

# 鉛ガラス光ファイバのファラデー効果を用いた電流計測

HOYA株式会社 R&Dセンター  
坂本和夫、山下俊晴

## A Faraday-effect current sensor using flint glass optical fiber

Kazuo Sakamoto, Toshiharu Yamashita

R&D Center, HOYA Corporation

### Abstract

A single mode optical fiber made from flint glasses with negligible stress-optic effect has been developed as the sensing fiber for current measurement based on the Faraday effect. A model of a current measurement system which is composed of a light source, an optical module integrated with the sensing fiber and optical components, and a signal-processing electrical circuit has been constructed. The current measurement characteristics exhibited high accuracy and high temperature stability meeting the requirements for the current transformers used in the electric power transmission systems.

### 1. はじめに

光ファイバを用いた電流の計測は、光ファイバを伝播する直線偏光のファラデー効果を利用して電流計測するものである。

図1に光ファイバを用いた電流計測の基本原則を示す〔1〕。センシングファイバは被測定導体の周囲に巻付けられており、センシングファイバの両端にはそれぞれ偏光子と検光子が設けられている。光源より偏光子を通してセンシングファイバに入射された直線偏光は、電流の作る磁界を受け、ファラデー効果によって電流に比例した分だけ偏波面方位が回転する。センシングファイバを出射した光の偏波面方位の回

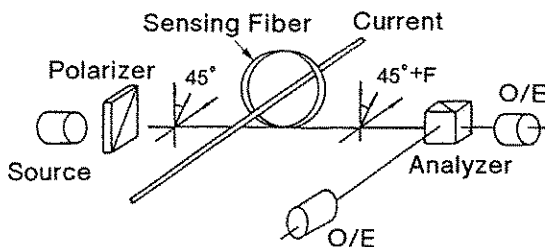


Fig.1 A basic arrangement of a fiber-optic current measurement system based on the Faraday effect

転角度を検光子によって測定すれば導体を通る電流が測定できる。

電流計測、なかでも変電所などにおける高電圧大電流の計測には従来から巻線型電流変成器が使われている。巻線型電流変成器に比較して

Table 1 Types and causes of the birefringence

Type	Cause	Expression
Intrinsic	Residual stress through fiber fabrication process	$(2\pi/\lambda) \cdot C \cdot T$
	Elliptic deformation of core (Normalized Freq. $V \approx 2.4$ )	$0.125 \cdot (e^2/a) \cdot (2\Delta)^{3/2}$
Induced	Bending	$(\pi/\lambda) \cdot C \cdot E \cdot (r/R)^2$
	Twisting	$2C \cdot (G/n) \cdot \phi t$
	Pressure	$(8/\lambda) \cdot C \cdot (Fc/rL)$
	Thermal stress	$C \cdot \alpha \cdot E f / (1-\nu)$

$\lambda$  = Wavelength、 $C$  = Stress-optic coefficient、 $T$  = Residual stress、  
 $e$  = Ellipticity of core、 $a$  = Core radius、 $\Delta$  = Relative refractive index difference  
 $R$  = Bending radius、 $r$  = Fiber radius、 $E$  = Young modulus、  
 $n$  = Refractive index of core glass、 $G$  = Shear modulus、 $\phi t$  = Torsional rate of fiber、  
 $L$  = Fiber length on which the load  $F_c$  exerts、  
 $f$  = Geometrical factor、 $\alpha$  = Linear thermal expansion coefficient、 $\nu$  = Poisson ratio

光ファイバのファラデー効果を利用した電流計測の利点として、(1)高電圧大電流計測における絶縁の問題が無い、(2)ファイバが可撓性であるので小型化が可能、(3)電磁誘導がない、などが挙げられる。

センシングファイバとしてこれまで石英ガラス光ファイバを用いた研究が長年行われてきたが、熱、変形、応力、振動などに敏感であり、精度の高い測定や使用環境での安定動作には不十分な点があった〔2〕。

この原因は主にセンシングファイバの複屈折にあると考えられる。ファイバにおける種々の複屈折を表1に示した〔3〕〔4〕。複屈折にはファイバ固有の固有複屈折と、応力などによって引き起こされる外乱誘起複屈折がある。表1によると、コアの楕円化にもとづくもの以外はすべて光弾性定数に比例することが分かる。すなわちファイバ製造時などに生じる残留応力が光弾性効果によって固有複屈折を増加させ、また熱、変形、加圧、振動などの外乱で引き起こされる応力も光弾性効果によって誘起複屈折を引き起こすのである。石英ガラスファイバは

光弾性定数が大きいので誘起複屈折が制御されず、環境安定性が低下するものと考えられる。つまりファイバ素材の光弾性定数をゼロにすればほとんどの複屈折が抑制されることが期待される。

本報告では、上記の観点に基づいて開発した、光弾性定数が極めて小さい鉛ガラスシングルモード光ファイバについてはじめに述べ、次にそれをセンシングファイバに用いた電流計測について報告する。

## 2. 鉛ガラス光ファイバ

### 2.1 鉛ガラス

表2に本報告の鉛ガラスの光弾性定数とベルデ定数を示す。石英ガラスに比べ光弾性定数は約300分の1、ベルデ定数は約5倍である。なお光弾性定数は安定化He-Ne横ゼーマンレーザー(633nm)を光源とし光ヘテロダイン法によりバルクガラスを試料として測定した。

### 2.2 鉛ガラスファイバ

ファイバ構造はコア/クラッド/オーバーコート

Table 2 The stress-optic coefficient and the Verdet constant of the flint glass and the silica glass

Glass	Stress-optic coefficient (633nm) ( $\text{cm}^2/\text{kg}$ )	Verdet constant (633nm) ( $\text{min}/\text{Oe} \cdot \text{cm}$ )
Flint Glass	$1.3 \times 10^{-9}$	0.073
Silica Glass	$3.4 \times 10^{-7}$	0.012

ラッドの3層構造で、屈折率プロファイルはW型である。コア/クラッド/オーバークラッド素材はいずれも鉛ガラスであり、組成は $\text{SiO}_2$ が約5%~35%、 $\text{PbO}$ が約85%~65%である。オーバークラッドはクラッドモードを除く目的で付加されており、850nm用ファイバでは銅イオンが加えられ800nm近傍の波長の光が吸収される。被覆はUV硬化樹脂の1重被覆である。

850nmシングルモードファイバの構造パラメータと特性を表3に示す。伝送損失は2dB/mと通信用石英ガラスファイバの約 $10^4$ 倍であるが、センサ用途で数m程度で使用することは可能である。

Table 3 The structural parameters and properties of the flint glass fiber

Fiber Diameter [ $\mu\text{m}$ ]	125
Core Diameter [ $\mu\text{m}$ ]	5.7
Relative Refractive Index Difference [%]	0.18
Numerical Aperture	0.11
Normalized Frequency	2.35
Transmission Loss [dB/m]	2
Modal Birefringence [deg/m]	5
Average Tensile Strength [GPa]	0.61
Minimum Bending Radius [mm]	3.0

ファイバは三重構造のプリフォームをロッドインチューブ法〔5〕によって作製し、通常のファイバドローイングによって作製した。

### 3. 電流計測器の試作

電流計測器として変電所で使用される単相ガス絶縁開閉器を想定したモデルを試作し、その特性を調べた。

#### 3. 1 計測システム構成

(1) 電流計測システムの構成、および試作したセンサモジュールの構造を図2に示す。直径約600mmのアルミニウム製の枠にセンシングファイバが1周巻付けられており、一端には偏光子と偏波保持ファイバが接続され、他端には検光子と受光用ファイバが接続されている。光源からの光は偏波保持ファイバに入射し、偏光子で直線偏光に整形されたのちセンシングファイバを伝播してファラデー回転を受ける。検光子によって分けられた出射光の両偏波成分は受光用マルチモードファイバに導かれ、受光素子によってO/E変換され光

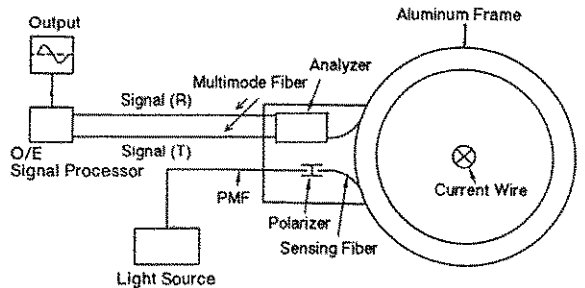


Fig. 2 The model of current sensor for the electric power transmission lines

強度となる。偏波成分の強度は信号処理回路によって演算され、電流が求められる。

光源には戻り光によるノイズを減少させることを目的として、干渉性の低い光源としてスーパーミネセントダイオード（SLD、中心波長 840nm）を使用した〔6〕。

偏光子は、金属と絶縁体の積層物から作られる積層型薄膜偏光子〔7〕を挟んで、偏波保持ファイバと鉛ガラスファイバが突き合わせで結合されている。

検光子は中間にプリズムなどの偏光分離素子と半波長板を備え、ファイバコリメータの空間結合で構成されている。半波長板を回転することによって、電流が流れていないときの偏波面方位を検光子の軸にたいして45度方向に設定できる。受光用ファイバにはコア径 200  $\mu\text{m}$  の多成分ガラス系マルチモードファイバを用いた。

基本特性の評価では、アルミ枠に電線を20回巻き、最大で 220Armsに相当する11Armsまでの交流（50Hz）を流した。

また大電流の計測実験ではアルミ枠の中央に導体を通し、トランスにより最大4000Arms程度の電流を流した。

## (2) 受光、信号処理回路

光源の光強度の変動あるいはファイバの枠への巻き形状の変化、受光系検光子の軸方位のずれなどは測定誤差の原因となる。これらによる誤差を除くために、本研究では、①入射直線偏光の方向にたいして45度方向に軸を定めた検光子によって出射光を二つの偏波成分  $I_1$ 、 $I_2$  に分離し、②  $I_1$ 、 $I_2$  おのこのについて交流成分と直流成分の比、すなわち変調度を求め、③それら変調度の差信号を求める、という信号処理方法によりファラデー回転角を求めた。

この方法は交流測定のみで有効であるが、変調度は受光素子の感度の変動、受光用ファイバの損失変動の影響を受けないうえ、変調度の差信号を求めることで検光子の軸方位の

微小なずれを補正することができるので測定精度を向上する方法として有効である〔8〕。

すなわち偏波面の方位が45度方向からわずかな量  $\delta$  ( $\ll 1$ ) だけずれた場合、それぞれの変調度は以下の式で表わされる。

$$M_1 = M_0 \sin \omega t (1 + 2\delta)$$

$$M_2 = -M_0 \sin \omega t (1 - 2\delta)$$

ここで、 $M_1$ 、 $M_2$  はそれぞれ受光側 1 と 2 の変調度で、 $M_0$  は偏波面の方位が45度方向に厳密に一致しているときの変調度である。

上記の式から

$$(M_1 - M_2) / 2 = M_0 \sin \omega t$$

となり、 $\delta$  に起因する誤差を補正することができる。

この演算を実時間で実現する回路のブロックダイアグラムを図3に示す。フォトダイオードの出力はそれぞれバンドパスフィルタ（BPF）とローパスフィルタ（LPF）によって交流成分と直流成分に分けられ、割り算器によってそれらの比が求められる。最後に和算器により両者の差信号を最終出力とする。

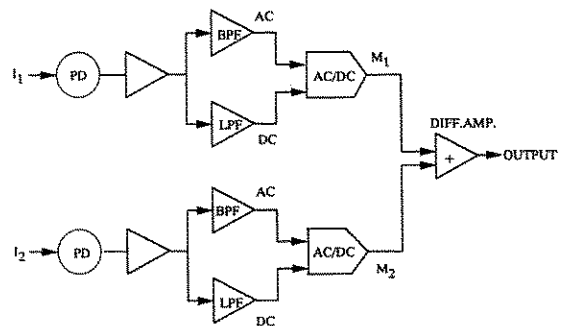


Fig. 3 The block diagram of the signal processor circuit

## 3. 2 電流計測特性

センサモジュール損失は 3.6dB、また出射光の消光比は30dBであり、ほとんど直線偏光であった。したがって出射光の楕円化による測定誤差〔9〕は考慮しなくてよい。

## (1) 電流計測の精度

図4に小電流測定における出力-電流特性を示す。直線性は極めて優れている。電流がゼロ付近でのノイズレベルは約3 Armsであったが、これには光源のノイズ、測定時の振動などが影響しているものと考えられる。

図5に4500Armsまでの測定精度を示す。ここで比誤差 (ERROR)とは0.2PS級標準電流変成器の出力にたいする相対誤差である。比誤差は4000Arms付近ではほぼ0%、1000Arms付近で0.5%程度であった。この特性は電気機器規格JEC-1201 [10] に定められた1PS級を満たすものである。

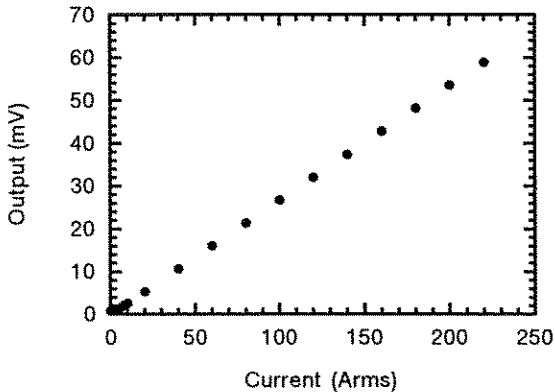


Fig. 4 The current measurement characteristic in low current range

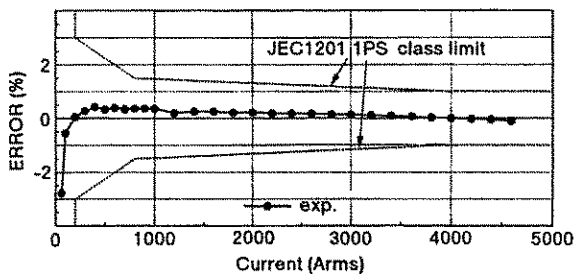


Fig. 5 The error in the measurement of current up to 4500 Arms

## (2) 温度特性

センサモジュールを恒温槽に入れ、50Hz、1800Armsの電流を流し、温度を30℃→-20℃

→80℃→30℃と変化させた時の比誤差の変化を図6に示す。比誤差は温度に対して一定の傾きで増大し、変化率は約 $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ である。この変化率は同種の反磁性鉛ガラス、SF57のベルデ定数に対するWilliamsらの報告 [11] とほぼ一致し、ベルデ定数の温度依存性を反映した結果と解釈できる。-20℃~80℃の範囲での変化幅は±0.5%であり、これも電気機器規格JEC-1201に定められた1PS級を満たすものである。

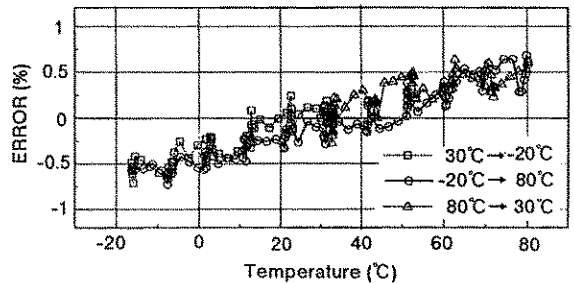


Fig. 6 The temperature dependence of the error in the current measurement

## 4. まとめ

光ファイバのファラデー効果を利用した電流計測において、測定精度とその安定性を向上するには、センシングファイバの光弾性定数を小さくすることによる複屈折の抑制が有効であることが明確となった。鉛ガラスファイバの光弾性定数はガラス組成のより精密な制御により、また損失、複屈折はファイバ製造技術の精密化などによりさらに低減、改良することが可能であると考えられる。

電流計測器として高電圧大電流の電力設備用電流変成器を想定したモデルを試作し、基本特性で満足できるものが得られた。今後実際に適用するにはさらに、種々使用環境での安定性、長期信頼性などが必要とされるが、センサモジュール構造などの改良により達成できると期待される。

バルクのファラデー素子も含め、ファラデー効果による電流計測の可能性と種々方式が提案

されてから久しいが、本報告で述べた鉛ガラスファイバと計測システムは、実用化に至るひとつの具体的可能性を素材とシステムの両面から示したものである。

## 謝 辞

本研究は東京電力(株)との共同研究によって行ったものである。共同研究に携わった東京電力(株)黒澤潔氏、吉田知氏、またHOYA(株)増田勲氏、渡部敦氏、仙田裕加里氏、新熊義包氏、館岡進氏、横山精一氏に感謝の意を表します。

## 引用文献

- [1] S. Donati, V. Annovazzi-Lodi, and T. Tambosso; IEEE Proc., Vol. 135, No.5, (1988) 372
- [2] G. W. Day and A. H. Rose; SPIE Vol. 985 Fiber Optics and Laser Sensors IV (1988) 138
- [3] A. H. Smith; Optics and Laser Technol. Feb. (1980) 25
- [4] J. Sasaki and T. Kimura; IEEE J. Quantum Electron. Vol. QE-18, No.11 (1982) 1899
- [5] たとえば森下克己著、「光ファイバーファイバ型デバイス」先端科学技術シリーズ、朝倉書店、1993年
- [6] K. Kurosawa, S. Yoshida, K. Sakamoto, I. Masuda, and T. Yamashita; Proc. 10th Opt. Fiber Sensors Conf. (1994) 24
- [7] 森真人、小川理、片岡春樹、鈴木英二、白石勝、嶋田誠；「多層膜偏光子(ラミボール)の開発」第3回光波センシング技術研究会講演論文集、(1989) 63
- [8] 黒澤潔、坂本和夫、山下俊晴：第54回応用物理学学術講演会、講演番号28a-K-2、1993年9月28日、北海道大学
- [9] P. R. Forman and F. C. Jahda; Appl. Optics, Vol. 27, No.15 (1988) 3088
- [10] 電気学会 電気規格調査会標準規格、計器用変成器、JEC-1201、電気書院
- [11] P. A. Williams, A. H. Rose, G. W. Day, T. E. Milner and M. N. Deeter; Appl. Optics, Vol. 30, No.10 (1991) 1176