

光応用電界センサによる電圧測定法

木 原 登 喜 夫

Measurements of Voltage by Using an Electro-Optic Crystal Sensor

Tokio KIHARA

Fundamental researches on the measurements of voltage and electric field intensity in electric power systems by using an electro-optic crystal sensor are described.

A piece of Bismuth Silicone Oxide ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) single crystal is utilized as an electro-optic modulator in the sensing device of voltage measurement, because of its better temperature stability than other electro-optic crystals such as LiNbO_3 , KDP, etc.

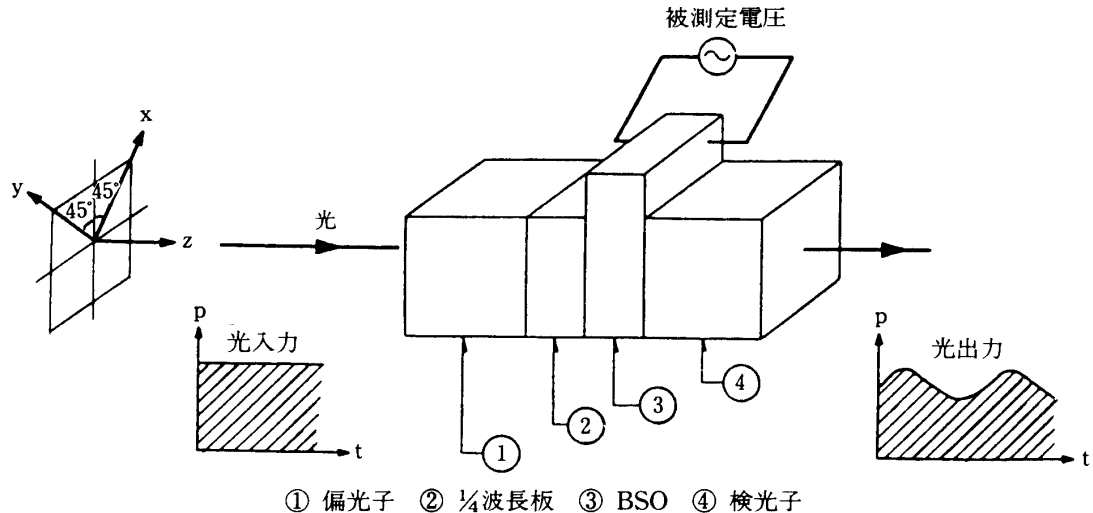
After the description of the principle and the structure of the sensor, fundamental experiments of the measurements of voltage and electric field intensity are described, that is, the linearity between output of the optic power receiver and input voltage to the $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$, the temperature characteristics, the frequency characteristics, the electric field intensity characteristics and the directional characteristics to the field intensity are reported.

Finally, some problems of the measurements and their possible applications to the electric power system field are also discussed.

1. ま え が き

光ファイバおよび光通信技術の進歩実用化により、これらを電力分野の計測制御に応用する試みが活発になっている。従来から使用されているセンサ部では、高電圧に課電された環境下でセンシングのための別電源を必要とする不便さをつきまとうが、電気量を光学量に変換する素子が受動素子の場合、別電源を必要とせず容易に高電圧部の計測を行なうことができる。

電圧または電界を受動的に光学量に変換する方法としては、電気光学効果をもつ KDP, LiNbO_3 , $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ (以下 BSO と略す) などをセンシング素子として、これにレーザ光を通過させ、印加電界による結晶の屈折率の変化を、光の速度の変化、最終的には光の位相差として検出し測定するものである^{1,2)}。この方法は (1)電圧光変成センサが受動素子であるので別電源を必要としない, (2)電気光学結晶が絶縁体であるので入力インピーダンスが高く被測定量に与える影響が少ない, (3)光の伝送路が空間あるいは光ファイバで高絶縁性を有するので高電圧部の電位差・



図一 1 光応用電界センサの基本構成

電界を簡単に測定でき、伝送路での電氣的誘導を受けない、等の特徴を有する。これらの特徴により従来測定が困難であった空間の電界の強さ、送配電線の電圧、電力用機器の分担電圧等を小型の装置で測定できるようになりつつある³⁻⁸⁾。一方、従来形指示計器にはない誤差、技術課題もいくつか存在することが判明した。

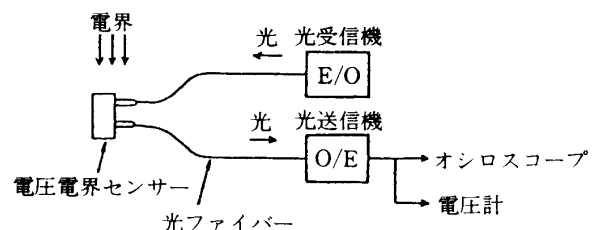
本論文では、BSO を用いた例を中心として、電気光学効果を利用した電圧・電界計測法について原理と特性例などを報告し、本学で実験した結果に基づいた計測誤差や技術課題をも紹介するものである。

2. センサ部の構造と原理

ビスマス・シリコン・オキサイド ($\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$) やニオブ酸リチウム (LiNbO_3) など電気光学効果を有するポッケルス素子を利用して図一 1 に示す基本構成を施したものがセンサ内部で、これをプラスチックケース (約 $19 \times 12 \times 9 \text{ mm}^3$) に納め光ファイバにより E/O および O/E 変換器に接続したものが図一 2 に示す測定系の構成である。

ここで電界センシング素子として採り上げた BSO 結晶中での光波の伝搬については、すでに基本的解析がなされている²⁾。BSO は電気光学効果と旋光能の 2 つの偏光特性を示すが、電界センサの基本特性に及ぼす旋光能の影響は小さく無視できるので、以下の説明では旋光能を考慮しないこととする。

図一 1 で BSO の両端面には酸化インジウムの透明電極がつけられており、光の進行方向と BSO への印加電界の方向とは等しい。上記の偏光特性をもつ BSO の誘電率テンソルは次式で表わされる。



図一 2 光応用電界センサの構成

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x & j\gamma & 0 \\ -j\gamma & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{pmatrix} \mathbf{E} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに $\varepsilon_x = \varepsilon - \eta$, $\varepsilon_y = \varepsilon + \eta$, $\eta = \varepsilon_0 n_0^4 \gamma_{41} E_z$
 $\gamma = (2\theta/\omega)(\varepsilon/\mu)^{1/2}$, γ_{41} : 電気光学定数
 ε_0 : 真空の誘電率, θ : 旋光能
 E_z : Bi₁₂SiO₂₀の z 方向の外部印加電界

である。

図—1において光ファイバ端面からセンサ部に入射する光出力はランダムな偏光状態であるが、偏光子を通過するのは結晶の x , y 方向とそれぞれ45度をなす直線偏光 $\mathbf{E} = \sqrt{2}A\exp[j(\omega t - kz)]$ のみとなる。すなわち、光波の x , y 方向の電界成分を E_x , E_y とすれば次式で表現できる。

$$\left. \begin{aligned} E_x &= A \sin \omega t \\ E_y &= A \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$\frac{1}{4}$ 波長板は x , y 方向の電界をもつ光波に対する屈折率に差異のある素子であり、 $\frac{1}{4}$ 波長板を通過すると E_x と E_y に90度の光学的位相差が発生するように作られている。

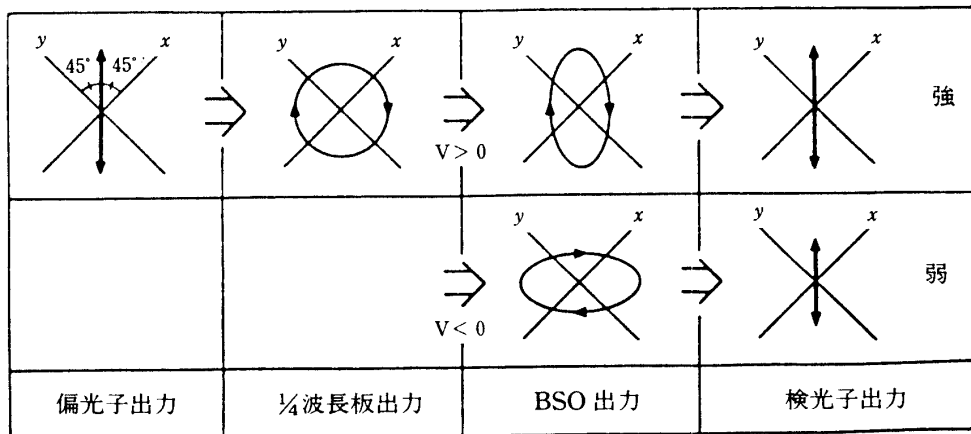
$$\left. \begin{aligned} E_x &= A' \sin \omega t \\ E_y &= A' \sin (\omega t - 90^\circ) = A' \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

これは、光波の電界ベクトルの先端の軌跡が円軌道を描くことを示し、円偏光になる。

さてBSOの z 方向に電圧が印加されると、外部印加電界 E_z に比例して x , y 方向の屈折率が変化しBSO内の光路 ℓ を光波が通過する間に光学的位相差が次式のように発生する。

$$\left. \begin{aligned} E_x &= A'' \sin (\omega t + \Delta) \\ E_y &= A'' \cos (\omega t - \Delta) \\ \Delta &\propto (\text{BSO への印加電圧}) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

式(3)で示される電界ベクトルの先端の軌跡は一般には楕円であり、図—3に示したようにBSOへの印加電圧の正負に応じて楕円の方向が変化する。



図—3 センサ内部での光の偏光状態

検光子は偏光子と同様に、特定方向の電界を有する光波のみを通過させる直線偏光素子であり、図-3のようにBSOに加えられる電圧に応じてセンサ部を通る直線偏光の強度が変化する。

これを解析的にまとめれば、センサ部の偏光子を通過して直線偏光となった式(2)の E_x , E_y は、センサ部を通過する間に、次式で表わされるマトリックス変換を受け、出力光 $E_{//}$ になる。

$$\begin{pmatrix} E_{//} \\ E_{\perp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-j\frac{\pi}{4}} & 0 \\ 0 & e^{j\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix} (M_{BSO}) \begin{pmatrix} A \\ A \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに $E_{//}$ は検光子に平行な方向の光波成分であり、

$$(M_{BSO}) = \begin{pmatrix} \cos \frac{\phi}{2} - j \cos x \sin \frac{\phi}{2}, & -\sin x \sin \frac{\phi}{2} \\ \sin x \sin \frac{\phi}{2}, & \cos \frac{\phi}{2} + j \cos x \sin \frac{\phi}{2} \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 $\phi = \delta \cdot \ell \doteq \{\omega^2 \mu (\eta^2 + \gamma^2) / \epsilon\}^{1/2} \cdot \ell$

$\cos x = (1 - \alpha^2) / (1 + \alpha^2)$, $\sin x = 2\alpha / (1 + \alpha^2)$

$\alpha = \gamma / (\eta + \sqrt{\eta^2 + \gamma^2})$, ℓ : BSO 光路長 (z 軸方向)

以上がセンサ部で光強度変調が起る基本原理であるが、解析の結果によれば¹⁾, BSO への印加電圧 V とセンサ部の光の透過率 (出力光強度) / (入力光強度) の関係は次式で与えられる。

$$T = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \left(\pi \frac{V}{V_{\pi}} \right) \frac{\sin f(V)}{f(V)} \right\} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$f(V) = \left\{ \left(\pi \frac{V}{V_{\pi}} \right)^2 + (2\theta\ell)^2 \right\}^{1/2}$$

ここに V_{π} は半波長電圧と呼ばれる材料固有の定数であり、BSO を $0.85\mu\text{m}$ の波長で利用した場合の V_{π} は 6800V である。 θ は旋光能で $\ell = 2\text{ mm}$ のとき $2\theta\ell = 0.73\text{ (rad)}$ である。式(6)をもとに BSO 電界センサの透過率対 BSO 印加電圧の特性を求めたものが図-4である。すなわち入力電圧が V_{π} に比べ小さく、かつ $\pi \cdot V /$

$V_{\pi} < 2\theta\ell$ の条件が成立する場合、 $V = \sqrt{2} \sin \omega t = 1 V_{\text{rms}}$ の信号電圧が BSO に印加された場合の光領域での変調度 m は

$$\begin{aligned} m &= (\pi \cdot V / V_{\pi}) \times \sin f(V) / f(V) \\ &= (\sqrt{2}\pi / 6800) \times \sin (2\theta\ell) / 2\theta\ell \\ &= 6.0 \times 10^{-4} = 0.06\% / V_{\text{rms}} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となり、直線性が保たれる。この直線からの偏差は $V = 300\text{V}$ で 1% 以内、 $V = 1000\text{V}$ で 5.5% 以内である。

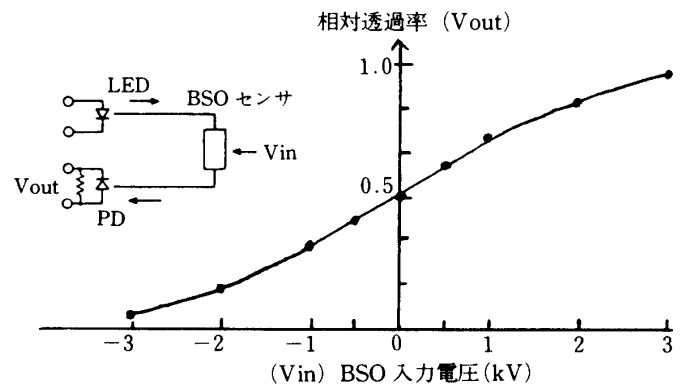


図-4 BSO 印加電圧と透過率の関係

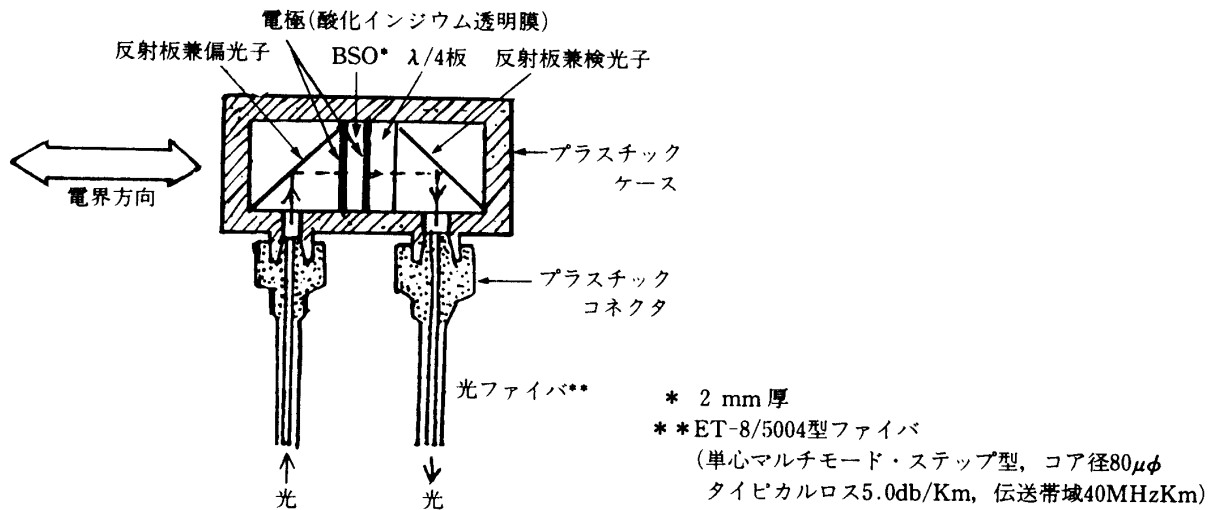


図-5 電界センサの内部構造

今回実験に使用したセンサは住友電工の試作品で、図-1の構成を改善した図-5の内部構造で、図-6の写真（金属コネクタ部のみ図-5と相違）に示す外観をしている。センサの寸法は $19 \times 12 \times 9 \text{ mm}^3$ で、光ファイバ（コア径 $80\mu\text{m}$ 、開口数0.25のステップ型）とはプラスチックの光コネクタを介して接続される。また光源としては中心波長が $0.87\mu\text{m}$ のLEDを、光検出器にはPIN-PDを利用している。

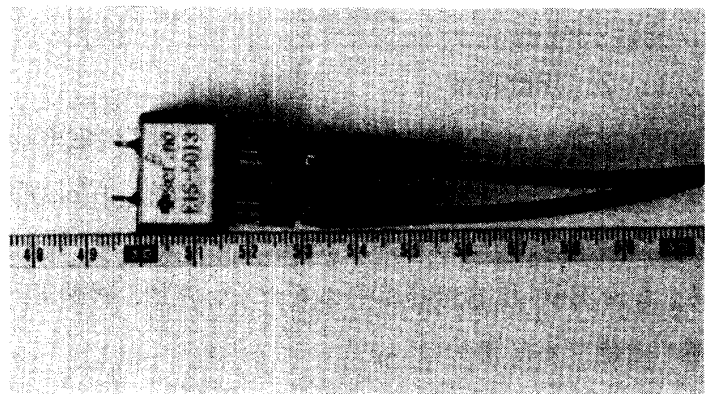


図-6 電圧センサの外観
(金属コネクタ部のみ図-5と相違)

3. BSO 電界センサの諸特性

3. 1 直線性

図-7の測定回路は、LEDを15kHzで変調し受信器で商用周波数の信号分とキャリア分とをフィルタで分離することにより、平均受信光パワをモニタできる方式で、これによる測定結果では図-8に示すごとく、入力電圧が数Vから1,000Vぐ

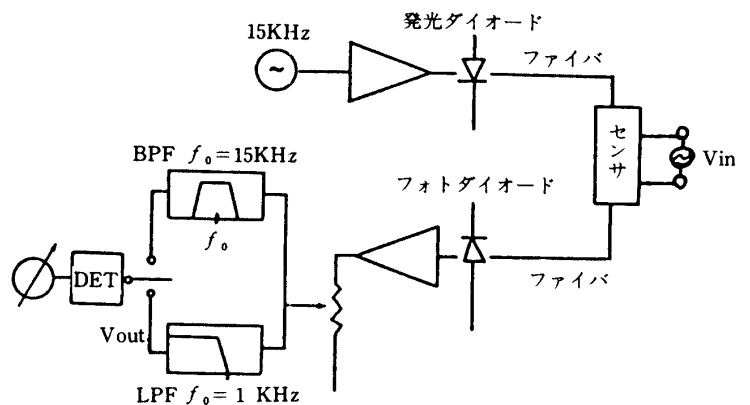
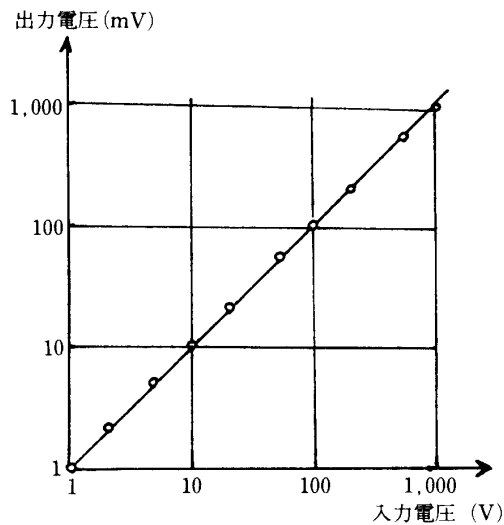
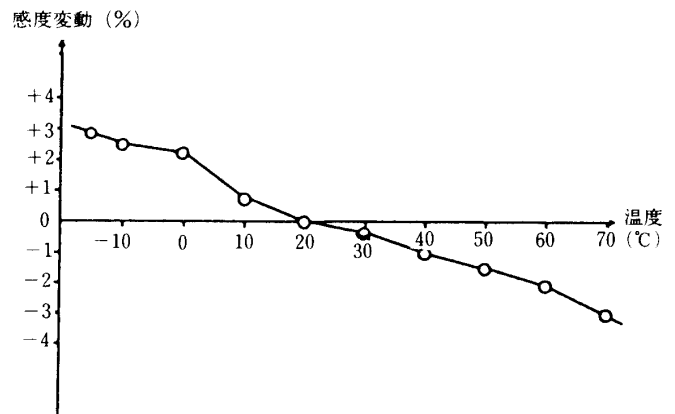


図-7 光送受信器による測定回路



図一 8 光応用電界センサの直線性



図一 9 光応用電圧センサの温度特性

らの間良好な直線性を示している。なお理論計算では1,000V を印加したときの直線からの偏差は5.5%であったが，実測結果では約3.5%と小さかった。

3. 2 温度特性

センサ部を恒温槽内に入れ，センサの感度の温度依存性を測定した。この結果図一 9 に示すように $-15^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ の範囲で感度の変動量が $\pm 3\%$ 以内という良好な結果を得た。本測定結果はセンサ全体の光学系を総合した特性であり，BSO 素子個々の温度特性については今後の課題である。なお BSO は自然複屈折をもたない点で，常光線，異常光線に対する屈折率の温度依存性の相違を考慮する必要がない。

3. 3 周波数特性

雷インパルス電圧，開閉インパルス電圧などの高い周波数成分を含む信号を計測するためには，BSO 電圧センサの周波数特性がフラットであることが必要である。

本学で図一10の測定回路を用い空間伝搬の He-Ne レーザ光で行なった実験結果によれば，BSO 素子の結晶の切り出し寸法により周波数特性がかなり相違する。図一11はこの現象を示したものである。 10^4Hz 前後の周波数帯域で出力パワが平坦なので，これを基準値にとり相対値を示してある。

この結果からインパルス電圧測定器としての問題点として，(1)基準値 0 dB にした 10^4Hz 前後の周波数帯域での出力パワ絶対値が BSO 素子の個性によって20%前後相違すること，(2)素子 C の特性に見られるように $(1 \sim 5) \times 10^6\text{Hz}$ の領域で，結晶のカット寸法によって決まるピエゾ共振現象が現われること，である。なお，素子 A, B の 2 曲線が 10^3Hz 以下の低周波領域において出力パワが上っているのは，光パワメータの周波数特性によるもので，これを補正してないためである。

以上の問題点を考慮すると，立上り波頭時間 $1 \mu\text{s}$ 位の雷インパルスの観測は可能であるが，こ

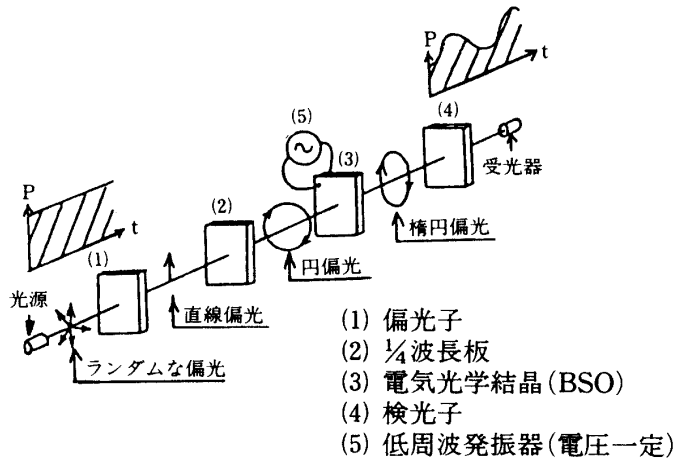


図-10 空間伝搬による周波数特性測定回路

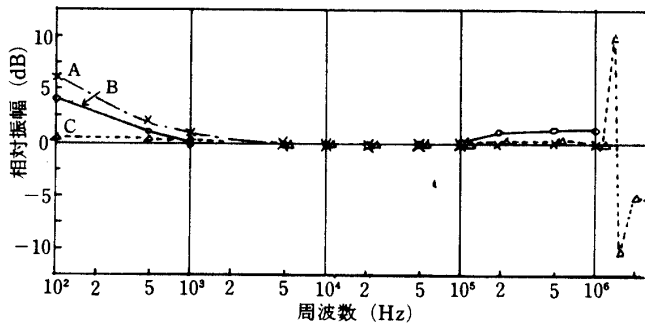


図-11 電圧センサの周波数特性 (素子 A, B, C の 3 種類)

れより高い峻度の $0.1\mu\text{s}$ 以下のパルスを忠実に測定できるためにはなお改善点が多いと言えよう。

4. 空間電界の測定実験

空間電界の測定には一般的に回転型電界測定器が使われているが、これに代る計測器として BSO センサの可能性を、以下の実験で確かめてみた。

4. 1 電界強度対出力電圧特性

直径20cm のアルミ円板で平行平板電極を図-12のように製作して平等電界を発生させ、この内部に絶縁棒に取りつけた BSO センサを配置した。センサ部と光ファイバの接続を図-5に示す絶縁物 (プラスチック) コネクタで行なうもの (以下 I 型と呼ぶ) と図-6の写真のように金属コネクタで行なうもの (以下 M 型と呼ぶ) の 2 種類について、電界の強さと光受信器出力電圧の関係を求めたものが図-13である。この結果から、センサ部全体が絶縁体から構成されている I 型は、構成素子の比誘電率 ϵ_s が 3.6 ($\frac{1}{4}$ 波長板) から 2000 (酸化インジウム薄膜電極) の範囲にあるものの、センサ部の寸法が小さいこともあって空間電界を著しくは変歪させないために、ほぼ原点を通る直線の特性が得られる。一方、M 型はかなりの容積の金属をセンサ部に付けているため、空間電界が極度に乱され BSO の電極間に I 型の $1/20$ 以下の電位差しか現われないことが判る。このため光受信部のノイズレベル (図-13では 0.4mV) と同程度の出力電圧を示す電界の強

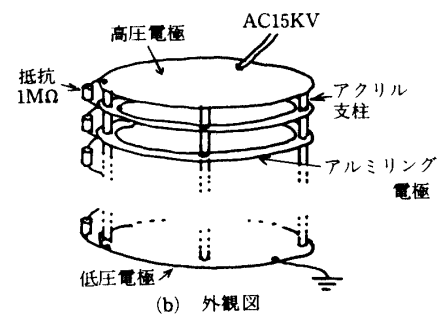
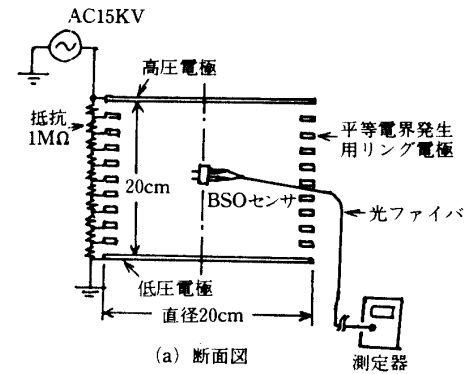


図-12 平等電界発生装置

さ（数百 V/cm）での測定は無理で、少くともこれより1桁高い電界でないと適用できないと考える。

これらの点から、空間電界の測定には、金属部を全くもたない小さい寸法のI型が最適であると考ええる。

4. 2 センサの電界指向特性

BSO 素子の両面には酸化インジウムの透明電極が蒸着されているので、この電極に平行な向きの電界には全く動作しないはずである。

いまセンサが周囲の電界を全く乱さないと仮定すれば、電極の法線の向きと角度 θ をなす電界に対する光受信器の出力電圧 $P(\theta)$ は次式で求められる。

$$P(\theta) = P_0 \cos \theta \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに P_0 は $\theta = 0$ のときの同一電界に対する出力電圧である。

図-12に示す平等電界内に、プラスチック絶縁棒に電界センサを固定して挿入し、この絶縁棒を回転させて上式で表わされる指向特性を求めた。その結果を図-14に示す。理論曲線は完全な8の字円で示されるのに対し、電界の強さ 700V/cm で求めた実験値は、プラスチックコネクタのセンサと金属コネクタのそれとで理論曲線からの乖離の度合が異なる。これは前項で述べたように、同一空間電界

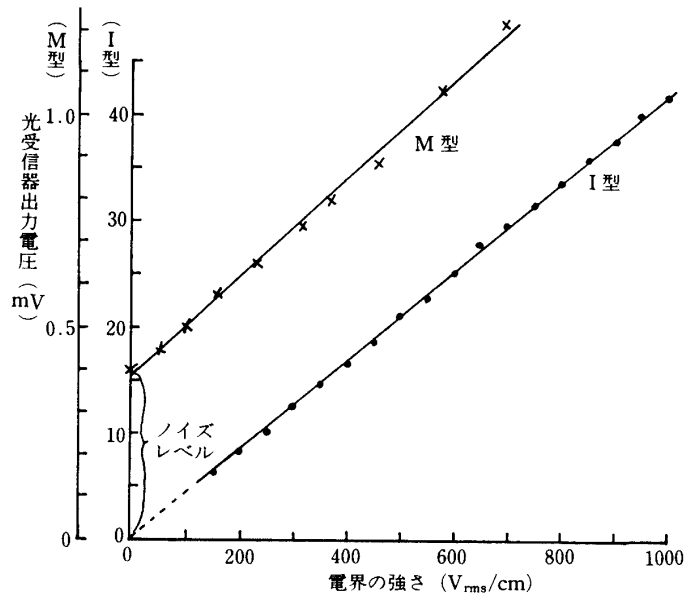


図-13 平等電界中の電界強度対出力電圧特性

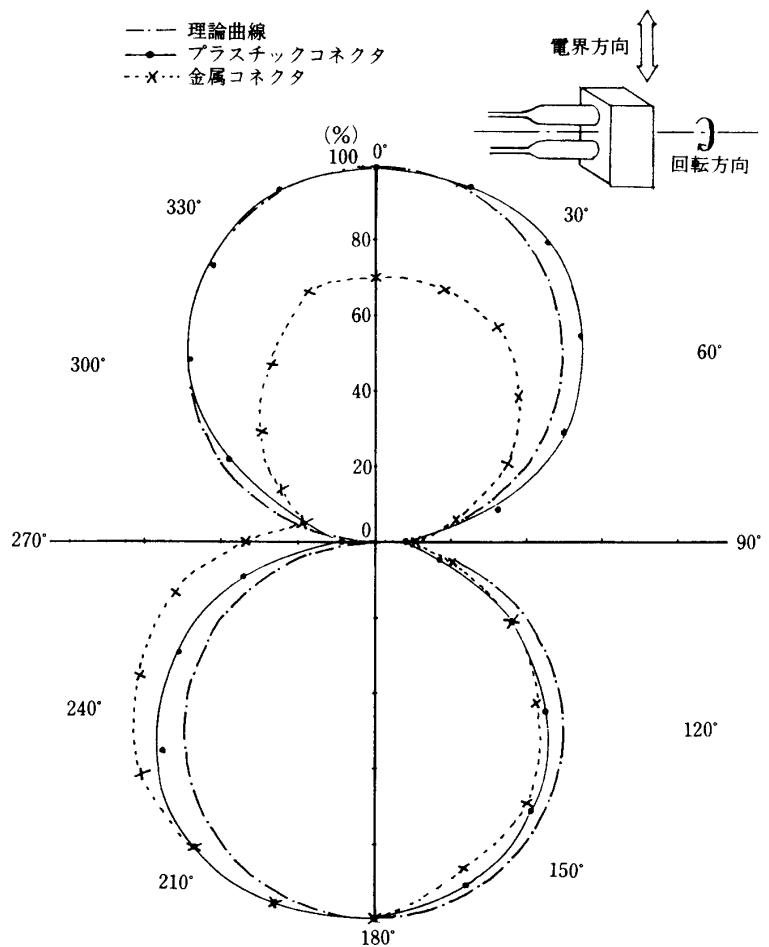


図-14 光電界センサの指向特性

強度に対する出力感度が1/20以下に低下することが主因と考えられる。この他 BSO 素子電極面とケース表面、コネクタ2本を結ぶ線などの取付方向のずれなども原因になる。

この結果から空間電界の測定に当っては、電界方向に対するセンサ部の取付角度が極めて重要である。なお、そのセンサは出来るだけ小型でプラスチックコネクタ付きで、かつセンサ構成要素の取付精度を上げたものが要求される。

5. む す び

電気光学効果をもつポッケルス素子の1つであるBSOを使った光応用電界センサについて、基礎特性を中心に研究考察の結果を述べた。

先端技術分野の計測法として、従来の電力技術部門にも例えば、(1)架空送配電線下の電界測定による検電法⁹⁾、(2)がいし連の分担電圧測定による不良がいしの選別⁴⁾、(3)雷電圧の観測¹⁰⁾、(4)電圧変成器(PT)を省いたGIS型光直接変成器^{6,7)}、(5)静電気計測¹¹⁾、など各種の使われ方が試みられている。しかし、以上の基礎的研究の結果からみると、定性的計測法としては充分便利な特長を有しているので応用分野は拡大されると期待されるものの、定量精密計測法としてはまだ検討すべき技術研究課題が多いと考える。標準計器に近い使われ方まで考えれば、センサ個々の特性の相違をなくすために、結晶の切り方、光学系の組立て方、センサ内外部の寸法精度の出し方などの他に、これと組合わせる光ファイバ、発受光素子の特性のばらつきの問題もあろう。この方面の実用化研究は関係者間で採り上げられたばかりである。課題は多くあるが、いずれ光技術を使った電気量の測定法が、現用の電気計器の一部にとって代る時がくると信ずるものである。

本研究は本学の特別研究費によって行われたもので、多大の御援助と御理解を戴いた金井兼造理事長、正田強学長をはじめ、御関係各位に深く感謝いたします。

また本研究の実施に当っては、BSO センサ、光ファイバ等の関連部品を供与していただいた住友電工の御関係各位と、卒業研究として担当された昭和59年度卒業生の安達公男、阿部秀行、村林文雄、昭和60年度卒業生の市川義文、田中辰也、田村信男の各氏に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 齊藤 他：東京大学生産技研報告，Vol.28 No5, 昭55, 3
- 2) 浜崎 他：信学技報，OQE '80, 4
- 3) 鍛冶 他：電学研究会資料，RM81-35, '81
- 4) 木原 他：電学研究会資料，IM81-11, '81
- 5) 小山 他：電学 昭56 全国大会，No1144, 昭56
- 6) 春本 他：電学 昭58 全国大会，No1161, 昭58
- 7) 黒田 他：電学 昭59 全国大会，No1152, 昭59
- 8) 日高 他：高電圧技術研究会資料，'80, 2, 7
- 9) 浜崎 他：住友電気，Vol.118 p.147
- 10) 三井 他：電学 昭57 全国大会，No1142, 昭57
- 11) 三井 他：静電学誌，Vol.9 No1 p.40, '85