

## 論 文

## セラミックコンデンサの高電圧特性

赤上 陽出男\*, 斎藤 宏\*, 佐藤 正志\*, 佐藤 安弘\*  
(1989年9月27日受理)

## High Voltage Characteristics of Ceramic Condenser

H. AKAGAMI,\* H. SAITO,\* M. SATO\* and Y. SATO\*

(Received September 27, 1989)

Breakdown voltages ( $V_b$ ) of high-voltage ceramic condensers with various specific inductive capacity ( $\epsilon$ ) were measured under dc, ac and impulse voltage application. As the results, for a given value of  $\epsilon$ , the  $V_b$  value for dc is the same as that for impulse, being about 1.9 times higher than ac RMS value. The results also show that  $V_b$  varies with  $\epsilon_b$  to the  $-1/3$  power, where  $\epsilon_b$  is the value of  $\epsilon$  just before breakdown. In the paper, the  $V_b-\epsilon_b$  characteristic is elucidated according to the idea of equivalent parallel resistance. Additionally, the time variation of the current flowing through the condensers ( $I-t$  characteristic) was measured by applying a step-functional dc voltage at a fixed time constant. From the  $I-t$  characteristics, the voltage across the condenser corresponding to the time that the current starts to separate from a theoretical exponential  $I-t$  curve was obtained. The paper shows that the separating voltage on the dc  $I-t$  characteristic enables to estimate the saturation voltage of the dielectric flux density ( $D$ ) on  $D-E$  hysteresis curve as an important ac characteristic for ferroelectric materials.

## 1. まえがき

$\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$  系のセラミックコンデンサは、絶縁耐力が高く、比誘電率  $\epsilon_s$  が大きいので高電圧コンデンサとして小形化ができる。また化学的に安定で、安価に大量生産が可能であり、高電圧機器の関連部品として多く用されている。これに伴って、コンデンサの信頼性の向上が要求され、その絶縁破壊機構の解明が重要な課題になっている。

前報<sup>1-3)</sup>では、モールド絶縁を行っていない（モールド無）ディスク形のセラミックコンデンサの交流破壊電圧  $V_b$  を、電圧上昇法により絶縁油中で測定した。その結果、破壊電圧  $V_b$  は  $\epsilon_s$  のほぼ  $-0.3$  乗に比例して約 4000 近くで極小となり、 $\epsilon_s$  がさらに大きくなると逆に上昇する現象を見いだした。

本研究の内容は主として、次の三つに分けることができる。第1に直流破壊電圧と衝撃破壊電圧<sup>4)</sup>とについて実験的な検討を行った。両者の破壊電圧  $V_b$  はほぼ等しく、その値は交流破壊電圧  $V_b$  の実効値の約 1.9 倍と高

くなる。また直流および衝撃電圧による  $V_b$  は  $\epsilon_s$  の  $-1/3$  乗に比例して低下し、モールド無の交流電圧の場合と同様に、 $\epsilon_s$  が 4000 近くで極小値を持つV字形の  $\epsilon_s$  依存性を示すことが分かった。

次いで、モールド絶縁を行った（モールド有）コンデンサの  $V_b$  について電圧上昇法により交流電圧<sup>5)</sup>で実験を行った。その結果モールド無の場合とは異なって、 $\epsilon_s$  が 4000 より大きくなても  $V_b$  は V 字形を示さないで、一方的に低下することを確認した。

$V_b$  の  $\epsilon_s$  依存性を解明する手段として、交流高電圧によるコンデンサの静電容量  $C$  と等価並列抵抗  $R$  を測定した。その結果、次のことが明らかとなった。すなわち、一般には  $C$  は電界強度  $E$  の上昇とともに小さくなる。したがって、低い電圧で測定する比誘電率  $\epsilon_s$  と破壊電圧  $V_b$  の近傍で得られる比誘電率  $\epsilon_b$  とは異なった値になる。このため、 $V_b-\epsilon_s$  特性よりも  $V_b-\epsilon_b$  特性の方が破壊現象をよく表わしている。また、 $R$  は電界強度  $E$  にあまり依存しないが、 $V_b$  の近傍の等価並列抵抗  $R_b$  は、 $\epsilon_b$  の増大にほぼ逆比例して小さくなる。この現象は主として粒界で生ずるものとみて、 $V_b$  がほぼ  $\epsilon_b$  の  $-1/3$  乗に比例して低下する現象を説明した。

また、一定の時定数 (50  $\mu\text{s}$ ) になるような  $C$  と  $r$  の直列回路に直流高電圧を突印<sup>4,6)</sup>し、コンデンサに流れる

キーワード：セラミック、コンデンサ、破壊電圧、熱破壊

\* 秋田大学鉱山学部電気工学科 (010 秋田市手形学園町 1-1)  
Department of Electrical Engineering, Mining  
College, Akita University, 1-1, Tegata Gakuen-  
chou, Akita, 010 Japan

表1 各種供試コンデンサ  
Table 1 Ceramic condenser samples.

Specimen	Relative dielectric constant		Particle size ( $\mu\text{m}$ )	Principal ingredients
	$\epsilon_s$	$\epsilon_b$		
A	53	53	2.65	$1.3\text{MgO} \cdot \text{TiO}_2 \text{CaTiO}_3 \text{SiO}_2$
B	100	97	3.90	$\text{CaTiO}_3 \text{MgTiO}_3 \text{La}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{TiO}_2$
C	240	240	0.90	$\text{CaTiO}_3 \text{SrTiO}_3 \text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{TiO}_2$
D	380	420	1.50	$\text{BaTiO}_3 \text{SrTiO}_3 \text{La}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{TiO}_2$
E	650		0.92	$\text{BaTiO}_3 \text{SrTiO}_3 \text{La}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{TiO}_2 \text{MnCO}_3$
F	1250	1040	1.17	$\text{SrTiO}_3 (\text{CoO} \text{含}) \text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{TiO}_2 \text{MgCO}_3$
G	1650	1440	1.22	$\text{SrTiO}_3 \text{BaTiO}_3 \text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{TiO}_2$
H	3500	2800	1.71	$\text{CaTiO}_3 \text{MgTiO}_3 \text{SrTiO}_3 \text{PbTiO}_3 \text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{TiO}_2$
I	4000		1.14	$\text{SrTiO}_3 \text{CaTiO}_3 \text{PbTiO}_3 \text{MnCO}_3 \text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{TiO}_2$
J	6000	3600	1.69	$\text{BaTiO}_3 \text{BaZrO}_3 \text{CaTiO}_3 \text{MgTiO}_3 \text{MnCO}_3$
K	10000	4400	3.25	$\text{BaTiO}_3 \text{BaZrO}_3 \text{SrTiO}_3 \text{CaTiO}_3 \text{MgCO}_3 \text{Sb}_2\text{O}_3 \text{MnCO}_3$

電流の経時変化、すなわち  $I-t$  特性<sup>4)</sup> を求めた。この  $I-t$  特性と交流電圧による  $D-E$  特性<sup>7)</sup> について比較検討を行った。その結果、 $I-t$  特性からセラミックコンデンサにとって重要な  $D-E$  特性の  $D$  の飽和し始める電圧が推測できることが分かった。

## 2. 直流、衝撃破壊電圧 $V_b$ と比誘電率 $\epsilon_s$ <sup>4)</sup>

### 2.1 実験方法

供試コンデンサの主成分などを表1に示した。その直径  $D$  は 10 mm、厚さ  $T$  は 3 mm、またギャップ長  $G$  はそれぞれ 0.5 mm と 1.0 mm の 2 種類を使用した。ギャップ長  $G$  とは、図1に示すように素体と電極（素体の両面に同心円上に銀を焼付け）との半径の差を称している。図1の(a)は素体のままの裸のコンデンサであり、(b)は厚さ約 3 mm のエポキシ系の樹脂で、モールド絶縁を行っている。前者をモールド無、後者をモールド有と呼ぶことにする。コンデンサは耐圧試験用のセル内の絶縁油中に、直径 12.5 mm の球電極で保持し、その周辺からのコロナ放電の発生を防止している。直流試験電圧の上昇率は、交流電圧の場合と同様に 2.5 kV/s であり、衝撃電圧は標準波形である。印加電圧を分圧しオシログラフで破壊電圧  $V_b$  を測定した。

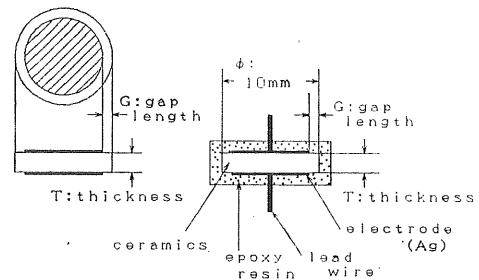
前報<sup>3)</sup>で得られたセラミックコンデンサの交流破壊電圧  $V_b$  の実験式は、限界ギャップ長  $G_c$  より  $G$  が小さいか大きいかで、次のように二つに分けて表わされる。

$$G < G_c$$

$$V_b = 74.0 \epsilon_s^{-0.3} (G/0.12)^{-0.36} T^{0.91} (\text{kV}) \quad (1)$$

$$G > G_c$$

$$V_b = 74.0 \epsilon_s^{-0.3} (G_c/0.12)^{-0.36} T^{0.91} (\text{kV}) \quad (2)$$



(a) Specimen without epoxy resin    (b) Specimen with epoxy resin

図1 試料の形状

Fig. 1 Configuration of the specimen.

ただし、 $G$ 、 $G_c$  および  $T$  の単位は mm であり、 $\epsilon_s$  は低い電圧で測定した比誘電率である。 $G$  が  $G_c$  より大きくなると  $V_b$  は  $G$  に関係なく、ほぼ一定の最低値となる。なお、限界ギャップ長は、 $G_c=0.3 T$  で表わされ、厚さ  $T$  が大きくなるに伴って大きくなる。

### 2.2 実験結果

直流 (●印) および衝撃電圧 (○印) による破壊電圧  $V_b$  と比誘電率  $\epsilon_s$  との関係を図2に示した。これは厚さ  $T$  が 3 mm、ギャップ長  $G$  が 0.5 mm の場合の結果である。図2の  $V_b$  のほかに、 $T$  と  $G$  とが異なる同種のコンデンサの  $V_b$  を、 $G$  と  $T$  に関する(1)と(2)式に準じて、図2の条件に換算した。その結果、これらの平均値は直流電圧と衝撃電圧との間にほとんど差がなく、この両者の破壊電圧  $V_b$  はほぼ等しいことが分かった。図中にモールド無の交流電圧 (実効値) による  $V_b$  の実測値を△印で、この破壊特性を表わす(1)式による計算値を

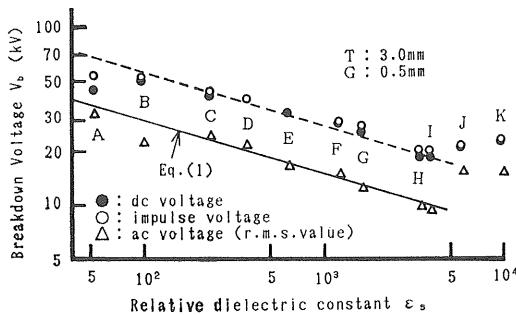
図2 直流および衝撃破壊電圧  $V_b$  と比誘電率  $\epsilon_s$  との関係

Fig. 2 Relation between dc, impulse breakdown voltage  $V_b$  and relative dielectric constant  $\epsilon_s$ .

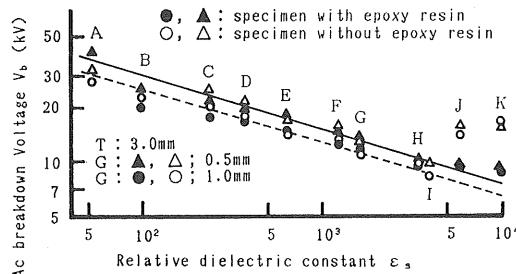
図3 交流破壊電圧  $V_b$  と比誘電率  $\epsilon_s$  との関係

Fig. 3 Relation between ac breakdown voltage  $V_b$  and relative dielectric constant  $\epsilon_s$ .

実線で示した。直流および衝撃電圧による破壊電圧  $V_b$  は交流電圧による  $V_b$  の実効値のほぼ 1.9 倍と高い。またこの両者の  $V_b$  はほぼ  $\epsilon_s$  の  $-0.3$  乗に比例して、 $\epsilon_s$  が約 4000 で V 字形を示すモールド無の交流電圧の場合と同様な  $\epsilon_s$  依存性を示している。

直流および衝撃電圧では電圧の交番がないので、コンデンサの損失は交流電圧より著しく小さい。これが両者の破壊電圧がほぼ等しく、交流電圧による破壊電圧に比べて著しく高くなる原因と考えられる。

### 3. 交流破壊電圧特性

#### 3.1 モールド有の $V_b$ と比誘電率 $\epsilon_s$ <sup>5)</sup>

モールド有の厚さ  $T$  が 3 mm, ギャップ長  $G$  がそれぞれ 0.5 mm および 1.0 mm のコンデンサの  $V_b$ - $\epsilon_s$  特性を図 3 に●印および▲印で示した。これは電圧上昇率が 2.5 kV/s における結果である。図中の実線は前述の実験式を表わしたもので、 $G$  が 0.5 mm の場合は  $G < G_c$  で(1)式、 $G$  が 1.0 mm の場合は  $G > G_c$  で(2)式より求めている。なお、この試料の  $G_c$  ( $\approx 0.3 T$ ) は約 0.9 mm である。同図中には参考のためモールド無の特性を○、△印で示してある。

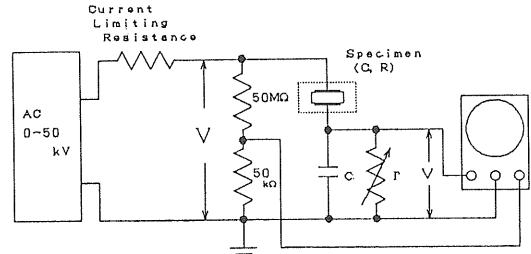


図4 D-E 特性測定回路

Fig. 4 Experimental circuit for measurement of D-E characteristics.

$\epsilon_s$  が約 4000 より小さい範囲では、モールドの有無による  $V_b$  の値の変化が認めがたい。しかし、モールド無(○、△印)の場合は  $\epsilon_s$  が約 4000 で V 字形の  $V_b$  特性を示しているが、モールド有(●、▲印)の場合は  $\epsilon_s$  の増大に伴って  $V_b$  が一方的に低くなっている。

#### 3.2 等価並列抵抗 $R$ <sup>5)</sup>

##### 3.2.1 実験方法

交流電圧によるセラミックコンデンサは漏れ抵抗や誘電損、さらに印加電圧  $V$  が高くなると、ボイド放電<sup>5)</sup>あるいは D-E 特性のヒステリシス等によって損失が生ずる。コンデンサの等価回路としては、これらの損失を含んだ抵抗  $R$  が静電容量  $C$  に並列に入っているものとみなされる。ここではこの  $R$  を等価並列抵抗  $R$  と呼ぶことにする。図 4 に示した回路は、D-E 特性を測定する回路である。いま、図 4 の回路で印加電圧  $V$  と  $v$  とが測定できるように、オシログラフを時間軸で掃印し、2 現象として両者のオシログラムをとる。 $v$  は並列に結んだ無誘導の可変抵抗  $r$  と無損失の静電容量  $c$  のコンデンサの両端の電圧である。可変抵抗  $r$  も  $c$  の静電容量も既知であって、 $c$  は  $C$  に比べて十分に大きい容量である。この  $r$  を調整して、この両端の電圧  $v$  と印加電圧  $V$  との位相を一致させると、次式が成り立つ。

$$CV = cv \quad (3)$$

$$Vr = vrR \quad (4)$$

この 2 式より、その印加電圧  $V$  における  $C$  および  $R$  が決定できる。

##### 3.2.2 比誘電率 $\epsilon_E$ と電界強度 $E$

各電界強度  $E$  での比誘電率を  $\epsilon_E$  とする。図 5 に、低い電圧で測定した  $\epsilon_s$  をパラメータとし、誘電率を  $\epsilon_E/\epsilon_s$  の形で電界強度  $E$  に対して示した。なお、 $\epsilon_E/\epsilon_s$  は、上述の電界  $E$  の下で測定した静電容量  $C$  と低い電圧で測定した  $C_0$  との比  $C/C_0$  で評価した。 $\epsilon_s$  の小さいコンデンサ(A～C材)は、 $E$  による  $\epsilon_E$  の低減効果があまり現われず、 $\epsilon_E/\epsilon_s$  の値はほぼ 1 である。 $\epsilon_s$  が 3500 より大きいコンデンサの  $\epsilon_E/\epsilon_s$  は小さくなり、特に  $\epsilon_s$  が

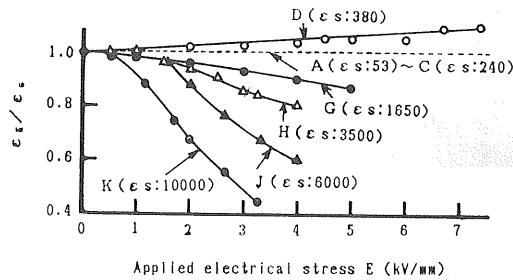


図5 静電容量と電界強度との関係

Fig. 5 Relation between capacitance and applied electrical stress.

6000より大きいJ, K材においては $\epsilon_E$ の低減効果が非常に大きい。例えば、K材においては $V_b$ 近傍で $\epsilon_E/\epsilon_s$ は約0.44となっている。ただし、 $\epsilon_s$ が380のD材のみは $E$ の増大と共に $\epsilon_E/\epsilon_s$ の値が大きくなっている。

この試験での交流破壊電圧 $V_b$ （波高値）は、図2および図3の $V_b$ （実効値）よりかなり低い値になっている。前述の破壊電圧試験は電圧上昇法で行っている。これに対し、この試験はコンデンサが破壊するまで長時間課電している。このため破壊近傍のコンデンサの温度はかなり上昇しているものとみられる。 $E$ による $\epsilon_E$ の変化が、温度上昇によるものか電界強度 $E$ の増大によるものか不明である。しかし、交流電圧によるD-E特性曲線の飽和現象からみて、主として $E$ の増大によるものとみられる。図5の $V_b$ 近傍における比誘電率 $\epsilon_E$ を $\epsilon_b$ として表1の $\epsilon_s$ に並べて示した。電圧上昇法による場合のように破壊電圧が高くなれば、図5の $E$ の値より電界が大きくなるので、コンデンサの $\epsilon_b$ はさらに小さくなるものと考えられる。

### 3.2.3 等価並列抵抗 $R$ と電界強度 $E$

図6にモールド有の各種コンデンサの $R$ の電界強度 $E$ （ $V/T$ 波高値）依存性を示した。なお、図6のパラメータは図5で得られた比誘電率 $\epsilon_b$ である。このコンデンサの $T$ は3.0mm,  $G$ は0.5mmである。電界強度の高い測点のコンデンサの温度は、かなり上昇しているものと考えられる。しかし、 $\epsilon_b$ の大きいJ材の3600とK材の4400の両者を除くと、 $R$ の $E$ 依存性はあまり顕著に現われていない。 $\epsilon_b$ の大きいJ材とK材の両コンデンサは、 $E$ の増大に伴って等価並列抵抗 $R$ が逆に増大し、その $E$ に対する増大率も大きい。

図6に示す $R$ の $E$ 依存性は次のように考えられる。誘電損などによる抵抗分は後述するように電界強度 $E$ の下での比誘電率 $\epsilon_E$ に逆比例するものと考えられる。したがって、 $R$ の $E$ 依存性は $\epsilon_E$ の $E$ 依存性に関係する。図5に示したようにA～C材の $\epsilon_E$ はほとんど電界 $E$ に依

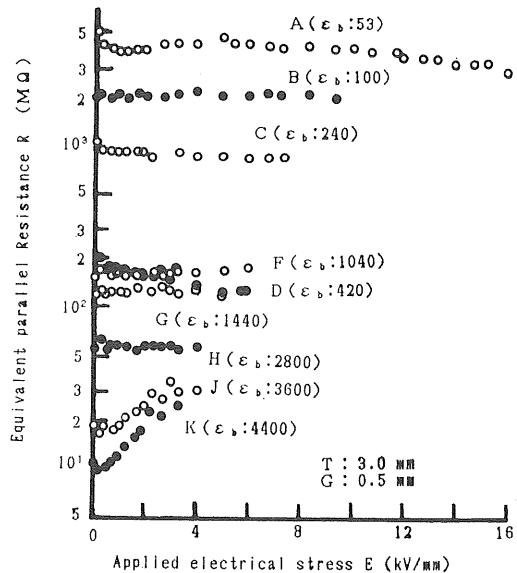
図6 等価並列抵抗 $R$ と電界強度 $E$ との関係

Fig. 6 Relation between equivalent parallel resistance  $R$  and applied electrical stress  $E$ .

存しない。E～H材は、電界の増大に伴い $\epsilon_E$ が幾分低下するが、せいぜい20%程度の低下である。したがって、A～H材においては等価並列抵抗 $R$ は $E$ にほとんど依存せず、ほぼ一定値となる。これに対して、J材、K材の場合は、図5に示したように、 $E$ が増大するに伴い $\epsilon_E$ は相当に低下する。そのため、この材料においては $E$ の増大に伴って $R$ も増大する傾向を示す。

### 3.2.4 等価並列抵抗 $R_b$ と比誘電率 $\epsilon_b$

コンデンサの $V_b$ 近傍の等価並列抵抗を $R_b$ とし、図6より得られる $R_b$ と比誘電率 $\epsilon_b$ との関係を図7に示した。なお、同図にはモールド無の場合と有の場合の両者を示したが、 $R_b$ はモールドの有無にあまり関係していない。 $R_b$ はD材、J材およびK材を除けば、 $\epsilon_b$ にはほぼ逆比例している。この関係は(5)式で表わされる。

$$R_b = 1.9 \times 10^5 \epsilon_b^{-1} \quad (\text{M}\Omega) \quad (5)$$

図8に図4の回路で測定した各種コンデンサ（F, H, J, K材）の $V_b$ 近傍の交流電圧によるD-Eのオシログラムを示した。(a)図のF材においてD-E特性はほぼ直線になっている。それに対し、(b), (c), (d)図のH, J, Kの3種類のコンデンサの交流電圧によるD-E特性曲線には飽和現象が現われている。しかも、J材とK材の両コンデンサは(c), (d)図のように、D-E特性にヒステリシス現象が大きく現われている。すなわち、この両コンデンサの $R$ にはヒステリシス損による抵抗分が並列に入っていることになる。そのため、等価並列抵抗 $R$ が図7の実線より小さな値を示すことになる。すなわ

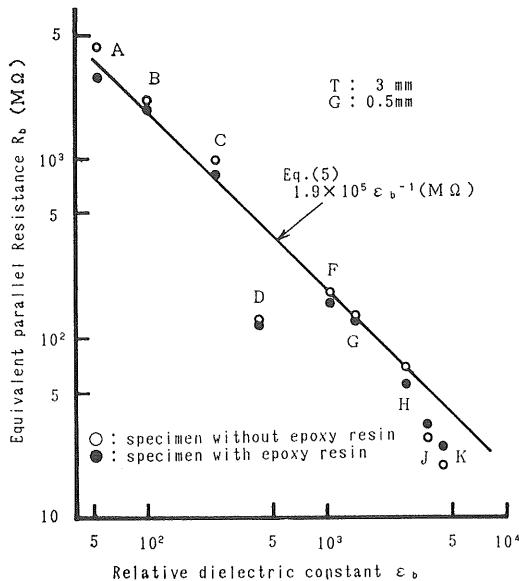


図7 各種コンデンサの等価並列抵抗  $R_b$  と比誘電率  $\epsilon_b$  の関係

Fig. 7 Relation between equivalent parallel resistance  $R_b$  and relative dielectric constant  $\epsilon_b$  of specimens.

ち、このJ, K両試料のRからヒステリシス損に対応する抵抗分を除くと、 $R_b$  は図7の(5)式の実線にかなり近づくことになろう。

### 3.3 交流破壊電圧 $V_b$ に関する検討

破壊近傍の等価並列抵抗  $R_b$  は  $\epsilon_b$  の増大にはほぼ逆比例して小さくなる。この点に着目して以下のような検討を行った。

いま、コンデンサのRは電圧の上昇過程でやや変化する試料もあるが、これを一定の  $R_b$  であるとし、電圧上昇率を  $k$  (V/s)、破壊までの時間を  $t$  (s) とすると、コンデンサへの注入電力量Wは、次のようになる。

$$W = \int_0^t (V^2/R_b) dt = \int_0^t \{(kt)^2/R_b\} dt \\ = V_b^3/3 k R_b \quad (J) \quad (6)$$

各コンデンサの形状が同一であるので、放熱損失を無視した場合の温度上昇は、注入電力量Wに比例する。いま、一定の温度上昇のもとでセラミックコンデンサが破壊するものとすると、

$$V_b = (3kWR_b)^{1/3} \quad (V) \quad (7)$$

となり、コンデンサの破壊電圧は、 $R_b$  の  $1/3$  乗に比例することになる。また、 $R_b$  は  $\epsilon_b$  に逆比例するので、

$$V_b \propto (3kW/\epsilon_b)^{1/3} \quad (V) \quad (8)$$

となって、破壊電圧に関する実験式の  $-0.3$  乗にほぼ一致することになる。

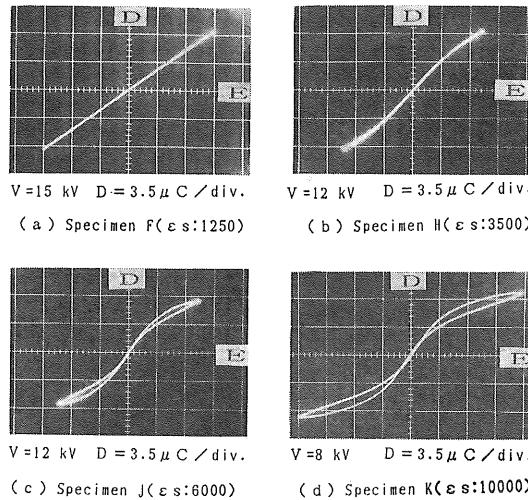


図8 各種コンデンサのD-E特性

Fig. 8 D-E characteristics of specimens.

いま、厚さ  $T$  を  $3$  mm、ギャップ長  $G$  を  $0.5$  mm として、各コンデンサの破壊に至るまでの注入電力量  $W$  を計算した。その結果、 $W$  はコンデンサの  $\epsilon_b$  が  $53$  のA材では  $2.27$  J、 $420$  のD材では  $7.04$  J、 $4400$  のK材では  $3.29$  J となる。このコンデンサの熱容量は、比重を  $5.5$  g/cm<sup>3</sup>、比熱を  $1$  J/g·K とすると、約  $1.3$  J/K である。したがって、温度上昇の最も大きいD材で、熱損失を無視しても約  $5.4^\circ\text{C}$  程度の温度上昇にすぎない。

セラミックコンデンサは結晶粒と粒界から構成されていると考えれば、コンデンサの最も弱点とされる部分は不純物やボイド等の多い粒界である。コンデンサは熱伝導率が小さく、粒界の占める容積は、コンデンサ全体の容積に比べると微々たるものである。上述の考察は等価並列抵抗  $R$  をコンデンサ全体に平均的に生ずるものとして行った。しかし、この  $R$  が主に粒界で生ずるとすると、粒界の温度上昇によって、セラミックコンデンサが破壊することは十分に考えられる。すなわち、粒界が一定の温度に達するとコンデンサは破壊すると考えれば、 $V_b$  は  $\epsilon_b$  の  $-1/3$  乗に比例する現象を説明することができる。

図9に図3のモールド有の交流破壊電圧  $V_b$  を破壊近傍の比誘電率  $\epsilon_b$  (図5の定電圧法で求めた値) に対して示した。図中の実線は  $G$  が  $0.5$  mm の場合で(1)式に、また破線は  $G$  が  $1.0$  mm の場合で(2)式に、 $\epsilon_s$  の代わりに  $\epsilon_b$  を入れて計算した結果である。いずれの  $V_b$  も  $\epsilon_b$  の  $-1/3$  乗にほぼ比例していることが分かる。

なお、 $\epsilon_b$  が  $\epsilon_s$  より大きく、 $R_b$  が図7の実線から外れてかなり小さいD材も、 $V_b$ - $\epsilon_b$  特性の実測値が実験式の値にほぼ一致している。すなわち、電圧上昇法による

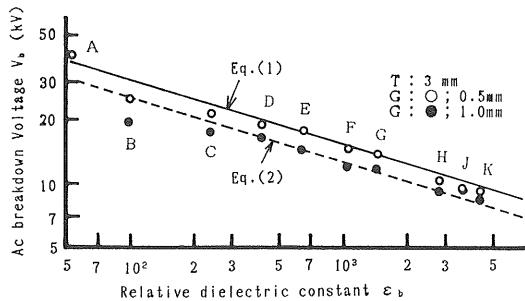
図9 モールド有のコンデンサの交流  $V_b$  と  $\epsilon_b$  との関係

Fig. 9 Relation between ac breakdown voltage  $V_b$  and relative dielectric constant  $\epsilon_b$  of specimen with epoxy resin.

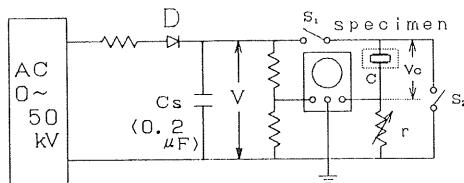
図10  $I-t$  特性測定回路

Fig. 10 Experimental circuit for measurement of  $I-t$  characteristics.

セラミックコンデンサの破壊は結晶粒界の熱破壊の先行によるものと考えられる。

以上のように、セラミックコンデンサは  $R_b$  による損失が起因となって熱破壊する。このため破壊電圧  $V_b$  は  $\epsilon_b$  の  $-1/3$  乗に比例する。しかし、コンデンサの静電容量は比誘電率に比例する。したがって、絶縁破壊電圧および静電容量を一定とすれば、コンデンサの体積は  $\epsilon_b$  の  $-1/3$  乗に比例し、 $\epsilon_b$  の大きい材料を開発することによりコンデンサを小型化できる。このような観点から、 $\epsilon_b$  が大きく、D-E 特性が飽和しない  $\epsilon_b$  の大きい材質のセラミックコンデンサを開発することが望まれる。

#### 4. セラミックコンデンサの強誘電特性<sup>4,6)</sup>

##### 4.1 電流 $I$ -時間 $t$ 特性

セラミックコンデンサの直流破壊電圧は、交流破壊電圧より著しく高い。したがって、直流電圧でコンデンサを使用する場合には交流電圧では測定し得ない高い電圧での特性が必要になることがある。ここではこの直流高電圧の特性を検討する一例として、コンデンサに直流高電圧を突印し、電流  $I$  の経時変化、すなわち、 $I-t$  特性について実験を行った。

セラミックコンデンサ  $C$  に直列に無誘導の可変抵抗  $r$  を接続し、その時定数が一定になるように  $r$  を調節し、これに直流高電圧を突印する。この実験回路を図 10 に

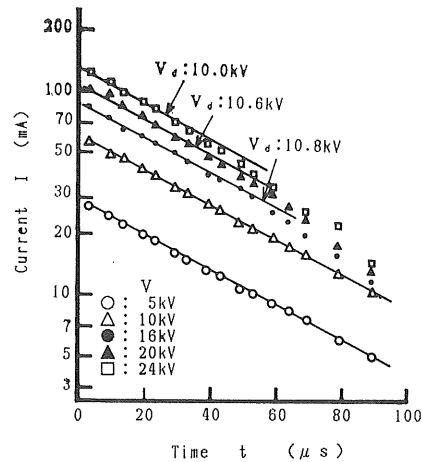
図11 コンデンサ G ( $\epsilon_b=1440$ ) の  $I-t$  特性

Fig. 11  $I-t$  characteristics of specimen G ( $\epsilon_b=1440$ ).

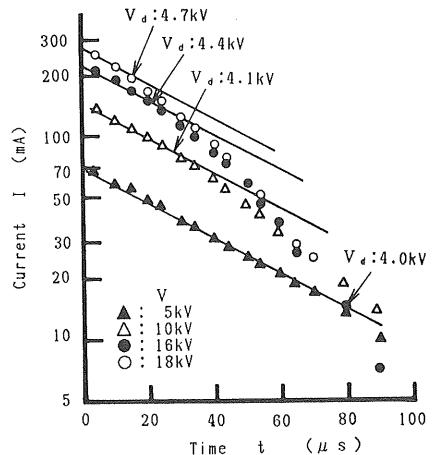
図12 コンデンサ H ( $\epsilon_b=2800$ ) の  $I-t$  特性

Fig. 12  $I-t$  characteristics of specimen H ( $\epsilon_b=2800$ ).

示した。本実験においては、この時定数を  $50 \mu s$  に選んだ。供試コンデンサの静電容量よりも 200 倍以上大きい容量のコンデンサ  $C_s$  に充電した直流高電圧を電源とした。オシログラフで流入電流  $I$  の経時変化を、種々の印加電源電圧  $V$  について測定した。この実験において電源電圧  $V$  は直列に接続された抵抗  $r$  と試料  $C$  の両端に印加している。したがって、コンデンサ  $C$  に加わる電圧  $V_c$  は時間経過と共に指数関数的に上昇する。

図 11 および図 12 に G 材および H 材のコンデンサについての  $I-t$  特性を、それぞれ半対数目盛りのグラフに示した。図中の実線は  $50 \mu s$  の時定数に対応する電流変化の計算直線である。図 11 の G 材において印加電源電圧  $V$  が  $5 \text{ kV}$ ,  $10 \text{ kV}$  の場合は、計算値と実測値とは一致

表 2  $E_d$  と  $E_s$  との比較Table 2 Comparison between  $E_d$  and  $E_s$ 

Specimen $V$ (kV)	F $\epsilon_s : 1250$	G $\epsilon_s : 1650$	H $\epsilon_s : 3500$	J $\epsilon_s : 6000$	K $\epsilon_s : 10000$
5.0	—	—	1.33	0.99	0.71
10.0	—	—	1.37	0.83	0.81
16.0	—	3.60	1.31	0.70	0.70
18.0	4.90	—	1.53	—	—
20.0	5.36	3.53	B.D.	—	—
24.0	B.D.	3.33	—	B.D.	B.D.
$E_d$ (Mean value)	5.10	3.57	1.39	0.84	0.74
$E_s$	—	3.30	1.33	0.83	0.53

している。しかし、 $V$ が 16 kV より高くなると、 $I$  がこの計算直線より外れて小さくなり始める時間  $t_s$  がある。図中にこの時間  $t_s$  近くを矢印で示し、またこの時点にコンデンサに加わっている電圧  $V_d$  を付記した。図 12 の H 材においては電圧  $V$  が 5 kV 以上のすべての場合で上述の時間  $t_s$  がある。同図中にも図 11 と同様に  $t_s$  に対応する時間を矢印で示し、コンデンサの電圧  $V_d$  を付記した。この電圧  $V_d$  を厚さ  $T$  で除して、 $I$  の減少開始電界強度  $E_d$  (kV/mm) と称した。各種コンデンサについて、各印加電源電圧  $V$  のもとで得られた  $E_d$  とその平均値を表 2 に示した。

#### 4.2 D-E 特性と $I-t$ 特性との比較

各種コンデンサの交流電圧による D-E 特性を示した図 8 から、D-E 特性の  $D$  が飽和し始める電界強度  $E_s$  を求める。(a)図の F 材では破壊電圧(波高値)は 18 kV であり、これに 15 kV を印加したが飽和開始点が確認できていない。しかし  $I-t$  曲線からは  $E_d$  は 5.10 kV/mm となり、 $T=3$  mm の F 材の  $V_d$  としては 15.3 kV 以上となれば、飽和特性のあることが認められる。(b)図の H 材では  $E_s$  が 1.33 kV/mm、(c)図の J 材では 0.83 kV/mm および(d)図の K 材では 0.53 kV/mm となる。これらの電界強度  $E_s$  を  $E_d$  と比較して表 2 に並べて示した。表 2 からみて、 $E_s$  と  $E_d$  とはほぼ一致している。なお、K 材のように  $E_d$  の低いコンデンサには、印加電源電圧  $V$  をさらに低くして測定する必要がある。

以上のように、セラミックコンデンサの重要な特性とされている、D-E 特性の  $D$  の飽和し始める電界強度を、直流高電圧突印法で推測することができる。また直流破壊電圧が交流破壊電圧の実効値の約 1.9 倍と高いため、本法は、交流の D-E 特性が測定できないほどの直流高電圧印加時に必要となる特性検査の一手法とすることができる。

#### 5. まとめ

本研究は、近年多用されている高電圧セラミックコンデンサの信頼性の向上を目的に、種々の面から実験的な検討を行ったものである。特に、「電圧上昇法で測定した場合のセラミックコンデンサの破壊電圧が比誘電率の  $-1/3$  乗に比例する」という実験結果は熱破壊という観点から説明できることを示した。本研究の概要を摘記すると、次のようになる。

(1) コンデンサの比誘電率  $\epsilon_E$  は電界強度  $E$  の増大に伴って、一般には小さくなる。特に、 $\epsilon_s$  の大きなコンデンサにおいては  $\epsilon_E$  の低減効果が大きい。したがって、低い電圧で測定する比誘電率  $\epsilon_s$  と破壊電圧  $V_b$  の近傍で得られる比誘電率  $\epsilon_b$  とは異なる。

(2) 直流(電圧上昇法)と衝撃(標準波形)電圧による破壊電圧  $V_b$  はほぼ等しく、その値は交流(電圧上昇法)による  $V_b$  の実効値の約 1.9 倍と高い。しかも両破壊電圧  $V_b$  はともにモールド絶縁無の交流の  $V_b$  と同様に、 $\epsilon_s$  の  $-0.3$  乗に比例し、V 字形の  $\epsilon_s$  依存性を示す。

(3) これに対して、モールド絶縁有のコンデンサの交流破壊電圧  $V_b$  は V 字形とはならないで、 $\epsilon_s$  ではなく  $\epsilon_b$  に対して  $-1/3$  乗にほぼ比例し、 $\epsilon_b$  の増大に伴って一方的に低下する。

(4) 等価並列抵抗  $R$  は、一般に印加電界強度  $E$  によって、あまり変化しない。しかし  $\epsilon_s$  の大きいコンデンサでは、 $E$  の増大に伴って  $R$  が大きくなる。これは、抵抗  $R$  が  $\epsilon_s$  に逆比例し、 $\epsilon_s$  が  $E$  の増大に伴って低減するからである。

(5) 破壊電圧  $V_b$  の近傍で得られる等価並列抵抗  $R_b$  と比誘電率  $\epsilon_b$  との関係はほぼ逆比例である。コンデンサの  $R_b$  が主として粒界の損失によるもので、一定の温度上昇で粒界が破壊するものと仮定すると、 $V_b$  が  $\epsilon_b$  の  $-1/3$  乗に比例する現象を説明することができる。した

がって、破壊電圧を考慮した上で、コンデンサを小形化するには  $D-E$  特性に飽和現象のない  $\epsilon_b$  の大きい材質の開発が重要である。

(6) 時定数が一定の直流高電圧を突印し、その  $I-t$  特性より、 $D-E$  特性の  $D$  の飽和開始電圧の検証ができる。交流の  $V_b$  より直流  $V_b$  が高いので、本方法はセラミックコンデンサを交流  $V_b$  より高い直流電圧で使用する場合の直流高電圧特性の一検証法とすることができよう。

終わりに当たって、試料を提供された TDK セラミック事業部の真崎隆郎、齊藤一志、古川喜代志、岩谷昭一氏のほか関係の方々ならびに実験に協力された大学院修了生の塙本一彦、赤塙雅一君に深謝する。

## 参考文献

- 1) 赤上陽出男、佐藤正志、佐藤安弘、塙本一彦：昭58年電気関係学会東北支部連大、No. 2H17 (1983)
- 2) 赤上陽出男、加賀昭夫、佐藤正志、佐藤 司：昭61年電気関係学会東北支部連大、No. 2F1 (1986)
- 3) 赤上陽出男、齊藤 宏、佐藤正志：電学論 A, 109(1989) 157
- 4) 赤上陽出男、齊藤 宏、佐藤正志、佐藤安弘：'89 静電気学会講演論文集、18 a 20 (1989)
- 5) 赤上陽出男、齊藤 宏、佐藤正志、佐藤安弘：平成1年電気関係学会東北支部連大、No. 2 F-18 (1989)
- 6) 赤上陽出男、齊藤 宏、佐藤正志、赤塙雅一：昭62年電気関係学会東北支部連大、No. 2122 (1987)
- 7) 岡崎 清：セラミック誘電体、p. 180、学叢社 (1978)
- 8) D.D. Chang, T.S. Sudarshan, R.A. Dougal and J.E. Thompson : IEEE, T. Electr. Insul., EI-22 (1987) 489