

環境磁界測定を目的とした 磁気光学プローブの試作および評価

加藤 佳仁* 笹川 卓** 鈴木 敬久*** 和氣 加奈子#

Development of the Magneto-Optical Probe for Environmental Magnetic Fields Measurement

Yoshihito KATO Takashi SASAKAWA Yukihisa SUZUKI Kanako WAKE

A prototype of the magneto-optical probe (MO probe) on the basis of the Faraday effect has been developed to measure environmental magnetic fields in the low frequency range. In this MO probe, the polarizer and the analyzer, which are optical elements, have been miniaturized and integrated into the body of the MO probe to avoid the output fluctuation caused by bending optical fiber cables. As a result, it is confirmed that the developed MO probe can stably output signals. In addition, the other characteristics of the MO probe were examined in the low frequency range. As a result, it is found that it is effective to use the probe when measuring environmental magnetic fields in the low frequency range.

キーワード：磁気光学プローブ，ファラデー効果，低周波磁界，環境磁界，磁界測定

1. はじめに

近年，低周波数帯の磁界（直流～100kHz）を利用した電気機器類の開発が進んでいる。その一方で，このような機器類から発生する磁界が環境面から注目されている^{1) 2)}。

電気鉄道においても，このような低周波数帯の磁界が発生することが知られている。特に，鉄道車両からは比較的広帯域の磁界が発生する^{3) 4)}。磁界の発生源となるのは，車両床下に搭載されている，インバータやモータ，およびこれらの機器類の間に敷設される電力ケーブル等であり，鉄道環境から発生する磁界は様々な周波数成分を含んでいる⁵⁾。

国際組織である ICNIRP（国際非電離放射線防護委員会）等が，磁界による人体への影響を考慮して人体防護のガイドラインを制定している⁶⁾。さらに，鉄道環境によって発生する磁界を測定するための規格が，この ICNIRP のガイドラインを参照して作成されている。IEC（国際電気標準会議）は，鉄道関連の測定に関する国際規格として IEC 62597 を発行し⁷⁾，また国内でも，JIS が鉄道車両に関する磁界の測定規格として，JIS E4018 を発行している⁸⁾。これらの測定規格においては，いずれも測定対象周波数を直流から 20kHz と定めている。

また，磁界の強さに関しては，植込み型心臓ペースメーカーへの影響を考慮して，その国際 EMC 規格である ISO 14117⁹⁾ において，磁界の影響を受けない基準値として 1mT という磁束密度が示されている。

環境磁界測定はこのような規格に対して，適切な方法で行う必要があるが，特に測定用センサについては適切なものを選んで測定を行う必要がある。従来，直流から 20kHz 程度までの広帯域の磁界を測定する場合には，サーチコイル方式や，ホール素子方式等の複数のセンサを組み合わせる測定を行うのが一般的である^{7) 10)}。近年になって，この帯域をカバーできるフラックスゲート方式が開発されているが，その構造および測定原理上¹¹⁾，拡張性や小型化の面で難があると考えられる。

そこで，直流～20kHz において，1mT を超える磁束密度の測定が可能であると考えられる，ファラデー効果^{12) 13) 14)} を利用する磁気光学プローブに着目した。本研究は，環境磁界測定を用途とする新たな磁気光学プローブを試作し，低周波数帯における磁界検出の特性を把握することを目的とする。

2. 磁気光学プローブ

2.1 磁気光学プローブの原理

磁気光学プローブはファラデー効果を利用するが，この原理を図 1 に示す。ファラデー効果はファラデー素子（またはファラデー回転子）と呼ばれる物質に直線偏光を入射したときに，光の進行方向に平行な方向成分の磁界により，偏光面が回転する現象である。この偏光面

* 浮上式鉄道技術研究部 電磁システム研究室

** 浮上式鉄道技術研究部

*** 東京都立大学

国立研究開発法人情報通信研究機構

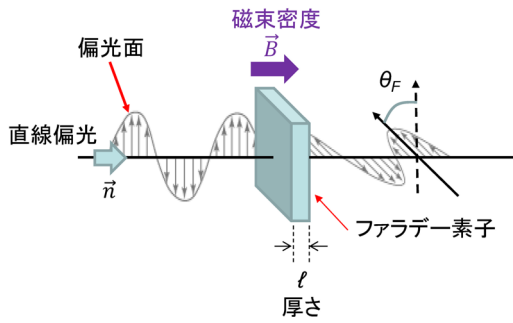


図1 ファラデー効果

の回転角をファラデー回転角と呼ぶ。ファラデー回転角 θ_F [rad] は物質固有の係数であるヴェルデ定数 V [rad/(T·m)], ファラデー素子に印加する磁束密度 \vec{B} [T], 光軸方向に平行な法線ベクトル \vec{n} , ファラデー素子の厚さ l [m] により式 (1) で表される。

$$\theta_F = V(\vec{B} \cdot \vec{n})l \quad (1)$$

この偏光面の回転角によって磁界の変動を検出するのが、磁気光学プローブを利用した測定システムの基本的な仕組みである。

2.2 既存の磁気光学プローブの課題

磁気光学プローブの開発例はこれまでの研究にもあるが、直流磁界を含む低周波数帯の環境磁界測定を目的としたものはほとんどない^{15) 16) 17)}。そこで、このような環境磁界測定に用途に適用可能な測定用プローブとして、森田テック(株)製の磁気光学プローブ¹⁸⁾に着目した。この磁気光学プローブは $0.3\text{mm} \times 0.3\text{mm} \times 0.3\text{mm}$ という非常に小さなファラデー素子である磁気光学結晶(ビスマス置換型磁性ガーネット結晶¹⁹⁾)からなり、測定時の空間分解能が高いという特徴がある。当磁気光学プローブを図2に示す。

この測定プローブは主に電子基板等から発生する電磁ノイズの測定等に用いられているものであり、基本的に測定プローブを固定して測定を行っている。測定の際には、電子基板等の被測定側を移動させて測定を行うため、

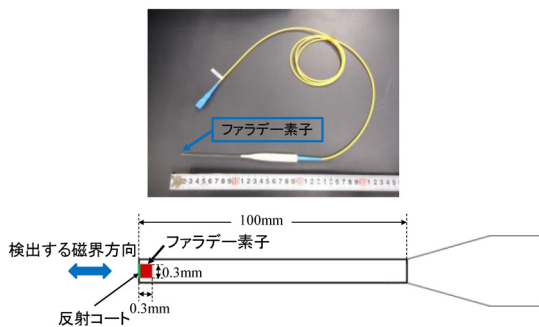


図2 既存の磁気光学プローブ

測定プローブは移動させる必要がない。しかしながら、環境磁界測定を用途とする場合には、測定プローブの移動が不可欠であるので、予備検討として、この磁気光学プローブを環境磁界測定に適用することを想定した測定試験を行った。

測定系の概要を図3に示す。測定系は大きく光学系と検出系からなる。光学系では、光源として波長可変レーザーを用いている。レーザーの波長は $1,550\text{nm}$ 、出力は 30mW である。レーザーから出力された光は光ファイバーケーブル内を伝搬し、偏光子(オプトクエスト製 PCUB-15-S/F)を透過することで直線偏光となる。直線偏光の偏光面はファラデー素子を透過する際に、光の伝搬方向と同じ方向成分の磁束密度の強度に比例した角度だけ回転する。これが検光子(オプトクエスト製 PCUC-15-S/F)を透過すると、光の強度が磁束密度の強度に応じて増減する。これをフォトディテクタ(ソーラボ製 DET01CFC)で光電変換して、磁束密度の変動を電圧信号として検出し、時間波形としてデータロガーに記録する。

当測定系により一般環境の磁界を測定したときの時系列波形を図4に示す。磁気光学プローブに印加する磁束密度が 0mT のときの出力電圧が 0V になるように調整している。測定時には、断続的に光ファイバーケーブルに曲げを与えながら測定を行った。その結果、偏光子-磁気光学プローブ間、および磁気光学プローブ-検光子間の光ファイバーケーブルに曲げ等が生じると、出力が

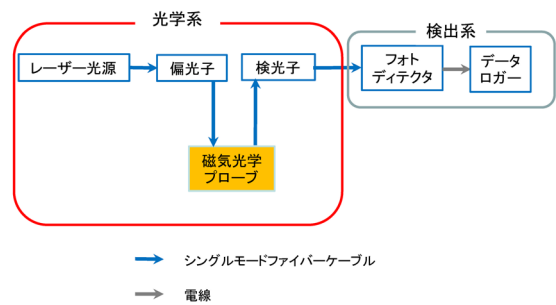


図3 既存の磁気光学プローブの測定系

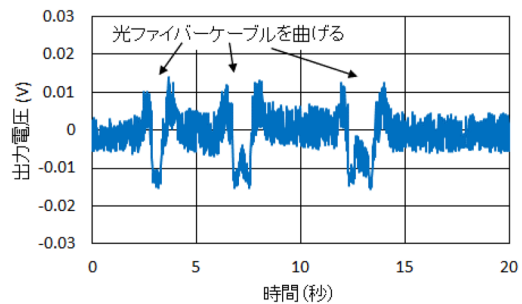


図4 既存の磁気光学プローブの測定波形 (一般環境)

変動することを確認した。これは、光ファイバーケーブルに曲げが加わると、ケーブル内部の屈折率等が変化し、伝搬する偏光が元々の状態を維持できなくなることによって考えられる。

環境磁界測定を行う場合には、基本的に測定プローブを測定点に移動させることになるため、それに伴い光ファイバーケーブルに曲げ等が生じることになる。ケーブルの曲げにより、フォトディテクタからの出力電圧が変動することを確認したので、環境磁界測定を用途とする場合には何らかの対策を施す必要があることがわかった。

3. 環境磁界測定用の磁気光学プローブの試作

3.1 光学素子を一体化した磁気光学プローブ

前章の結果より、磁気光学プローブを利用した測定系のうち、偏光子-磁気光学プローブ間、および磁気光学プローブ-検光子間の光ファイバーケーブルの曲率の変化により出力が変動することを確認した。環境磁界測定を用途とする場合、この変化に起因する出力の変動を抑制することが必要である。そのために、偏光子、検光子の光学素子を小型化し、プローブ本体と一体化した新たな磁気光学プローブを試作した。

図5に試作した光学素子一体型磁気光学プローブを示す。上記の一体化により、それぞれの素子間の光ファイバーケーブルの曲げによる出力の変動を抑制し、環境磁界測定時におけるプローブの移動を自由にした。

また、ファラデー素子への入力光を安定させるために、偏光子への入力ケーブルを従来のシングルモードファイバーケーブルから、偏波保持ファイバーケーブルとした。なお、当該磁気光学プローブに使用しているファラデー素子は既存の磁気光学プローブと同一のものである。

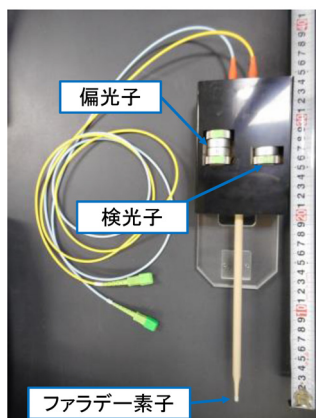


図5 光学素子一体型磁気光学プローブ

3.2 測定試験

試作した磁気光学プローブを用いて、前章で述べた既存のプローブの測定試験と同様の試験を行うこととした。また、既存の磁気光学プローブで測定実績のある周波数帯は概ね500Hz～1MHzであるので、500Hz以下の低周波数帯の磁界を新たな磁気光学プローブに印加したときの特性を把握することとした。

試作した光学素子一体型磁気光学プローブを含む測定系を図6に示す。偏光子・検光子と磁気光学プローブ本体を一体化した範囲を緑の線で示す。

この新たな磁気光学プローブによって一般環境の磁界測定を行った時系列波形を図7に示す。前章で示した既存の磁気光学プローブで行った測定と同様に、光ファイバーケーブルに曲げを与えながら測定を行った。ただし、偏光子-磁気光学プローブ-検光子間は一体化されているため、一体型磁気光学プローブの入出力となる、偏光子-レーザー間と、検光子-フォトディテクタ間の光ファイバーケーブルのみに曲げを与えたが、出力信号が変動することはなかった。この結果より、光学素子を磁気光学プローブ本体と一体化したことによる改善効果が明確に示された。

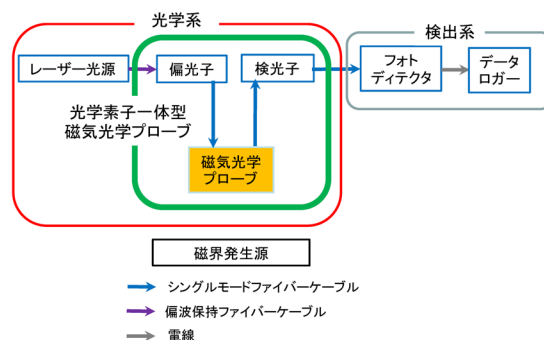


図6 光学素子一体型磁気光学プローブの測定系

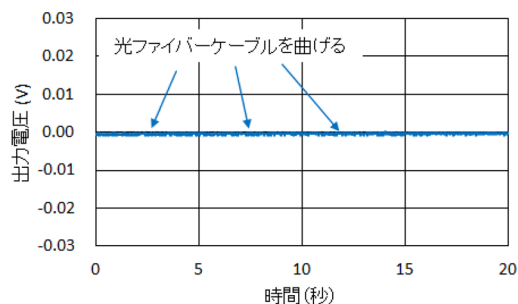


図7 光学素子一体型磁気光学プローブの測定波形 (一般環境)

また、既存の磁気光学プローブの測定時を通して見られたノイズ成分（図4参照）が、新たな磁気光学プローブの測定では見られなかった。これは偏光子への入力ケーブルを偏波保持ファイバーケーブルとしたことにより、入力光が安定したためと考えられる。

次に、低周波磁界への応答性を確認するために、磁界発生コイル（メリットコイル）を用いて一様性の高い正弦波磁界を生成し、磁気光学プローブに印加した時の出力波形を測定した。磁界発生コイルと光学素子一体型磁気光学プローブを含む測定状況を図8に示す。磁界発生コイルにより、50Hz、100Hz、300Hz、500Hzの正弦波磁界を磁気光学プローブに印加して（それぞれ磁束密度3mT（実効値））、その時の出力電圧を確認した。この結果を図9に示す。同図より、それぞれの周波数において、印加された正弦波磁界に応じた出力が磁気光学プローブから得られていることを確認した。

印加する磁束密度に対する磁気光学プローブからの出力電圧の関係を確認した。最大3mTの磁界を印加し、それぞれの周波数において測定した結果を図10に示す。前述した鉄道関連の測定規格である、IEC 62597およびJIS E4018においては、測定値の直線性が定められおり、偏差は±5%以内となっている。今回の結果より、いずれの周波数においても、概ねこの範囲内となっていることを確認した。また、これらの周波数における周波数応答を確認したところ、ほぼフラットな周波数特性であることを確認した。

さらに、直流磁界を印加して、その応答性を確認した。印加磁束密度を段階的に5mTまで増加させながら、連続的に測定を行った時の出力波形を図11に示す。この結果より、直流磁界の印加磁束密度の変化に応じた電圧信号が出力されることを確認した。

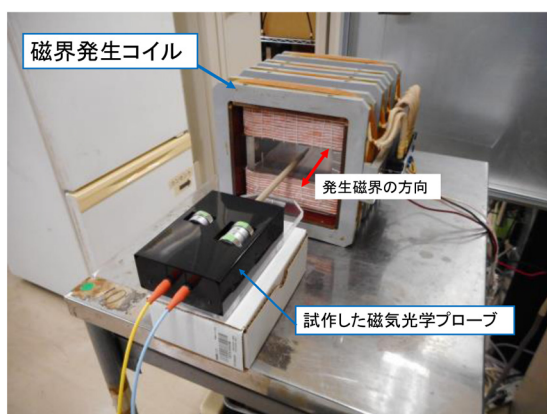
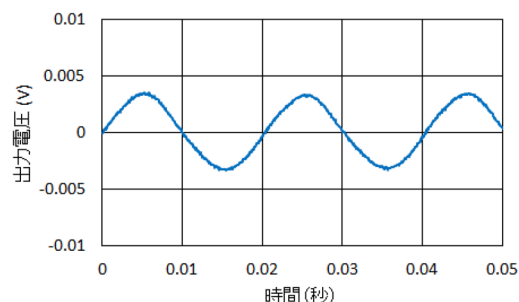
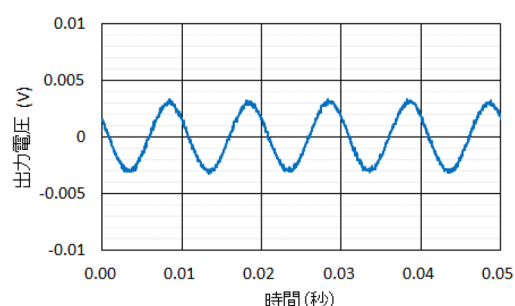


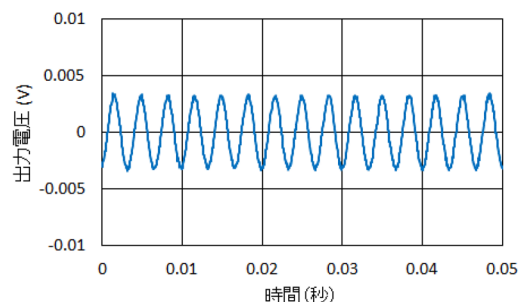
図8 磁界発生コイル（メリットコイル）



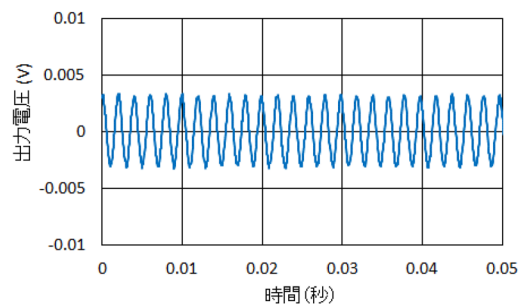
(a) 50Hz



(b) 100Hz



(c) 300Hz



(d) 500Hz

図9 光学素子一体型磁気光学プローブの出力波形

4. まとめ

低周波数帯の環境磁界測定を目的として、新たな磁気光学プローブを試作し、出力特性等を確認した。

従来の磁気光学プローブでは、偏光子、プローブ、検光子間の光ファイバーケーブルを曲げると出力が変動することを確認したので、偏光子と検光子を小型化し、磁気光学プローブの本体に組み込む構成とした。その結果、光ファイバーケーブルに曲げを与えても、新たな磁気光学プローブからの出力信号は変動しないことを確認した。これにより、環境磁界測定時、任意の場所にプローブを移動して測定を行うことが可能となった。

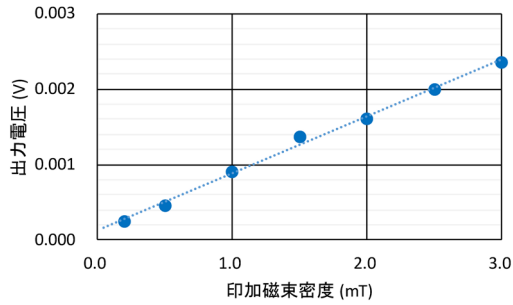
また、従来の磁気光学プローブで測定実績のない500Hz以下の周波数の磁界を磁気光学プローブに印加して、その応答性を調べた。その結果、各周波数の正弦波磁界に応じた電圧波形が出力されていることを確認した。また、印加磁束密度と磁気光学プローブからの出力電圧との関係を調べたところ、これらの間にはほぼ線形な関係があることを確認した。さらに、直流磁界の応答性についても確認したところ、最大で5mTまでの印加磁束密度に応じた電圧信号が出力されることを確認した。これらのことにより、直流磁界を含む低周波数帯の環境磁界測定に活用できる見通しを得た。

今後は実際の環境磁界測定に供するため、磁気光学プローブの三軸化を図る予定である。小型形状を保ったままの構成を目指し、今回と同様の測定試験を実施して、その特性を確認する予定である。

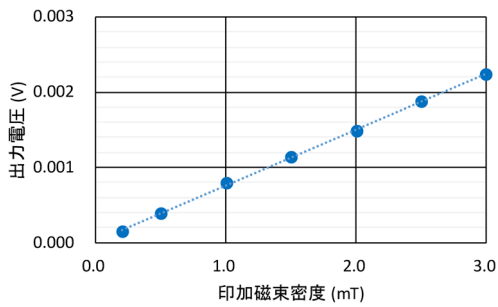
本研究の一部は、総務省委託研究（JPMI10001）により実施した。

謝 辞

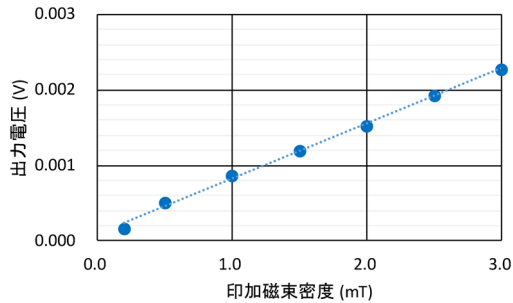
本研究における測定試験等の実施にあたり、森田テック株式会社様には多大なご協力をいただいた。この場を借りて厚くお礼申し上げる。



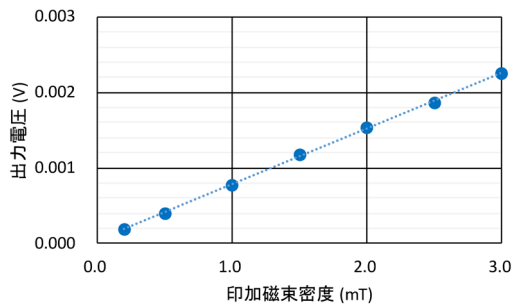
(a) 50Hz



(b) 100Hz



(c) 300Hz



(d) 500Hz

図 10 印加磁束密度と磁気光学プローブからの出力電圧との関係

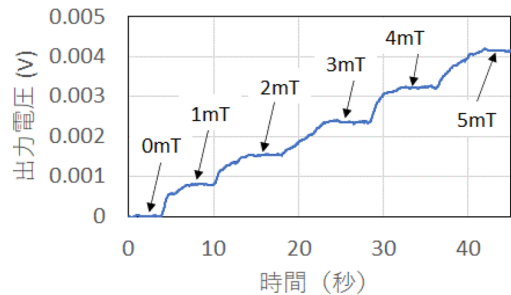


図 11 光学素子一体型磁気光学プローブの出力波形(直流磁界)

文 献

- 1) J. Chakarothai, K. Wake, T Arima, Soichi Watanabe, and U. Toru, "Exposure evaluation of an actual wireless power transfer systems for and electric vehicle with near-field measurement," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, Vol.66, No.3, pp.1543-1552, 2018.
- 2) A. Hirata, I. Fumihito, and I. Laakso, "Confirmation of quasi-static approximation in SAR evaluation for a wireless power transfer system," *Phys. Med. Biol.*, Vol. 58, pp. N241-N249, 2013.
- 3) D. Bellan, A. Gaggioli, A. Mariscotti, and S. A. Pignari, : "Time-Domain Measurement and Spectral Analysis of Non-stationary Low-Frequency Magnetic-Field Emissions on Board of Rolling Stock," *IEEE transaction on Electromagnetic Compatibility*, Vol.46, No.1, pp.12-23, 2004.
- 4) 加藤佳仁, 笹川卓：鉄道車両内における低周波磁界の可視化・評価システムの開発, 鉄道総研報告, Vol. 31, No.1, 2017
- 5) Ikehata, M., Kato, Y., Morita, G., Nakamura, K., Sasakawa, T., "EMF issue in railway system -evaluation and communication tool," *IP_07_6*, 12th World Congress on Railway Research Proceedings, 2019.
- 6) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz), *Health Physics*," Vol. 99, 818-836, 2010.
- 7) IEC 62597 ed1.0 "Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical apparatus in the railway environment with respect to human exposure," 2019.
- 8) JIS E 4018 (2012)：鉄道車両—磁界測定方法, 2012
- 9) ISO 14117 "Active implantable medical devices - Electromagnetic compatibility - EMC test protocols for implantable cardiac pacemakers, implantable cardioverter defibrillators and cardiac resynchronization devices," 2012.
- 10) 竹内, 田代, 吉永, 長谷川, 水間：国際規格に対応した鉄道における磁界測定例, 信学技報, DC2010-51, 2010
- 11) F. Prindahl "The Fluxgate Mechanism, Part1: The Gating Curves of Parallel and Orthogonal Fluxgates," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.MAG-6, No.2, 1970.
- 12) M. Faraday "Faraday's Diary," Vol. 4, 1933.
- 13) 佐藤勝昭：光と磁気, 朝倉書店, 2001
- 14) 西, アルフレード, 鈴木, 和氣：ファラデー効果を用いた中間周波数帯磁界測定用の光磁界センサに関する予備的検討, 電子情報通信学会環境電磁工学研究会, 2014
- 15) Itoh Nobuki, et al. "Small optical magnetic-field sensor that uses rare-earth iron garnet films based on the Faraday effect," *Applied optics*, Vol.38, No.10, 1999.
- 16) Weizhong Zhao "Magneto-optic properties and sensing performance of garnet YbBi:YIG," *Sensors and Actuators*, Vol.89, pp.250-254, 2001.
- 17) E. Yamazaki, S. Wakana, H. Park, M. Kishi, and M. Tsuchiya, "High-frequency magneto-optic probe based on BiRIG rotation magnetization," *IEICE Trans. Electron.*, Vol.E86-C, No.7, 2003.
- 18) 上條, 畑, 日高, 水戸：光磁界測定システムの開発, 電子情報通信学会光応用電磁界計測研究会, 2016
- 19) Wittekoek, S., Popma, T. J. A., Robertson, J. M., and Bongers, P. F. "Magnet-optic spectra and the dielectric tensor elements of bismuth-substituted iron garnets at photon energies between 2.2-5.2 eV," *Phys. Rev. B*, No.12, pp.2777-2788, 1975.