

## 光ファイバーセンサーによる電力設備の監視

黒澤潔

電力設備は、発電機、変圧器、開閉装置、送・配電線等の電力機器から構成され、電力を高効率かつ安定に伝送することを目的に構築されている。この電力系統を機能させるうえで、機器の導体に流れる電流や、導体の電圧を検出し、設備の制御・保護を行う必要がある。また併せて、機器の電気絶縁保持機能が健全であることを監視する必要がある。ここで、監視の対象として電力機器をみた場合、以下の特質があることに注目する必要がある。

- ・高電圧を保持する。
- ・大電流が流れる。
- ・周囲に強い電磁界が存在する。
- ・現象の変化が早い。
- ・複数の機器が広範囲に分散して配置され、全体がシステムとして動作する。

従来電力機器には、これらの特質に適合するように設計された、各種の監視用センサーが取り付けられている。

物理量を検出する素子として光ファイバーを用いるシステムは、光ファイバーセンサーと呼ばれる。光ファイバーセンサーは、一般に次の特長を有する。

- ・高電圧を保持する場所に取り付ける場合の電気絶縁の確保が容易である。
- ・信号が電磁誘導雑音の影響を受けない。
- ・応答周波数帯域が広い。
- ・長距離信号伝送が可能である。
- ・センサーの挿入による検出対象への影響が小さい。

これらの特長を電力機器の特質に対照すると、光ファイバーセンサーが機器の監視に適することがわかる。電力分野では、監視に光を用いることの利点が早くから注目され<sup>1)</sup>、研究・装置開発・実用化が進められてきた。ここでは、

筆者らが進めている、電流および絶縁異常の監視のための光ファイバーセンサーの開発を紹介する。

### 1. 電流の監視

#### 1.1 原理および背景

従来交流電流の検出には、電磁誘導を原理とする変流器が用いられてきた。この変流器に代わる装置として、ファラデー効果を利用するものが提案され<sup>1)</sup>、多くの機関で研究がなされてきた。このような装置は光電流変成器と呼ばれる。光電流変成器の特長は、次のとおりである。

- ・機器の電気絶縁の確保が容易であり、また鉄心を含まないので、装置を小型にできる。
- ・電力設備の故障発生時に流れ得る低周波成分を含む大電流の測定が容易である。
- ・電磁誘導雑音の影響を受けない。

ファラデー効果を発生させる素子は、ガラスブロックなどのバルク型素子と、単一モード光ファイバーに大別できる。細く、曲げやすい光ファイバーを素子に用いることにより、バルク型を用いる場合と比較し、装置のさらなる小型化と構成の単純化が期待される。図1に、光ファイバーを素子に用いた光電流変成器の構成概念を示す。光源から、送光ファイバーにより、機器に取り付けた検出部に光を送る。その光から偏光子を用いて直線偏光を取り出し、導体の周囲に巻かれた素子ファイバーに入射させる。電流が誘起する磁界が印加されるため、光はファラデー効果を受け、ファイバーを出射する。ファラデー回転角  $\theta_F$  は、磁界ベクトル  $H$  の光の伝搬方向成分を、ファイバーのなす曲線に沿って積分した値に、ベルデ定数を乗じた値となる。したがってアンペアの周回積分の法則から、ファイバーの巻数を1回として、次式に示すとおり、 $\theta_F$  は電流  $I$  に比例する。

東京電力(株)電力技術研究所 (〒230 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1)  
E-mail: kurosw-k@rd.tepco.co.jp

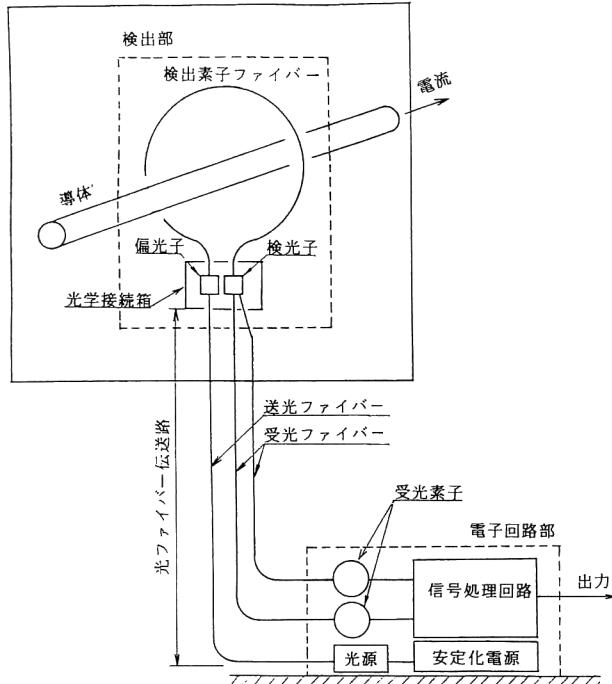


図1 ファイバーセンサー型光電流変成器の構成概念。

$$\theta_F = V \int_s H \cdot ds \\ = VI \quad (1)$$

ここに,  $ds$ : ファイバーの曲線の線要素ベクトル,

$V$ : ベルデ定数。

巻数が  $n$  の場合,  $\theta_F$  は  $n$  倍になる。素子ファイバーの出射光は検光子に入射し, 2つの直線偏波成分に分離される。検光子通過光の強度は  $\theta_F$  に応じて変化する。通常検光子の方位は,  $\theta_F=0$  のときに, 入射する光の偏波方位に対して 45 deg に設定される。この場合, 次式に示すとおり,  $\theta_F$  が小さいと近似できる範囲で, 2つの検光子通過光の強度  $P_x$ ,  $P_y$  と,  $\theta_F$  の関係は線形となる。

$$P_x, P_y = (P_0/2) (1 \pm 2\theta_F) \quad (2)$$

ここに,  $P_0$ : 素子ファイバーの出射光強度,

$P_x$ : 検光子の主軸  $x$  方向の偏波成分,

$P_y$ : 検光子の主軸  $y$  方向の偏波成分,

右辺の符号+は  $P_x$ , -は  $P_y$  に対応。

検光子通過光は, 受光素子に導かれて電気信号に変換され, 信号処理の後, 出力に変換される。

このような装置の実現をめざして, 素子に石英ファイバーを用いた研究が広く行われた(例えば文献 2, 3)). それらの研究の結果, ファイバー内部の光弾性効果に起因し, 光の偏波状態が維持されなくなり, センサーの出力が変化するという問題があることがわかった。実用装置の素子と

してファイバーを用いるためには, それをコイル状に巻く必要があり, また温度変化や振動を前提にする必要がある。それらはすべて応力の原因となるため, 光弾性の影響防止は重要である。光弾性の影響を防ぐ方法として, ファイバーにツイストを施して円複屈折を誘起する方法<sup>4)</sup>, アニーリングを施して歪みを除く方法<sup>5)</sup>, 端部に磁石と鏡を取り付けて偏波を 90 deg 回転反射させる方法<sup>6)</sup>などが研究されている。

筆者らは, この光弾性の問題を解決し, ファイバーセンサー型の光電流変成器を実現するため, 光弾性定数の非常に小さい鉛ガラスから製造した光ファイバー(鉛ガラスファイバー)を素子に用いた開発を進めている。

## 1.2 鉛ガラスファイバー

鉛ガラスがファラデー素子ファイバーの材料に適する主な理由は, 次のとおりである。

- ・組成の調節により光弾性定数を非常に小さくできる<sup>7)</sup>.
- ・反磁性体であり, ベルデ定数の温度依存が小さい。
- ・石英よりベルデ定数が大きく, 光弾性の影響が相対的に小さい。

波長 850 nm 帯用に開発した鉛ガラスファイバーの主な特性は, 次のとおりである<sup>8)</sup>. コア材料の光弾性定数  $0.45 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{kg}$  (石英の約 1/780), ベルデ定数  $0.85 \text{ deg/kA}$  (石英の約 6 倍), コア直径  $5.7 \mu\text{m}$ , コア屈折率  $1.85$ , 比屈折率差  $0.18\%$ . クラッドモードを除くため, クラッドの外側に屈折率と吸収係数の高い層を設けている。保護層としては, 厚さ  $50 \mu\text{m}$  の UV 硬化樹脂を被覆している。伝送損失約  $1 \text{ dB/m}$ , 残留複屈折約  $2 \text{ deg/m}$ , 平均引張強度約  $0.6 \text{ GPa}$  (サンプル長  $10 \text{ cm}$ ) である。

鉛ガラスファイバーの偏波特性は, 光電流変成器の設計に深く関係するので, 以下に説明する<sup>9)</sup>. 図 2 に偏波特性を調べた実験の構成を示す. 波長 840 nm の SLD 光源から, 偏光子に光を導いて直線偏光を発生させ, 鉛ガラスファイバー(長さ  $500 \text{ mm}$ )に入射させる. ファイバーの出射光を検光子に導き, 通過光量をパワーメーターで測定する. 偏光子の方位を一定にしておき, 検光子を回転させて, 出射光の消光比と方位を求め, それらと入射光の偏波方位の関係を調べる. この構成を用いて行った実験の結果から, 特性を総合的に表す例として, 3次元曲線をなすようにファイバーを曲げた場合について紹介する. 図 3 に曲げの方法を示す. はじめに, 平面上にファイバーを曲線を描くように配置する. 次にファイバーの下にパイプを挿入し, 3次元曲線をつくる. 図中の表に, 実験を行った 3種類の曲線の形成条件を示す. 図 4 に実験結果を示す. 図において,

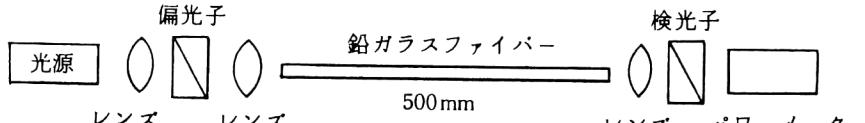


図2 ファイバーの偏波特性調査実験の構成。偏光子、検光子：グラン・トムソンプリズム、光源：SLD、波長 840 nm。

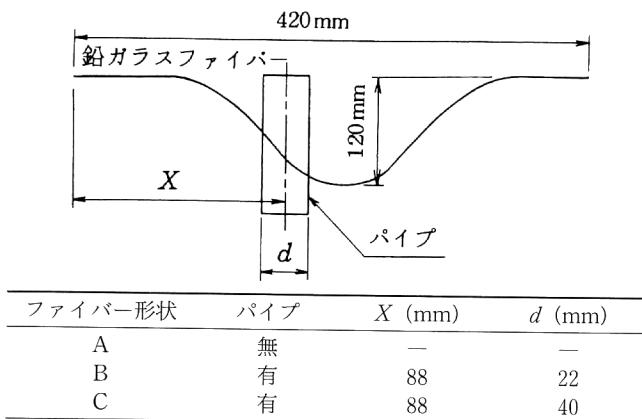


図3 ファイバーの曲線の変形の方法。

横軸はファイバーへの入射光の偏波方位、左側の縦軸は出射光の方位、右側の縦軸は出射光の消光比を示す。図から次のことがわかる。

- ①出射光の消光比は、常に 34 dB 以上の値を示し、直線偏波状態である。
  - ②曲線の形が一定の場合、出射光の偏波方位の変化は、入射光のそれに等しい。
  - ③入射光の方位が一定でも、出射光の方位は曲線の形に応じて変化し、回転する。
- ①と②から、ファイバーの光弾性効果は非常に小さいことがわかる。また、③の「曲線の変形によって偏波が回転する現象」の原因是、光弾性効果ではなく、曲線のねじれの関数として記述できる<sup>10)</sup>。図5を用いてその現象を説明する。複屈折のない単一モードファイバーに直線偏波光が入射したとき、出射光の偏波方位は、ファイバーのつくる曲線に沿ったねじれ率の積分に等しい角度だけ回転する。回転角  $\phi$  は次式で表される。

$$\phi = \int_s \tau(s) ds \quad (3)$$

ここに、 $\tau(s)$ ：曲線のねじれ率、  
 $s$ ：曲線の弧長。

ねじれ率が既知の場合の偏波の回転を調べる実験により、式(3)が成立することが確認されている<sup>11)</sup>。

ここで、ファイバーの一端に鏡を設け、光をその内部で往復させることを考える。こうすると、反射後に式(3)の符号が反転することから、光路の全長にわたる積分の値は

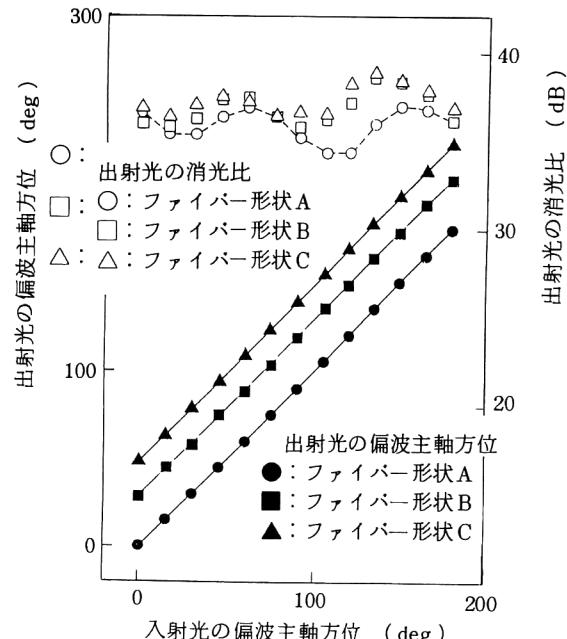


図4 出射光偏波、曲線の形、入射光偏波の関係。

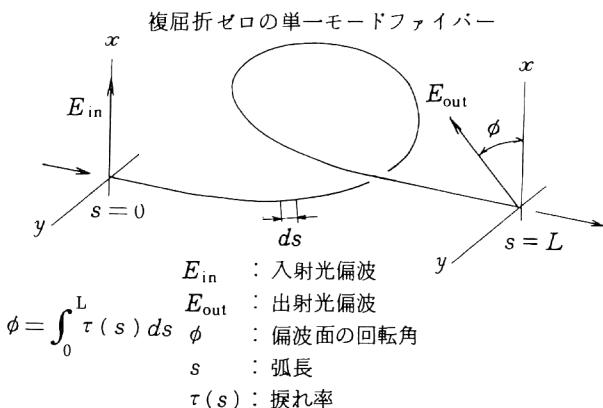


図5 ファイバーの曲線のねじれと偏波回転の関係。

ゼロになる。したがって、入射端から再び出射する光の偏波は回転しなくなる。実験を行ったところ、往復した光の偏波が曲線に無関係であることが確認された<sup>12)</sup>。

なお、ファイバーを他のさまざまの状態において行った実験でも、出射光は常に消光比 30 dB を超えた直線偏波状態に保たれることが確認されている。

### 1.3 光電流変成器

鉛ガラスファイバーを用いた光電流変成器の設計・試作

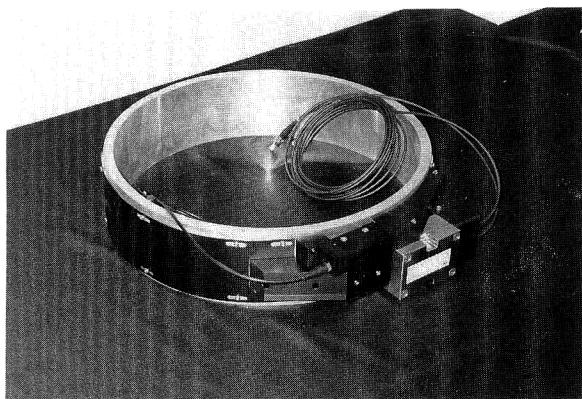


図6 光電流変成器検出部。

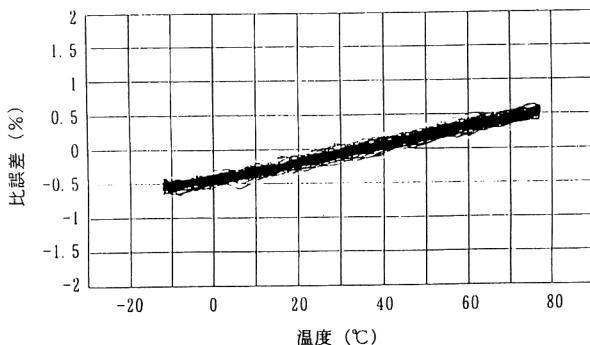


図7 検出部の比誤差の温度特性。

を行った。設計にあたり、検出部の構造はガス絶縁開閉装置へ取り付けることを想定し、また定格電流は  $4,000 \text{ A}_{\text{rms}}$  ( $50 \text{ Hz}$ )とした。測定精度は変流器規格 JEC1201-1PS 級を満たすことを目標とした。ファイバーの巻数は 1、光源波長  $840 \text{ nm}$ 、定格電流のピーク値  $5,660 \text{ A}$  に対するファラデー回転角は  $4.91 \text{ deg}$  である。

前節で述べた鉛ガラスファイバーの偏波特性から、装置を構築するうえで光弾性の影響は無視できる。一方、周囲から伝わる振動や温度変動によってファイバーの曲線が変わり、その結果偏波が回転し、出力に影響が生じることが懸念される。この対策として次の 2 つが考えられる。

- ① ファイバーを丈夫な枠に固定し、変形を防ぐ。
- ② ファイバーの内部で光を往復させる。

後者を用いた場合、機器への取り付けが容易になる可能性があるが、光学部品の接続の信頼性確保に課題がある。そこで本開発では前者を選択した<sup>13)</sup>。図 6 に試作した検出部の外観を示す<sup>14)</sup>。試作装置の主な特性は、以下のとおりである<sup>15)</sup>。

- (1) 測定精度： 検出部に定格以内の電流を流し、装置の出力と電流値を記録し、比誤差（流した電流に対する誤差率）と電流値の関係を調べた。その結果、測定



図8 長期通電試験装置。

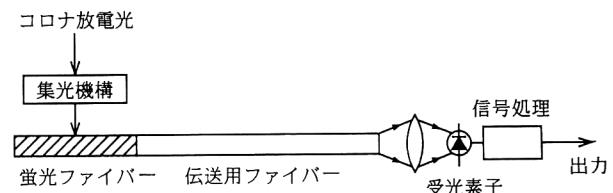


図9 蛍光ファイバーセンサーの構成概念。

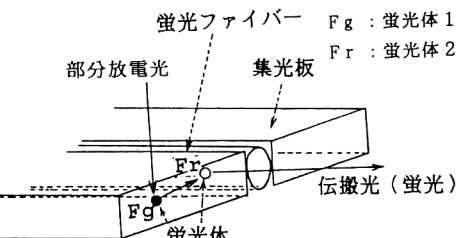


図10 集光板による感度向上の原理。

精度は規格 JEC1201-1PS 級を満足することがわかった。

- (2) 温度特性： 検出部の周囲温度を  $-20^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$  の間で 40 サイクルにわたって繰り返し変化させ、その期間中  $1800 \text{ A}_{\text{rms}}$  の電流に対する比誤差を調べた。図 7 に結果を示す。図から、比誤差の変化率は  $+0.01\%/\text{°C}$  程度という小さい値であること、および試験期間中特性の再現性が確保されていることがわかる。なお温度特性は、鉛ガラスファイバーのペルデ定数の温度依存に起因する<sup>11)</sup>。

さらに、試作した装置の信頼性を検証するため、屋外で連続通電試験を行った<sup>12)</sup>。図 8 に試験装置の外観を示す。検出部はガス遮断器の碍子の根元に取り付けられている。遮断器には  $800 \text{ A}_{\text{rms}}$  の電流を連続通電し、検出装置の精度

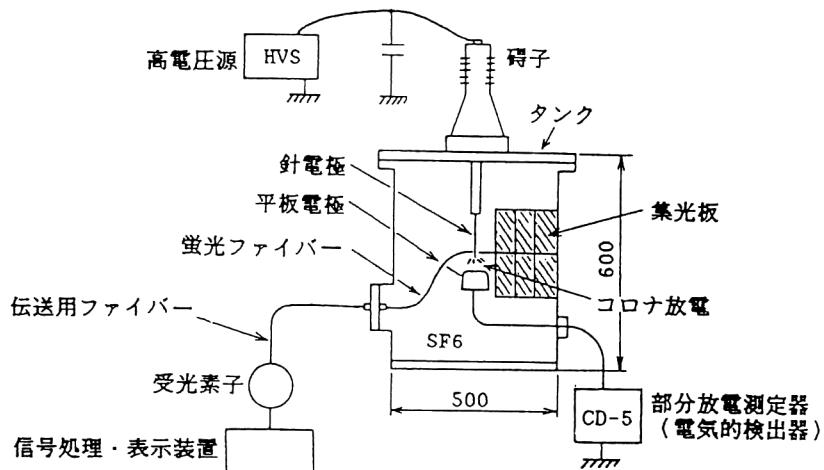


図11  $SF_6$  ガス中放電光を検出する実験の構成。

と動作状態を連続的に記録した。また定期的に遮断器を動作させ、振動に対する耐久性を調べた。その結果、1995年9月～1996年11月の試験期間中、装置は正常に動作を続け、信頼性が確認された。

## 2. 絶縁異常の監視

### 2.1 原理および背景

ガス絶縁開閉装置の内部に微小な突起物などがあると、その部分の電界が高くなり、微弱なコロナ放電が生じる。これを放置することは絶縁上問題があるため、監視が必要である。従来コロナ放電の監視には、放電に伴う電流、電圧または音波を電気的に検出する方法が研究されてきたが、外来の電気的または音や振動の雑音の影響の除去が困難な課題となっている。

筆者らは、ガス絶縁開閉装置内部の大地電位の場所に蛍光体を含むプラスチックファイバーを挿入し、放電に伴って発生する光をファイバーの側面から取り入れ、蛍光に変換して検出する方法を研究している。図9に構成の概念を示す。この方法には、電気や音の雑音の影響を受けない、背景光の影響を受けない(機器内部は暗闇)、センサー取り付け部に電子回路が不要、どの方向から光が入射しても検出できる等の特長がある。検出感度を制限する唯一の雑音は、蛍光を電気信号に変換する受光素子の暗電流である。以下に、暗電流雑音に対するSN比の向上、すなわち検出感度の向上について述べる。

### 2.2 検出感度の向上

第1の方法は、発散する放電光を効率的に蛍光ファイバーに集めることである。蛍光体を含むプラスチック板(集光板)を蛍光ファイバーと組み合わせて用いることにより、それが可能である<sup>13)</sup>。図10に原理を示す。板はコロナ放電光の波長に対応する吸収帯(480～520 nm)をもつ蛍光体1

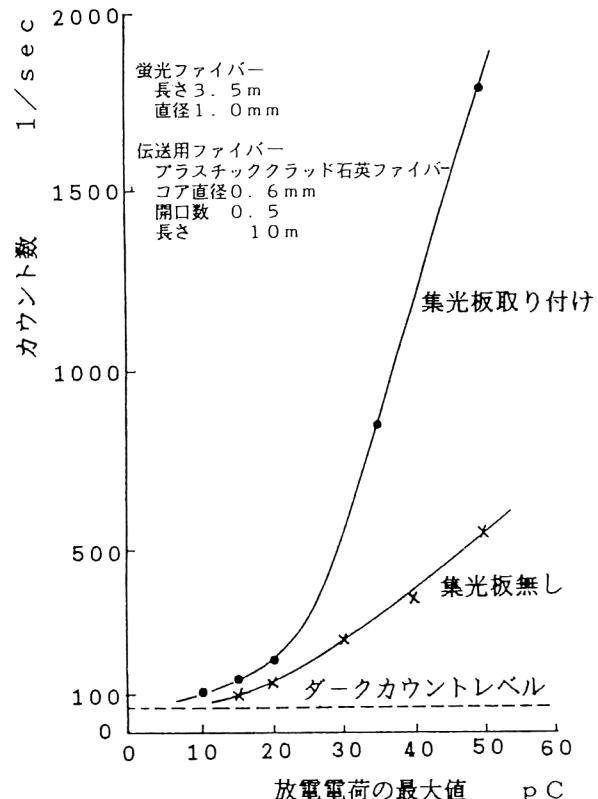


図12 放電電荷の最大値と光子計数器の出力数の関係。

を含む。また蛍光ファイバーは、板の蛍光体の発光波長に対応する吸収帯(520～570 nm)をもつ蛍光体2を含む。放電光が板に入射すると蛍光体1が光を吸収し、蛍光を発する。臨界角内の方角の放射成分が板を伝わり、蛍光ファイバーに入射する。ファイバーの内部で光は蛍光体2に吸収され、再び蛍光(630～670 nm)に変換され、臨界角内の方角の放射成分が光検出器に導かれる。この方法を用いれば、集光板によって発散する放電光を蛍光ファイバーに集めることができ、さらにファイバーの損失が少ない長波長

の光に変換して伝送できる。図11に示すSF<sub>6</sub>ガスを封入した装置の内部で交流電圧により針電極からコロナ放電を発生させ、その光を、集光板を用いたセンサーと用いないセンサーで検出し、両者の感度を比較する実験を行った。その結果、集光板の使用により顕著に感度が向上することが確認された。

第2の感度向上法として、光子計数法により暗電流パルスを除く方法がある<sup>14)</sup>。図11の装置を用い、蛍光ファイバーで検出した光を、アバランシフォトダイオードを用いた光子計数器により検出する実験を行った。図12に放電電荷の最大値と光子計数器の出力数の関係を示す。集光板と組み合わせた場合のほうが、蛍光ファイバー単体で検出する場合よりも約3倍多い出力数が得られている。また図より、どちらのセンサーを用いた場合にも、最大電荷が10 pC以下の放電に対し、暗電流レベルより明らかに多い計数値が得られていることがわかる。

第3の感度向上法として、蛍光ファイバーの両端に光子計数器を接続し、両者の出力の論理積を最終出力とする方法がある<sup>15,16)</sup>。このようにすると、2つの光子計数器の暗電流パルスの発生がランダムであることから、それらが同時に発生する確率は低くなる。一方、蛍光ファイバーが光を検知した場合には、両方の光子計数器に同時に光が入射するため、論理積が1となる確率は高くなる。したがって、暗電流パルスと信号パルスのいっそう明確な分離が可能となる。2つの光子計数器の出力を論理積回路に接続し、コロナ放電光を検出する実験を行った結果、理論どおりSN比が向上することが確認された<sup>16)</sup>。

電力機器監視用の光ファイバーセンサーとして、光電流変成器と絶縁異常監視技術の開発を紹介した。現在までに両者の方針は確立し、今後は電力機器へ実用するための開発を行う段階に達している。電力機器の監視は、光ファイバーセンサーの特長が非常に有用な分野であり、本文で紹介したもの以外にも、多くの機関でさまざまな研究開発が行われている<sup>17)</sup>。実用化例も増しており、今後の発展が期待される。

## 文 献

- 1) S. Saito, et al: "Development of the laser current transformer for extra-high-voltage power transmission lines," IEEE J. Quantum Electron., **QE-3** (1967) 589-597.
- 2) A. Rapp and H. Harms: "Magneto-optical current transformer," Appl. Opt., **19** (1980) 3729-3745.
- 3) A. M. Smith: "Optical fibres for current measurement applications," Opt. Laser Technol. (1980) 25-29.
- 4) R. Ulrich and A. Simon: "Polarization optics of twisted single-mode fibers," Appl. Opt., **18** (1979) 2241-2251.
- 5) G. W. day: "Compact fiber sensors for the measurement of low level electric currents," Proc. 4th Opt. Fiber Sensors Conf. (1986) pp. 81-84.
- 6) N. C. Pistoni and M. Martinelli: "Polarization noise suppression in retracing optical fiber circuits," Opt. Lett. **16** (1995) 711-713.
- 7) W. A. Weyl and E. C. Marboe: *The Constitution of Glass, Vol. 2, Part-I* (Welei Inter-science, N. Y. 1964) pp. 824-831.
- 8) K. Kurosawa, I. Masuda and T. Yamashita: "Faraday effect current sensor using flint glass fiber for the sensing element," Proc. 9th Opt. Fiber Sensors Conf. (1986) pp. 415-418.
- 9) K. Kurosawa, S. Yoshida and K. Sakamoto: "Polarization properties of the flint glass fiber," IEEE J. Lightwave Technol., **13** (1995) 1378-1384.
- 10) J. N. Ross: "The rotation of the polarization in low birefringence monomode optical fibers due to geometric effects," Opt. Quantum Electron., **16** (1984) 455-461.
- 11) 黒澤 潔, 吉田 知, 坂本和夫, 増田 熟, 山下俊晴: "鉛ガラスから製造した光ファイバのファラデー効果を利用した電流センサ", 電気学会論文誌B, **116** (1996) 93-103.
- 12) K. Kurosawa: "Optical current transducers using flint glass fiber as the Faraday sensor element," Opt. Rev., **4** (1997) 38-44.
- 13) K. Kurosawa and W. Watanabe: "A new scheme of fiber optic light sensor for detection of Corona discharges in gas insulated power apparatus," Proc. 8th Opt. Fiber Sensors Conf. (1992) pp. 422-425.
- 14) 黒澤 潔, 田中 章, 藤井 清: "蛍光ファイバを用いたガス絶縁機器のコロナ放電光検出技術の感度向上の検討", 平成5年電気学会全国大会, No. 1485, 第11分冊 (1993) pp. 66-67.
- 15) 黒澤 潔, 畠山吉文, 田中 章: "蛍光ファイバを用いた部分放電光センサの暗電流パルス雑音の除去法", 平成7年電気学会全国大会, No. 1490, 第6分冊 (1995) pp. 423-424.
- 16) 黒澤 潔, 畠山吉文, 宮本昌広, 土屋俊克: "蛍光ファイバ型部分放電検出器の統計手法を用いた性能評価", 平成9年電気学会電力・エネルギー部門大会, No. 659 (1995) pp. 1101-1102.
- 17) 例えは, "電力会社における光技術", オプトロニクス, **12**, No. 9 (1993) 47-84.

(1998年4月14日受理)