

光電界・電圧センサ

Optical Electric Field/Voltage Sensor

柴田 一喜 * Kazuyoshi Shibata

I. まえがき

光電界・電圧センサは、①高電気絶縁性、②本質安全防爆性、③無誘導性など光応用計測の特徴を備えている。一方、高電圧機器など高電圧部の場合、石油タンクに蓄積する静電気検出のように可燃物が存在し爆発・火災の危険性がある場合、放電現象などに伴う激しい電磁誘導ノイズがある場合などの電界・電圧測定は、従来の電気を用いた測定技術では困難である。このような従来困難であった電界・電圧測定を、光電界・電圧センサを用いて容易に精度よく測定できるようにすることが、このセンサの開発の目的である。

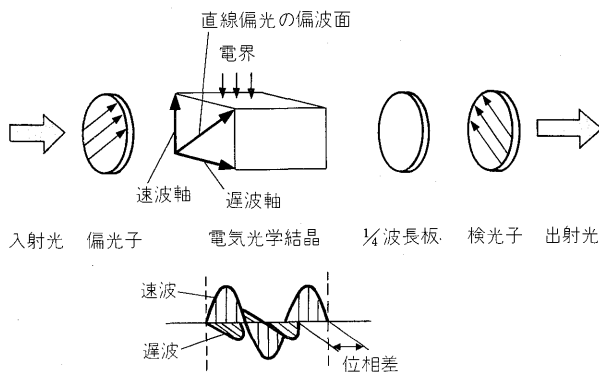
このセンサの原理として電気光学結晶のポッケルス効果を用いているため、光を光ファイバで電気光学結晶をトランスデューサとする検出部に送り、検出部で電界・電圧によって変調された光を光ファイバで受光部に戻し、この戻ってきた光を検出することによって電界・電圧測定を行う。このため、このセンサは高压側に電源、能動素子を置く必要がないという利点を持っている。

このセンサの仕様として、測定範囲0～3kV/cm、感度10V/cm、精度±2%を目標とした。

II. センサの原理

このセンサの原理を第1図に示す。

入射光は偏光子を通り、斜め45°の振動方向を持つ直線偏光となる。この直線偏光が電気光学結晶中に入ると互いに垂直な振動方向を持つ二つの光に分かれる。その



第1図 ポッケルス効果を用いた光電界・電圧センサの原理
Fig. 1. Principle of the optical electric field/voltage sensor using Pockels effect

一方の振動方向が水平ならば、他方は振動方向が垂直である。そして電気光学結晶に垂直方向の電界・電圧が印加されると、垂直の振動方向を持つ光は速度が速くなり、逆に水平の振動方向を持つ光は速度が遅くなる。このため、結晶の入射面で一致していた二つの光の位相は出射面で差が生じる。つまり、位相差 Γ を生じる。位相差のため直線偏光は楕円偏光となり1/4波長板を通過して更に $\pi/2$ の位相差を加えた後、検光子を通過することによって、直線偏光の振動方向と直角な方向の成分だけを楕円偏光から選び出す。ここで、 Γ は電気光学結晶に印加した電界・電圧に比例する。このため、ポッケルス効果は一次電気効果ともよばれる。

電界・電圧の変化に基づく位相差の変化は検光子を通過することによって光の強度変化に変換されているので、出射光の光強度を測定することによって電界・電圧を測定できる。入射光強度を I_i 、出射光強度を I_o とすると、

$$I_o/I_i = \sin^2 \left[\frac{1}{2} \left(\Gamma + \frac{\pi}{2} \right) \right] \dots\dots\dots (1)$$

が成り立つ。

III. 構成

センサを二つの部分に分ける。一方は高压部に置かれ実際に電界・電圧を検知する検出部、他方は光伝送路、信号処理部である。

1. 検出部

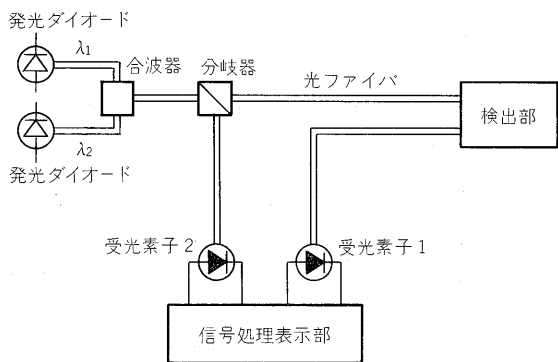
検出部は偏光子、電気光学結晶、1/4波長板、検光子からなり、外形は17×8×32(mm)の直方体である。電気光学結晶としてLiNbO₃を用いた。この結晶は光学的一軸性結晶^{(1)~(3)}であり、光の進行方向によって自然複屈折が生じる。自然複屈折が生じるとその温度依存性のため、電界・電圧測定に温度変化に基づく測定誤差を生じる。また、結晶中の光の進行方向と印加電界・電圧の方向との組合せによって、感度とその調節可能性が決まる。このため、結晶中の光の進行方向と印加電界・電圧方向との組合せの幾つかに対して、自然複屈折の有無、感度の大小、感度の調節可能性を検討した結果、光の進行方向としてc軸、電界・電圧の方向としてa軸あるいはb軸を選んだ。この組合せは自然複屈折がなく、感度は中程度であり、感度の調節が可能であり、センサとして最適

* (株)富士電機総合研究所 製品化研究所

な組合せである。自然複屈折がないため、その温度依存性にに基づくこのセンサの温度依存性は生じない。

2. 光伝送路, 信号処理部

光伝送路, 信号処理部は発光部, 光ファイバ, 光コネクタ, 受光部, 信号処理回路などからなる。光が光ファイバ, 光コネクタなどの光伝送路を進む場合, これらの温度の変化, 光ファイバに加わる応力の変化などによりその伝送特性が, したがって光伝送損失が変動する。そして, この変動が精度の良い測定を妨げる。また, 発光素子の放射する光強度も温度などにより変動し, 測定誤差の原因となる。このため, 光伝送路の損失変動と発光素子の出力変動を補償し, 測定精度を向上させる方法を開発した。その方法を第 2 図に示す。



第 2 図 光電界・電圧センサの構成
Fig. 2. Composition of the optical electric field /voltage sensor

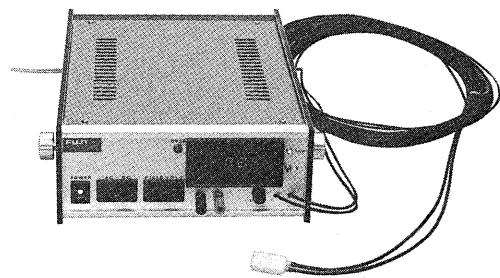
波長の異なる二つの波長 λ_1, λ_2 を用いる。二つの発光ダイオード (LED) で λ_1, λ_2 の光を交互にパルス発光させて, これを光ファイバで導いて合波器で 1 本の光ファイバにのせる。分岐器で波長 λ_1, λ_2 の光の一部を分岐し, 受光素子 2 でこの分岐光の光強度を検出して光源の出力変動を測定する。分岐器から出射する他方の光は光ファイバ中を伝搬して検出部に入射する。検出部において波長 λ_1 の光は電界・電圧によって変調されるが, λ_2 の光は変調を受けない。検出部を出射した光は光ファイバで受光素子 1 に導かれ, その入射光強度が測定される。受光素子 1 で受光する波長 λ_1, λ_2 の光強度をそれぞれ $I_{1\lambda_1}, I_{1\lambda_2}$, 受光素子 2 で受光する波長 λ_1, λ_2 の光強度をそれぞれ $I_{2\lambda_1}, I_{2\lambda_2}$ とすると, 信号処理部では,

$$S = (I_{1\lambda_1}/I_{2\lambda_1}) / (I_{1\lambda_2}/I_{2\lambda_2}) \dots\dots\dots(2)$$

の演算が行われる。第一段目の割算で波長 λ_1, λ_2 の光源の出力変動に基づく測定誤差を補償できる。第二段目の割算では波長 λ_1, λ_2 に対する光伝送路の損失変動はほぼ同一であるので, 光伝送路の損失変動に基づく測定誤差を補償できる。

IV. 特 性

以上のような構成を持つ電界・電圧センサを試作した。それを第 3 図に示す。この試作機の特性を評価した結果, $0 \sim 3 \text{ kV/cm}$ の目標測定範囲で直線性からのずれは 1% 以内であり, 感度は約 2 V/cm で目標感度 10 V/cm を上回っており, 目標値に対して感度の設定が最適であった。

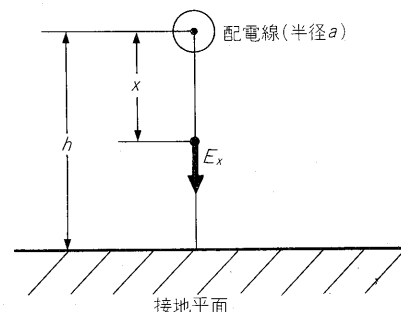


第 3 図 光電界・電圧センサの試作器
Fig. 3. Optical electric field/voltage sensor

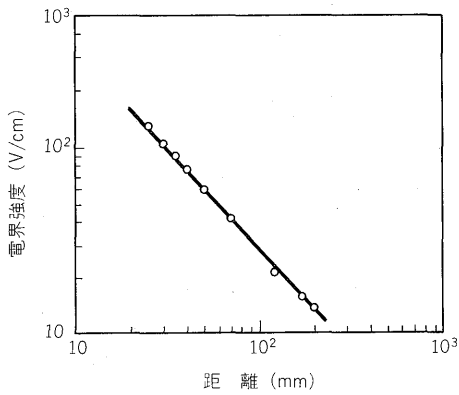
しかし, 温度依存性は 10°C の変化で $\pm 8\%$ の依存性を示した。詳細な実験及び理論的検討により, その主原因が電気光学結晶として用いた LiNbO_3 結晶の焦電性にあることをつきとめた。すなわち, 焦電性のため結晶の温度が変化すると結晶端面に電荷が蓄積し, 結晶内部に測定電界以外の電界を生じ, センサは温度依存性を示すと考えられる。そのため, 焦電性についての対策を行った結果, 基礎実験で 70°C の温度変化に対し, 温度依存性を $\pm 1.5\%$ に低減することができた。現在, この対策を施したセンサの試作を行っている。

V. 電界測定例

試作器を用いて第 4 図に示すような電界の測定を行った。接地平面上 h の高さにある配電線に AC $3,800 \text{ V}$ を印加した場合, 配電線中心から真下に x の距離にある空間の電界強度を測定し, 電界強度 E_x の x 依存性を求めた。その結果を第 5 図に示す。測定値は両対数スケールのグ



第 4 図 光電界・電圧センサで測定した電界の一例
Fig. 4. Electric field measured by the optical electric field/voltage sensor



第5図 光電界・電圧センサで測定した電界強度の距離依存性

Fig. 5. Electric field strength vs. distance relation measured by the optical electric field/voltage sensor

グラフ上で傾き-1の直線にのっており、電界強度は距離の逆数に比例している。

一方、配電線に電圧 V を印加したとき、理論的に得られる E_x は、

$$E_x = \frac{V}{\ln(2h/a)} \left(\frac{1}{x} + \frac{1}{2h-x} \right)$$

$$\doteq \frac{V}{\ln(2h/a)} \frac{1}{x} \quad (h \gg x) \dots\dots\dots(3)$$

a : 配電線の導体部の半径

であって、 E_x が $1/x$ に比例する。これは実験結果と一致している。

次に、式(3)から計算した $x=25\text{mm}$ のところでの電界強度 $E_x=25$ は 190V/cm である。一方、 LiNbO_3 の電気光学係数(ポッケルス効果の大きさを表す)、誘電率等の物性定数等から計算した電界強度は 130V/cm で、式(3)

から計算した値の約70%である。この不一致は、物性定数の不確定さ、センサケースのため実際の感度が低下することなどの原因が考えられるが、実際の使用では校正して用いるので問題はないと考えられる。

VI. むすび

電気光学結晶のポッケルス効果を用いた光電界・電圧センサを試作し、その特性を評価するとともに実際の電界測定を行った。その結果、測定範囲、感度は十分なものを得られたが温度依存性が残った。この温度依存性の原因が焦電性であることをつきとめ、この対策を施したところ、基礎実験で良好な温度依存性を得た。また、配電線の周囲の電界強度が距離の逆数に比例するという測定結果が得られ、理論計算の予測と一致した。このように光電界・電圧センサが電界測定において有効であることを明らかにできたが、更に次のような点の検討が必要である。

- (1) 焦電性対策を施したセンサの温度依存性除去が十分であることの確認。
- (2) 長期的安定性の検討。
- (3) 高周波あるいは直流電界・電圧の高精度測定技術の確立。

参考文献

- (1) S. C. Abrahams et al.: J. Phys. Chem. Solids, **27** pp. 997~1012 (1966)
- (2) 坪井誠太郎: 偏光顕微鏡, pp. 73~88 (1960)
- (3) 応用物理学会光学懇話会: 結晶光学, pp. 213~252 (1975)



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。