

磁気光学効果による動的磁場の広範囲かつ実時間観察

中村 泰貴^{*,†}・磯上 慎二^{**,††}・豊島 晋^{*}

^{*}福島工業高等専門学校電気工学科 〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾30

^{**}福島工業高等専門学校一般教科 〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾30

[†](現)東京大学システム創成学科 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

^{††}(現)国立研究開発法人物質・材料研究機構 〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

Real Time and Wide Range Observation of Dynamical Magnetic Field via Magneto-optical Effect

Taiki NAKAMURA^{*,†}, Shinji ISOGAMI^{**,††} and Susumu TOYOSHIMA^{*}

^{*}Department of Electric Engineering, National Institute of Technology, Fukushima College, 30 Nagao, Aza-Kamiarakawa, Taira, Iwaki, Fukushima 970-8034

^{**}Department of General Education, National Institute of Technology, Fukushima College, 30 Nagao, Aza-Kamiarakawa, Taira, Iwaki, Fukushima 970-8034

[†]Current; Department of System Creation, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

^{††}Current; Research Center for Magnetic and Spintronic Materials, National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047

Real time magneto-optical images with wide visual field covering entire permanent magnets with cm in dimension were demonstrated using a homemade magnet rotator and a processing system. The rotator was designed to enable variable period from 1.3 s to 10 s without mechanical fluctuation by appropriate materials as well as homemade electronic circuits. The images visualized the different magnetic poles as a contrast of optical intensity, and which became clear by subtraction of a background. The results led us to expect direct visualizing systems for practical fields of electric vehicle motors in the future.

Key words: magneto-optical effect, dynamical magnetic field, motors

1. はじめに

磁気光学効果を利用した磁場分布状態のイメージングは、高い空間分解能かつリアルタイムで簡便に観察が可能な優れた方法として、古くから技術確立されている¹⁻³⁾。さらに、得られた偏光像から精度よく磁場強度の定量評価を行う手法の提案もなされ、磁気センサーとして機能させることが可能になってきている⁴⁾。近年、ハイブリッド自動車や電気自動車が普及し始め、それらに搭載される高効率モーターの研究開発が盛んに行われている。それに伴い、回転子周辺約5~10 cmの範囲における動的電磁界解析が重要度を増している⁵⁾。例えば回転子コイルが4極のモーターの定格回転数が3000 rpmである場合、磁場の変動周期は5 msと非常に高速である。そのため現状ではおもに専用のシミュレーターが用いられているが、計算量が

膨大となるため、模型全体ではなく代表的な部分に限定したり、空間要素サイズを大きくしたりせざるを得ないケースが非常に多い。したがって、磁気光学像の観察手法は、そのような高時間分解能を要する電磁界強度分布の直接イメージングといった方面への応用も期待される。これまで一般に数ミリメートル程度に集光した光源が用いられていたため、広い領域の一括観察は技術上不可能であった。

そこで本研究では、時間変化する広い領域の磁場の磁気光学像をリアルタイムかつ一括で観察する技術の原理検証を目的とした。そのため、まずは永久磁石の漏洩磁場を水平面内に低周波数領域で周期変動させるための回転機構の試作、ならびに磁気光学映像のリアルタイム画像処理プログラムの構築を行った。その結果、回転周期によらず極性の違いを黑白コントラストで表示すると同時に、ピンポイント

^{**}E-mail: isogami.shinji@nims.go.jp

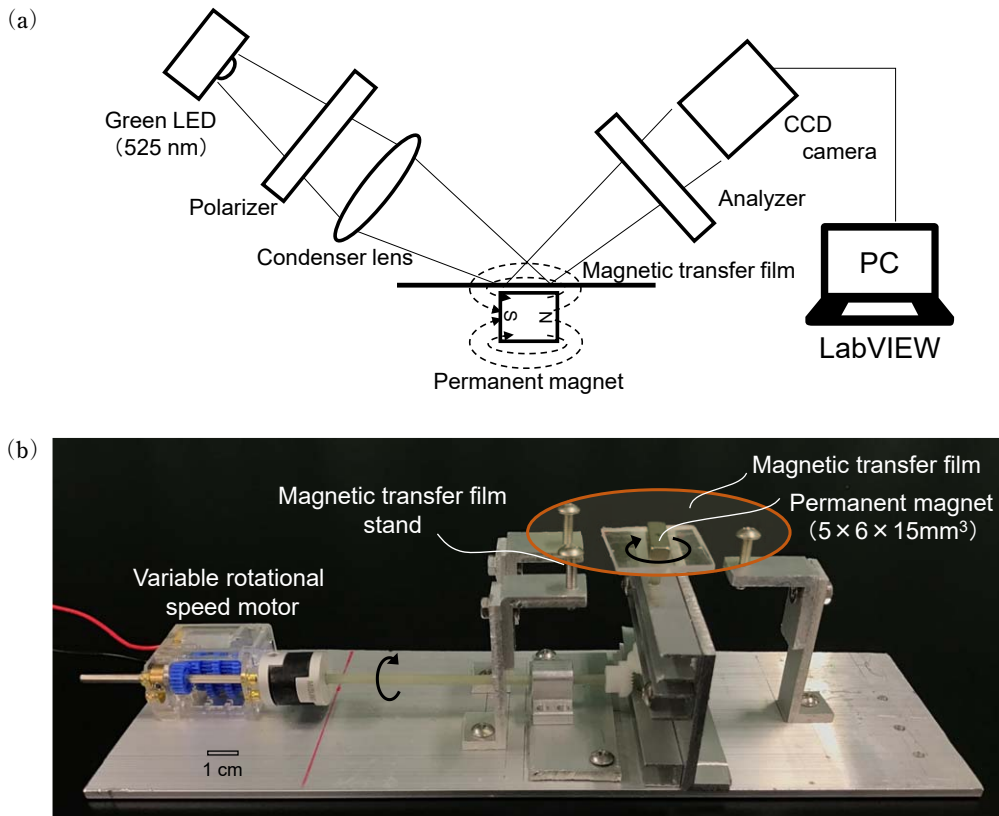


Fig. 1 (a) Schematic illustration of magneto-optical imaging system. (b) Photograph of the homemade magnet rotator. The magnetic transfer film was placed above the permanent magnet with $5 \times 6 \times 15 \text{ mm}^3$ in dimension.

ントの強度データを時間に対してプロットできることを確かめた。本論文では、回転機構ならびにリアルタイム画像処理プログラムの詳細と、実際に観察された磁気光学像データの特徴を報告する。

2. 動的磁気光学像観察へ向けたセットアップ

2.1 磁気光学系の構築

Fig. 1 (a) は、磁気転写膜に転写された磁場垂直成分の分布強度を LabVIEW 上で磁気光学像として取得する光学系の概念図である。上流側から、LED 光源 (波長 525 nm)、偏光子、集光レンズ、磁気転写膜 (その下に 1 個のネオジウム焼結磁石：ガウスメーターで実測した表面磁束密度は約 0.35 T)、検光子、ウェブカメラで構成した。磁気転写膜上の光照射領域はおよそ直径 5 cm の円型とした。検光子と偏光子の方位角差は約 45° とした。すなわち本光学系では、偏光子と検光子を通してウェブカメラに入る (肉眼で視認できる) 光強度 I は、カー回転角 θ_k を用いて、

$$I(\theta_k) = I_0 \cos^2(45 + \theta_k) \quad (1)$$

と与えられている。したがって、 $I(\theta_k = 0)$ を基準とするこ

とにより、磁場の極性を異符号の強度として示すことを可能とした (詳細は第 2.3 節第 2 段落のバックグラウンド差分の部分にて言及する)。磁気転写膜には、ガーネット結晶膜が形成されている直径 3 インチウェハーを用いた⁶⁾。できるだけ転写磁場近傍の光強度を均一化するため、偏光子の前に光散乱体 (市販のトレーシングペーパー 1 枚) を配置した。リアルタイム磁気光学画像の撮影には、CCD カメラの代替として PC の外部接続品で一般的なウェブカメラ (200 万画素、自動露光機能なし) を用いた。

2.2 水平回転機構の構築

動的な磁気光学像を観察する本研究の目的を達成するには、動的磁場を作り出すための装置が必要である。そこで、Fig. 1 (b) に示すような永久磁石回転機構を実際に試作した。永久磁石を一定の速度で水平面内に回転させることで、回転する漏洩磁場を作り出す仕組みとした。モーターの動力を伝えるギアの比は 189 : 1 とした。動力を負荷なく鉛直方向へ切り替えるため、適切な大きさのマイターを選定した。モーターの回転数を制御するための電子回路を構築し、最終的な水平面内回転周期を 1.3~10 s の範囲で可変とした。永久磁石周辺の部品は、磁性を有する素材を

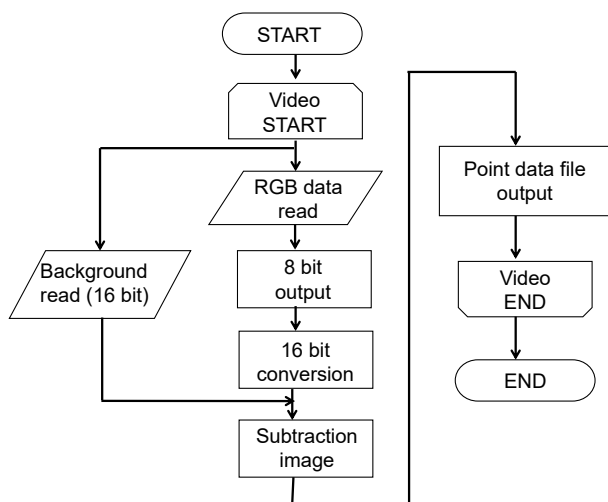


Fig. 2 Flowchart showing the real-time imaging process on the LabVIEW software.

用いると永久磁石の漏洩磁場と不要な磁気回路を形成し、厳密な測定が実現できないことがわかったため、アルミニウムや樹脂などすべて非磁性素材のものを用いた。さらに、モーター内部に使用されている永久磁石の漏洩磁場の影響も無視できず、Fig. 1 (b) に示すようにモーターと永久磁石を十分に離れた。完成後の全体寸法は、縦 7.5 cm、横 24 cm、高さ 5.5 cm 程度であった。磁気転写膜の支持には非磁性ねじを用い、永久磁石と磁気転写膜の間の空隙を微調整可能とした。

2.3 画像処理プログラムの構築

回転する永久磁石の磁気光学像を自動露光機能のないウェブカメラで連続した影像として取得し、グレースケール動画として LabVIEW ソフトウェア上に取り込んだ。また、グレースケール動画の特定地点の輝度値をデータとして取得した。しかし、実際の直接磁気光学像ははずんだ同心円状の光強度分布によって輝度が一様ではなく、特に特定地点のデータ解析に大きく影響することがわかったため、磁気転写膜背面に永久磁石が配置されていない状態における磁気転写膜上の画像（反射像）をバックグラウンド (I_{back}) 像としてあらかじめ取得しておき、直接像から差し引く仕組みとした。その結果、光強度分布のほとんどみられない磁気光学像を得ることに成功した。以上のような代表的な処理プロセスを含むフローチャートを Fig. 2 にまとめた。

既述の I_{back} 像差分プロセスは、光強度分布の排除のみならず、磁場極性をグレースケールのコントラストとして表示するために不可欠である。 I_{back} 像差分は、漏洩磁場のない特定地点のグレースケール値を画像処理上でゼロとするプロセスを意味している。その結果、算出される正と負のグ

レースケール値は、磁場の極性に対応したものとなる。

以下に、LabVIEW 上でグレースケール値を求める処理を説明する。今回用いている光源はグリーン LED であるため、取り込まれる直接像は RGB データに相当する。この緑色を 8 bit 画像データとして抽出した後、16 bit 画像データへと変換した。次に I_{back} 像を 16 bit 画像データとして読み込みこんだ後、既述の直接像から全ピクセルのデータについて差分した。

ここで、通常は符号付き 8 bit 画像データでも正負のグレースケール値を表示できるようになっているが、LabVIEW の場合は符号付き 8 bit 画像を扱えないことがわかった。そのため、既述のように 16 bit 画像データに変換する過程が必須であり、その上で差分を施すことで、負のグレースケール値も表示させることに成功した。われわれが構築したプログラムは測定中リアルタイムで画像処理されているが、1 回あたりの処理時間は、PC とのデータ通信にかかる時間も含めて約 30 ms であることがわかった。

3. 動的磁気光学像の観察

3.1 4 秒周期回転磁場の観察

独自に構築した磁石回転機構と画像処理プログラムを用い、実際に得られた磁気光学像の観察結果と、特定地点における定量的なグレースケール値のリアルタイム測定結果を示す。今回の永久磁石は、Fig. 1 (a) に示すように N 極と S 極が同一水平面上になるよう寝かせて配置されている。Fig. 3 (a) は、磁石回転機構を周期 4 s で回転させた場合の、 I_{back} 像差分を施していない直接磁気光学像のスナップショットと、測定箇所 ① および ② の破線上を反時計回りに周回測定した際に得られる局所グレースケール値 (intensity) の時間変化プロファイルを示す。グラフ外に示されるグレースケールバーは直接磁気光学画像の色味とグレースケール値との対応関係を示し、真白が $I = 136$ 、真黒が $I = 0$ に対応している。また、白 (黒) コントラストは N 極 (S 極) の強さに対応しており、永久磁石からの漏洩磁場が磁気回路を成している様子が見てとれる。測定箇所 ① のプロファイルに着目すると、Time = 0 s から 0.9 s にかけて、 $I = 90$ から 72 までなめらかに低減した。これはちょうど永久磁石の S 極上に達したことを示唆する。その後、1.2 s にかけて $I = 137$ 付近まで急上昇し、ピークを示した。これは永久磁石の S 極から N 極側へ測定地点が移動したことを示唆する。その後、下に凸の放物線状に変化した後急激に減少したのは、強い N 極方向の領域から一旦離れ、漏洩磁場による影響が弱い領域を経た後、再び永久磁石の N 極から S 極上を走査したことに対応する。プロファ

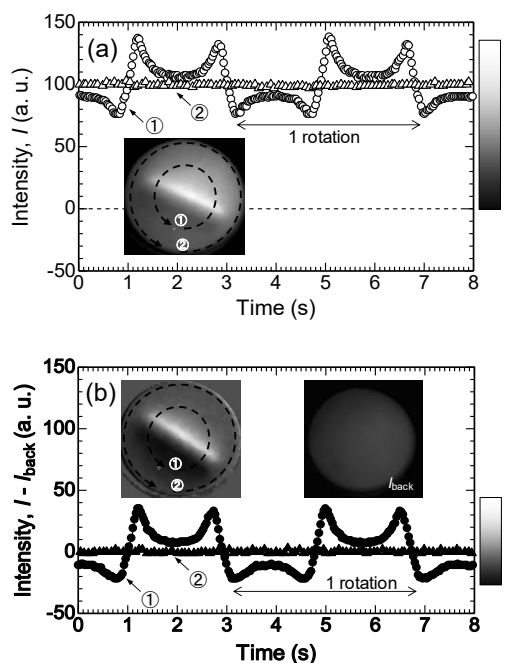


Fig. 3 4-second periodic intensity at the specific positions on the magneto-optical images for (a) without, (b) with subtraction of background (I_{back}). Gray scale bar on the right represents the relationship between intensity values and colors of the images.

イルには2周期分のデータが示されているが、きわめて良好な周期性が測定されていることがわかった。さらに、Time = 0.9 s, 1.2 sなどの位置においてもピーク値が正確に計測されており、4 s程度の周期で変動する動的磁場に対して、今回の装置は適正であることを確認した。次に、辺縁部である測定箇所②のプロファイルに着目すると、時間に対する強度は約 $I = 100$ と一定の値が得られたことがわかる。また、例えば Time = 2 s, 4 s 付近の強度は、それぞれプロファイル①のなめらかに変化する部分の極小、極大値にも接近していることがみてとれる。これらの結果より、今回の永久磁石からの漏洩磁場は、磁石の長軸より短軸方向へ広がりをもつが、辺縁部近傍で限りなくゼロになるという分布をもつと推察することができる。一方、スナップショットをみてわかるように、直接磁気光学画像の白黒コントラストが明瞭ではなく、上記推察の視認が困難であることに課題を残していると考えられる。これを解決するために、バックグラウンドの差分処理で、既述したような入射光強度分布の排除をしながらグレースケールのダイナミックレンジ調整を試した。

Fig. 3 (b) の画像は、Fig. 3 (a) で得られた直接磁気光学像から I_{back} 像 (右の画像: I_{back}) を差し引いたスナップショットである。まず、差分なしの結果 (Fig. 3 (a)) と比較して白黒コントラストが明瞭になり、漏洩磁場分布の

視認性が向上したことがみてとれる。これは、入射光強度分布の排除のみならず、グレースケール値の最大値を白色、最小値を黒色となるようにダイナミックレンジを調整した、両方の効果によるものと考えられる。しかし Fig. 3 (a) のプロファイル②が一定値を示したことから、入射光強度はほぼ一様と考えてよく、今回の場合は後者のほうが視認性の向上に強く寄与したものと推察される。このことは、市販のトレーシングペーパーでも十分に強度分布を一様にできたことを示唆する。よって、ナノ構造体の拡散板を用いれば、ほぼ完全に一様分布を実現できる可能性が高く、あらかじめ平均的な反射光強度を測定しておけば、直接像から一律に一定の数値を差し引くことによって容易に高コントラストな差分画像が得られると期待できる。次に、プロファイル①に着目すると、正ピークから負ピークまでの強度差および時間などの結果は Fig. 3 (a) と全く同様であることが確認された。グレースケール値と色味との対応は Fig. 3 (a) 同様にグラフの枠外に示したが、 $I = 45$ がN極、 $I = -27$ がS極にそれぞれ対応している。プロファイル②についても、時間によらず一定であることに変化はなく、全体の値が100ほど減少していることから、本研究で行った差分のプロセスは磁気光学信号に重畳している反射光成分を強度分布も含めてカットする役割を果たすことがわかった。また、 $I = 0$ を基準とし、N極側は正、S極側は負の値として表すことで、了解性よく極性を区別することを可能とした。しかし、値については絶対値が対称ではなく、N極側38、S極側-25であった。式(1)の説明にあるように、理論上はゼロを中心として正負対称に計測されるはずであるが、結果はそうなっていない。これは、光が集光レンズを通過するとき、光の直径が3~4 cm程度あるため、中央部とそうでない部分では光路差が生じたり、光学素子の温度変化などが複合的に関係して偏光状態が変化したことがおもな原因として推察される。また、試作装置の構造上、光路と関係ない空間まで発散したLED光の一部が迷光となって検出に重畳した可能性も考えられるが、現時点で完全に特定されていない。一方で、後述するように、1.3秒周期のデータでは非常によく対称性が得られている。このことから、レーザーではなく、発散角がきわめて大きいLED光源を使用した磁気光学像をもとに定量評価を行う場合は、以上のような課題を解決した上で再現性を確認する必要がある。

3.2 1.3秒周期回転磁場の観察

Fig. 4は、磁石回転機構を周期1.3 sで回転させたときの、測定箇所①におけるグレースケール値の時間変化プロファイル (上: 差分なし, 下: 差分あり) を示す。測定

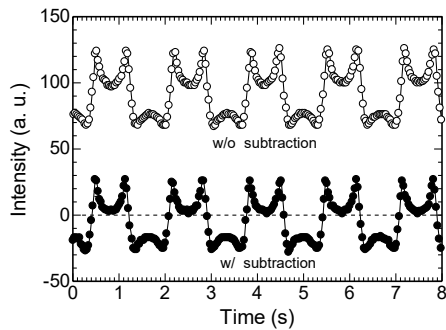


Fig. 4 1.3-second periodic intensity at the specific position on the magneto-optical images with and without subtraction of the background.

方法、差分に用いた I_{back} 画像データは、Fig. 3 の場合と同一である。上のプロファイルはN極 (S極) が $I = 124$ ($I = 68$) に対応しており、下のプロファイルはN極 (S極) が $I = 25$ ($I = -26$) に対応している。Fig. 3 と同様に、差分は 100 程度のオフセットを排除することに相当していた。また正ピークから負ピークまでの強度差および時間などの結果は、差分前後において変化ないことを確認した。ここで、例えば、周期 4 s と 1.3 s のいずれも差分ありのプロファイルについて対比する。同一の永久磁石を使用しているため、正ピークから負ピークまでの強度差 (すなわち N 極から S 極までの強度差) は同一であることが期待される。しかしながら、実際は 1.3 s のほうが若干小さくなる傾向が得られた。これは、プロファイルのサンプリング周波数が回転速度に対して十分に大きくない領域に入りつつあり、ピーク値近傍の急峻な変化に十分に追従できなくなったことが原因と考えられる。

4. ま と め

従来から確立されていた磁気光学イメージング技術を、将来的に「広い視野での」「実時間観察」技術に発展させるため、独自の回転機構と画像処理システムによる原理検証実験を行った。その結果、永久磁石の回転周期で 4 s と 1.3 s のいずれの場合においても、単純反射光であるバックグラウンドを差分しながらグレースケール値のダイナミックレンジを調整することで、高コントラスト化と光強度分布があった場合でも一様化を両立できることを実証した。同時にグレースケール値の基準値を磁場ゼロに対応づけられるため、正負の値を単純に磁場の極性に割り当てられることを確認した。今後はさらなる高時間分解能の実現が課題であるが、例えば光学チョッパーによって得られるパルス入射光を使用し、標準市販品のハイスピードカメラおよび専用ソフトウェアを今回の光学系と置き換えられれば、冒頭部分に記述したような数 ms 周期で変動する動的磁場を一括観察できる可能性は十分に考えられ、重要度が高まる電気自動車モーター中の動的電磁界解析に対して強力なツールに発展するものと期待される。

本研究で用いた磁気転写膜は長岡技術科学大学の石橋隆幸教授より提供を受けた。

文 献

- 1) S. Gotoh, N. Koshizuka, M. Yoshida, M. Murakami and S. Tanaka: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **29** (1990) L1083-L1085.
- 2) M. V. Indenbom, N. N. Kolesnikov, M. P. Kulakov, I. G. Naumenko, V. I. Nikitenko, A. A. Polyanskii, N. F. Vershinin and V. K. Vlasko-Vlasov: *Phys. C*, **166** (1990) 486-496.
- 3) M. Shamonin, T. Beukera, P. Rosena, M. Klankb, O. Hagedornb and H. Dotschb: *NDT&E Int.*, **33** (2000) 547-553.
- 4) T. Ishibashi, Z. Kuang, S. Yufune, T. Kawata, M. Oda, T. Tani, Y. Iimura and K. Sato: *J. Appl. Phys.*, **100** (2006) 093903.
- 5) T. Takemae, K. Nakamura and O. Ichinokura: *J. Mang. Soc. Jpn.*, **38** (2014) 15-19.
- 6) A. Kosaka, M. Naganuma, M. Aoyagi, T. Kobayashi, S. Niratisairak, T. Nomura and T. Ishibashi: *J. Mang. Soc. Jpn.*, **85** (2011) 194-198.