

# 強誘電体の電圧特性直視装置

土 屋 英 俊\*

信州大学工学部 通信工学教室

(昭和33年10月20日受理)

## (1) 緒 言

強誘電体を使用して誘電増巾器、周波数変調器等を設計する際利得等を算出する基礎として、試料の電圧容量特性を知る必要がある。従来かかる電圧容量特性を求めるには、ブリッジ又はQメータ等で直流電圧を加えられた試料の静電容量を、一点ずつ測定し、それらの点を結んだのである<sup>(1)</sup>。しかるに実際得られる利得等は上述の静的特性曲線より算出した値とは一致しない<sup>(2)</sup> 事が多い。この不一致の原因を筆者は静的な電圧容量曲線の採用にあると考えて動作状態での電圧容量特性を直視せしめる装置を考案し、おおよそ目的を達したので報告する次第である。

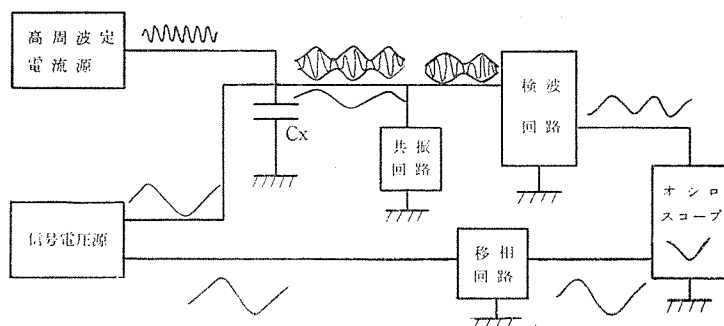
## (2) 装 置 の 構 成<sup>(3)</sup>

回路としては静電容量の瞬時値を示せばよいのであるが、容量の数10%にも達する変動が測定用高周波源に与える影響を極力避けなければならない。それゆえ高周波源と試料の結合は極めて粗にしているが、そのため出力電圧が充分でない憾みがある。出力電圧を大きくする方法としては第1図に示す如き高周波定電流回路を使用して試料端子の高周波電圧をそのまま検波回路に導入すればよいのであるが、この場合は試料の容量を $C_x$ 、端子電圧を $E_x$ 、高周波定電流を $I$ 、角速度を $\omega$ とすれば

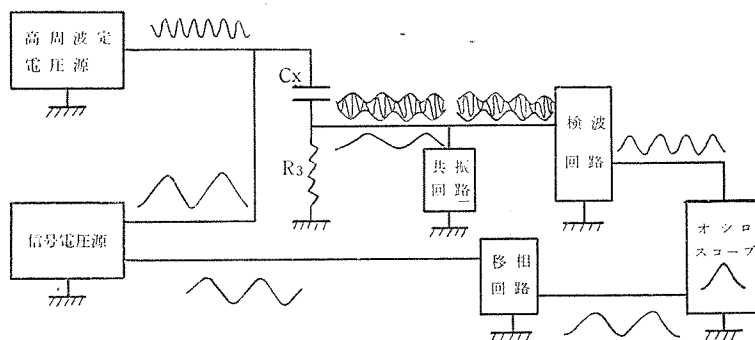
$$E_x = I / \omega C_x \quad \dots\dots(1)$$

となり、容量の逆数を示すことになる。この方式には必要な電圧が充分に得られること、測定用周波数に特別な制限がないこと、被測定容量の範囲がひろい等の利点があるが容量の逆数を指示することは何と言つても不便である。例えば容量の最大である零電界付近で目盛が最も粗くなり、強誘電体の特異現象を見落す等の欠点がある。容量に比例する出力電圧を得る回路方式を第2図に示す。試料と直列に接続せる抵抗の端子電圧を検波回路へ導入するゆえ、出力が第1図の回路に比して相当低下するのはやむを得ない。高周波源に真空管807を使用して約300ボルトの高周波電圧を得、これより実際試料の大きな容量変化に対し充分な安定度をもつ約10ボルトの電圧を分圧するには試料インピーダンスとして少なくとも $1k\Omega$ 以上を要する。しかるに試料容量の最小値には実際上限度があるゆえ使用する高周波数に限界を生ずる。筆者は実際上の便宜をも考慮して455kcを選んだ。第2図の回路で試料に接続せる抵抗を $R_0$ 、試料および $R_0$ に加わる電圧

\* 信州大学助教授



第 1 図



第 2 図

を  $E_3$ ,  $R_3$  の端子電圧を  $E_x$  とすれば

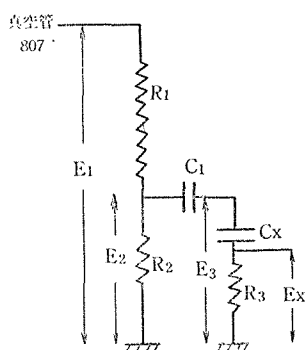
$$E_x = E_3 R_3 / \sqrt{R_3^2 + 1/\omega^2 C_x^2} \approx \omega C_x R_3 E_3 \quad \dots\dots(2)$$

ただし  $1/\omega C_x \geq 3R_3$  に選んでいる。この大きさの割合と目盛の関係は後述する。(2)式より明らかな如く、 $R_3$  を可変抵抗にして最初の状態で  $C_x R_3$  が一定になるように輝点を調整すれば、すべての電圧容量変化(試料および条件の差異に対して)を同一基点よりの曲線として示し得て便利である。本回路は第1図の回路に比して測定容量の範囲、試料へ加わる電圧、抵抗  $R_3$  の選定等に幾分困難な問題があるが変化容量直視装置としては前者よりすぐれているので以下その特性を吟味する。

### (3) 回路特性

第2図の回路の高周波電圧分圧部分を第3図に示す。電源に定電圧回路を使用すれば  $E_1$  の変動はほとんど無視出来る。したがって  $E_2$ ,  $E_3$  を求めれば

$$E_2 = E_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \sqrt{1 + \omega^2 \left( \frac{C_1 C_x}{C_1 + C_x} \right)^2 R_3} / \sqrt{1 + \omega^2 \left( \frac{C_1 C_x}{C_1 + C_x} \right)^2 \left( R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^2} \quad \dots\dots(3)$$



第 3 図

$$E_3 = E_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{C_1}{C_1 + C_x} \sqrt{1 + \omega^2 C_x^2 R_3^2} / \sqrt{1 + \omega^2 \left( \frac{C_1 C_x}{C_1 + C_x} \right)^2 \left( R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^2} \dots (4)$$

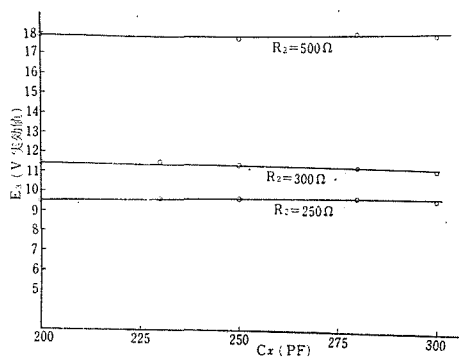
となる。(3)式にて  $R_1 \geq 10R_2$ ,  $R_3 \simeq R_2$ ,  $\omega^2 \left( \frac{C_1 C_x}{C_1 + C_x} \right)^2 R_3^2 \lesssim 0.1$  なるゆえ

$C_x$  の増減に対しては分母の増減割合の方が分子の増減割合よりも大きい。すなわち  $C_x$  が増加すれば  $E_2$  は減少するのである。試料には直流電圧と信号電圧を印加しなければならない。信号周波数が 20kc とになれば信号周波源の出力インピーダンス低下のために  $C_1$  にはあまり大容量のコンデンサーは使用出来ない。さて  $C_x$  の最大値に対して  $C_1 \simeq 10C_x$  に選定した。しかしこの程度の  $C_1$  の存在でも(2)式より明らかな如く  $E_2$  に比して  $E_3$  をおおよそ 10% 低下せしめている。すなわち  $C_x$  の増減に対する  $E_3$  の増減は  $E_2$  の場合につき前述せる根号項の比によると同程度  $C_1 / (C_1 + C_x)$  なる項にも依存している。これらの関係の計算結果を第 1 表に示す。ただし  $R_1 = 5k\Omega$ ,  $R_2 = R_3 = 300\Omega$ ,  $C_x = 300$  pF で 10% 増加せる後の電圧値等を増加前の値を 1 として示してある。

第 1 表  $C_x$  10% 増加の結果

$C_1 / C_x$	$C_x$ を 10% 増加することにより減少せる A 値	同左の $C_1 / (C_1 + C_x)$ 値	同左の $E_3$ の値
1	0.998	0.953	0.951
3	0.993	0.997	0.970
10	0.990	0.992	0.982
20	0.987	0.995	0.982

表中 A は(4)式の根号項の比を意味している。すなわち  $C_x$  の変化に対する  $E_3$  の変動は  $C_1$  が大きい程、かつ  $R_2$  が小さい程少いわけである。 $C_x$  に対する  $E_3$  の変化を第 4 図に示す。第 3 図より  $E_x$  を求めれば、

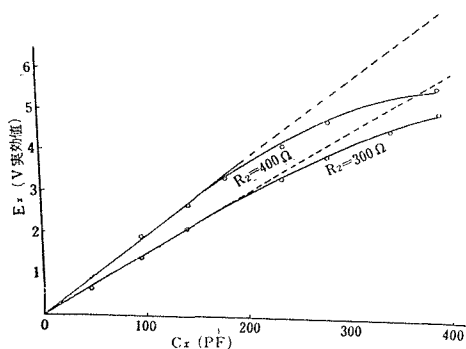


第 4 図

$$E_x = \omega C_x R_3 E_3 \frac{1}{\sqrt{\omega^2 C_x^2 R_3^2 + 1}}$$

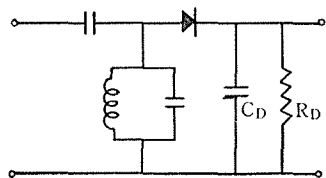
$$= E_1 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{C_1}{C_1 + C_x} \omega C_x R_3 \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \left( \frac{C_1 C_x}{C_1 + C_x} \right)^2 \left( R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \right)^2}} \quad \dots\dots(5)$$

(5)式の分母についてやはり  $C_x$  が 10%増加した場合を考えると、 $\omega^2 C_x^2 R_3^2 \approx 0.1$  とすれば、はじめの分母は  $1 + 0.05$  であり増加後は  $1 + 0.06$  になる。すなわち  $C_x$  に対応する  $E_x$  の値は  $C_x$  が 10%程増減するとき、 $C_x$  の変化に伴う  $E_x$  の変動以外にさらに 1%近い変動を示すのである。後の変動を少なくするには  $\omega C_x R_3$  を小さくすればよい。以上はすべて  $C_x$  の変化量 10%の場合につき述べたがこれは強誘電体の電圧容量曲線の一部分を観測する際の根きよとなるのである。 $C_x$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  の一層小さい値で観測するならば、10%変化せる  $C_x$  に対応する  $E_x$  値の直線性よりのはづれを最初の  $E_x$  値の 0.5%程度に減らしうる。又電圧容量曲線の全部を観測する際は  $C_x$  の 70%程度の変化に対し最大値で直線性よりの低下を 7%程度に抑え得る。 $C_x$  と  $E_x$  の関係の実測値を第 5 図に示す。なお装置には試料と標準可変空気コンデンサーを切換え接続して常に容量の較正が出来る如くしてある。 $C_x$  の変化により変調せられた高周波電圧  $E_x$  を導入すべき検波回路を第 6 図に示す。信号電圧の相当高い場合は信号電圧の一部が検波器に加わり、その非直線性の



第 5 図

ために出力波形は本来の変調波形とはかなり異ってくる。特に信号周波数が10~20 kcとなると  $R_3$  端子信号電圧は100 ミリボルト以上となり容量に換算すれば15PF程度である。そこで信号電圧の混入を避けるために第6図の如く検波器（ゲルマニウムダイオード）の前に高周波同調回路を接続した。かく



第 6 図

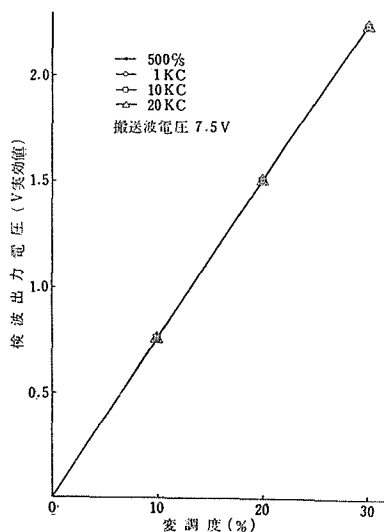
すれば不変の  $C_x$  に対してはオツシロスフープ上の出力は完全に零と認められる。つぎに検波回路全体の信号周波数特性は被変調正弦波を使用して検討した。すなわち搬送波電圧を  $E_c$ 、振幅変化分の1/2を  $E_s$ 、変調度を  $m$ 、検波能率  $\eta$ 、信号周波出力電圧を  $E_o$  とすれば

$$E_s / E_c = m \quad (6)$$

$$E_s \eta = E_o \quad (7)$$

$$\text{よつて } E_o = \eta m E_c \quad (8)$$

種々の周波数において  $E_c$  を一定として変調度  $m$  と  $E_o$  の関係を求めた結果を第7図に示す。図より明らかな如く信号周波数特性には問題はないと考えられる。ただし  $R_D = 250 \text{ k}\Omega$ 、 $C_D = 150 \text{ pF}$  に選んである。信号電圧に対する負荷は容量と抵抗であるから試料にかかる電圧の位相はおくれるし、さらに出力回路においても垂直軸印加電圧の位相はおくれる傾向を持つゆえ、信号用電圧の一部を移相回路を通して水平軸に加えている。移相回路はコンデンサーと抵抗より構成せられており位相をおくらせて調整するのであるが、水平軸用リード線に長いシールド線を使用すると高い信号周波数では分布容量の



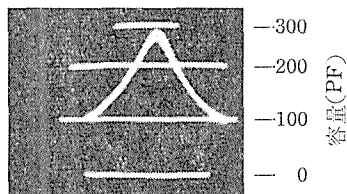
第 7 図

ために水平軸用電圧の位相におくれを生じ調整不能となるゆえ注意を要する。信号電圧用出力変圧器からの誘導は10kc位より著しくなり図形を乱すゆえ充分遮蔽を行う必要がある。なお使用せるブラウン管オシロスコープの直流増巾器は入力0.5ボルト以上

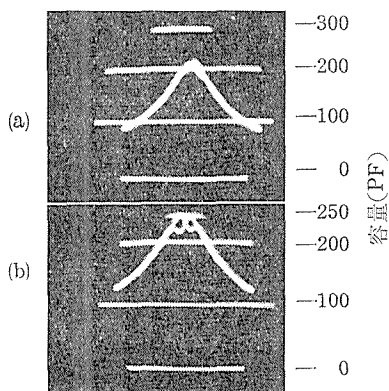
ならば完全な直線性を示した。

#### (4) 測定結果

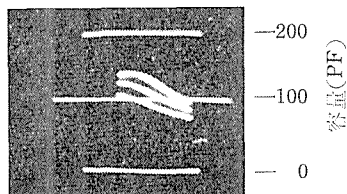
第2図の回路による電圧容量特性の観測結果を示す。第8図はキュリー点 $27^{\circ}\text{C}$ の(Ba—Sr)  $\text{TiO}_3$ 試料を $20^{\circ}\text{C}$ にて $500\text{ c/s}$ の信号電圧 $300\text{ V}$ (実効値)を加えた際のオシログラムである。目盛線は標準コンデンサーに切換えて挿入したが $200\mu\text{f}$ 以上では直線性が失われているのが目立っている。中央で山が一致しておらないのは、電界の向きによつて分極変化に非対称性がある事を示しており、(Ba—Sr)  $\text{TiO}$ と $\text{PbZrO}_3$ の固容体試料ではよく一致している。動作温度はほとんどキュリー点と思われる。第9図(a)は第8図の試料を $10^{\circ}\text{C}$ で同一条件の下に観測した結果である。上述の非対称性とヒステレンスループのプロペラ型の効果が重なっている。プロペラ効果の顕著な例を第



第 8 図 (試料厚さ $0.35\text{mm}$ )



第 9 図



第 10 図

9 図(b)に示す。第10図は同系統の試料で直流偏倚電圧をそれぞれ50, 100, 150ボルトにして 500 c/s 50 ボルトの信号電圧を加えた際の容量変化の比較を示している。その他本装置により印加電圧による試料の中心容量の変動, すなわち温度上昇等の程度および短時間における枯化現象<sup>(3)</sup>を量的に取扱う事ができる。

### (5) 結 言

強誘電体容量の非直線特性を交流電界印加状態で直視せしめる装置を考案し, 電圧容量曲線の一部の観測では回路定数の選定により, 中心容量付近の直線性よりのはずれを中心容量の0.5%以下になし得ること, 曲線全体の観測では 300PF にて直線目盛よりのはずれを10%以下に抑え得る事を示した。後者の場合標準コンデンサーで適宜目盛線を挿入すればはるかに正確な測定が可能である。なお本装置による観測結果の二, 三を示して物性的な説明を与えた。終りにのぞみ終始御指導を載いた東京工大教授齊藤幸男先生, 試料を提供された同学山中俊一氏に深甚なる謝意を表する次第である。

### 参 考 文 献

- (1) 熊谷, 藤本; 電学誌77, 1596 (昭32)
- (2) 土屋; 特許出願番号 26326号
- (3) 土屋; 信大工学部紀要 7, 179 (昭32)

### Summary

## On Apparatus Indicating Directly Nonlinear Dielectric Characteristics

Hidetoshi TSUCHIYA

(Department of Communication Engineering, Faculty of Engineering)

This report is on an apparatus which indicates directly, in curve of dielectric constant vs field strength, the nonlinear dielectric characters of the ferroelectric materials under the supply of alternating fields with oscilloscope.

As the results of observations, a dynamic characteristic curve of the dielectric's capacitance vs electric field has been decided for the design of dielectetric amplifier.

The relations between propeller types of hysteresis loops and short time aging effects has been examined.

The characteristic curve for the single crystal and ceramic films which are unstable for d. c. bias strength has been decided in various frequencies.

The dielectric constant gained by this apparatus satisfactorily agrees with that measured with Q meter.



# 正 誤 表

頁	図	誤	正
32	18	文字脱落	縦軸は電熱器出力(W)を表わす
72	5	図の歪み	