

小型集磁ヨーク付ツインヘッド型光プローブ電流センサの基礎検討

Fundamental Study of Twin-Head-Type Optical Probe Current Sensor with Small Magnetic Yoke

金子 秀太^{a)}・曾根原 誠^{a)†}・須江 聡^{b)a)}・宮本 光教^{b)}・久保 利哉^{b)}・佐藤 敏郎^{a)}

^{a)} 信州大学工学部, 長野県長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)

^{b)} シチズンファインデバイス, 長野県北佐久郡御代田町御代田 4107-5 (〒389-0295)

S. Kaneko^{a)}, M. Sonehara^{a)†}, S. Sue^{b)a)}, M. Miyamoto^{b)}, T. Kubo^{b)}, and T. Sato^{a)}

^{a)} Faculty of Engineering, Shinshu University, 4-17-5 Wakasato, Nagano-shi, Nagano 380-8553, Japan

^{b)} Citizen Finedevice Co., Ltd., 4107-5 Miyota, Miyota-machi, Kitasaku-gun, Nagano 389-0295, Japan

The optical probe current sensor enables in-situ sensing and is not affected by electromagnetic noise. However, it is challenging to measure the absolute value of a current because the sensor output depends on the distance from the current. In this paper, the authors propose a twin-head-type optical probe current sensor with a small magnetic focusing yoke that is resistant to misalignment from a current. The output deviation in the sensor was within $\pm 3\%$ at any position of the 0.5-mm diameter conductor on the 2-mm inner-diameter magnetic yoke. In addition, the current sensor was able to measure absolute values from a direct current to a 12.5-MHz alternating current.

Key words: current sensor, Faraday effect, optical probe, magnetic yoke for magnetic flux concentration, absolute value measurement of current

1. はじめに

近年のパワーエレクトロニクス産業においては、大容量（高電圧・大電流）の電源やMHz以上の高速スイッチング電源が開発・使用されつつある^①。特にSiCやGaNなどの第二世代パワー半導体の実用化に伴う動作周波数の高速化はインダクタやキャパシタといった受動素子の小型化による回路自体の小型・軽量化に寄与している。一方で、高周波動作下においては回路内の寄生インピーダンスの影響が大きくなることからリンギングを起こし易く、スイッチングノイズは大きくなる。従って従前以上の電源回路のノイズ対策が要求され、電流計測においては少なくとも数十MHz以上の電流を非破壊・低侵襲で精度良く測定可能であることが要求されている^②。また、電源回路の小型化に合わせて、狭所における電流測定も課題である。従来ある電気式の電流センサ、例えばロゴスキーコイルや電流プローブでは、プローブのサイズ、周波数帯域、周波数ディレーティングに制限があり狭所における正確で低侵襲な電流測定は困難である。シャント抵抗は最も正確な電流測定が可能であるものの被測定回路に直列に抵抗を入れることになり、被測定回路の負荷になってしまう。

一方、光を信号として利用する電流計も開発されている。現在利用されている光電流センサとして、光ファイバのFaraday効果を利用し、光ファイバを巻きつけることで電流を測定する光CTがある^③。磁気飽和が無く大電流測定に向いているが、光ファイバのヴェルデ定数が低いいため光ファイバの巻き数を増やす必要がある。これが原因で測定系の小型化が困難であり、周波数帯域も制限されるためパワエレ機器の電流測定には適さない。

筆者らは、磁性薄膜Faraday素子を使用した電流センサを開発している^④。高い透明性とFaraday回転角を両立するBi:YIG結晶をFaraday素子として利用することで高感度化、センサヘッドの小型化が可能になる^{⑤⑥}。Fig. 1に光プローブ電流センサのセンサヘッ

ド部の拡大写真を示す。約10 μm の幅を持つ縞状磁区構造よりもビーム径を十分に大きくするため光照射範囲を拡大しており、センサヘッド直径は280 μm 程度となっている^⑦。しかしながら、本電流センサはFaraday素子部に鎖交する局所的な磁界を測定しているため、原理的に測定対象（被測定電流）との距離が変わるとセンサ出力が変化し、絶対値計測ができないという課題があった。

そこで筆者らは、Fig. 2に示すように2本のセンサヘッドを被測定電流に対して両側に配置するツインヘッド型のセンサヘッド構造を提案した。ツインヘッド型の方が従来のシングルヘッド型よりも被測定電流との距離に対するセンサ出力の変化が小さい。加えて、被測定電流による磁界(H_i)に対してはセンサ出力が和動、外乱磁界(H_n)に対してはセンサ出力が差動となるため、理想的には信号出力は2倍となり、ノイズはキャンセルされ、S/N比も向上する。

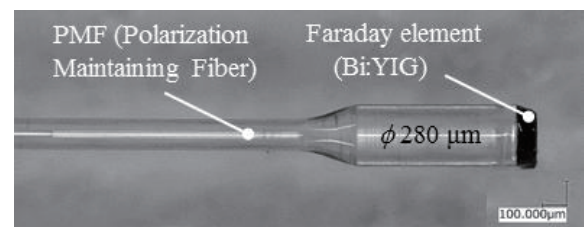


Fig. 1 Photograph of sensor head in optical probe current sensor.

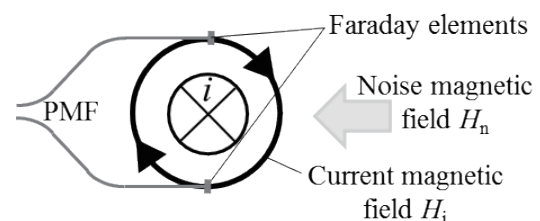


Fig. 2 Schematic view of twin-head-type optical probe current sensor, and current and noise magnetic field.

本論文では、被測定電流とセンサヘッドの距離の変動に対してセンサ出力の変化が現在主に利用されているログスキーコイルや電流プローブと同程度の5%未満まで低減し、かつ挿入インピーダンスが小さいすなわち低侵襲性を旨とした低透磁率・低損失磁性複合材料による準閉磁路構造となる小型集磁ヨークを用いたツインヘッド型光プローブ電流センサを新たに考案し、その諸特性について述べるものである。

2. 小型集磁ヨーク付ツインセンサヘッド部の構造

2.1 小型集磁ヨークの諸検討

Fig. 3にツインヘッド型光プローブ電流センサに使用する小型集磁ヨークの構造を示す。Fig. 3より、センサヘッドであるFaraday素子はヨーク間のエアギャップ部に配置しており、ギャップ間の磁界を検出することで電流磁界を測定する。また、小型集磁ヨークの内径は、想定されるパワー半導体の端子やスイッチング電源内の導線より太く設定し2mmとした。

Fig. 4に小型集磁ヨークの使用材料の複素比透磁率の実部 μ_r' を変更した場合の測定電流位置によるセンサ出力の偏差の解析結果を示す($L_g=200[\mu\text{m}]$; 2.3節で後述するが加工精度の下限)。解析には電磁界解析ソフトウェア(JMAG-studio)を使用した。集磁ヨーク中心部に導線(直径0.5mm)を通して電流20Aを流したと仮定し、導線位置を集磁ヨークの内径2mmの内部で変化させた場合のギャップ間の磁界を計算した。なお、導線の直径は本電流センサの適用先である回路内部で使用されうる導線として十分に細い0.5mmを想定している。出力偏差の基準は、導線が集磁ヨーク中心(Fig. 3の位置①)にある場合とし、②～⑤の各導線位置におけるギャップ磁界の基準に対する偏差を導線位置が集磁ヨーク中心の際のギャップ磁界を H_0 、各導線位置におけるギャップ磁界 H_m として次式で計算した。

$$(H_0 - H_m) / H_0 \times 100. \quad (1)$$

ここで、導線位置①に対して②～⑤の4点に絞って出力偏差を計算している理由は、JMAGであらゆる導線位置を試した結果、この4点が最大あるいは最小の出力偏差になることが分かったためである。出力偏差の最大値(▲)と最小値(▼)をFig. 4に示す。また、Fig. 4には比較として従来のシングルヘッド型光プローブ電流センサの出力偏差の最大値(▲)と最小値(▼)も示した。

Fig. 4より、集磁ヨーク材料の複素比透磁率の実部 μ_r' が減少すると漏洩磁束が増加すると考えられるため、導線位置による出力偏差が増加することがわかる。しかしながら、 $\mu_r'=20$ の低透磁率材料であったとしても、少なくとも今回の解析条件下(導線直径0.5mmの場合)においては、出力偏差が目標の5%未満で、電流センサとして実用範囲内で絶対値計測ができる。また、本提案のツインヘッド型の方がシングルヘッド型よりも出力偏差が小さくなることが分かる。

Fig. 5(a)と(b)に集磁ヨーク使用材料の複素比透磁率の実部 $\mu_r'=20$ とし、集磁ヨーク間のエアギャップのギャップ長 L_g を変更した場合の出力偏差および磁界エンハンス $H_0/H_{(g=1)}$ の解析結果を示す。 H_0 は、導線が位置①の場合のギャップ間の磁界強度である。磁界エンハンスは、集磁ヨークを用いない($\mu_r'=1$)場合の磁界に

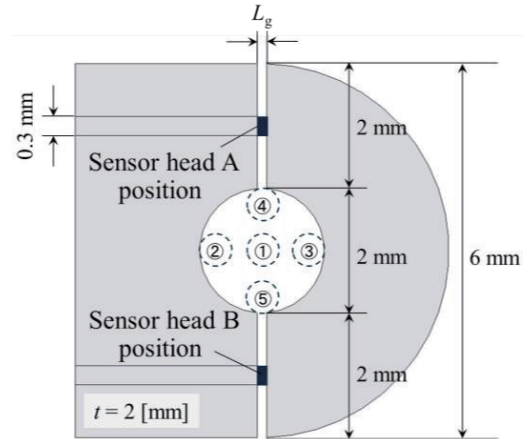


Fig. 3 Schematic diagram of magnetic yoke.

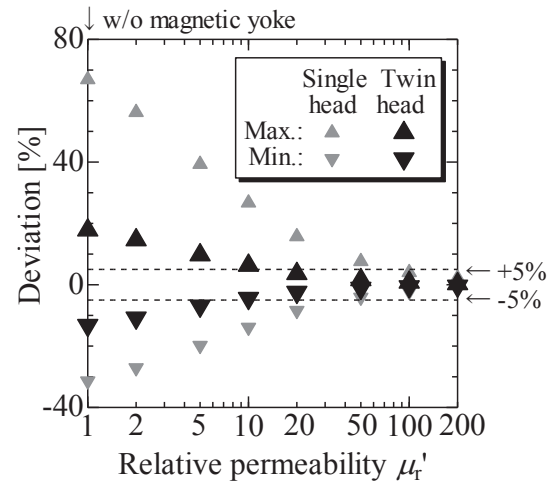


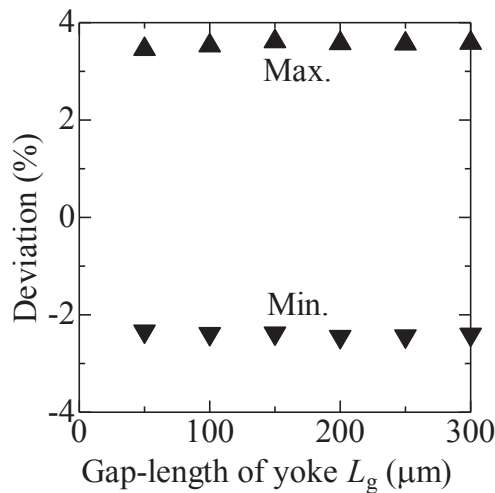
Fig. 4 Relationship between real part of complex relative permeability μ_r' in magnetic yoke and deviation in sensor output.

対して、集磁ヨークによって磁界が何倍になるか、すなわちセンサ感度が何倍増大するかを表す指標である。

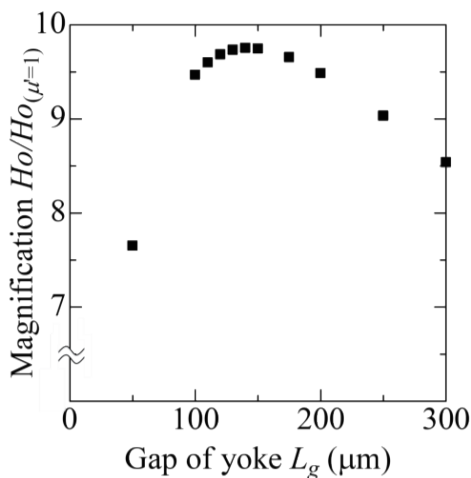
Fig. 5(a)より、集磁ヨーク間のギャップ長 L_g は出力偏差にはほとんど影響しないことが確認できる。一方、Fig. 5(b)より、ギャップ長 L_g が変わることで磁界エンハンス $H_0/H_{(g=1)}$ が変化し、 $L_g=140[\mu\text{m}]$ で最大値となった。これはエアギャップが変化することでフレミング磁束によるギャップ間の磁界の強め合いと、集磁ヨーク実効透磁率の減少の関係が変化するためと考えられる。

2.2 小型集磁ヨーク用磁性材料について

Fig. 4の解析結果より、集磁ヨーク用の磁性材料として鉄系アモルファス合金球形粉末コンポジット材料を採用した。鉄系金属コンポジット材料は、低透磁率材料ではあるが、高周波特性に優れる利点を有し、かつ磁性微粒子間の非磁性樹脂が微小なギャップとなり磁気飽和が起こり難く、粉末間を絶縁することで渦電流損失を抑制できるため複素比透磁率の虚部 μ_r'' を小さくできる利点がある。また、鉄系アモルファス合金球形粉末は異なる粒径の粉末を混ぜ合わせることで磁性体充填率が向上し、飽和磁化などの磁気特性が向上することが分かっているためメディア径が2.59 μm と11.13 μm の粉末を1:3の重量比で混合している⁽⁸⁾。



(a) Deviation in sensor output vs. gap length of yoke



(b) Magnification vs. gap-length of yoke

Fig. 5 Analysis results of relationship between deviation (a), magnification (b), and gap length of yoke.

Fig. 6に鉄系アモルファス合金球形粉末コンポジット材料の複素比透磁率の実部 μ_r' および虚部 μ_r'' の測定結果を示す。Fig. 6より、約10 MHzまでセンサ感度に影響する複素比透磁率の実部 μ_r' は約20で一定であり、またセンサ出力の遅延に影響する虚部 μ_r'' は概ねゼロであることが分かる。Fig. 6に併記した μ_{reff}' はエアギャップを考慮した場合の実効比透磁率であり、2.3節で説明する。

2.3 小型集磁ヨークの試作・評価

Fig. 7に集磁ヨークの作成工程を示す。前述したメディアン径が2.59 μm と11.13 μm の粉末を1:3の重量比で混合した鉄系アモルファス合金球形粉末と2液性エポキシ樹脂、希釈剤としてジブロピレングリコールジメチルエーテルを混合・攪拌することで、コンポジットスラリーが得られる。得られたコンポジットスラリーを型に流し込み2液性エポキシ樹脂の硬化条件である120°Cで6時間焼成した。

Fig. 8に試作した小型集磁ヨークの写真を示す。同写真に示す通り、集磁ヨークの写真上・下の各ギャップ部にセンサヘッド (Faraday 素子) を合わせ、ツインセンサヘッドを組み込んだものとしている。ギャップ長 L_g は加工精度の都合上、200 μm とした。

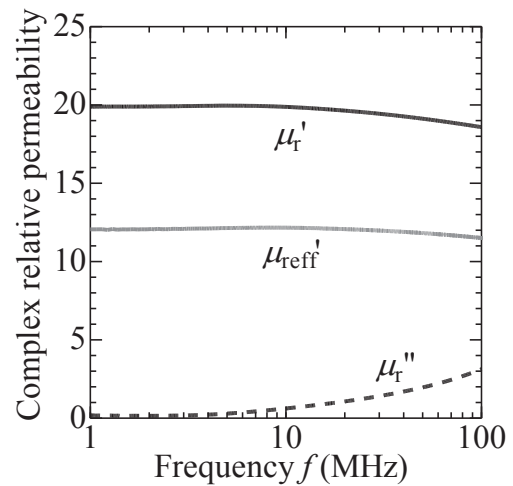


Fig. 6 Frequency dependence of complex relative permeability in Fe-based amorphous alloy powder composite for magnetic yoke.

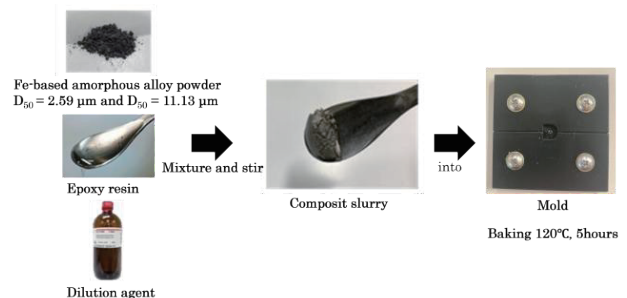


Fig. 7 Fabrication process of magnetic yoke.

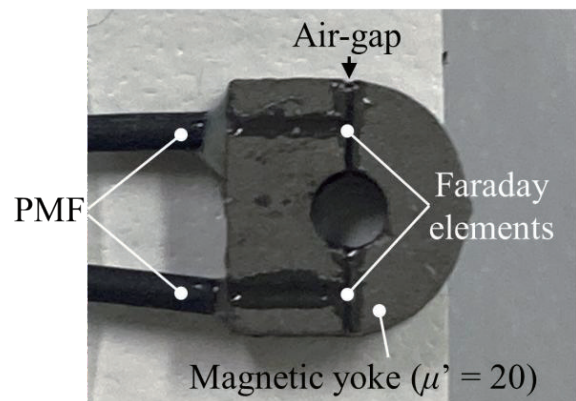


Fig. 8 Photograph of twin-head-type optical probe current sensor with magnetic yoke using Fe-based amorphous alloy powder composite.

このツインセンサヘッドも装荷したギャップ付集磁ヨーク内に1 turnのコイルを通し、インピーダンスマテリアルアナライザ (Keysight Technologies; HP4294A) により、挿入インピーダンス Z を測定した。

Fig. 9に測定時の写真を示す。挿入インピーダンス Z はこの集磁ヨークが電流測定時に測定回路に与えるインピーダンスを示しており、高周波帯においても低挿入インピーダンス (低侵襲) であることが望ましい。

Fig. 10に集磁ヨーク付ツインヘッドの挿入インピーダンスの絶対値 $|Z|$ の測定結果を示す。準閉磁路構造の集磁ヨークを用いている

ので、光プローブ電流センサ単体よりは挿入インピーダンス Z は高くなるが、1 MHz で約 27 m Ω 、10 MHz で約 270 m Ω であり、測定範囲では十分小さいことが分かった。

次に挿入インピーダンス Z の測定結果から、エアギャップ付集磁ヨークをエアギャップ付リングコアに近似して実効比透磁率 μ_{eff}' を算出した。Fig. 11 に実効透磁率計算時の形状近似の模式図を示す。実効透磁率の計算の際には集磁ヨーク形状を内径 2mm、外径 6mm、厚さ 2mm のエアギャップ付きリングコアに近似し、実効断面積と実効磁路長を計算した。集磁ヨークには 2 つのエアギャップがあり、 $\mu_t = 20$ の材料比透磁率に対する実効透磁率の低下による挿入インピーダンスの低下や高周波帯における比透磁率低下の改善が期待できる。Fig. 6 に集磁ヨーク付ツインヘッドの実効比透磁率 μ_{eff}' の計算結果を示す。エアギャップが入ることで、実効比透磁率 μ_{eff}' は 10 MHz で約 12 に低下し、高周波特性も材料単体の比透磁率 μ_t は 1~100 [MHz] の範囲で約 6.8% 減少しているのに対し、実効比透磁率 μ_{eff}' は 4.5% の減少と、改善されていることが確認できる。

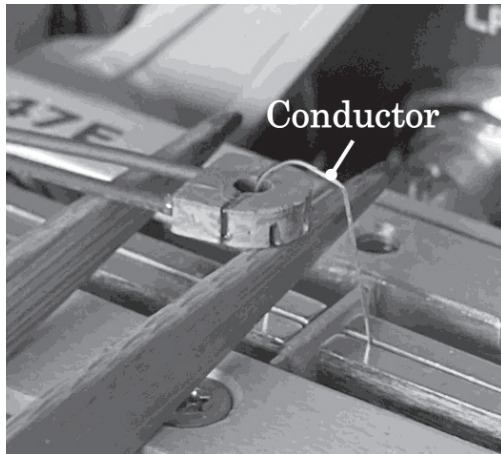


Fig. 9 Photograph of impedance measurement.

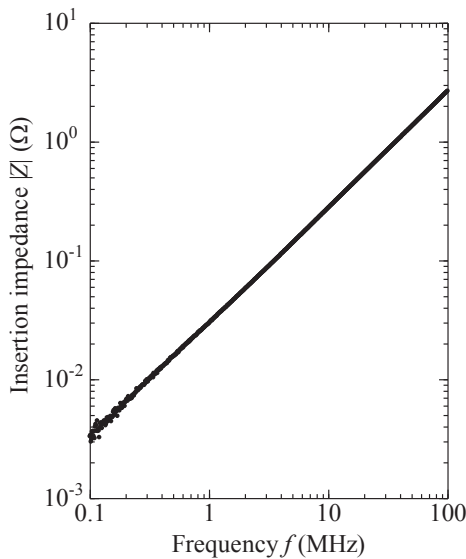


Fig. 10 Frequency dependence of insertion impedance $|Z|$ in twin-head-type optical probe current sensor with magnetic yoke.

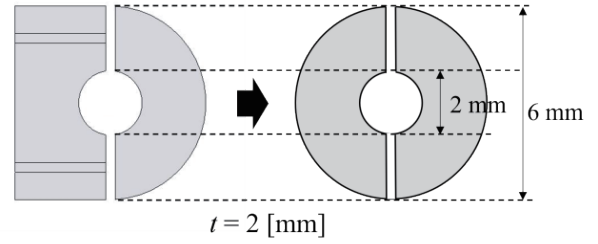


Fig. 11 Schematic of magnetic yoke shape approximation.

3. 小型集磁ヨーク付ツインヘッド型光プローブ電流センサの実測評価

3.1 電流計測の方法

Fig. 12 に電流計測で用いた回路図を示す。電流発生源として、Current probe calibrator (PMK; KSZ-100D) を用いた。直径 0.5 mm の導線に、振幅 $I_m = 20$ [A]、立ち上りスローレート $di/dt = 570$ [A/ μ s] (周波数に換算すると 12.5 MHz) のパルス電流を流した。 $I_m = 20$ [A] とした理由は、他方式の電流センサでは測定が困難である高周波・大電流の測定環境を模擬するためであり、比較対象として高周波・大電流を精度良く測定できるログスキーコイル電流センサ (IWATSU; SS-683) を使用した。導線位置の固定には、Fig. 13 に示す位置ガイドを使用した。位置ガイドは ABS 樹脂で作製し、集磁ヨークの内径に合わせて外径を 2 mm とし、導線を通す穴 (直径 0.6 mm) を計 5 箇所空けた。これら穴の位置①~⑤にそれぞれ導線を通した場合のパルス電流をそれぞれ 5 回ずつ、小型集磁ヨーク付ツインヘッド型光プローブ電流センサで計測した。

3.2 小型集磁ヨーク付ツインヘッド型光プローブ電流センサのセットアップ

Fig. 14 にシングルヘッド型光プローブ電流センサの光学系構成を示す。光学構成はセンサヘッド入力側に中心波長 1550 nm の SLD (Super Luminescent Diode) 光源、光アイソレータおよび偏光子からなる光源部、出力側に分光素子である PBS (Polarization Beam Splitter) を PMF (Polarization Maintaining Fiber) で接続した構成である⁹⁾。光源部により生成された直線偏光は、センサヘッド内の Faraday 素子の面垂直方向に入射する。Faraday 効果により透過光の偏光面が Faraday 回転角 θ_F だけ回転し、P 偏光強度 P_P および S 偏光強度 P_S が変化する。P 偏光、S 偏光の光強度および偏光強度差 ΔP は次式で表される。

$$P_P = P_{\max} \sin^2(\theta_F + \alpha) = P_{\max} \sin^2(\theta_F + \pi/4). \quad (2)$$

$$P_S = P_{\max} \cos^2(\theta_F + \alpha) = P_{\max} \cos^2(\theta_F + \pi/4). \quad (3)$$

$$\Delta P = P_S - P_P = P_{\max} \sin 2\theta_F \approx P_{\max} 2\theta_F. \quad (4)$$

ここで、 $P_{\max}$ は各偏光強度の最大値、 θ_F は Faraday 回転角、 α は磁界無印加時の透過光の偏光角で $\pi/4$ rad である。

シングルヘッド型光プローブ式電流センサは、(3)式の ΔP がセンサ出力に相当する。

ツインヘッド型光プローブ電流センサの出力は、2 本のセンサヘッドの出力感度が偏ると導線位置による出力偏差が大きくなることが考えられるので、本実験においては 2 本のセンサヘッドにそれぞれ Fig. 14 に示す光学系を接続し、二つの SLD 光源に入力する電流値で $P_{\max}$ を調整することで感度を揃えて計測した。

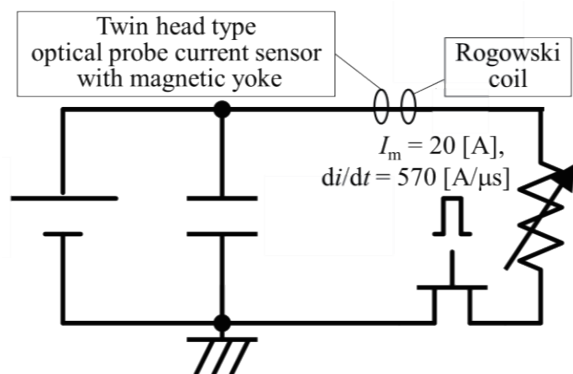


Fig. 12 Circuit diagram for pulse current measurement using twin-head-type optical probe current sensor with magnetic yoke and Rogowski coil.

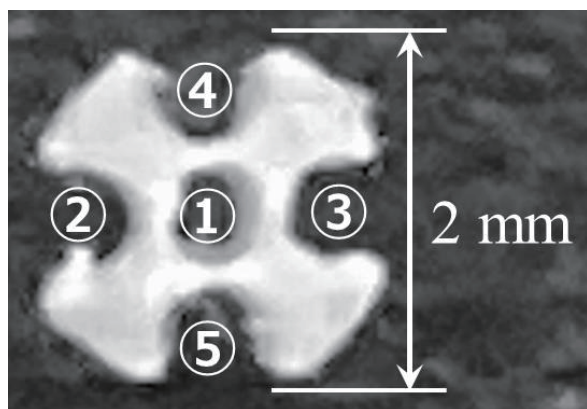


Fig. 13 Photograph of conductor-position guide in magnetic.

3.3 小型集磁ヨーク付ツインヘッド型光プローブ電流センサの導線位置による出力偏差の評価

Fig. 15(a)と(b)に Fig. 13 の位置①と位置④に導線を通した場合のツインヘッド型光プローブ電流センサで計測したパルス電流波形を示す。

Fig. 15 (a)より、位置①の場合は2本のセンサ出力が概ね一致している。一方、同図(b)より、位置④の場合は導線がセンサヘッドAに近づくため、センサヘッドAのセンサ出力が大きくなっている。シングルヘッド型の場合はこの影響で出力偏差が大きくなるが、ツインヘッド型にすることで、センサヘッドBのセンサ出力が相対的に小さくなり、出力偏差を抑えられていることがわかる。

Fig. 16に②～⑤の各導線位置における5回の電流測定結果における出力偏差の最大値、最小値、平均値を示す。測定回数によって出力が大きくばらつくことはなく、出力偏差は±3%程度に収まっている。Table 1に導線が位置①の場合を基準とした位置②～⑤の各導線位置におけるセンサ出力の偏差の平均値を示す。Table 1の各導線位置におけるセンサ出力の偏差の実験結果より、出力偏差は約±3%で概ね解析値と一致し、目標である±5%未満になり、実用的に絶対値計測が可能な電流センサになり得ることが明らかになった。

3.4 光プローブ電流センサとログスキーコイルの電流波形の比較

Fig. 17 (a)と(b)に集磁ヨーク付ツインヘッド型光プローブ電流センサ（導線は位置①）とログスキーコイルで計測したパルス電流波形の立上りとパルス波形を示す。電流パルスの立上りにおいて、ツインヘッド型光プローブ電流センサとログスキーコイルの出力波形は遅れや乱れはなく、良好な結果を得られた。この立上りは周波数に換算すると12.5 MHzに相当するため、少なくともこの程度の周波数に対しては問題なく応答できることが確認できた。

パルス電流波形全体を比較すると、パルスの立上り後と立下りの部分において出力波形が大きく異なっている。ログスキーコイルの立上り後の計測波形が右下がりに減少するのは、ログスキーコイルが電流の時間変化率 (di/dt) を積分することで電流を計測しているからであり、直流成分を原理上測定できないためである。同様の理由で立下りも出力が下がってしまうため、負にオーバーシュートするように表れてしまう。一方、集磁ヨーク付ツインヘッド型光プローブ電流センサは、Faraday 素子の磁化によって生じるFaraday 回転角を計測しているため、電流の直流成分を測定でき、20 A 程度の電流であれば磁気飽和なく測定できることが確認できた。

4. まとめ

本論文では、絶対値計測可能な光プローブ電流センサの開発を目的とし、磁性材料を用いた集磁ヨークとツインヘッド型を同時に採用した集磁ヨーク付ツインヘッド型光プローブ電流センサを検討および試作、評価した。本研究により明らかになった諸点を以下に述べる。

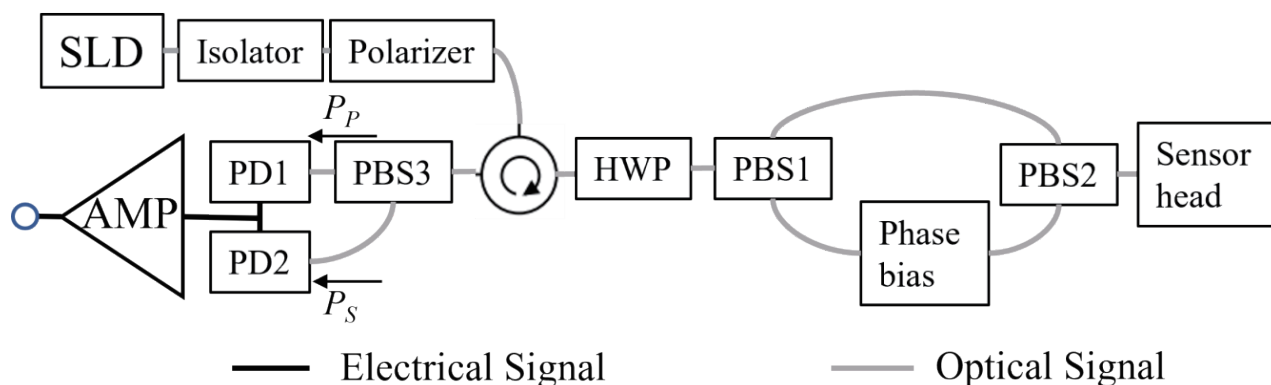
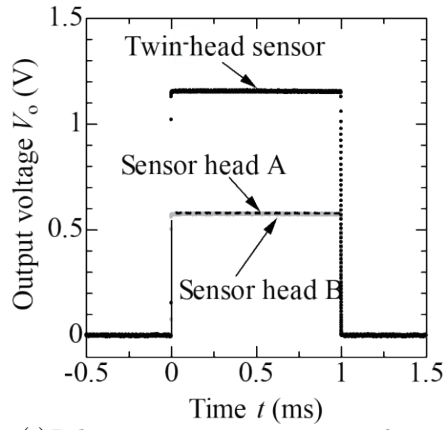
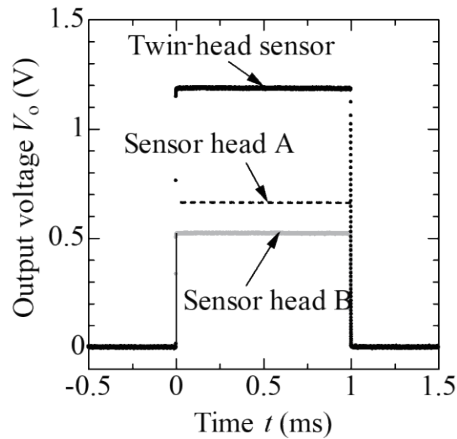


Fig. 14 Schematic view of optical system in single-head-type optical probe current sensor.



(a) Pulse current measurement waveform of position ①



(b) Pulse current measurement waveform of position ④

Fig. 15 Pulse current waveform measured by twin-head-type optical probe current sensor with magnetic yoke.

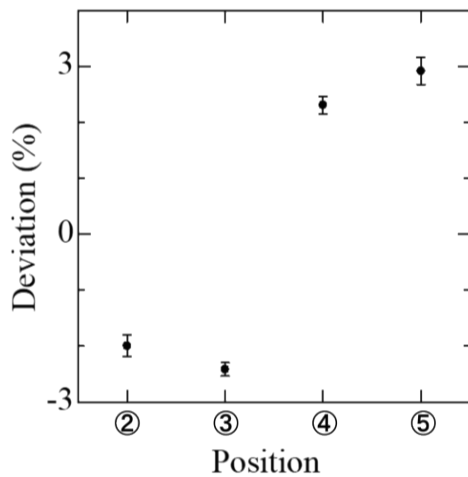
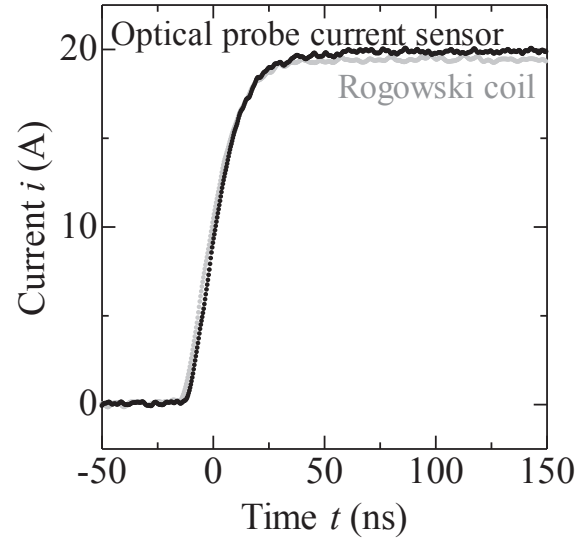


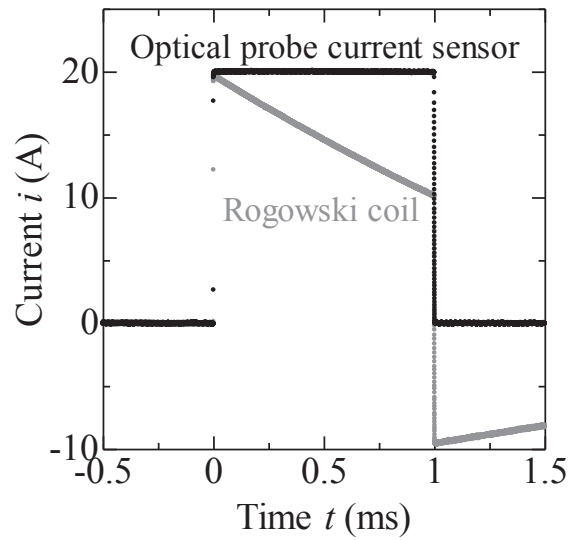
Fig. 16 Variation of output deviation in position ②-⑤.

Table 1 Sensor output deviation of each position ②-⑤ from position ① in twin-head-type optical probe current sensor with magnetic yoke.

Position	Simulation	Measurement
②	-2.4%	-2.0%
③	-2.4%	-2.4%
④	+3.5%	+2.3%
⑤	+3.6%	+2.9%



(a) Measurement waveform of rising pulse current



(b) Measurement waveform of pulse current

Fig. 17 Comparison of measurement waveforms between twin-head optical probe current sensor with magnetic focusing yoke and Rogowski coil.

- (1) ツインヘッド型を採用することで集磁ヨークに鉄系アモルファス合金球形粉末コンポジット材料のような低透磁率材料 ($\mu' = 20$) を使用しても、導線位置による出力偏差を2本のセンサヘッドが相殺し、 $\pm 3\%$ 程度の出力偏差で絶対計測が可能である。
- (2) Current probe calibrator を使用したパルス電流波形計測において、周波数に換算すると 12.5 MHz に相当する立上りを計測でき、直流成分も計測できることを明らかにした。

今後の展望として、ツインヘッド型光プローブ電流センサを構成する光学素子を減らすため、光源を1つで構成する光学系を検討する。また、集磁ヨークによる挿入インピーダンスをより低減するため、集磁ヨークの形状・寸法や使用材料を再検討し、より低侵襲で絶対計測可能な電流センサを開発する。

謝辞 本研究は、NEDO「官民による若手研究者発掘支援事業」共同研究フェーズ（2023 度新エネ領ム第 1002006 号）の助成を受けたものである。

References

- 1) Y. Takahashi and T. Endo: *J. Jpn. Inst. Electron. Packaging*, **24**, 215 (2021).
- 2) N. Sato and H. Yamamoto: *Rep. Chiba Inst. Technol.*, **62**, 23 (2015).
- 3) R. M. Silva, H. Marins, I. Nascimento, J. M. Baptista, A. L. Ribeiro, J. L. Santos, P. Jorge, and O. Frazão: *Appl. Sci.*, **2**, 602 (2012).
- 4) M. Miyamoto, T. Kubo, Y. Fujishiro, K. Shiota, M. Sonehara, and T. Sato: *Intermag 2018 Digest Book*, p.754 (2018).
- 5) S. Sue, M. Miyamoto, T. Kubo, M. Sonehara, and T. Sato: *IEEE Trans. Magn.*, **59**, 4000506 (2023).
- 6) A. D. Block, P. Dulal, B. J. Stadler, and N. C. Seaton: *IEEE Photonics J.*, **6**, 0600308 (2014).
- 7) M. N. Deeter, A. H. Rose, and G. W. Day: *J. Light. Technol.*, **8**, 1838 (1990).
- 8) N. Yabu, K. Sugimura, D. Shibamoto, Y. Inagaki, D. Ueda, M. Sonehara, and T. Sato: *The Papers of Tech. Meeting on Magn.*, *IEEJ*, MAG-17-200, (2017).
- 9) K. Furuya, K. Iwami, S. Ota, K. Yamazaki, T. Kubo, M. Miyamoto, M. Sonehara, and T. Sato: *43rd Annual Conf. Magn. Jpn.*, 25pD-6, (2019).

2024年10月22日受理, 2025年3月11日採録