

## Development of an Optic Voltage and Current Sensors for Power Distribution Line applying a Technique of Optoelectronics

TADAMITSU KANEKO\*, TOSHINORI TSUJI\*, MASAHISA OTSUBO\*\*,  
HIROSHI NIEDA\*\*\* and MASAYUKI UEJIMA\*\*\*\*

\* Faculty of Humanities,

Miyazaki Municipal University, 1-1-2, Funatsuka, Miyazaki, 880 Japan

\*\* Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering,

Miyazaki University, 1-1, Gakuenkibanadai-Nishi, Miyazaki, 889-21 Japan

\*\*\* Department of Electrical Engineering, Kumamoto Institute of Technology,  
4-22-1, Ikeda Kumamoto, 860 Japan

\*\*\*\* Miyazaki Branch, Kyusyu Electric Power Co., Inc.

4-5-27, Tachibanadouri-Nishi, Miyazaki, 880 JAPAN

### Abstract

For the purpose of increasing electric power supply reliability in the distribution systems, high reliable voltage and current sensors for power distribution line must be needed. A strong demand for employing an optical voltage and current sensors in the distribution systems has recently increased because of an excellent electrical noise suppressing and good electrical insulation abilities. The authors have already reported the phase sequence voltage sensor system which consisted of the transverse type of  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  (BGO) Pockels cell coupled as capacitor in series with an air gap.

In this work, by using Pockels' and Faradays' effects of BGO single crystal, the characteristics of optical sensors for measurement of voltage and current on power distribution line have been investigated by using various sized BGO Pockels cells. The BGO crystal is readily available for voltage and current sensors with regard to their sensitivity and temperature stability. The optical voltage sensors system for power distribution line fundamentally consists of the transverse type of Pockels cell coupled as capacitors in the series with an insulator and an air gap. As a result, it was found that by inserting an insulator in the series between Pockels cell and an air gap, an insulator acted on suppressing corona discharge occurring at the edges of Pockels cell. The effect of inserting an insulator resulted in improving the sensitivity of optical voltage sensor. Also, as a result, it was found that the current sensor could be applied for measuring the current in principle.

## 光応用技術を応用した配電線路電圧・電流計測用光センサの開発

金子 正光 辻 利則 大坪 昌久 贅田 寛 上島 征行

### 1. まえがき

配電システムの監視・制御・保護機能を高度化するためには、現在配電用変電所だけで行われている常時および事故時の電圧、電流計測を配電線路側にも拡大する必要がある。配電線に設置する電圧、電流センサには、耐雑音性、小形化、無保守、事故探査や保護方式などに無影響、故障時の線路事故回避などの要求があることから、従来の電圧、電流変換装置による電氣的計測方式の適用は困難になりつつある。そこで、上記の諸要求を満足する計測方式として、光電圧・電流センサを用いた光応用計測方式の配電システムへの適用が望まれている。

光センサによる配電システムの電圧計測においては、光電圧センサにコンデンサ分圧器を併用した相電圧センサシステムと零相電圧センサシステムの開発が行われている<sup>1)</sup>。開発された計測法の特徴は、コンデンサ分圧器によって6kVの配電線路電圧を1/10に分圧して、分圧器のこの2次側電圧をBi<sub>2</sub>GeO<sub>20</sub>単結晶のポッケルス素子(BGO素子)で測定する点にある。

本研究では、まず、配電用光電圧センサシステムとして、配電線路上の高電圧(以後、被測定電圧という)を分圧してBGO素子に印加し得る構造の、BGO素子と直列エアギャップから成る静電結合型平行平板電極を考案した。この電極を用い横型変調方式により配電線路上の電圧を計測する方式を提案して、その基礎特性を60Hzの交流電圧で調べた。このシステムを用いれば、コンデンサを特別に設置する必要がない。また、横型変調方式であるから、地上の安全な低電界領域で配電線路上の高電圧を計測し得る。

次に、この方式におけるBGO素子の保護と測定感度の向上を目的として、平行平板電極間がBGO素子、絶縁物とエアギャップとから成る静電結合による改良型の配電用光電圧センサシステムを考案し<sup>2)</sup>、このシステムの交流高電圧印加時の光出力の交流成分特性を、BGO素子の大きさ並びにエアギャップの長さを変えて調べた。

その結果、提案の静電結合型配電用光電圧センサシステムの有用性が明らかとなり、絶縁物を挿入した改良型のシステムによって、短ギャップにおいてもBGO素子がコロナや絶縁破壊で損傷を受けることなく、高感度で被測定電圧を安定に計測し得ることがわかった。さらに、BGO素子を横型変調方式として用いた場合の、BGO単結晶軸とレーザ入射方向並びに印加電界の方向の関係を調べるとともに改良型配電用光電圧センサシステムの被測定電圧の制限条件を明らかにした。

次に、光電流センサとして、配電システムの電流計測にファラデー効果を用いた配電システム用光電流センサを、磁気光学効果を有するBGO素子を用いて試作し、その基礎特性として商用周波電流特性、時間特性、温度特性、雷インパルス電流特性を調べた。以下、これらのことについて述べる。

### 2. 測定原理

ポッケルス効果やファラデー効果を利用した光電圧・電流センサの原理については既に多くの解説がある<sup>3)</sup>。ここでは、まず、本研究で最初に提案した、ポッケルス素子と直列エアギャップから成る光電圧センサシステムについて述べる。このシステムは、図1(a)に示すように、静電容量C<sub>A</sub>のエアギャップを静電容量C<sub>P</sub>のBGOポッケルス素子に対して直列に配置したものである。ここで配電線路上の被測定電圧VとBGO素子に加わる電圧V<sub>P</sub>の関係は、次式で表すことができる。

$$V = V_P \{ (C_A + C_P) / C_A \} \quad (1)$$

しかし、直列エアギャップのみを利用する図1(a)の方法では、ポッケルス素子端部の電界が歪み、端部のエアギャップ中にコロナ放電が出現して光出力波形が歪むなどの問題があることが考えられる<sup>4)</sup>。

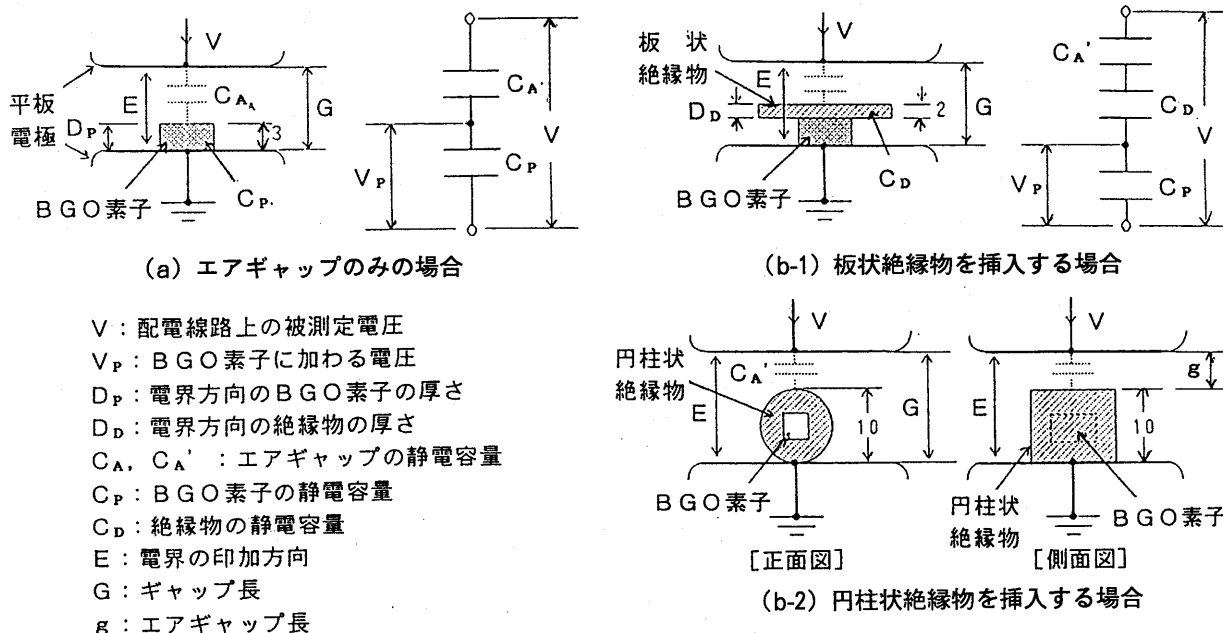


図1 センサ部の概略図と等価回路

そこで、板状絶縁物をBGO素子上に配置する方法(図1(b-1)参照)、あるいは円柱状絶縁物内にBGO素子を挿入・固定する方法(図1(b-2)参照)を考案した。これらの改良形システムによって、エアギャップの歪電界を是正・低減して放電を抑制することができ、測定感度と被測定電圧を上げることができた。また、このようにセンサシステムを改良することによって、BGO素子をコロナ放電あるいは絶縁破壊から保護することもわかった。この場合、 $V$ と $V_P$ の関係は次式で表すことができる。

$$V = V_P \{ (C_A' C_D + C_P C_D + C_A' C_P) / C_A' C_D \} \quad (2)$$

ここで、 $C_A'$  はエアギャップ部の静電容量、 $C_D$  は絶縁物の静電容量である。

実際の $V$ の測定においては、まず、既知の $V$ と、 $V$ によって変調されたレーザ出力波形から光変調成分(交流分： $V_{Ac}$ )と光直流成分(直流分： $V_{Dc}$ )の比すなわち変調度( $m = V_{Ac} / V_{Dc} \times 100$ , [%])との関係を求める。次に、この $V-m$ データを校正表として、未知の $V$ による $m$ を計測することによって $V$ の値を求める。また、 $C_A, C_B, C_C, C_D$ をあらかじめ実測すれば、(1)、(2)式を利用して $V_P$ の計測から $V$ を求めることができる。

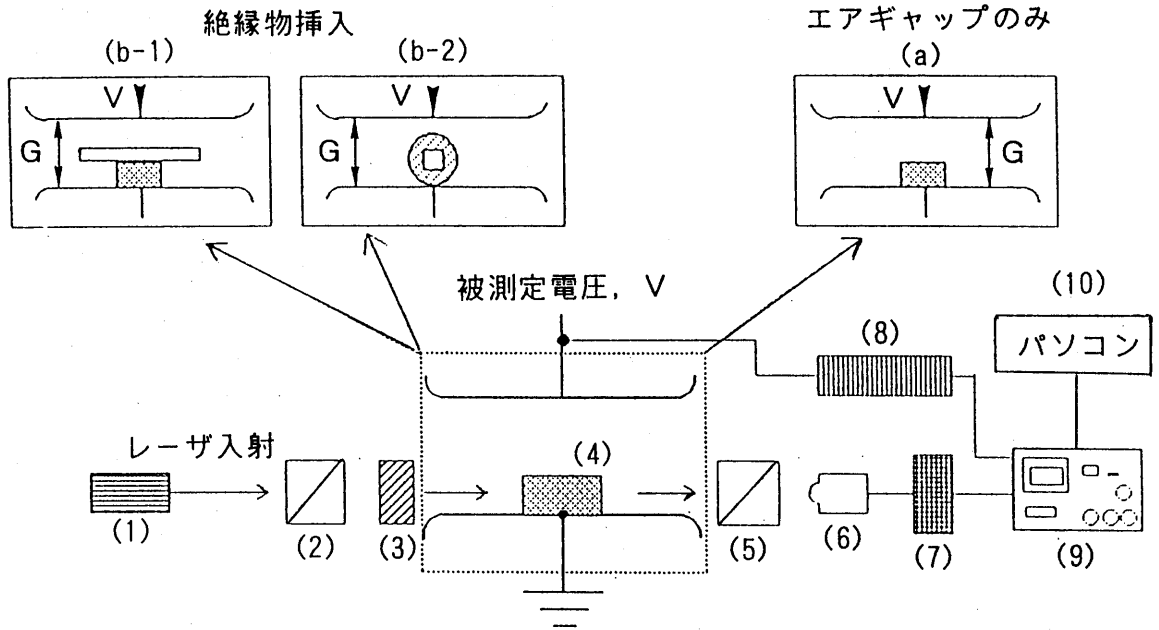
### 3. 実験の装置と方法

#### 3.1 光電圧センサの実験装置と実験方法

図2に、本研究に用いた、光電圧計測システムの概略図を示す。同図からわかるように、光電圧計測システムは、He-Neレーザ光源(波長 $\lambda = 633\text{nm}$ )、偏光子、 $1/4$ 波長板、エアギャップ・絶縁物・BGO素子から成る平行平板電極、検光子並びに受光部で構成される。ポッケルス素子としては、図3に示すように、結晶軸( $x, y, z$ )に対して切り出し面(ミラー指数で表示)の異なる2種類の立方晶系のBGO単結晶(タイプ(a)、タイプ(b)で示す)を、寸法を変えて用いた。

表1に、主に用いたBGO素子を試料No.1~No.5として示す。図2には、レーザ入射方向と印加電界 $E$ の方向を示した。また、図3では、レーザ入射方向は $\gamma$ 方向、印加電界の方向は $\alpha$ 方向で示されている。図2で、寸法を示す $L_P[\text{mm}]$ はレーザ入射方向の厚み、 $D_P[\text{mm}]$ は電界方向の厚み、 $W[\text{mm}]$ はそれぞれに直角の残りの辺上の厚みである。

タイプ(a)のBGO素子は、図1(a)と図1(b-1)に示した配置で使い、タイプ(b)のものは、図1(b-2)に示した配置で用いた。本実験では、入射レーザ光の波長 $633\text{nm}$ においてBGO素子の旋光能が $21.0^\circ / \text{mm}$ であることから、検光子の回転角度が光出力の旋光角 $90^\circ, 180^\circ$ にほぼ一致するように $L_P$ の値をそれぞれ $4.3\text{mm}, 8.5\text{mm}$ または $8.7\text{mm}$ とした。平行平板電極間に挿入した絶縁物はアクリル製(比誘電率4.0)で板状(厚さ $2.0\text{mm}$ 、広さ $20\text{mm} \times 20\text{mm}$ )または円柱状(直径 $10\text{mm} \phi$ 、長さ $10\text{mm}$ )で用いた。

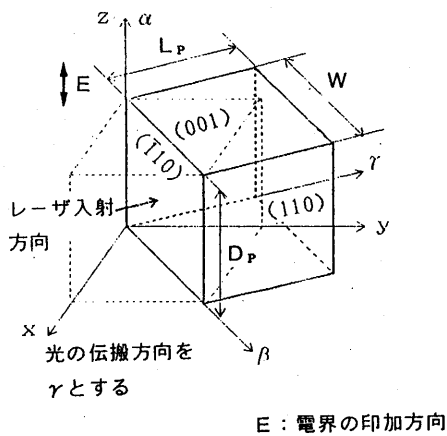


(1): He-Neレーザー光源, (2): 偏光子, (3): 1/4波長板, (4): BGO素子, (5): 検光子  
 (6): 受光部, (7): ローパスフィルター, (8): 高圧プローブ, (9): デジタルメモリー(DS-9121)

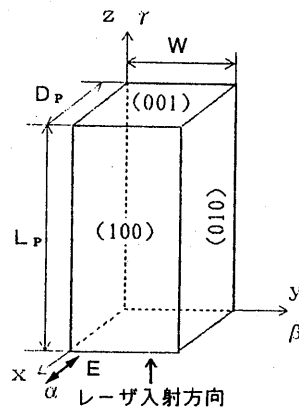
図2 センサシステムの構成図

表1 BGOポッケルス素子の寸法

タイプ	No.	$L_P$ (mm)	$D_P$ (mm)	W(mm)
(a)	1	4.3	3.0	5.0
	2	4.3	3.0	15.0
	3	8.5	3.0	5.0
	4	8.5	3.0	15.0
(b)	5	8.7	4.4	4.4



(a) タイプ(a)



(b) タイプ(b)

図3 BGO素子の結晶軸と光軸, 印加電界方向

レーザの発振が安定した後、偏光子と1/4波長板並びに検光子の各光学面が光軸に対して垂直になるように調整した。また、横形変調方式となるように、実験内容毎に入射レーザ光の進行方向と電極配置を調整した。ここで、横形変調方式とは入射レーザ光の進行方向が電界に対して垂直の場合である。さらに、レーザ光がBGOポッケルス素子の(100)面または(110)面に垂直に入射するように精密XYZステージコンポーネントなどを用いて調整を行った。

本研究では、図2中に示したように、ポッケルス素子を接地側電極に直接固定する静電結合型センサシステムと、ポッケルス素子を直径10mm φの円柱形アクリル製ホルダーの内部に固定して平行平板電極間の中央または平板電極上に配置する改良型静電結合型センサシステムの2方式について調べた。交流60Hzの印加電圧Vを平行平板電極に印加し、ギャップ長Gは最大20mmまでとした。エアギャップの空気は約-25℃の大気圧室内空気(比誘電率1.0)である。

この場合、各測定は同一条件下で10回行い、実験結果を示すグラフには、10回の測定値の平均値を各種記号で示す。得られたデータはパソコンに取り込み、パソコンで解析した。なお、交流電圧はすべて波高値で示す。

### 3. 2 光電流センサの実験装置と実験方法

実験装置を図4に示す。光学系はHe-Neレーザ ( $\lambda=633\text{nm}$ )、偏光子、BGO素子、検光子、ピンホトダイオードであり、光出力信号はローパスフィルタを通した後、デジタルリングオシロスコープで計測した。被測定電流としては、小型アーク溶接機の出力端子にランプ負荷を接続した場合の商用周波数60Hzの電流を印加電流  $I_L$  とした。これを10A単位で変化させて  $I_L=50\sim 100\text{A}$  とし、この  $I_L$  を図5に示す2種類の光電流センサの磁気モデルに通電させた。このときの磁気モデルは、図5(a)に示した、黄銅製延べ板上のアクリル製円柱内に磁気光学材料であるBGO素子を設置したタイプAと、図5(b)に示した、銅線コイルの中央にBGO素子を設置したタイプBである。この2種類の光電流センサの磁気モデルについて、 $I_L$  を変えて光出力信号を計測し、光出力信号の直流成分と交流成分から変調度  $m$  を求めて、各モデルの  $I_L-m$  特性を調べた。この場合、SN比が小さかったので、光出力信号の値は4回のサンプリング値の平均で求めた。ここで、求められた  $I_L-m$  の関係から、 $m$  を実測することによって電流が計測できる。得られたデータはパソコンに取り込み、パソコンで解析した。

次に、センサの大気圧雰囲気中の温度を変えた場合の  $I_L-m$  特性、センサ出力の  $m$  の時間変化特性をタイプBの磁気モデルについて調べた。さらに、数kAの雷インパルス電流に対するタイプAのセンサの出力特性を調べた。

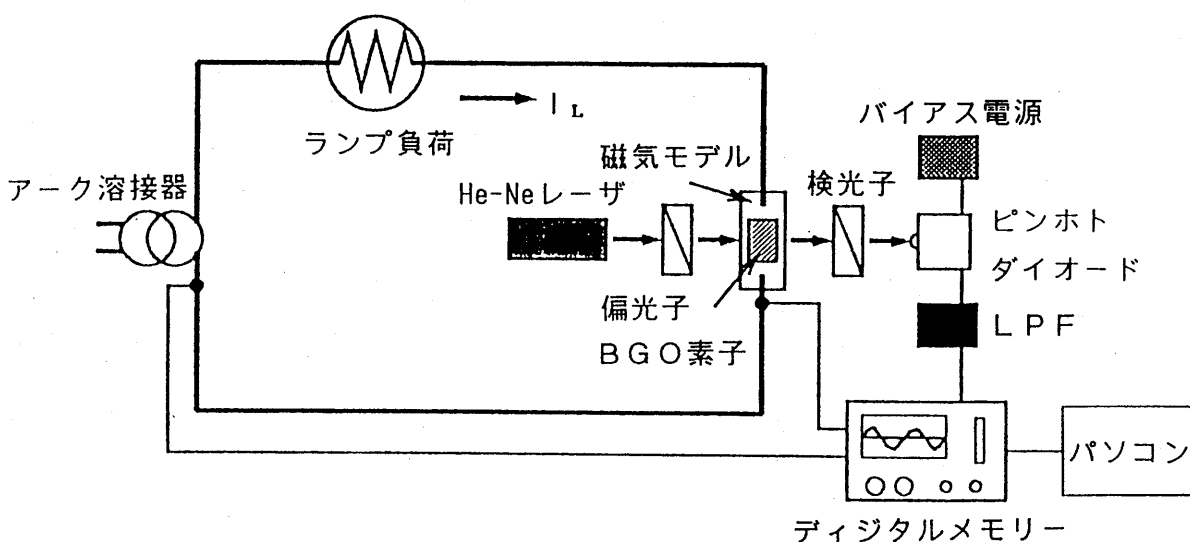


図4 商用周波電流特性の実験装置の概略図

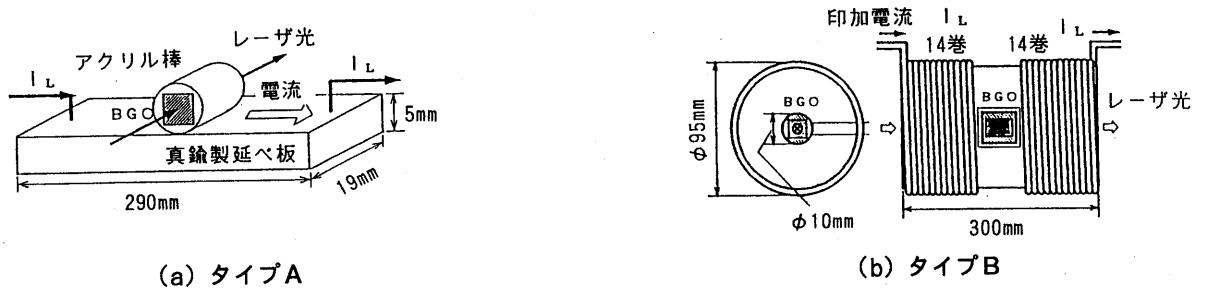


図5 光電流センサの磁気モデル

4. 光電圧センサシステムの実験の結果と考察

4. 1 光電圧センサの実験結果

4. 1. 1 導電性塗料とV-m特性

レーザー光源から出射され、偏光子によって直線偏波されたレーザー光は、自由空間を伝搬し、光電圧センサシステム内で円偏波あるいは楕円偏波に変更される。光電圧センサに電圧Vを印加したときの光出力波形から変調度mを求めれば、光電圧センサの印加電圧を知ることができる<sup>3)</sup>。

このセンサシステムの光出力に対するポッケルス素子と平行平板の接触効果を明らかにするために、エアギャップを設けずにポッケルス素子を直接平行平板電極で挟んだ場合の接触効果を、表1に示すNo.1とNo.2のポッケルス素子について調べた。その結果を図6に示す。同図で、導電性塗料を用いてポッケルス素子を平行平板に密着させた場合、V-m特性にはポッケルス素子を変えてもばらつきは生じていない。しかし、導電性塗料を使用しなかった場合、No.2のポッケルス素子の印加電圧 $V_p = V$ に対するmは若干低下し、ばらつきも見られる。このように、導電性塗料を使用しない場合、ポッケルス素子と平行平板間の接触が不十分となってV-m特性が低下・不安定となり得ることがわかったので、以後、ホルダーなしで用いたポッケルス素子の実験では、ポッケルス素子と平板電極間を導電性塗料で密着させた。

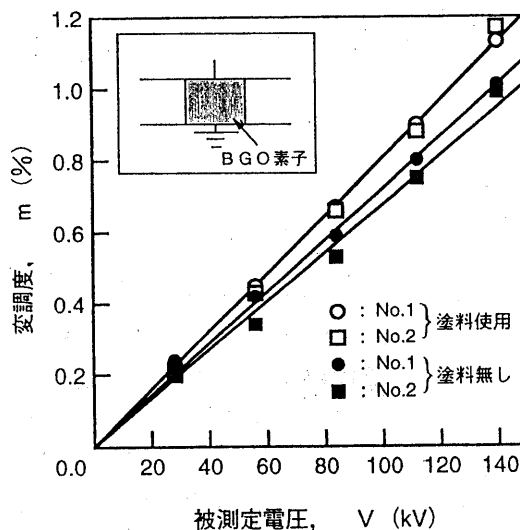


図6 素子と電極の接触状態と特性

4. 1. 2 導電性塗料と $V_{ac}$ の時間変化

著者らは、先に図1(a)に示したように平行平板電極間がエアギャップとBGO素子からなる光電圧センサシステムで、下部平板電極上に置いたBGO素子と電極との接触面が大きいNo.4のBGO素子を用いた場合、光出力波形が時間とともに著しく変動することを示した<sup>6)</sup>。今回、この問題について再検討した。すなわち、図1

(a)の配置で、平板電極とBGO素子の接触状態の効果を調べるために、No.1とNo.4のBGO素子を用いて、(a) BGO素子を平板電極上に単に置いただけの場合、(b)両面テープでBGO素子を平板電極に固定した場合、さらに(c)導電性塗料でBGO素子を平板電極に固定した場合について、各60分の間、2分間隔で $V_{AC}$ を計測した。その結果を図7に示す。

この図から、BGO素子と平板電極の接触状態によって、光出力波形が大きく変動することがわかる。これらの一連の実験結果から、比較的大きいNo.4のBGO素子を用いた場合でも、(c)の方法でBGO素子を平板電極上

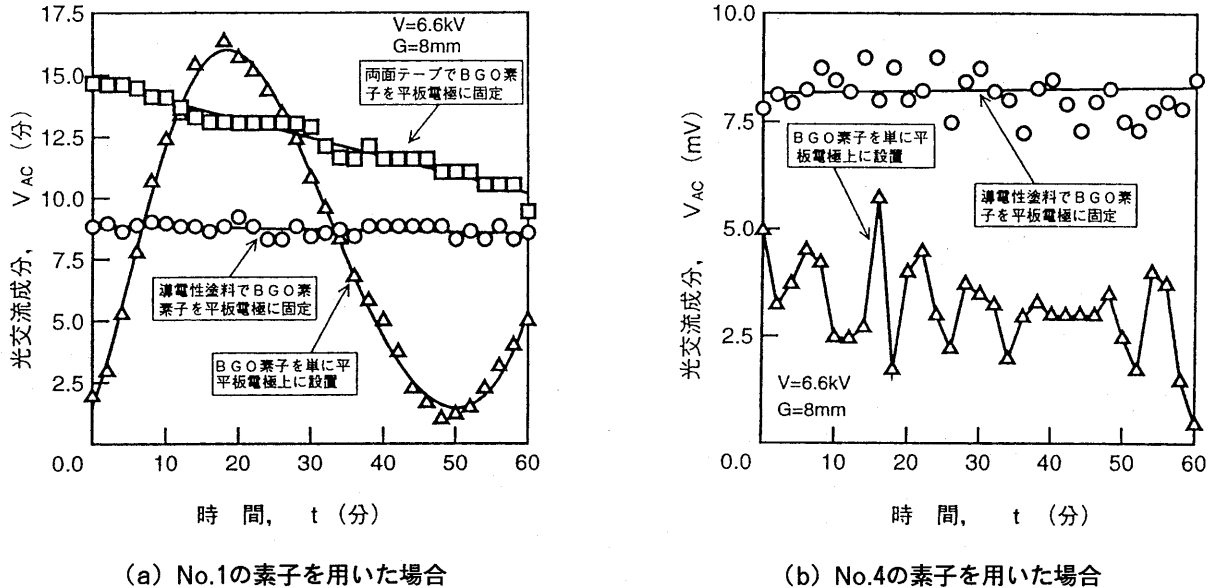


図7 No.1とNo.4の素子を用いた場合のBGO素子と平板電極の接触状態の影響

に固定すれば光出力波形の変動が少なく、良好な特性が得られることを確認した。ここで、導電性塗料を用いてBGO素子を平板電極上に固定した場合の光出力波形の変動は、接触状態の影響よりもレーザーの出力の変動によるものである。このように、BGO素子を平板電極に固定する場合には特別な配慮が必要である。ただし、導電性塗料でBGO素子を平板電極上に固定する場合、導電性塗料の調合が重要であった。また、BGO素子の上に絶縁物を置く場合も、同様にBGO素子と絶縁物の接触状態が重要であることが確認された。

#### 4. 1. 3 ホルダーと $V-V_{AC}$ 、 $V-m$ 特性、絶縁特性

図8に、ホルダーにポッケルス素子を内蔵した場合(以下、ホルダー付きと呼ぶ)のレーザー入射方向のBGO素子の厚さ $L_p$ の異なる3種類のポッケルス素子の $V-V_{AC}$ 特性を示す。この図で、最大15kVまでの $V$ の範囲内で、 $V_{AC}$ と $V$ の間には直線関係が成立している。このようにポッケルス素子をホルダーに内蔵すれば、後で述べるようにコロナや絶縁破壊によって損傷を受けないので、高電圧、広範囲の電圧計測が可能となり、提案の本センサシステムが配電用として適合し得る。また、 $V_{AC}$ が $L_p/D_p$ の増加に比例して上昇することは、出力感度の向上を意味しており、 $V_{AC}$ が、第4. 2節の考察で述べるように入射光の波長、結晶の性質で決まる常光線屈折率とポッケルス係数に左右されるほかに、素子形状に依存する $L_p/D_p$ によっても左右されことを立証している<sup>14)</sup>。

図9に、ホルダー付きのポッケルス素子 $L_p=8.7mm$ を用いてギャップ長 $G$ を12~20mmの範囲で変化させた場合の $V-m$ 特性を示す。この図から、 $G$ を変化させることによって光電圧センサの感度を容易に調整し得ることがわかった。図10に、同様に $G$ を変化させたときの、ホルダーなしのNo.1ポッケルス素子の $V-m$ 特性を示す。この図からも、 $V-m$ 特性に直線性が得られ、 $m$ は $G$ の変化によって調整できることがわかる。

ホルダーなしのポッケルス素子の場合、電圧印加時におけるポッケルス素子の保護が問題になると考えられる。そこで、本実験系で用いる平行平板電極の空気中の破壊電圧 $V_B$ と、ポッケルス素子を平板電極上に配置した平行平板電極のコロナ開始電圧 $V_C$ を、ギャップ長を変化させて調べた。その結果を図11に示す。ここで、コロナ

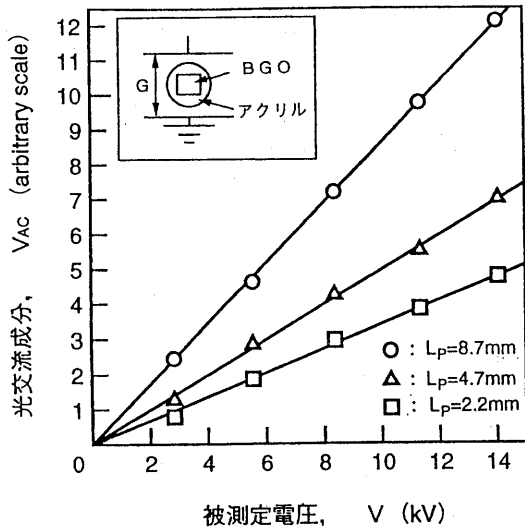


図8 V-V<sub>Ac</sub>特性に対するL<sub>p</sub>の効果

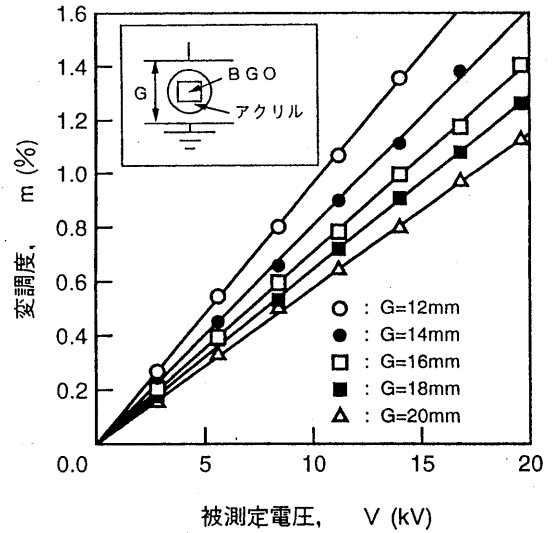


図9 ホルダー付素子のV-m特性とギャップ長

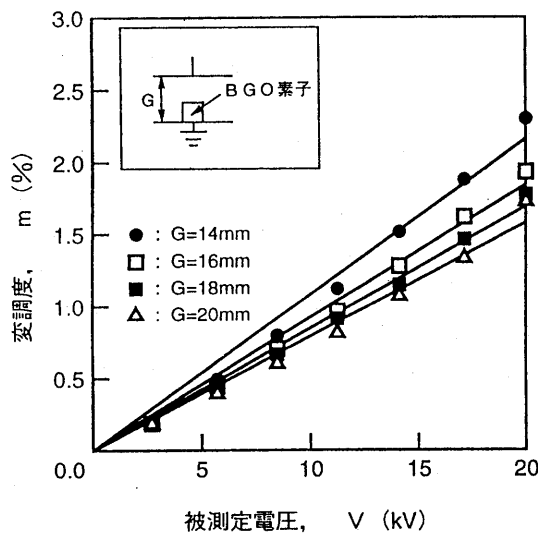


図10 ホルダーなし素子のV-m特性とギャップ長

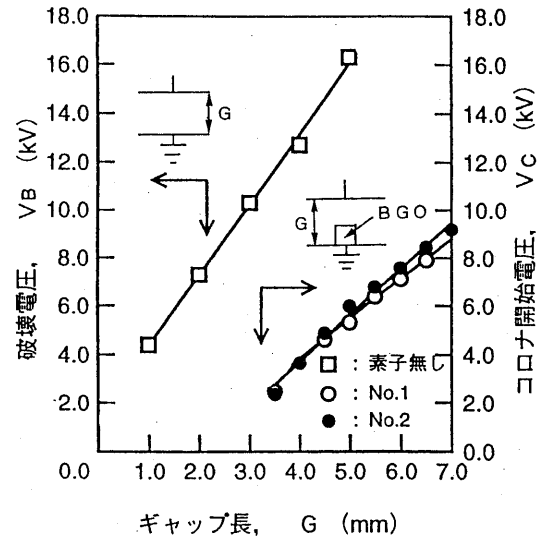


図11 ギャップ長対破壊・コロナ開始電圧特性

開始電圧は、コロナの可聴雑音の開始電圧とした。このように、エアギャップを設けた場合、雑音で始まるコロナが発生し、このコロナによってmが変動するようになるので<sup>6)</sup>、このときの計測可能な電圧範囲はコロナ開始によって制限される。

#### 4. 1. 4 電界の印加方向の影響

BGO素子を横型変調方式で用いる場合、BGO結晶軸に対するレーザーの入射方向と印加電界Eの方向の、mあるいはV<sub>Ac</sub>の影響を明らかにする必要がある<sup>6)</sup>。そこで、表1並びに図3に示したタイプ(b)のBGO素子を図1(b-2)の配置で使用した場合について、アクリル製ホルダーを回転させることによって、印加電界方向をBGO結晶のX軸方向とY軸方向に設定してこの効果を調べた。その結果として、図12に、V=12kV、G=15mmのときの検光子の回転角度 $\theta_A$ 対光出力の交流分V<sub>Ac</sub>特性を示す。ここで、図中の△の記号は電界がX軸方向に印加されたE⊥(100)面の場合の、また○の記号は電界がY軸方向に印加されたE⊥(010)面の場合の各結果を示す。

この図で、E⊥(100)面の場合と電界を90°回転させて印加したE⊥(010)面との場合のV<sub>Ac</sub>は、共に $\sin 2\theta_A$  ( $\theta_A$ は検光子の回転角度)で変化している。ただし、後者のV<sub>Ac</sub>は前者に対し $\theta_A=45^\circ$ で最大感度値を示す。



したがって、 $\theta_A=45^\circ$  はE(010)面の場合の偏光角であり、検光子の最適方位である。このように、電界方向の変化によって光出力 $V_{AC}$ の最大感度値の出現箇所が変化するが、 $V_{AC}$ は共に同じ変化を示すことから、電界の印加方向を考慮して検光子の回転角度が偏光角に一致するように調整すれば、印加電界をE $\perp$ (100)面の場合とほぼ同じ感度で計測し得ることがわかった。なお、印加電界の方向の変化で $V_{AC}$ の最大値に差が生じているが、これは後述するようにBGO素子を回転させて電界方向を変化させたためにレーザー光の入射位置が変化したことによるものと考えられる<sup>7)</sup>。

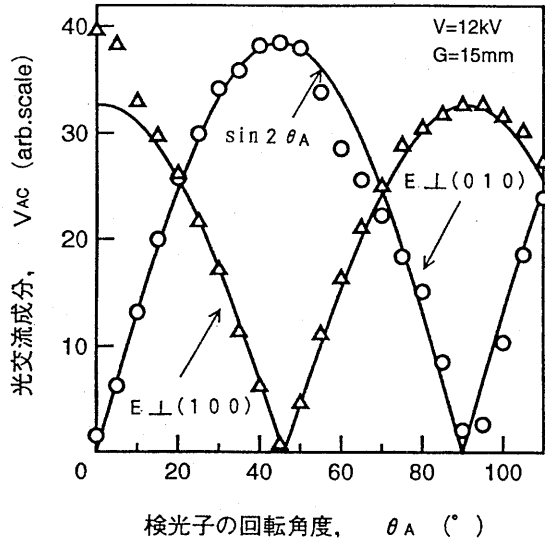


図12 検光子の回転角度対光交流成分に及ぼす印加電界方向の影響  
(結晶軸と印加電界方向の関係)

△ : E(100)面の場合, ○ : E(010)面の場合

#### 4. 1. 5 零相電圧計測システム

このほか、著者らは、提案の相電圧計測システムを零相電圧計測に適用するための予備実験を進めている。これに関連して宮内らは、分圧器を併用した配電用相電圧・零相電圧計測システムを開発している。彼らが開発した零相電圧計測システムでは、透過光の大きさと同位相が3つの相電圧のベクトル和に比例するように3個のBGO素子が偏光子と検光子間に配列されており、且つ光ファイバと送受光部が1組で済むようになっている<sup>11)</sup>。この場合、特に注意しなければならないことは、BGO素子の切り出し面へのレーザー入射位置による $V_{AC}$ の変動である。

そこで、図1(a)の配置でNo.1のBGO素子を用い、(110)面におけるレーザー入射光位置を変えて光出力の交流成分の時間変化特性( $t-V_{AC}$ 特性)を調べた。その計測結果を図13に示す。この図から、レーザー光入射位置によって $V_{AC}$ が変化することがわかる。同様な実験を他のBGO素子についても行ったが、同様にレーザー入射位置によって $V_{AC}$ が変化した。これはBGO素子に生ずる電界分布によるものであろう。したがって、 $V$ と $V_p$ の較正表の作成あるいは、絶縁物を平行電極間に挿入する場合と挿入しない場合の $V_{AC}$ の相対比較に際しては、レーザー光入射位置が常に同じとなるように注意を払って実験を進める必要がある。このことから、以後の実験では、BGO素子の中央部にレーザー光を入射した。これらの結果に基づいて、平行平板間の絶縁物を挿入した場合の効果調べた。

#### 4. 1. 6 絶縁板、円柱状ホルダーの効果

図14に、No.3のBGO素子を用い、ギャップ長 $G$ を6mm, 8mm, 10mmと変えた場合の $V-V_{AC}$ 特性を示す。図中では、板状絶縁物を平行平板電極間に挿入した場合の各 $G$ における計測結果を●, ▲, ■の記号で示し、絶縁物を挿入していないエアギャップのみの場合の各 $G$ における計測結果を○, △, □の記号で示す。この図から分かるように、 $V_{AC}$ は $V$ の増加とともに直線的に上昇し、ギャップ長が短い程、 $V_{AC}$ の上昇効果が顕著になること

を明らかにすることが出来た。また、絶縁物を平行平板電極間に挿入することによって、高感度で低い相電圧も計測し得ることを明らかにすることが出来た。これらの結果は(1)、(2)式によってもたらされる。

同図中の○印による値は、 $G=6\text{mm}$ で絶縁物を挿入しない場合のコロナ放電発生直前における $V_{AC}$  ( $V=4.2\text{kV}$ )であり、コロナ放電発生直前のBGO素子内の電界が若干高くなることを示している。なお、この場合、コロナ放電開始電圧は約 $4.3\text{kV}$ で、また絶縁破壊電圧は $4.6\text{kV}$ であった。これに対して、同じ $G=6\text{mm}$ で平行平板電極間に絶縁物を挿入すると、コロナ放電が $6\text{kV}$ まで発生しないことが確認された。このことから、絶縁物の挿入によってエアギャップ中の電界が低減され得ることを明らかにすることが出来た。

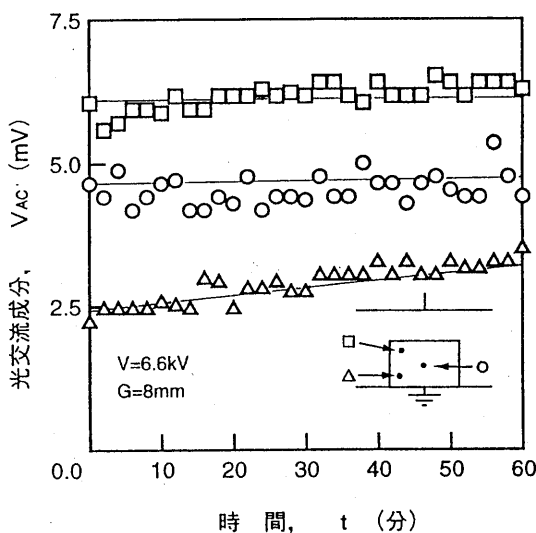


図13 光交流成分に及ぼすレーザー光入射位置の影響

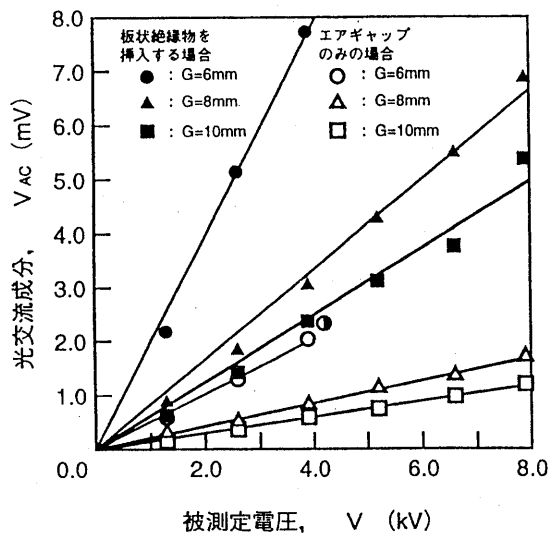


図14 No.3のBGO素子によるギャップ長を変えた場合の $V-V_{AC}$ 特性

図1(b-2)に示す配置でギャップ長を変えて求めた $V-V_{AC}$ 特性を、図15に示す。この図は、ギャップ長を長くすれば、図14の場合と同様(2)式による関係が得られて、 $V_{AC}$ は $V$ の増加とともに直線的に上昇し、且つ高い電圧領域の計測が可能となることを示している。なお、ギャップ長が比較的長いにもかかわらず $V_{AC}$ が高感度で得られるのは、 $L_p$ が長くなったことによる。

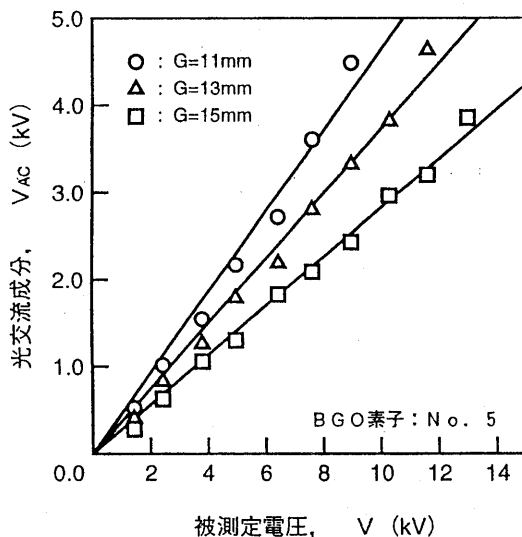


図15 No.5のBGO素子による $V-V_{AC}$ 特性

## 4. 2 提案の光電圧センサシステムについての検討・考察

### 4. 2. 1 電圧測定感度に対する入射光方位の影響

電圧測定感度すなわち光出力の変調度 $m$ は、BGO素子に対するレーザー光の入射方位によって異なる。また、光電圧センサ部の平行平板間が空気とBGO素子のみで構成されたいわゆるホルダー無しの場合と、その間が空気と誘電体（BGO素子を内包するホルダー）、BGO素子で構成されたホルダー付きの場合とでは、すでに明らかにしたように $m$ は異なる。

本実験では、BGO素子に対するレーザー光の入射方位の効果を調べるためにレーザー光は、ホルダー無しの場合BGO素子の(110)面方位方向に入射され、ホルダー付きの場合(100)面方位方向に入射されている。ここで、ホルダー無しの場合の $m$ は、

$$m = 2\pi / \lambda \cdot n_o \cdot \gamma_P \cdot L_P / D_P \cdot kV \quad (3)$$

となり、ホルダー付きの場合、入射方向の変化の影響が現れて $m$ は、

$$m = \pi / \lambda \cdot n_o \cdot \gamma_P \cdot L_P / D_P \cdot k'V \quad (4)$$

となる<sup>7)</sup>。なお、両式中の $\lambda$ はレーザーの波長、 $n_o$ はBGO素子の常光線屈折率、 $\gamma_P$ はポッケルス係数、 $kV$ あるいは $k'V$ は $V_P$ であり、 $L_P$ 、 $D_P$ はそれぞれ、第3.1節で述べたように、BGO素子の光路長、電界方向の厚みである。

図9、10は、これらについての実験結果を示す。図9は、 $L_P=8.7\text{mm}$ 、 $D_P=4.4\text{mm}$ 、 $L_P/D_P=2$ のBGO素子をホルダー付きで用いた場合の $V-m$ 特性であり、図10は、 $L_P=4.3\text{mm}$ 、 $D_P=4.4\text{mm}$ 、 $L_P/D_P=1$ のBGO素子をホルダー無しで用いた場合の $V-m$ 特性である。両図の比較からわかるように、同一のギャップ長と印加電圧のときのホルダー無しの方の $m$ の値は、 $L_P/D_P$ がホルダー付きの場合の $1/2$ であるにもかかわらずホルダー付きの場合の値の約1.5倍と大きくなっている。かりに $L_P/D_P$ 、 $V$ が同一とすれば、それはホルダー付きの場合の約3倍となり得、結晶軸に対する入射光方位の相違効果の方が大きく現れ、誘電体挿入の場合よりもそれを挿入しなかった方の測定感度が上がっている。

### 4. 2. 2 円柱状ホルダー付きセンサシステムのコロナ放電開始電圧と電圧計測範囲

本光電圧センサシステムを用いて6kVの配電系統の電圧を計測する場合、被測定電圧の範囲はギャップ長や絶縁物の挿入、その厚み、BGO素子に対するレーザー光入射方位等によって決まることを明らかにすることが出来た。

さらに、配電用光電圧センサの被測定電圧の制限条件を明らかにするために、ギャップ長を変えてコロナ開始電圧と絶縁破壊電圧を調べた。ここでは、BGO素子をアクリル製ホルダー内に挿入・固定した場合（図1(b-2)参照）について述べる。

図16は、 $G=11\text{mm}$ において、コロナ放電が出現しない場合（ $V=9\text{kV}$ ）と、コロナ放電が出現する場合（ $V=10\text{kV}$ ）の $V$ と $V_{Ac}$ の波形並びにイメージインテンシファイアで観測したコロナ放電発光を示す。この図から明らかのように、コロナ放電がエアギャップで発生すると光出力波形が歪む。 $V_{Ac}$ の値の変化は図7にも示した。このように、コロナ放電が発生すると、正弦波であった光出力波形が歪むようになるので、本光電圧センサシステムの適用が制限される。しかし、図14の説明で述べたように、被測定電圧の測定感度は絶縁物でBGO素子を保護し、コロナ放電を抑制することによって上昇している。

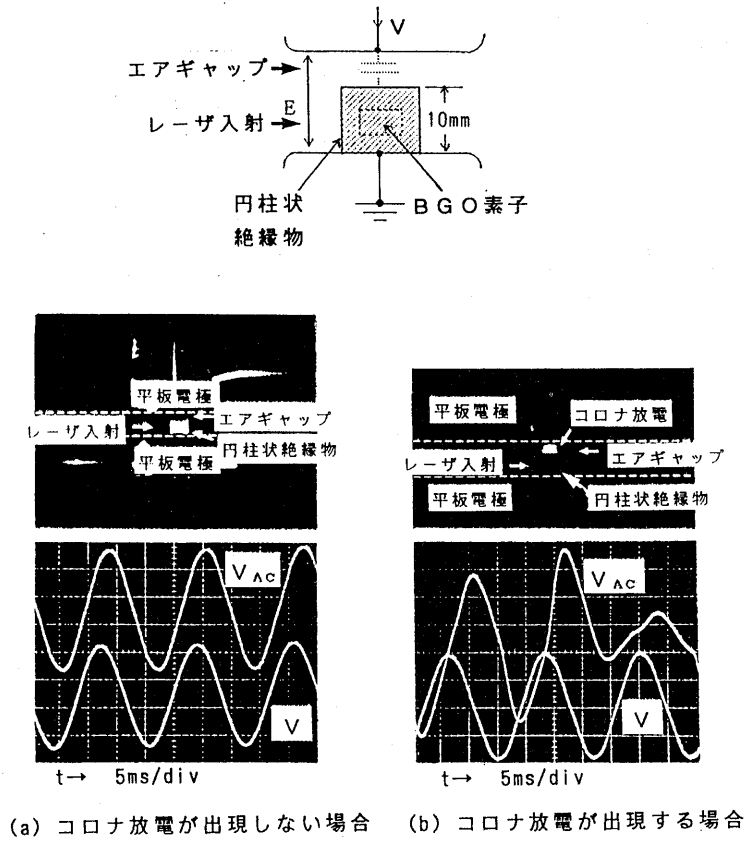


図16 コロナ放電が生じない場合のVとV<sub>Ac</sub>の波形(V=9kV), 並びにコロナ放電が発生している(V=10kV)場合のVとV<sub>Ac</sub>の波形, コロナ放電光

図17に、ギャップ長を変化させたときのコロナ開始電圧、絶縁破壊電圧の特性を示す。なお、コロナ放電の開始はコロナの可聴雑音と発光現象の発生から判断した。ここで、BGO素子は、ホルダー内に固定されているので、コロナ放電と絶縁破壊が起きても損傷することはなかった。このとき、コロナ放電は上部ホルダー表面とエアギャップで発生するが、絶縁破壊は、アクリル製ホルダー表面を経由せずにホルダーから少し離れた平板電極間で起こり、ホルダーとBGO素子には損傷を与えない。絶縁破壊が離れたところで起こる原因としては、主にコロナ放電によって絶縁物の円柱状ホルダー表面に付着した電荷が、平板電極間の電界に対し上部エアギャップの電界を緩和することが考えられる。このように、BGO素子をホルダー内に固定することによって測定感度が上昇し、しかも被測定電圧範囲を広げるとともに素子の損傷を防ぐことができることを、実験的に立証することができた。

また、図17から、ギャップ長が長くなればなる程コロナ出現の電圧領域は狭くなり、コロナ開始と同時に絶縁破壊に至るようになることがわかるが、このような場合でも、図17に示す実験範囲では、絶縁破壊の発生によるBGO素子の損傷は見られなかった。このように、円柱状ホルダーの効果を明らかにすることが出来た。

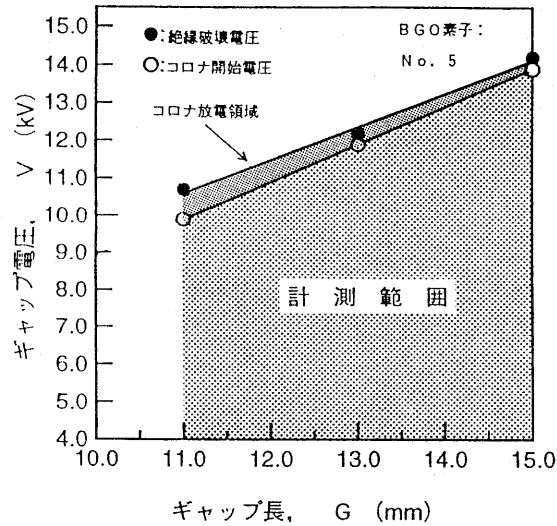


図17 ギャップ長対コロナ開始電圧, 絶縁破壊電圧特性

## 5. モデル光電流センサシステムによる実験結果と検討

### 5.1 商用周波電流特性

図18に, タイプA, Bの光電流センサシステムについて求めた, 被計測電流  $I_L = 50 \sim 100$  Aと光出力の変調度  $m$  [%] の関係を示す。同図で, タイプA, Bの  $I_L$  に対する  $m$  の変動割合はともに小さく, 直線的に変化しており,  $I_L$  と  $m$  は比例関係にある。この場合, タイプA, Bの  $I_L$  と  $m$  の関係式を最小二乗法で求めると次のようになる。

$$\text{タイプA: } m_A = 0.00319 \times I_L \quad [\%] \quad (5)$$

$$\text{タイプB: } m_B = 0.01821 \times I_L \quad [\%] \quad (6)$$

両式の比較から明らかなように, タイプBでは, タイプAに比べ約5.7倍の出力が得られる。このことは, タイプBでは, 磁気モデルの電流がコイル状で起磁力が大きくなっているのでBGO素子に加わる磁束が多いことによる。

これらの  $m$  は,  $H$  と  $\nu$  が明らかになれば, 理論的に次式により求めることができる<sup>4)</sup>。

$$m = 2 \nu H L \quad (7)$$

$\nu$ : ファラデー効果の感度を表すヴェルデ定数

$L$ : 磁気光学材料中の光路長

光電流センサシステムの開発にあたっては, 磁束分布とともにヴェルデ定数を把握して測定感度等を適正にすることが望まれる。

そこで, 本実験では, 使用目的に適した磁気モデルを開発する立場から, タイプA, Bを漏れ磁束がない理想的な磁気モデルと仮定してそれぞれの磁界  $H_A$ ,  $H_B$  を求め, さらに(5), (6)式に示した実験結果と(7)式を用いて,

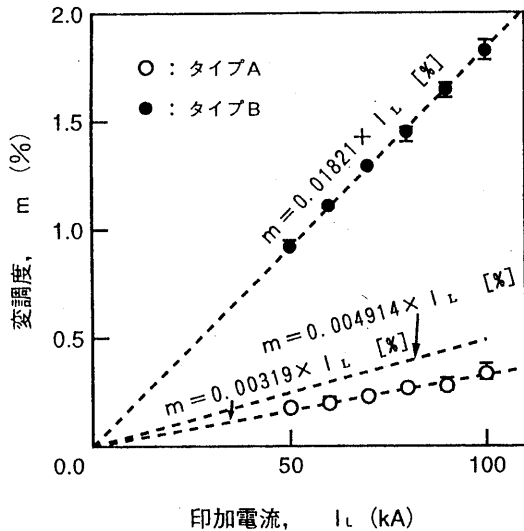


図18 光電流センサシステムの  $I_L$  と  $m$  の関係

表2 BGO結晶とBSO結晶のヴェルデ定数<sup>(6)</sup>

	BGO: $\nu_G$	BSO: $\nu_B$
ヴェルデ定数	$\lambda = 850\text{nm}$	$\lambda = 870\text{nm}$
$\times 10^{-5}$	6.8	3.5
[rad/AT]	$\lambda = 633\text{nm}$	
	2.3~12.3	6.6

タイプA, Bそれぞれでヴェルデ定数  $\nu_A, \nu_B$  を求めた上で, (7)式により  $m$  の値を求めてその特性を検討した。求めた磁界とヴェルデ定数を以下に示す。

$$H_A = 7.977 \times I_L \text{ [AT/m]} \tag{8}$$

$$H_B = 29.56 \times I_L \text{ [AT/m]} \tag{9}$$

$$\nu_A = 2.34 \times 10^{-5} \text{ [rad/AT]} \tag{10}$$

$$\nu_B = 3.60 \times 10^{-5} \text{ [rad/AT]} \tag{11}$$

次に, タイプBで求めたヴェルデ定数  $\nu_B$  を用いて, タイプAの  $I_L$  と  $m$  の関係を(12)式に, また, この関係を図18中に点線で示す。

$$m_{A-B} = 0.004914 \times I_L \text{ [%]} \tag{12}$$

図18から分かるように,  $m_{A-B}$  特性曲線の傾きはタイプAのものよりも大きくなった。これはタイプBにおける漏れ磁束よりも, タイプAにおける漏れ磁束が大きいためであると考えられる。表2において, BGO素子のヴェルデ定数  $\nu_G$  ( $\lambda = 850\text{nm}$ ) は, レーザ波長  $\lambda = 870\text{nm}$  におけるBSO素子のヴェルデ定数  $\nu_B$  の約2倍である。BGO結晶は, BSO結晶と同じ立方晶系単結晶で, 構造や性質がよく似た結晶であることから, そのヴェルデ定数も同様の特性を示すことが推測されるが, レーザ波長  $\lambda = 633\text{nm}$  におけるヴェルデ定数の値としては, 表2に見られるように2.3~12.3が示されているが, ここでは磁気モデルにおける印加磁界を大きく見積もったので, 本実験で測定したBGO素子のヴェルデ定数は小さかった。これは磁界計算において漏れ磁束を考慮しなかったことによる。

### 5. 2 光電流センサの温度特性と時間特性

図19に, 商用周波電流  $I_L = 50, 70, 100\text{A}$  一定とし, センサ部の雰囲気温度  $T_s$  を  $30 \sim 90^\circ\text{C}$  の範囲で  $5^\circ\text{C}$  ずつ変化させた時の変調度  $m$  の変化を示す。ここで, 各  $I_L$  における  $m$  は,  $T_s$  の上昇とともに徐々に上昇し, 商用周波電流  $I_L$  が大きくなると  $T_s$  に対する傾きもやや大きくなった。  $T_s = 90^\circ\text{C}$  の時の  $m$  は  $T_s = 30^\circ\text{C}$  の時の  $m$  に比べ,  $I_L = 50\text{A}$  では約4.2%,  $I_L = 70\text{A}$  では約7.8%,  $I_L = 100\text{A}$  では約7.9%上昇することが分かった。

図20に,  $I_L = 70\text{A}$  一定とし, センサ部の温度を  $T_s = 50, 70, 90^\circ\text{C}$  とした時の  $m$  の時間変化を示す。この場合, 各  $T_s$  における  $m$  はほぼ一定であるが,  $T_s$  が高くなると  $m$  の変動幅が若干上昇しかつその変動幅がやや大きくなっている。同図に示すように, 測定時間50分では, 光出力の変調度はほぼ一定であり, 変調度の平均からの変動率は, タイプAで5~13%程度, タイプBで1~4%程度である。ここで, タイプBの精度はタイプAに比べ約3.7倍高い感度が得られた。

以上のことから, 実験に用いたモデルでは, 同一温度での変調度は時間的には変化しないが, 温度並びに電流が高くなるとより大きくなることから, 電流変化, 温度変化に対する変調度の補正が必要となることが分かった。

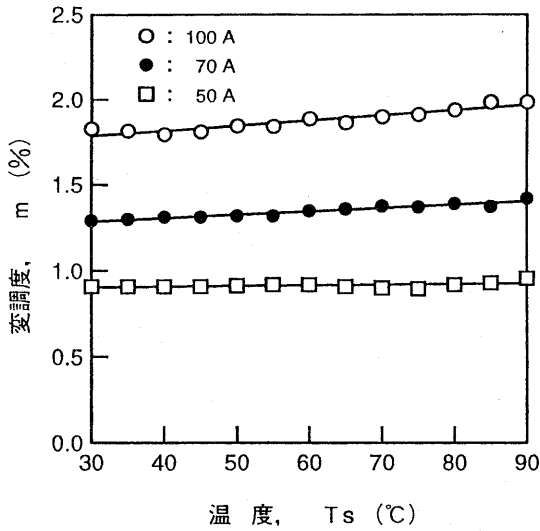


図19 タイプBの光電流センサ磁気モデルを用いたときの $I_L$ 一定時の温度変化 $T_s$ に対する変調度 $m$ の関係

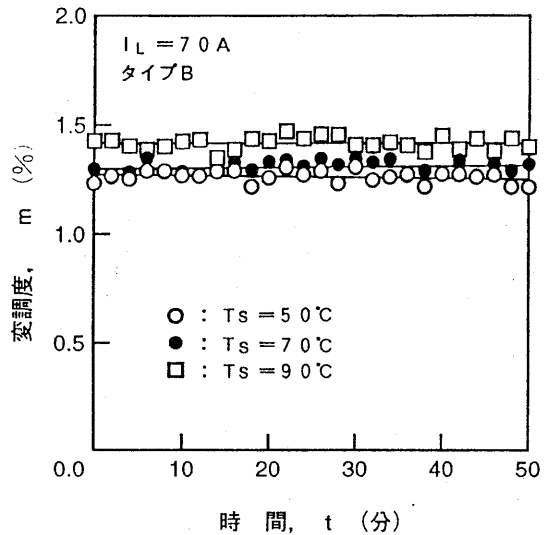


図20 タイプBの光電流センサ磁気モデルを用いたときの $I_L=70\text{A}$ ,  $T_s=50, 70, 90^\circ\text{C}$ の時の時間変化

なお、被測定電流が一定の時の変調度に、センサ部の温度一定のときのものと同様に検知し得る時間変化が見られなかったが、これは、電流一定時の放熱効果が十分であったことによるものと考えられる。これらのことから、温度と $m$ については今後さらに検討を要する。

### 5.3 雷インパルス電流特性

図21に、雷インパルス電流 $I_{L-L}=3.84\text{kA}$ の場合の電流波形(実測値)と光出力信号波形から求めた電流計算波形(計算値)を示す。計算波形は、商用周波電流特性によって求めた(5)式と光出力信号波形とを用いて計算した被測定雷インパルス電流の波形である。計算値と実測値は、高周波ノイズによりBGO素子に共振が起こり、このために電流のノイズを増幅しているものと考えられる。電流がピークに達する直前から両者に相違が生じ、計算値の方が実測値よりも早く立ち下がっている。この原因としては、雷インパルス電流発生装置の接地抵抗の出力波に対する影響や変位電流の効果などが考えられるが現段階では解明されていない。なお、計算値と実測値は、ほぼ一致しているが、 $t=10\mu\text{s}$ 以降では、両者に相違が生じている。この相違は、計算値において、電流継続による温度上昇効果を考慮していないことによるであろう。

次に、図22に $I_{L-L}$ に対する $m$ の関係と(5)式による $I_{L-L}-m$ 特性を示す。各電流値に対する変調度は理論直線に近いが、電流値が高くなると、直線からのずれが大きくなる。これは、変調度とファラデー回転角の関係が線形でないことを示す。

光電流センサについての本研究は、初期段階のものである。したがって、今後、配電システムに適用される光電流センサとしてはいかなる責務が課せられているかを十分に調査・検討した上で、光電流センサの実用化をめざし、モデルの改善、特性の向上についての研究を推進する予定である。

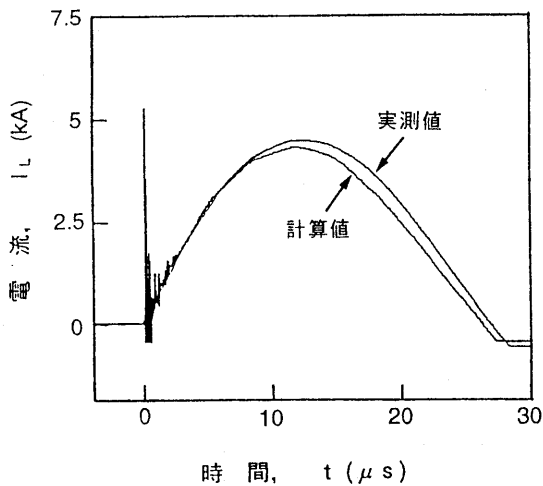


図21 雷インパルス電流  $I_{L-L}=3.74\text{kA}$  の  
実測値と計算値

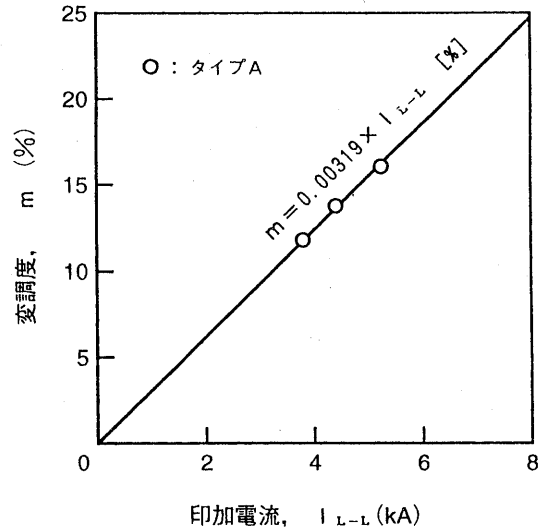


図22 雷インパルス電流  $I_{L-L}$  対変調度  $m$  の関係

## 6. 結論

### 6. 1 光電圧センサシステムについて

配電システムにおける相電圧計測用光電圧センサシステムとして、平行平板電極間がBGOポッケルス素子、絶縁物とエアギャップから成るものを考案し、平行平板電極間の電圧を3領域に分圧し、BGO素子の大きさを変えて交流高電圧印加時の光出力の交流成分並びに変調度の特性を横型変調方式で調べた。その結果、次のことがわかった。

- (1) 平行平板電極間に絶縁物を挿入、あるいはBGO素子を絶縁物中に内蔵することによって、短ギャップにおいても配電線路上の電圧を高感度で安定に計測し得る。この場合、コロナ放電、絶縁破壊が生じてもBGO素子は損傷を受けない。
- (2) 光出力の交流成分は、検光子の回転角度  $\theta_A$  に対して  $\sin 2\theta_A$  の曲線で変化する。電界は、その印加方向がBGO素子の(100)面から(010)面に変更されても、ほぼ同じ感度で計測し得る。ただし、(010)面印加の場合は偏光角が  $45^\circ$  ずれる。
- (3) BGO素子を平板電極に固定する場合、導電性塗料などで密着すれば、高感度で安定に光出力を計測し得る。
- (4) BGO素子の面へのレーザー入射位置によって、光出力の交流成分が変化する。
- (5) 被測定電圧の範囲は、エアギャップ間で発生するコロナ放電の出現によって制限される。

これらの結果から、提案の光電圧センサシステムは十分に実用化し得る特性を持つことが明らかになった。今後は、この結果に基づいて、提案のセンサシステムを含む配電システム用光電圧計測システムの開発についての研究を行う。

### 6. 2 光電流センサシステムについて

配電システム用光電流センサシステムの開発を目指して、磁気光学材料にBGO素子を用い、光電流センサの磁気モデルとして延べ板利用のもの(タイプA)、コイル利用のもの(タイプB)を考案した。これらの磁気モデルを用いて、測定感度としての変調度の商用周波電流特性、時間特性、温度特性及び雷インパルス電流特性を調べた。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 商用周波電流特性について、商用周波電流と変調度の関係は直線式で示される。コイルを用いたタイプBの測定感度はタイプAに比べ約5.7倍良い。
- (2) 測定時間50分では、光出力の変調度はほぼ一定であり、変調度の平均からの変動率は、タイプAで5~13%程度、タイプBで1~4%程度である。タイプBの精度はタイプAに比べ約3.7倍高い。
- (3) 光出力の変調度は、センサ部の温度が  $30\sim 90^\circ\text{C}$  の範囲では、ゆるやかに直線的に上昇し、  $90^\circ\text{C}$  で約5~10%



程度上昇する。変調度は、時間的にはほとんど変化しないが、温度が高くなるとより大きくなり、温度変化に対して補正が必要となる。

(4) 雷インパルス電流の場合、光出力信号から求めたものはほぼ同様な波形となり、商用周波電流特性で求めた電流と変調度の関係式が雷インパルス電流の計測にも適用し得る。

以上の結果から、BGO素子のファラデー効果を利用して、実用化し得る配電系統用光電流センサシステムの開発の目途が得られた。今後、配電系統の電流センサシステムに課せられている責務を考慮し、光電流計測システムとして、優れた性能を持ち、小型で汎用性があり、且つ光ファイバを使用したものの開発についての研究を引続き行う必要がある。

## 謝 辞

本研究を実施するに当たり、御便宜を諮っていただいた九州電力(株) 疋田 昭副社長、竹下新二配電部長はじめ関係各位に感謝の意を表します。また、各種の資料を揃えていただいた九州電力(株) 宮崎支店配電課杉田和隆副長、平岡 豊副長、小川浩二氏に、BGO素子を提供していただいた古河電気工業(株)の関係各位に厚く御礼申し上げます。

本研究は、宮崎大学と九州電力の共同研究費、文部省科学研究補助金(一般研究(C))並びに宮崎学術振興財団助成金の援助を得たことを記す。

最後に、実験に熱心に協力いただいた宮崎大学松根皐樹技官、大学院生の泊政明、卒業研究生の岩橋正始・中山 仁・高見康史の学生諸君に謝意を表します。

## 参考文献

- (1) 宮内・栗原：「高度情報化応用技術による配電総合自動化システムの開発(その2) 配電用光応用電圧・電流センサの開発と性能評価」, 電力中央研究所報告, No.185021, 1 (1986)
- (2) 金子・泊・大坪・賛田・西村・江連・中村：「配電線路における相電圧計測用光電圧センサシステムの特性」, 平成4年電気設備学会研究発表会, D-4, 101(1992)
- (3) 電気学会光応用計測調査専門委員会：「光応用計測の技術動向」, 電気学会技術報告(部)第221号, 1 (1986)
- (4) 応用物理学会光学懇話会編：結晶光学, 森北出版(株), 85(1986)
- (5) 金子・福山・大坪・賛田・江連・西村：「 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶のポッケルス効果による光電界・電圧センサの特性に関する研究」, 航空大学校研究報告, R-44, 17(1991)
- (6) 金子・福山・大坪・賛田・江連・西村：「電界センサの電界感度に及ぼす $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 単結晶のポッケルス素子の厚さの効果」, 静電気学会誌, 15, 88(1991)
- (7) 滝岡・久間・布下・三上：「光ファイバ応用電圧センサの原理と特性」, センサ技術, 2, 11 51(1982)
- (8) 応用光エレクトロニクスハンドブック, 昭晃堂

## 所属・氏名

金子 正光 辻 利則

(宮崎公立大学)

大坪 昌久

(宮崎大学)

賛田 寛

(熊本工業大学)

上島 征行

(九州電力株)

