

# 異常ネルンスト効果を利用した フレキシブル熱流センサーの開発

周偉男, 中山裕康, 桜庭裕弥  
(物材機構)

Development of flexible heat current sensor using anomalous Nernst effect

W. Zhou, H. Nakayama, Y. Sakuraba  
(NIMS)

## [背景]

熱流センサーは、熱の流入・流出をベクトル量として、極めて高い感度と応答性で観測できることから、熱の流れを可視化するセンサーとしてIoTでの活用されることが期待されている。しかしながら、現在市販されるゼーベック型熱流センサーは、センサー自体の熱抵抗が高い、フレキシビリティに限界がある、センサーの単価が高い、等の大きな課題がある。我々は、これらの課題を解決するため、磁性体に対し熱流を流した際に生じる熱電効果「異常ネルンスト効果」を利用した新しい熱流センサーを目指した研究を進めている。異常ネルンスト効果は、磁化と温度勾配の外積方向に電界を生じるさせるため、磁性線を面内方向で接続した極めて簡便な熱電対列で直列的に出力電圧を増大可能であり高い感度が期待できるとともに、延性のある磁性金属を低熱抵抗なフレキシブル基板上に成膜し利用すれば、高いフレキシビリティと低い熱抵抗の両立が期待される。その実現に向け、ネルンスト効果を発現する材料には、異常ネルンスト効果による  $10\mu\text{V/K}$  以上の高い熱電能、並びに材料自体の反磁場や外乱磁場の影響を受けにくい低い磁化と大きな保磁力を持つことが求められる。本講演では、近年の材料開拓の成果並びに異常ネルンスト型熱流センサーの性能評価の結果について言及する。

## [実験方法]

異常ネルンスト型熱流センサーの試作品は、CoやFeをベースとした材料の磁性膜を、リソグラフィによって面内型熱電対列に加工することで作製し、図1に示すセッティングによって熱流への感度係数を評価した。磁性線幅は  $50\text{-}400\mu\text{m}$  であり、 $1\text{cm}^2$  サイズによりこれを  $10\text{-}100$  本直列に連結させた。

## [実験結果]

図1に示す通り、ヒーター出力を変えて異常ネルンスト電圧の磁場依存性を測定した結果、外部磁場ゼロでもネルンスト電圧出力が得られ、その出力はゼーベック熱流センサーで同時計測された熱流密度に対して線形的に応答することから、異常ネルンスト効果が熱流センサーとして、外部磁場ゼロでも利用できることが示された。試作品における感度は現行ゼーベック型より  $1\text{-}2$  桁小さいが、磁性線数を増やすことや今後の材料開拓で感度の改善は可能である。

## 参考文献

- [1] Sakuraba et al.,  
APEX 6,033003  
(2013),  
[2] 桜庭裕弥, 日本熱  
電学会 15, 36 (2018)  
謝辞

この成果は、国立研究  
開発法人新エネルギ  
ー・産業技術総合開発  
機構 (NEDO) の委  
託業務の結果得られた。

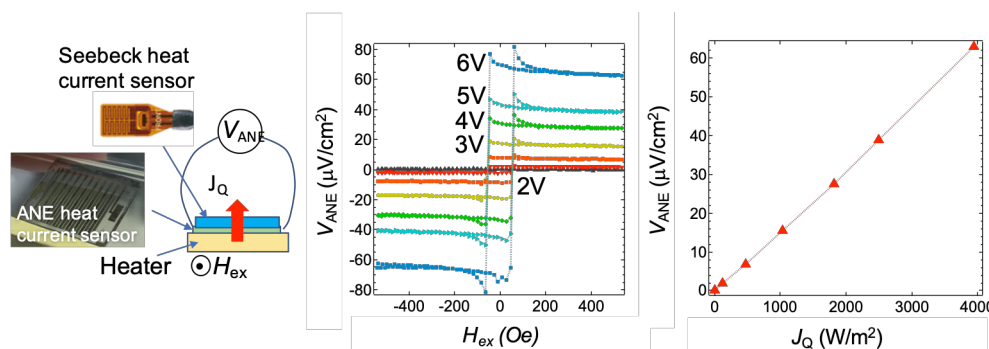


図1 試作した異常ネルンスト熱流センサー( $400\mu\text{m}$  線幅、10本直列接続)の電圧出力の磁場依存性と、ゼーベック熱流センサーで同時観測した熱流密度依存性。

## 強制振動による逆磁歪効果型歪みセンサの特性評価

曾良大輔\*、久保結人、荒井薫、栢修一郎、石山和志(東北大学)

Characteristic evaluation of reverse magnetostrictive effect strain sensor by forced vibration

D. Sora, Y. Kubo, K. Arai, S. Hashi, K. Ishiyama (Tohoku Univ.)

### はじめに

我々は、橋梁等の老朽化インフラの振動特性から健全性を診断可能な振動センサとして、軟磁性磁歪薄膜の逆磁歪効果を用いた高感度歪みセンサを振動センサへと応用する研究を行ってきた<sup>1)</sup>。先行研究においてはセンサをカンチレバー構造とし、自由振動させることでその特性の評価を行っていたが、この方法ではカンチレバーの機械的共振周波数において大きく振動を検知してしまい、センサの特性を正しく測定することができていなかった。そこで別の歪み印加手法として、センサを接着した圧電素子を伸縮させ直接歪みを与える方法を提案する。自由振動では、振動の際センサに与える歪みを制御出来なかったが、この手法を用いれば歪みは制御可能である。また、自由振動の際はセンサにバイアス歪みをかけるために錘を乗せる必要があったが、圧電素子を用いる際はバイアス電圧を印加すればバイアス歪みをかけることが可能になる。強制振動のための予備実験として、磁性膜を成膜していない Si 基板を圧電素子に接着し、直流電圧を印加することで歪みを与えることを試みた。

### 実験方法

直径 50mm、厚さ 4mm の圧電素子上に厚さ 200 $\mu\text{m}$ 、8.5mm $\times$ 25mm の Si 基板を Fig. 1 に示すように接着した。圧電素子に -1000V~1000V の直流電圧を印加し、歪みゲージを用いて Fig. 1 に示す三ヶ所の歪みの測定を行った。

### 実験結果及び考察

電界に対する歪みの測定結果を Fig. 2 に示す。圧電素子上の歪みゲージは電界が 250V/mm の際、およそ 200ppm を検知し、Si 基板上の歪みゲージはおよそ 100ppm の歪みを検知した。以上の結果から、Si 基板には 100ppm 程度の歪みがかけており、特性測定の際にはセンサに十分な歪みを印加することができ、強制振動による測定が可能であると考えられる。実際の強制振動による特性測定の結果は講演の際に報告する。

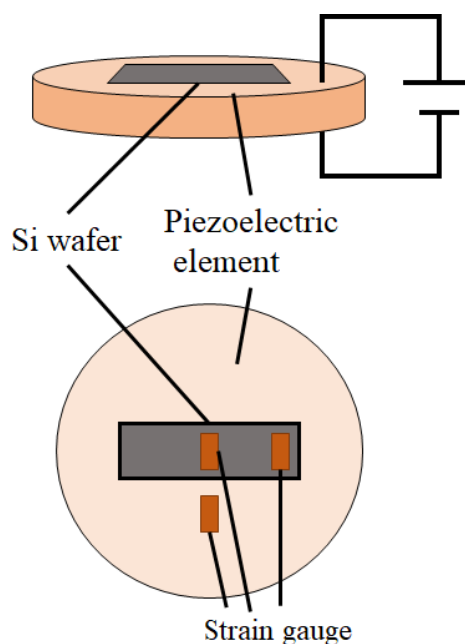


Fig. 1 Schematic diagram of the piezoelectric element.

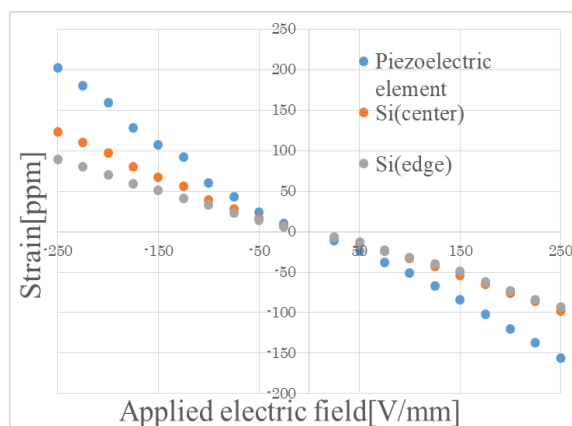


Fig. 2 Distortion characteristics for applied electric field

### 参考文献

- 1) 久保, 栢, 横井, 荒井, 石山, IEEJ Trans. SM, **138**, 4 (2018)

## 磁性ワイヤ・コイル分離型 Wiegand センサを用いた 振動発電と等価回路解析

飯島榛史、孫小雅、原和江、酒井貴史、山田努、竹村泰司  
(横浜国立大学)

Vibration-type energy harvester using Wiegand sensor with separated wire/coil and  
its equivalent circuit analysis

Haruchika Iijima, Xiaoya Sun, Kazue Hara, Takafumi Sakai, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura  
(Yokohama National University)

### はじめに

Wiegand ワイヤ<sup>1)</sup> (熱ひねり加工を施した FeCoV 磁性線) は、大バルクハウゼンジャンプと呼ばれる高速な磁壁移動によって急峻な磁化反転を生じ、検出コイルを設置することでこの磁化反転からパルス出力が得られる。この出力は無電源で得られることや外部磁界の時間変化に依存しないなどの特徴を有しており、エネルギー・ハーベスティング素子への応用が着目されている<sup>2)</sup>。本研究では、複合磁気ワイヤを振動させることにより生じるパルス出力のエネルギー量を測定した。

### 実験方法と結果

本研究では、長さ 13 mm、0.25 mm 径の Wiegand ワイヤを用いた。検出コイルと励磁用磁石をワイヤの近傍に置き、ワイヤの長手方向を励磁用磁石に対して垂直に振動させた(Fig.1)。ワイヤの磁壁移動により生じる漏れ磁束をコイルで検出し、正負それぞれのパルス出力の 1 振動 (1 パルス) 当たりのエネルギー量を求めた。エネルギーは、検出コイルに負荷抵抗を接続し、その消費電力を算出した。また Wiegand ワイヤに対する励磁磁石と検出コイルの相対位置を変えてエネルギー量の変化を検討した。

ワイヤの端を励磁し、検出したエネルギー量の測定結果を Fig.2 のようになる。励磁用磁石は NdFeB ( $4 \times 4 \times 5 \text{ mm}^3$ , 着磁方向)、検出コイルは ( $10 \times 10 \text{ mm}^2$  の平面型, 500 turn) である。これまでに Wiegand ワイヤに検出コイルを巻いた従来型の Wiegand センサを用いた振動発電<sup>3)</sup>や、今回同様のワイヤ・コイル分離型での回転センサへの応用<sup>4)</sup>を報告してきたが、これらの既報と今回得られた微小振動ワイヤからの発電との差異や優位点などを考察した。

具体的な励磁方法や検出コイルの位置等の詳細、等価回路を用いた電力の解析は当日発表する。

### 参考文献

- 1) Wiegand and Velinsky, U.S. Patent 3,820,090, 1974.
- 2) Takemura *et al.*, *IEEE Trans. Magn.*, **53**, 4002706, 2017.
- 3) Takebuchi *et al.*, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **41**, 34, 2017.
- 4) 小原他, *J. Magn. Soc. Jpn.*, **34**, 347, 2010.

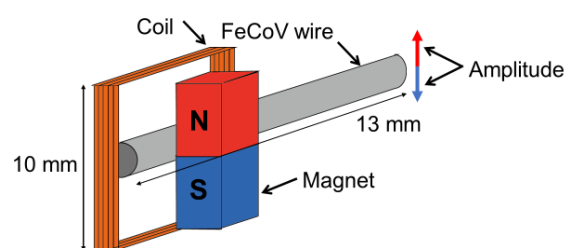


Fig. 1 Configuration of magnetic wire, magnet and detection coil.

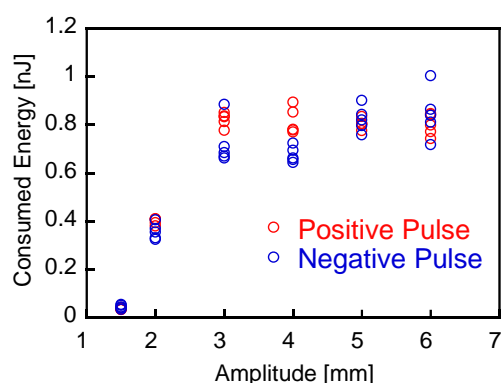


Fig. 2 Consumed energy in the load resistor connected to the Wiegand sensor depending on the vibration amplitude of the excitation coil.

# Wiegand ワイヤを用いた小型ワイヤレス給電

川添駿平、和口修平、酒井貴史、山田努、竹村泰司  
(横浜国立大学)

Wireless power transmission using a Wiegand wire

Shumpei Kawazoe, Shuhei Waguchi, Takafumi Sakai, Tsutomu Yamada, Yasushi Takemura  
(Yokohama National University)

## はじめに

熱ひねり加工を施した FeCoV 磁性ワイヤ(Wiegand ワイヤ)<sup>1)</sup>は、励磁周波数に依らない高速な磁壁移動によって、大バルクハウゼンジャンプと呼ばれる急激な磁化反転を生じるため、この周りに検出コイルを設置することでこの磁化反転からパルス出力が得られる。励磁周波数が 10 kHz 程度以下の低周波帯では、MnZn フェライトコアによる誘導起電力の増幅より、大バルクハウゼンジャンプによる電力の増幅が優位であると報告されている<sup>2)</sup>。また、集積回路の低消費電力化などにより、例えば 100  $\mu\text{W}$  以下の電力であっても十分な用途性がある。よって本研究では Wiegand ワイヤをコアに用いることにより、筒状の電磁誘導型ワイヤレス給電の小型化を想定し、1 kHz 以下の交流磁界によりワイヤを励磁した場合に負荷で得られる電力を測定した。

## 実験方法

Fig.1 に示すように、Wiegand ワイヤ( $\phi:0.25$  mm, length:11 mm)の周りに 3000 turn の給電用検出コイルを設置し<sup>3)</sup>、さらにその外側にはワイヤの中央部が励磁されるように励磁コイルを置き、正弦波交流磁界  $\pm 40$  Oe で励磁させた。検出コイル側の回路には、ダイオードブリッジ及びコンデンサを接続し、正負双方のパルス出力の整流・平滑化を行い、負荷での消費電力を算出した。

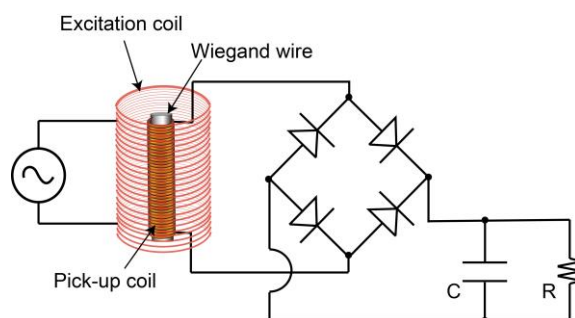


Fig. 1 Configuration of measurement.

## 実験結果

Fig. 2 に励磁周波数を  $f = 1$  kHz, 800 Hz, 600 Hz, 400 Hz, 200 Hz とした場合における、負荷抵抗値  $R$  と負荷での電力  $P$  の関係を示す。 $f = 1$  kHz で  $R = 3$  k $\Omega$  とした場合、この負荷で 100  $\mu\text{W}$  程度の電力が得られることを確認した。また、高周波ほど負荷抵抗依存が大きく、低周波ほど最大電力が得られる負荷抵抗値が大きいことが分かった。

我々は Fig.1 に示す回路の他に、倍電圧整流回路を用いた電力測定や、コンデンサ挿入による共振の影響について検討を行っている。回路パラメータの詳細や、最大電力を得るための検討について当日報告する。

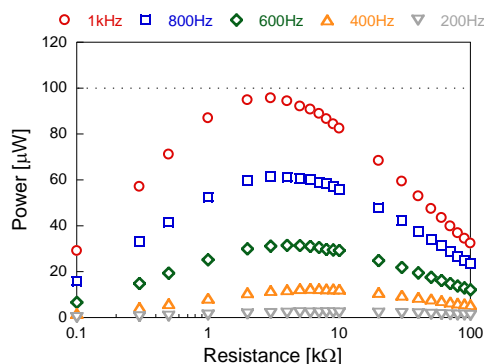


Fig. 2 Electrical power consumed in the load resistance.

## 参考文献

- 1) J. R. Wiegand and M. Velinsky, U.S. Patent 3, 820, 090, 1974.
- 2) Takahashi *et al.*, *J. Mag. Soc. Jpn.* **42**, 49, 2018.
- 3) Takemura *et al.*, *IEEE Trans. Magn.* **53**, 4002706, 2017.

## コリメータレンズをセンサヘッドに用いた 高 S/N 比光プローブ電流センサの基礎検討

山崎 健太<sup>1</sup>, 太田 柊都<sup>1</sup>, 岩見 晃希<sup>1</sup>, 古屋 一輝<sup>1</sup>,  
久保 俊哉<sup>2</sup>, 宮本 光教<sup>2</sup>, 曾根原 誠<sup>1</sup>, 佐藤 敏郎<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>信州大学, <sup>2</sup>シチズンファインデバイス)

Fundamental study on high S/N ratio optical probe current sensor using sensor head with collimator lens  
K. Yamazaki<sup>1</sup>, S. Ota<sup>1</sup>, K. Iwami<sup>1</sup>, K. Furuya<sup>1</sup>, T. Kubo<sup>2</sup>, M. Miyamoto<sup>2</sup>, M. Sonehara<sup>1</sup>, T. Sato<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Shinshu University, <sup>2</sup>Citizen Finedevice Co.,Ltd.)

### はじめに

筆者らは、電磁ノイズの影響を受け難く、直流から高周波まで測定可能な電流センサの実現を目指し、Co-MgF<sub>2</sub> ナノグラニューラー磁性膜の Faraday 効果を利用した光プローブ電流センサの研究・開発を進めている<sup>1)</sup>。本稿では、センサヘッドにコリメータレンズを利用し<sup>2)</sup>、磁性膜への入射光を集光させ、本電流センサの S/N 比を高くする手法を提案した。

### 実験方法

Fig. 1 に示すように、本センサヘッドは偏波保持ファイバ (PMF) から出射した直線偏光がコリメータレンズにより集光され、磁性膜を透過し、誘電体ミラーで反射、再び磁性膜を透過、再度コリメータレンズにより集光され PMF に入射する構成である。Fig. 2 に示す光プローブ電流センサのセンサヘッド部を Fig. 1 の構成とし、800 kA/m → -800 kA/m → 800 kA/m と磁界  $H$  を印加した場合の各偏光強度  $P_P$ ,  $P_S$  を測定した。Faraday 素子には、Co-MgF<sub>2</sub> ナノグラニューラー薄膜 (Co:MgF<sub>2</sub> = 1:2, 厚さ 1.38 μm)<sup>1)</sup> を使用した。

### 測定結果

Fig. 3 にコリメータレンズの有無における光プローブ電流センサの磁界と各偏光強度の関係の測定結果を示す。Fig. 3 より、コリメータレンズを使用することで約 3 倍の光強度が得られた。本電流センサのセンサ出力は、偏光強度の最大値  $P_{max}$  および Faraday 効果による偏光面の回転角 (単位磁界当たりの Faraday 回転角  $\theta_F$  [°/(A/m)]) の積で表され、S/N 比に依存する。前述の通りコリメータレンズの使用で  $P_{max}$  が約 3 倍増大したため、S/N 比が約 3 倍の高くなる可能性が示された。今後は、更に高 S/N 比化を図るため、集磁用小型磁気ヨークの併用も検討する<sup>3)</sup>。

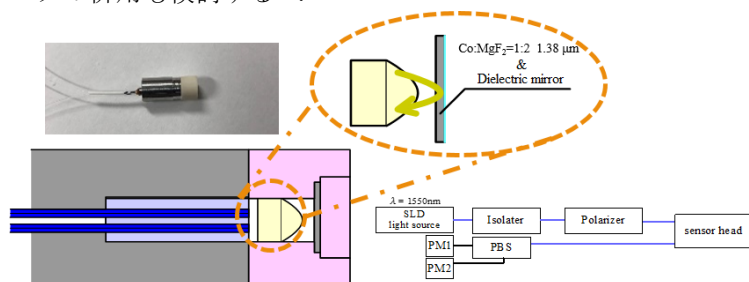


Fig. 1 Photograph and schematic view sensor head with collimator lens.

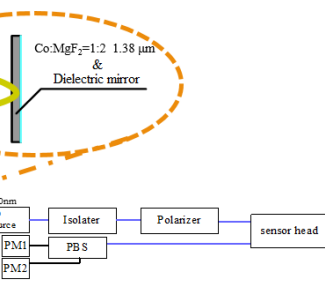


Fig. 2 Optical system for optical probe current sensor.

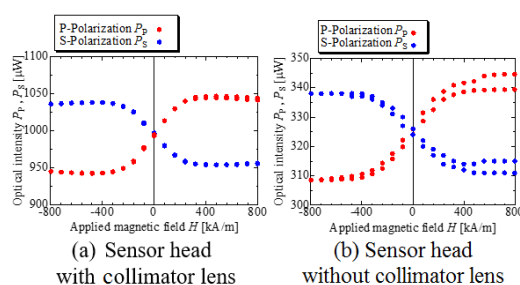


Fig. 3 Experiment results of relation between applied magnetic field  $H$  and optical intensities  $P_P$ ,  $P_S$ .

### 参考文献

- 1) M. Miyamoto, T. Kubo, Y. Fujishiro, K. Shiota, M. Sonehara, T. Sato, "Fabrication of Ferromagnetic Co-MgF<sub>2</sub> Granular Film with High Transmittance and Large Faraday Effect for Optical Magnetic Field Sensor", *IEEE Trans. Magn.*, **54**, 11, #2501205, 2018.
- 2) T. Jitsuno, K. Tokumura, H. Tamamura, "Laser ablative shaping of collimator lens for single mode fiber", *OFC 2001, Tech. Digest Postconference Edition*, #7091585, 2001.
- 3) K. Yamazaki, Y. Fujishiro, K. Shiota, K. Iwami, M. Sonehara, T. Sato, "Study on shape of magnetic-yoke for Faraday-effect optical probe current sensor", *The 42nd Annual Conf. Magn. Jpn.*, 14aD-9, 2018.

# 高い温度安定性を有する リング干渉方式光プローブ電流センサの基礎検討

古屋 一輝<sup>1</sup>, 岩見 晃希<sup>1</sup>, 太田 柊都<sup>1</sup>, 山崎 健太<sup>1</sup>,  
久保 俊哉<sup>2</sup>, 宮本 光教<sup>2</sup>, 曾根原 誠<sup>1</sup>, 佐藤 敏郎<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>信州大学, <sup>2</sup>シチズンファインデバイス)

Fundamental study on ring interferometric optical probe current sensor with high temperature stability  
K. Furuya<sup>1</sup>, K. Iwami<sup>1</sup>, S. Ota<sup>1</sup>, K. Yamazaki<sup>1</sup>, T. Kubo<sup>2</sup>, M. Miyamoto<sup>2</sup>, M. Sonehara<sup>1</sup>, T. Sato<sup>1</sup>  
(<sup>1</sup>Shinshu University, <sup>2</sup>Citizen Finedevice Co.,Ltd.)

## はじめに

筆者らは、電磁ノイズの影響を受け難く、直流から高周波まで測定可能な電流センサの実現を目指し、Co-MgF<sub>2</sub> ナノグラニューラー磁性膜の Faraday 効果を利用した光プローブ電流センサの研究・開発を進めている<sup>1)</sup>。本稿では、高い温度安定性すなわち周囲温度特性に優れたセンサ実現のためにリング干渉計を応用したリング干渉方式光プローブ電流センサを検討し<sup>2)</sup>、その結果について述べる。

## 実験方法

Fig. 1 (a)に従来の透過型 Faraday 効果型光プローブ電流センサの光学系を示す。本電流センサは直線偏光を磁性膜に入射し、透過光を P 偏光と S 偏光に分光させ、これらの光強度差  $\Delta P$  [W]を電流値として換算する<sup>1)</sup>。しかし、周囲温度に変化が生じた場合、使用している偏波保持ファイバ (PMF) の複屈折率と伝送損失に変化が生じて温度ドリフトが生じてしまう。複屈折に伴う温度ドリフトの補償、および伝送損失の温度変化に伴う光強度の変動には、それぞれ PMF の Slow 軸および Fast 軸の両軸を利用して光を伝搬させる方法、および P 偏光と S 偏光の光強度差  $\Delta P$  [W]をセンサ出力とすることが有効である。以上を踏まえて設計したリング干渉方式の光学系を Fig.1 (b)に示す。

## 測定結果

恒温槽 (ESPEC; SU-240) 中にセンサヘッド部を入れ、-40~85 [°C]の間で、P 偏光と S 偏光の光強度を測定し、それらの差分  $\Delta P$  を算出した。Fig. 2 に従来の透過型強度変調方式と本稿提案のリング干渉方式の温度  $T$  [°C] に対する光出力の差  $\Delta P$  [W]を示す。Fig. 2 より、透過型強度変調方式では測定した温度範囲内で約 14  $\mu$ W の温度ドリフトが確認された。一方、リング干渉方式では温度ドリフトが 5  $\mu$ W 程度であり、前述の通り温度変化の補償ができたためと考えられる。40°C 以上で、温度ドリフトが悪化しているが、センサヘッド部で使用している QWP の温度特性が原因であると考えられる。

## 参考文献

- 1) M. Miyamoto, T. Kubo, Y. Fujishiro, K. Shiota, M. Sonehara, T. Sato, "Fabrication of Ferromagnetic Co-MgF<sub>2</sub> Granular Film with High Transmittance and Large Faraday Effect for Optical Magnetic Field Sensor", *IEEE Trans. Magn.*, **54**, 11, #2501205, 2018.
- 2) H. Tamura, H. Tozuka, T. Nakaya, O. Kamada, "Ring interferometric magnetic field optical sensor using a garnet single crystal", *J. Magn. Soc. Jpn.*, **34**, 4, pp. 537-542, 2010.

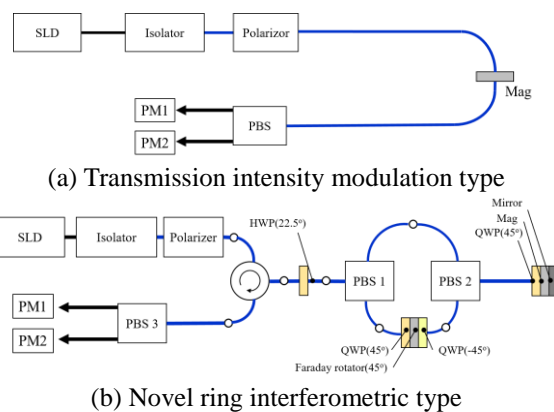


Fig. 1 Schematic view of two kinds of optical probe sensor system.

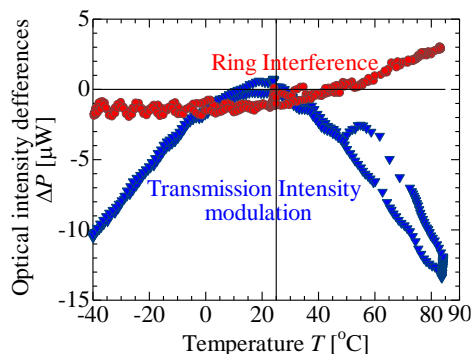


Fig. 2 Relation between optical intensity differences  $\Delta P$  and temperature  $T$ .