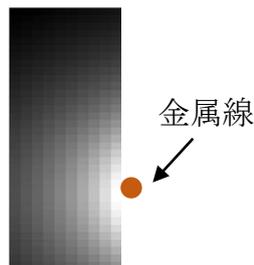


図 27. 計算による金属線から生じる磁界の強度分布(測定領域 6×3 mm²)

	空調on		空調off	
	走査	GI	走査	GI
比較領域				
<i>g</i> 値	39.2	72.8	56.7	74.7

図 28. 空調 on / off の 4 パターンについて求めた *g* 値

図 28 より, GI で得られた出力画像については空調稼働・非稼働によらず, 同程度の g 値が得られた. このことから, 環境磁界ノイズに対するロバスト性があるといえる. 一方, 走査で得られた出力画像について, 空調稼働時の g 値は非稼働時の g 値より低いものとなった. これは, 環境磁界ノイズに影響され, 正確な磁界の強度分布画像が得られていないためと考える.

このように, 光学式磁界センサで測定した磁界信号を GI によって強度分布画像として出力することで, 走査よりも高い SN 比が得られた. また, 極低周波な環境磁界ノイズに対するロバスト性も確認でき, 信号源の位置推定などに対する GI の優位性を示すことができた.

•4-2 ロックインアンプ(LIA)を用いた信号磁界の方向成分解析

第 1 章の 3 項より, 本センサには印加する静磁場 B_0 に対して垂直な 2 方向に感度を有し, それぞれ LIA を用いた信号交流磁界との位相検波によって抽出が可能となる. 図 29 より, x 軸方向の信号に対しては参照信号との位相差が 90° , y 軸方向への信号に対しては参照信号との位相差が 0° として LIA より抽出される.

本項では, 抽出した信号をそれぞれ画像処理することで信号磁界の方向などについての空間的な解析を行い, 磁界分布の計算結果と比較することで評価を行う.

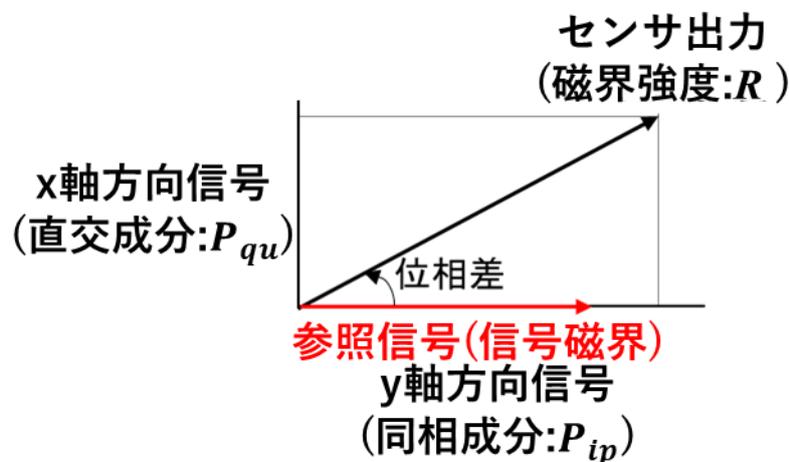


図 29. LIA における位相検波の測定原理

まず, 感度を有する方向への交流磁界印加によるセンサ出力について, 感度を有する成分ごとに画像化を行った. 測定対象はセンサが中心に来るように設置したヘルムホルツコイル(1巻, 直径 30 cm)(図 30)より, x 軸と y 軸にそれぞれ交流磁界を印加した. なお, センサとして機能するための静磁場 B_0 は $20 \mu\text{T}$ に調整し, 式(1)よりラーモア歳差運動の角周波数は 70 kHz と算出される. このことより, ヘルムホルツコイルから印加する交流磁界も 70 kHz とした.

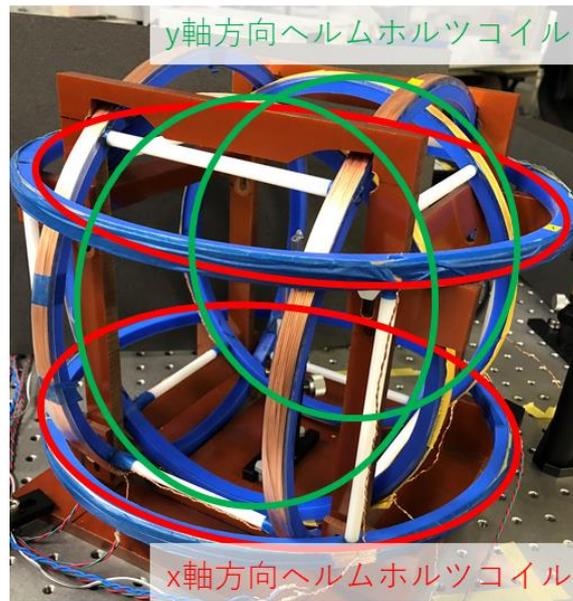


図 30. センサ部分に均一な磁界を発生させるヘルムホルツコイル

図 31 より, 赤い枠で囲った上段の画像が x 軸方向に信号を印加した際の強度分布, 緑の枠で囲った下段の画像が y 軸方向に信号を印加した際の強度分布であり, それぞれ左が同相成分, 右が直交成分である. また, 画像化には GI を用いており, それぞれ 15×15 画素, 30 セットの測定による画像処理を適用している.

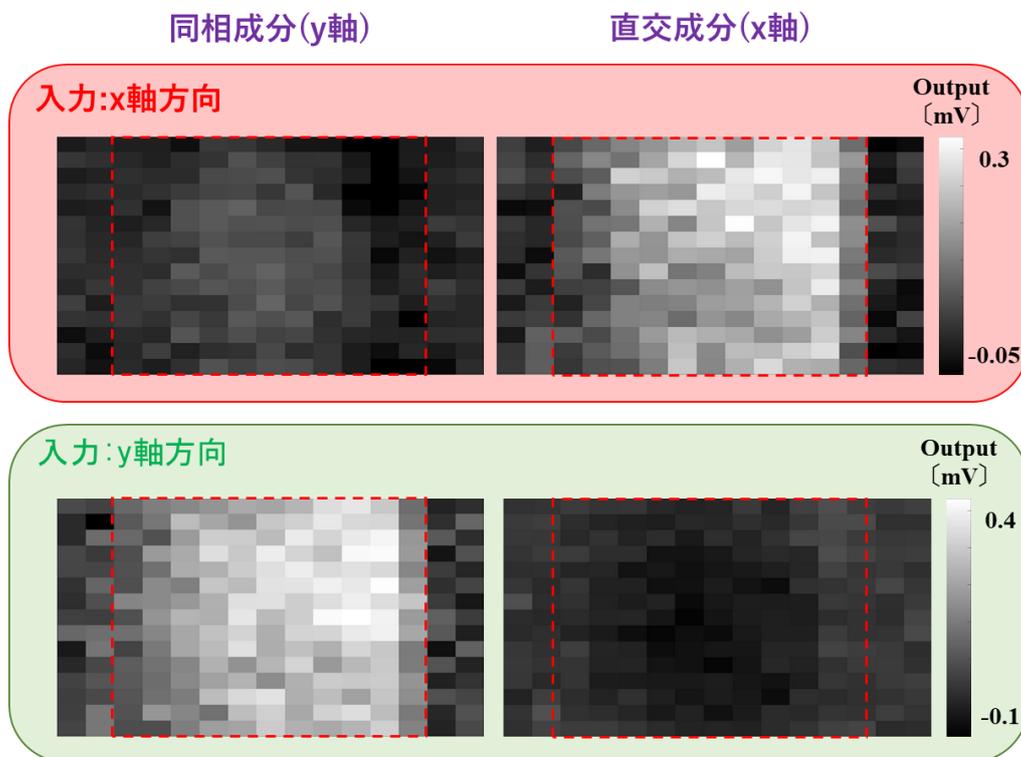


図 31. 感度を有する方向へ信号を印加した際の磁界の強度分布

図 31 の出力より, それぞれ信号が印加された軸に対して感度を有する方へのみ測定領域が均一になるような強度分布画像が得られた. このように, LIA による参照信号との位相検波によって感度成分を抽出し, それぞれに対して画像処理を行うことで評価が可能であることが確認できた.

次に, 測定対象を直径 10 mm のループコイルから構成される近傍磁界プローブ (KEYSIGHT RF R 50-1) に電流を流した際に生じる 70 kHz の交流磁界分布とし, 測定領域の上側に設置した. その際のセンサ部分と座標軸関係を図 32, 近傍磁界プローブとセンサヘッドの位置関係を図 33 に示す.

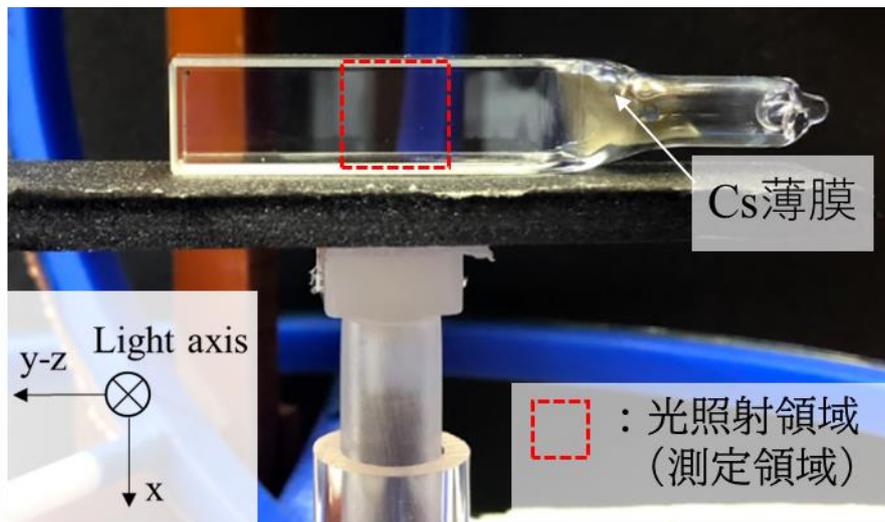


図 32. 4 章-2 の測定におけるセンサの配置と座標軸

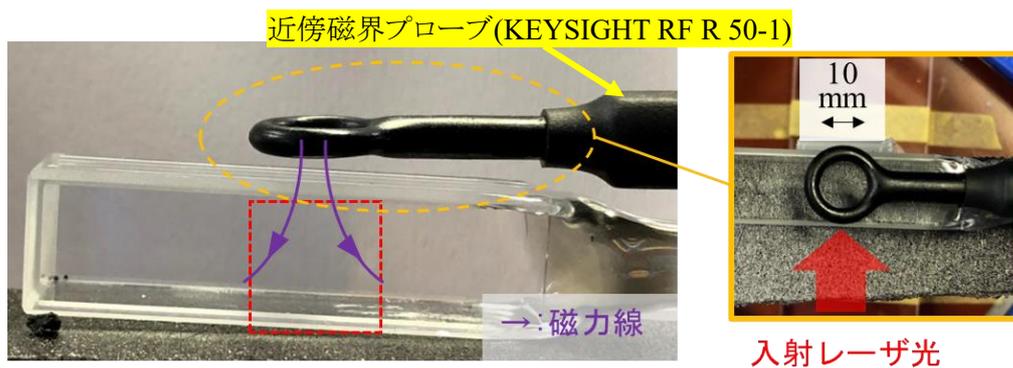


図 33. センサの真上に x-z 平面と水平になるように設置した近傍磁界プローブ

プローブから生じる交流磁界の磁力線は図 33 に示すようになると考えられる. これらは測定領域内で x 軸方向と y-z 平面方向に対応し, LIA による位相検波によって磁力線の向きを可視化できると期待できる.

評価方法として, 測定では走査と GI によってそれぞれ 15×15 画素で画像化を行い, 得られた結果は測定領域における磁界強度の計算結果と比較を行った. (図 34)

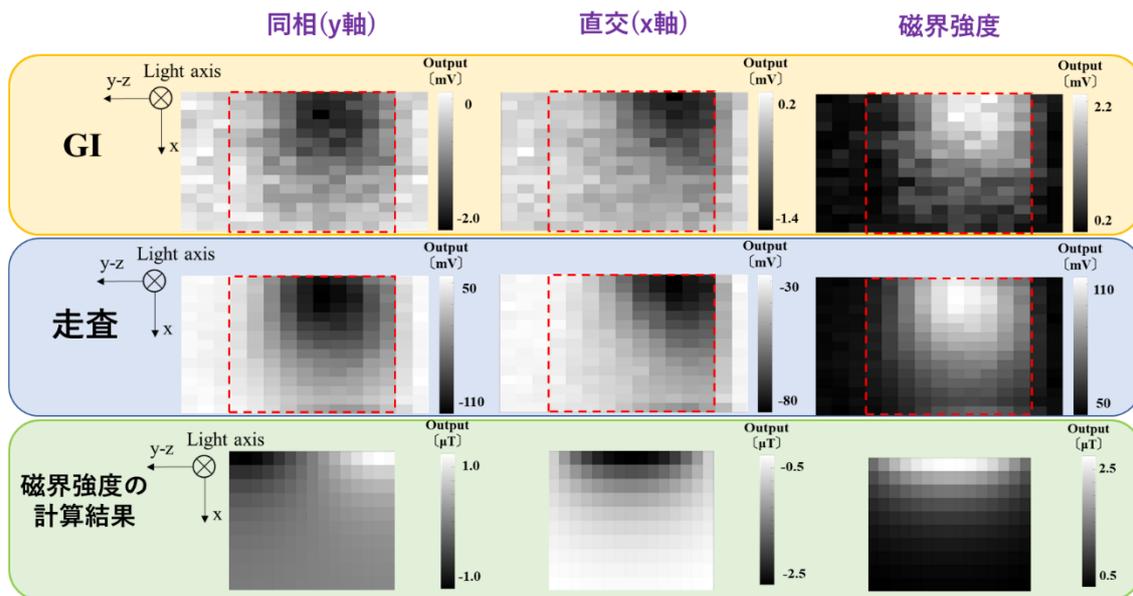


図 34. 感度を有する方向における測定結果と測定領域における計算結果の比較 (上段)GI(中段)走査(下段)計算結果で、それぞれ左から同相成分・直交成分・磁界強度

図 34 より、計算結果はビオ・サバールの法則から実測値である 42 mA の際の磁界強度分布であり、同相成分は y - z 平面方向の磁力線、直交成分は x 軸方向の磁力線と考える。磁界強度は、同相成分と直交成分の二乗平方根を算出することで求めた。

図 34 下段の計算結果より、直交成分の強度分布にて近傍磁界プローブから生じた x 軸方向上向きの磁力線が確認でき、同相成分の強度分布にてそれらが y - z 平面へ流れている様子が確認できる。また、強度分布については近傍磁界プローブのコイル中心軸から広がるような強度分布が得られた。

一方、走査と GI で得られた結果について、各成分とすべて同様の分布が得られたが、磁界強度の分布以外については計算結果による強度分布とは大きく異なるものとなった。これは、信号源としている近傍磁界プローブのコイルが持つインダクタンスによる位相の遅れが生じたためと考える。

ここで、LIA によって得られた同相・直交成分の出力から、位相の補正を行い、計算結果と同様の強度分布が得られるようにした。そこで、MATLAB を用いて図 35 のようなフローで位相の補正を行った。

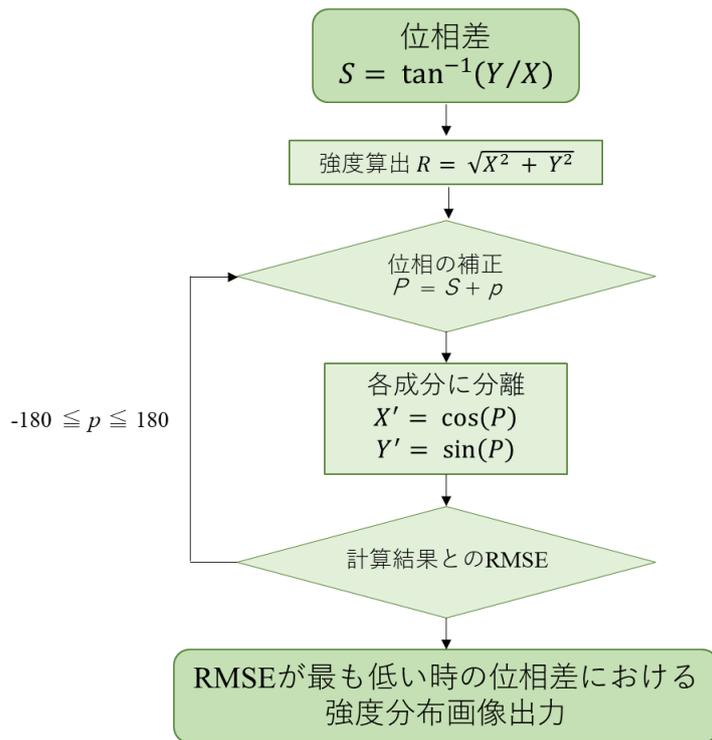


図 35. 得られた強度分布を用いた位相の補正フローチャート

図 34 の GI による出力において位相の補正を行ったものを図 36 に示す. 図 35 のフローより, 位相の補正を $+45^\circ$ としたとき, 近傍磁界プローブから生じる磁界の強度分布と最も近い出力画像が得られた.

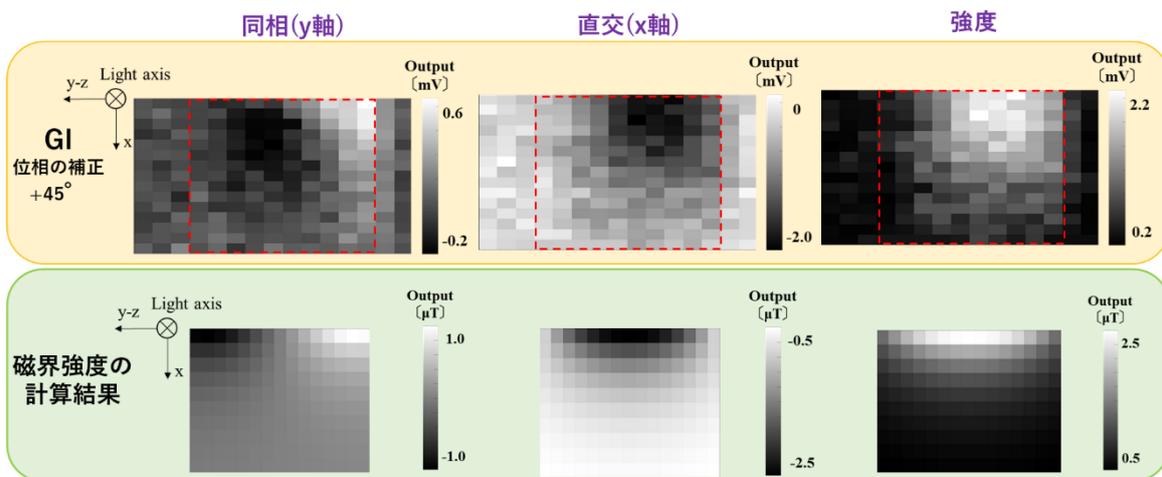


図 36. 図で得られた強度分布に位相の補正を行った強度分布

本項では、センサの感度を有する方向について、LIA を用いて参考信号との位相検波によってそれぞれ抽出し、強度分布として画像化することで磁界の向きについて空間的な評価を行った。測定対象について、インダクタやキャパシタのように位相差が生じるようなものである場合であっても、磁界強度分布の計算結果と比較することで位相の補正を行い、正確な磁界の分布を得ることができた。

・ 4-3 コイルを用いた電磁誘導の可視化

近年、車など様々な機器に数十 kHz 帯の電磁波を用いた無線給電が導入されており、給電効率の向上には電磁界の空間的な分布の把握が重要となる。空間的な磁界の測定には金属プローブによる走査がよく用いられるが、金属を用いているために電磁誘導による磁界の歪みが生じ、正確な測定ができない。

そこで本項では、センサ部分に用いる金属が少ないために非侵襲な計測が可能となる光学式磁界センサと DMD を組み合わせることによる測定系で、2 次コイルの共振周波数における電磁誘導による磁界の可視化を目的とする。

実験として、センサ部分には図 37 より測定領域において強度が均一になるような交流磁界(70kHz, 4 nT)を緑の実線で示したヘルムホルツコイル(1 巻, 30 cm)より印加した。また、本項の測定ではレーザ光を一边 8 mm の正方形に整形したため、その領域が測定領域となる。画像化にはミラーアレイの走査を適用し、15×15 画素で 20 dBの信号増幅を行っている。

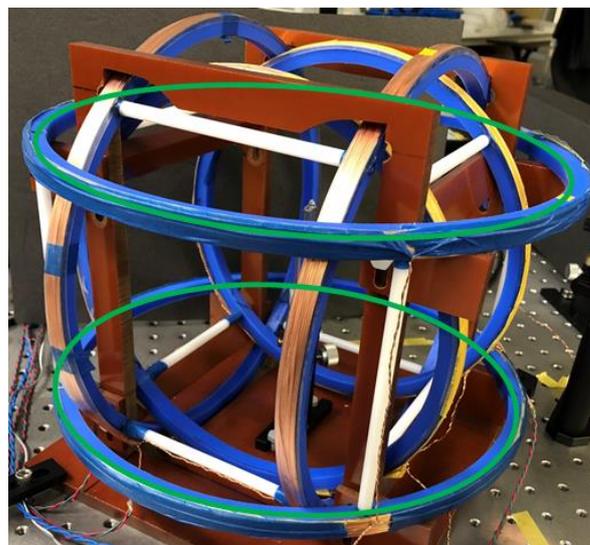


図 37 測定領域に均一磁界を生成するヘルムホルツコイル(1 巻, 30 cm)

ヘルムホルツコイルから印加された交流磁界を受信する2次コイルには積層コイル(図 38)を用いた。



図 38. 磁界の吸収に用いた積層コイル(約 200 回巻, 平均直径 = 0.8 cm)

積層コイルは、センサとなるガラスセル(測定領域)上側に設置する。(図 39)ヘルムホルツコイルより交流磁界を印加しているため、電磁誘導による誘導電流が積層コイルに流れる。つまり、ヘルムホルツコイルから印加された交流磁界のエネルギーは積層コイルで消費され、均一な磁界の強度分布は変化すると考える。

そこで最初の測定では、積層コイルの線の両端を短絡・解放状態でそれぞれの磁界強度分布を出力した。

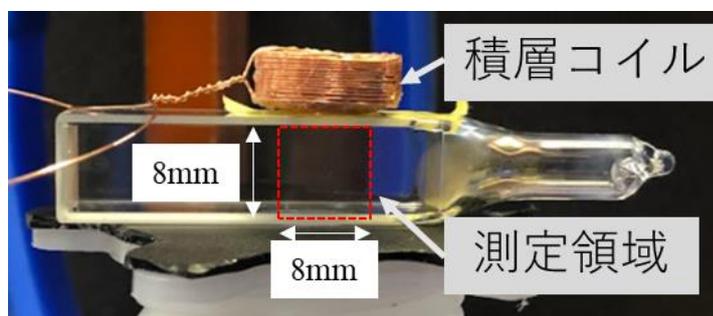
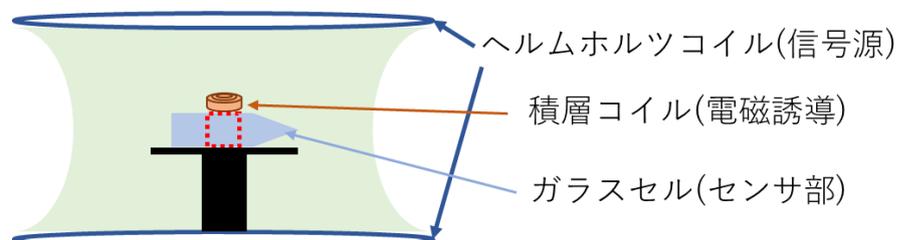


図 39. 積層コイルによる磁界の変化を観測するための実験系の概要(上側)と、センサ部となる Cs 封入ガラスセルとその上に配置した積層コイル(下側)

得られた測定結果を図 40 に示す。図 40(左)より、積層コイルが解放状態の時は磁界吸収による影響は少なく、測定領域において均一な磁界の強度分布が得られた。一方、図 40(右)より積層コイルを短絡状態にした時は、電磁誘導によって磁界が消費されるために測定領域上部で強度減衰が確認できた。

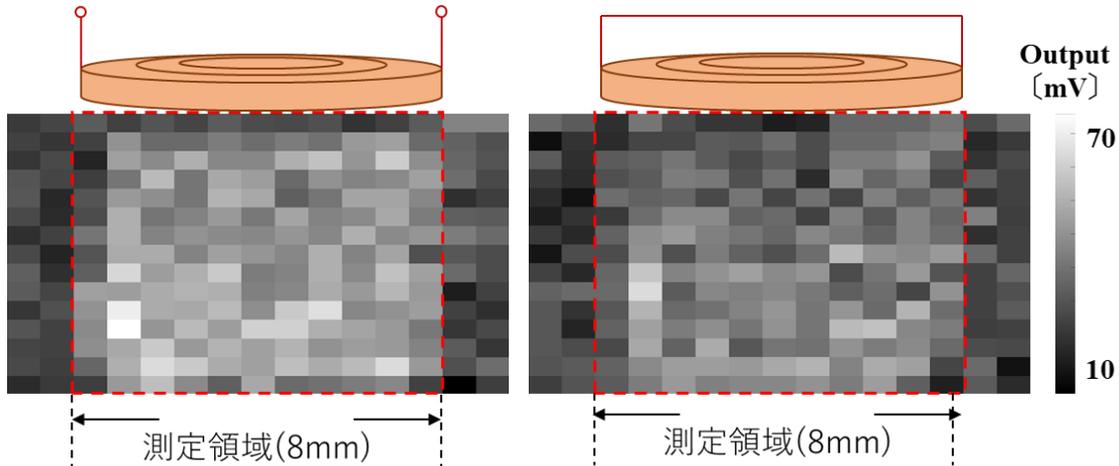


図 40. 積層コイルを開放した場合(左)と短絡した場合(右)の磁界分布の測定結果

また、図 40 の画像縦方向の画素区分について、測定領域の中央 3 列の平均値の推移を図 41 にプロットした。図 41 より、横軸は縦方向の画素区分を示し、グラフ左側が積層コイルの位置する図 40 の画像上方向を表す。縦軸は中央 3 列の画素値の平均であり、オレンジのプロットは積層コイル開放、青のプロットは積層コイル短絡、グレーのプロットは解放時と短絡時の差分を示している。積層コイル短絡時のプロットより、積層コイルが位置する画像上側において、全体的に強度の低下が確認できた。また、差分のプロットは積層コイルによる磁界の吸収を示しており、積層コイルの位置する付近である画像上側において吸収を示すようなプロットが確認できた。

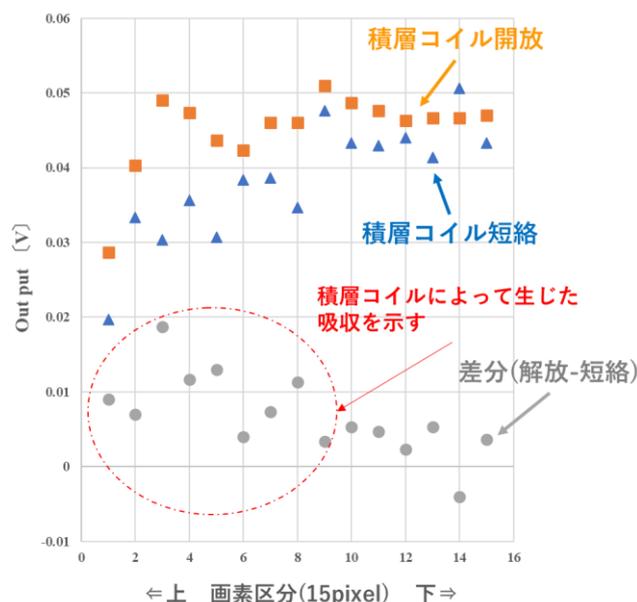


図 41. 画素区分と中央 3 列の平均値の推移を示すプロット

積層コイルを短絡した場合、均一磁界の強度の減衰が確認できた。ここで、積層コイルにはインダクタンス(L)の成分があり、回路としてキャパシタ(C)を設計することで共振回路にし、共振周波数における誘導電流から生じる磁界の分布を測定した。

まず積層コイルのもつインダクタンスについて LCR メータ(図 42)を用いて測定を行ったところ、およそ $347.15 \mu\text{H}$ であった。共振周波数 f_0 については式(7)で与えられる。



図 42. インダクタンス・キャパシタの測定に用いた LCR メータ(IM3523)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7)$$

本測定では、1 次コイルから印加する磁界は 70 kHz である。式(7)より、 f_0 を 70 kHz に設定するには、キャパシタの値を 15 nF にする必要がある。そこで設計した LC 共振回路を図 43 に示す。



図 43. 共振周波数(70 kHz)のために積層コイルに接続したキャパシタ

図 43 のような共振回路を測定領域の上側に設置した状態で測定を行ったものを図 44 に示す。

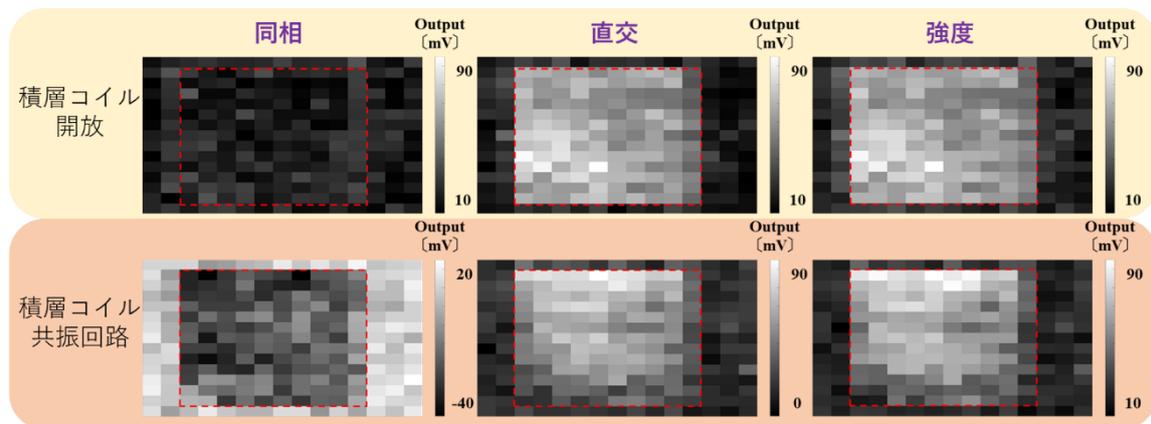


図 44. 積層コイル開放路の強度分布(上段)と、
積層コイルを共振回路にして設置した時の強度分布(下段)

図 44 より、積層コイル開放路は誘導電流が生じないため、x 軸方向の信号印加に対して 90° 位相のずれた直交成分にのみ均一な磁界の強度分布が得られた。一方、積層コイルを共振回路にした場合、電磁誘導によって生じる磁界の位相がずれるために同相成分にも出力が確認できた。また、強度の分布に関して、積層コイル開放路は測定領域で均一な強度の分布が得られているが、共振回路接続時では誘導電流による磁界を測定しており、積層コイル設置位置である画像上側の強度が高くなるような分布が得られた。

ここで、積層コイルにキャパシタ(15 nF)を接続した共振回路における周波数特性を図 45 に示す。2 次コイルの役割をなす積層コイルは回路として独立しており、GND を統一できない。そのため、測定方法として LC 共振回路に抵抗(1 Ω)を接続し、その両端電圧の差分を算出することで周波数特性を測定した。

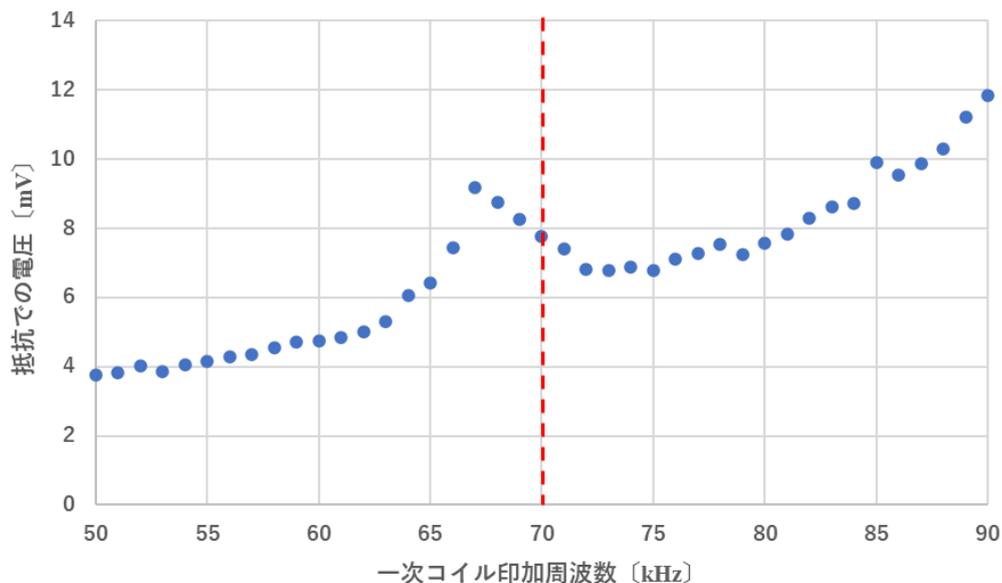


図 45. 2 次コイル(積層コイル)の周波数特性

図 45 より, 横軸がヘルムホルツコイル(1 次コイル)からの印加周波数, 縦軸が積層コイル(2 次コイル)の共振周波数が 70 kHz になるような LCR 共振回路にした時の抵抗の両端電圧の差分である. グラフより, 実測における共振位置は 70 kHz には満たず, 67 kHz が共振のピークとなった.

そこで, 共振周波数が 70 kHz に調整できるよう, 可変キャパシタ(図 46)を積層コイルに接続した. 1 つあたりの可変キャパシタの容量は LCR メータによる実測値でおよそ 20 ~ 200 pF であり, 実験ではこの可変キャパシタを 5 つ並列に接続することでおよそ 200 ~ 1000 pF の範囲で調節可能となった. また, 式(7)より, 共振周波数を 70kHz にするためにキャパシタを 15 nF としていたが, 実際の共振周波数は少し低かった. そのため, 220 μ F のキャパシタを直列に接続し, 可変キャパシタ接続前の容量を理論値で 14 nF となるようにした. 図 47 に最終的に決定した 70 kHz 共振用の積層コイルを含めた回路全体の概略図をまとめた.

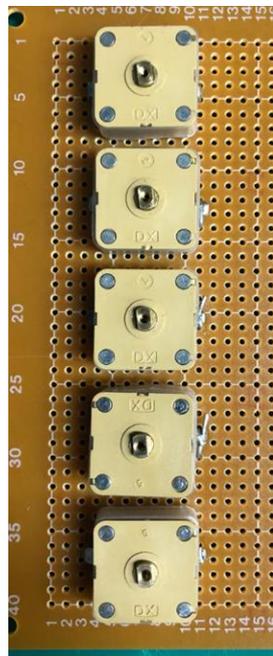


図 46. 共振周波数へ調整するために用いた可変キャパシタ(PVC-224)

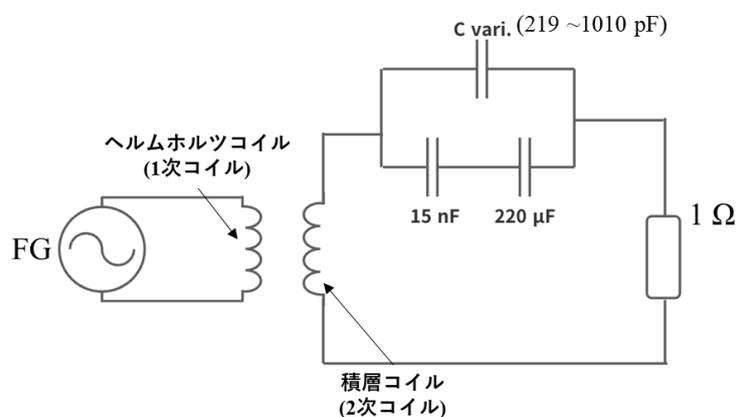


図 47. 測定に用いた共振回路の概略図

図 47 の共振回路で行った測定結果を図 48 に示す。図 48 より、共振回路によって位相が 90° ずれることにより、直交成分で確認された積層コイルの電磁誘導によって生じる磁界強度分布の画像が同相成分で確認できた。また、共振による影響で出力レンジの最大値が積層コイル近くでおよそ 3.3 倍になったことも確認できた。直交成分の出力では積層コイル付近で強度の低い分布が存在し、局所的な共振の位相ずれを示すような分布として確認できた。



図 48. 積層コイルの回路で共振周波数を調整した際の磁界分布

本項では、1 次コイルから発信した交流磁界によって 2 次コイルに電磁誘導が生じ、誘導電流による磁界が 90° ずれて発生する様子を可視化することができた。

・まとめ

本研究では Cs 原子を用いた光学式磁界センサとデジタルマイクロミラーデバイス(DMD)によって、信号磁界の強度分布画像化を行った。測定結果は画像として出力することで、空間に生じる狙った周波数の磁界の存在を強度分布として空間的な評価を目的として研究を行った。

Cs 原子の磁気共鳴によって強度変調した光は、画像化のために DMD ミラーアレイを用いて空間的に分解した。画像化の手法としては、走査パターンによるイメージングと、ミラーアレイにバイナリランダムパターンを用いた演算処理を行うゴーストイメージング(GI)の 2 種で行った。

本稿の測定では大きく 3 つの項目に分けており、1 つ目では GI の高い SN 比や極低周波なノイズに対するロバスト性について評価した。走査による画像化では、画素数の増加に反して単位画素あたりの光強度が減衰する。また、DMD のミラーアレイ回折光による影響で一定強度のノイズフロアが生じる。そのため、高画素での画像化では、SN 比が低下するために不鮮明な強度分布になる。一方 GI では、信号光の空間分解にバイナリランダムパターンを用いるため、画素数によらず信号の増幅無しでも強度分布画像を得ることが出来た。また、性質として測定回数に比例して画像精度が向上することが知られており、ノイズフロアを低減させることができる。この効果により、極低周波な磁界ノイズが存在する空間での測定でもロバスト性を示し、正確な強度分布として評価することができた。

2 つ目の測定では磁力線の向きの画像化に取り組んだ。本研究で用いた光学式磁界センサでは特性として 2 方向に感度があり、ロックインアンプ(LIA)による参照信号との位相検波でそれぞれ抽出が可能となる。このことを用いて、直径 10 mm の近傍磁界プローブから生じる磁界強度分布の計算結果と比較した。結果として、近傍磁界プローブのインダクタンス成分によって出力画像は位相ずれを含むものが得られた。しかし、磁界強度分布の計算結果と測定結果の画像で平均二乗誤差(RMSE)を計算し、LIA の原理から位相の補正を行うことで目的とする磁力線の方向を示すような強度分布が得られた。

3 つ目の測定としては、コイルを用いた空間的な磁界のやりとりの可視化を行った。実験では、1 次コイルとした測定領域に均一な強度がかかるような交流磁界をヘルムホルツコイルから 70 kHz で印加し、測定領域上部に設置した積層コイルを 2 次コイルとした実験系で電磁誘導の可視化を行った。結果として、2 次コイルの開放では電磁誘導が生じないために均一磁界を示す強度分布が得られたが、2 次コイルの短絡では電磁誘導による影響で、均一磁界の減衰が確認できた。また、2 次コイルを LCR の共振回路にすることで、電磁誘導による 2 次コイルから生じる磁界が逆位相で確認できた。また、共振しているために 2 次コイルの共振回路のインピーダンスが極小になり、出力強度の上昇も確認できた。今回、共振回路において、共振周波数の設定は可変キャパシタを用いて行ったことや、2 次コイルの設置位置のずれによる効果が大きいため、出力が非常に不安定になることが多かった。積層コイルの設置に関して、測定領域周辺に磁性のあるものを設置できないために困難を極めるが、測定の精度を上げるためにも改善の余地がある。

・参考文献

- [1] 総務省, 電波の人体に対する影響,
<https://www.soumu.go.jp/soutsu/tokai/denpa/jintai/>, 2009.
- [2] E. B. Alexandrov and A. K. Vershovskiy, “Mx and Mz magnetometer,”
in *Optical Magnetometry*, D. Budker and D. F. J. Kimball, Eds. Cambridge
University Press, New York, pp. 60–84, 2013.
- [3] 平野功, 原子・光・磁気の解析-その成り立ちと発展の軌跡-, 技報堂出版, 東
京都, 2004.
- [4] Georg Bison, Robert Wynands, Antoine Weis, “Optimization and
performance of an optical cardiomagnetometer”, *J. Opt. Soc. Am. B*,
Vol. 22, No. 1, 2005.
- [5] 仁田功一, シングルピクセルイメージング～単一画素計測による画像取得～,
OPTRONICS 4, p. 187., 2017.
- [6] S. Taue, et. al., “Development of a Highly Sensitive Optically Pumped
Atomic Magnetometer for Biomagnetic Field Measurements: A Phantom Study”,
IEEE TRANSACTION ON MAGNETICS, VOL. 46, NO. 9, pp. 3635–3638, SEPTEMBER 2010.

・謝辞

本論文を作成するにあたり、ご指導を頂いた高知工科大学システム工学群の田上周路准教授に心より感謝致します。学部の頃を含めて4年間、大変お世話になりました。

同じくシステム工学群教授山本真行先生、准教授星野孝総先生には、本論文の作成にあたり、副査として適切なお助言を賜りました。ここに深謝の意を表します。

岡山大学、自然科学科教授の豊田啓孝先生には、測定データについて大変参考になる助言を受け賜りました。厚く御礼申し上げます。

私を日ごろから支えてくださった両親や兄弟にもとても感謝しております。

同じ研究室の同期や B3 の後輩の皆様にも大変感謝しております。実験の都合上、室内灯を消したりすることもありましたが、そのような時も快く承諾していただき、大変感謝いたしております。

所属している部活の皆様にもとても感謝しております。研究の合間に皆様と過ごす時間で私自身何度もリフレッシュすることが出来ました。大変感謝しております。

最後に、学部4年間、修士2年間の計6年間で私と関わった方々や支えてくださったすべての方々に厚く御礼申し上げます。