

論 文

PTC セラミック半導体の貫通破壊電界強度の評価

齋藤 宏*, 赤上 陽出男*, 佐藤 正志*, 佐藤 安弘*

(1990年8月30日受理)

Evaluation of Puncture Electrical Stress of PTC Ceramic Semiconductor

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

(Received August 30, 1990)

As noted in the previous paper, the temperature (T) of PTC ceramic semiconductors varies with the applied electrical stress (E) linearly. According to the T - E linearity, it is possible to estimate the resistivity of PTC elements for any values of E and T . In this paper, also according to the T - E linearity, we investigate how the factors, such as the Curie temperature, minimum resistivity, diameter and thickness, effect on the puncture temperature of disc PTC elements. The results show that we are able to estimate the puncture stress for any values of the factors, and that the puncture stress decreases with the diameter of disc PTC elements.

1. ま え が き

BaTiO₃に La, Ce, Sm などの3価の元素を添加したセラミック半導体は、抵抗率 ρ が正の温度特性を有する。ここではこのセラミック半導体を PTC と略称する。

PTC は印加電圧の増大ともなって温度 T と抵抗率 ρ がともに上昇する。PTC の通電方向への貫通的な破壊は、一般に電圧の上昇ともなって抵抗率 ρ が最大抵抗率 ρ_b を経て正から負の温度特性に移行する温度 T_b で発生する^{1,2)}。すなわち、印加電圧がこのような状態に対応する電圧を超過すると電流が急上昇し、熱平衡が破れて PTC が破壊に至る。課電されている PTC の抵抗率 ρ は温度の上昇による増大と電界強度の増大による低下との二つの因子によって変化する。このため同一温度であっても、実際に電圧を印加して発熱状態にある場合の PTC の ρ は、電圧を印加しない場合の ρ より著しく低い値になる^{2,3)}。したがって、自己加熱のない抵抗率 ρ -温度 T 特性からの破壊電界強度の推定は不可能に近いと考えられていた。しかし、前報¹⁾では各種ディスク形の PTC の静特性 (電圧 V -電流 I) 試験結果について検討を行った。その結果、破壊移行時点の比誘電率 ϵ_b 、抵抗率 ρ_b 、温度 T_b 、電界強度 E_b などに関連付け

て、破壊電界強度の推定法¹⁾ならびに簡易推定法²⁾を提案した。特に簡易推定法では、自己加熱のない抵抗率 ρ -温度 T 特性における最低抵抗率 ρ_{min} の値のみで、破壊電圧の大約の推定を可能とした。

次いで、前報^{1,2)}においては PTC の温度 T と電界強度 E との関係について検討した。その結果、印加電界強度のある範囲内では PTC の温度 T が電界強度 E に比例することを明らかにした。すなわち、この電界強度の領域において PTC の温度 T は $T = T_K + CE$ と表わすことができる。したがって、温度 T -電界強度 E 特性のこの関係を用いて、任意の電界強度 E における抵抗率 ρ_E の値を推定できることを明らかにした。

PTC を製作する際には破壊電界強度が重要な問題となる。しかし、PTC を設計する場合、例えば最低抵抗率 ρ_{min} 、キュリー温度 T_C および寸法 (直径 D 、厚さ t) を変化することによって、破壊電界強度 E_b が低下するのがあるいは増大するのかの情報は重要である。従来このような情報については報告されていない。本研究は、設計に必要な上述のような知見を得るために、 E_b と ρ_{min} 、 T_C および寸法とがどのような関係にあるかを調べることを目的としている。これまで提案してきた破壊電界強度の推定法¹⁾ならびに簡易推定法²⁾では、 T_C および寸法による電界強度の影響を検討することは不可能であった。そこで、本研究では、破壊時の PTC の温度 T_b を熱平衡式から算定し、この温度 T_b への PTC の最低抵抗率 ρ_{min} 、キュリー温度 T_C および寸法 (直径 D 、厚さ t) の依存性を検討し、実験式を求めた。次いで、この破壊時の PTC の温度 T_b と上述の温度 T -電

キーワード：セラミック半導体, PTC, 破壊電界強度, 破壊温度, 破壊電界強度への影響因子

* 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 Gakuenchou, Akita, 010 Japan

界強度 E 特性とから、破壊時の電界強度 E_b を推定できることを明らかにした。終わりに、PTC の最低抵抗率 ρ_{\min} 、キュリー温度 T_C および寸法 (直径 D 、厚さ t) が破壊時の電界強度 E_b に与える影響について検討した。

2. PTC の破壊時の温度 T_b

静特性試験は 50 Hz の交流で行った。すなわち、PTC へ電圧 V (波高値 V_P) を印加し、電圧の波高値に対応する電流 I_r を測定した。電圧 V を PTC の厚さ t で除した値を電界強度 E (V_P/mm) と称している。この静特性試験は、周囲空気温度 20°C のもとで、各種円板形の PTC の電極表面をフォーク形の電極で挟み、電圧を印加して行っている¹⁻⁴⁾。

本研究において使用した PTC の直径 D は 6.8~19.8 mm、厚さ t は 1.09~5.05 mm、最低抵抗率 ρ_{\min} は 15.4~4920 $\Omega\cdot\text{cm}$ 、キュリー温度 T_C は 10~110 $^\circ\text{C}$ 、グレイン直径は 2.3~4.5 μm である。また、本研究における検討は Sr を添加した試料のみに限定している。

上述のような PTC ならびに電極構成においては、放熱出力 P (W) と温度 T ($^\circ\text{C}$) との間に次の実験式が得られる¹⁻⁴⁾。

$$P = 5.9 \times 10^{-3}(T - 20) + 3.05 \times 10^{-6}A(T - 20)^{1.43} \quad (\text{W}) \quad (1)$$

ここで、 A は PTC の表面積 (mm^2) である。この実験式の第 1 項はフォーク電極を介してリード線へ伝熱する出力に、第 2 項は PTC の表面から周囲の空気へ伝熱、対流および放射によって放熱する出力に対応する。

電圧 V を印加した場合の PTC への電気的入力 W (W) は次式で求められる。

$$W = VI_r/2 \quad (\text{W}) \quad (2)$$

ここで、 V は電圧波高値 (V_P)、 I_r はこれに対応する瞬時の電流値 (A) の実測値であり、電圧、電流波形はそれぞれ正弦波で近似し、各波形の実効値は波高値の $1/\sqrt{2}$ と評価している。

種々の寸法、 ρ_{\min} および T_C の PTC の貫通破壊時の温度 T_b は次のようにして算定する。すなわち、実測の電圧、電流波形から、破壊時点の V および I_r を読みとる。次に、(2)式で電気的入力 W (W) を求める。一般に、電圧を印加した場合の PTC の入力 W と放熱出力 P とは平衡している。したがって、破壊時においても実測から得られた電気的入力 W と(1)式の放熱出力 P とが平衡しているとして、PTC の破壊時の温度 T_b ($^\circ\text{C}$) を算出する。

PTC からの放熱出力 P は、(1)式に示すように、温度 T 、表面積 A 、したがって、直径 D と厚さ t に関係

している。また、電気的入力 W は PTC の抵抗 R と印加電圧 V に関係し、 $W = V^2/R = (Et)^2/f(\rho_E, D, t) = (Et)^2/f(\rho_{\min}, T_C, D, t)$ に関係すると考えられる (ただし、 E : 電界強度、 ρ_E : E の下での抵抗率)。したがって、破壊電界強度 E_b における温度 T_b ($^\circ\text{C}$) は PTC の最低抵抗率 ρ_{\min} 、キュリー温度 T_C および寸法 (直径 D 、厚さ t) などに関係するものとして実験式を求めた。すなわち、寸法、 ρ_{\min} 、 T_C の異なる 45 個の実測データをもとに各要素の依存性を最小 2 乗法により求めた。その結果、この破壊時の PTC の温度 T_b ($^\circ\text{C}$) に関し、次の実験式が得られた。

$$T_b = 800 \times D^{-0.378} \rho_{\min}^{-0.047} T_C^{0.064} t^{-0.045} \\ = 769 \times D^{-0.378} \rho_{\min}^{-0.047} T_C^{0.064} \quad (^\circ\text{C}) \quad (3)$$

ここで、 D は PTC の直径 (mm)、 t は厚さ (mm)、 ρ_{\min} は最低抵抗率 ($\Omega\cdot\text{cm}$)、 T_C はキュリー温度 ($^\circ\text{C}$) である。

実測結果は寸法 (D, t)、 ρ_{\min} 、 T_C の異なるデータである。そこで、実測の電圧、電流波形より求めた電気的入力 W と(1)式の放熱出力 P の関係から算定した値を実測値とし、これと(3)の実験式による計算値とがどの程度一致しているかを調べるため、実測値と実験式による計算値との関係を図 1 に示す。図中の実線は横軸の値と縦軸の値が一致する点を示す。同図からみて、実験式(3)は破壊時の温度 T_b に比較的良好に近似していることが分かる。この温度 T_b は PTC の寸法のうち特に直径 D に大きく関係し、さらに、最低抵抗率 ρ_{\min} およびキュリー温度 T_C にも影響を受けていることが分かる。

3. 温度 T -電界強度 E

電界強度 E が著しく低い範囲と、破壊電界強度 E_b に近い領域を除くと、PTC の温度 T -電界強度 E 特性は

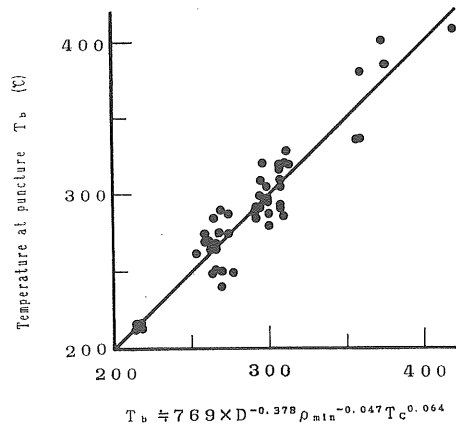


図 1 PTC の破壊温度 T_b

Fig. 1 Puncture temperature T_b of PTC.

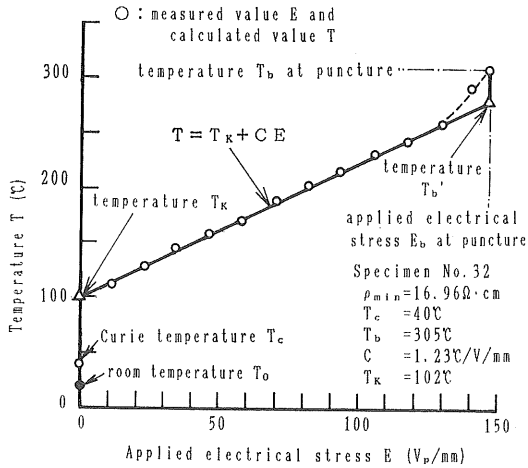


図2 PTCの温度-電界強度特性の近似

Fig. 2 Linear approximation to temperature-applied electrical stress characteristic of PTC.

次式に示すような直線で表わされる^{4,5)}.

$$T = T_K + CE \quad (^\circ\text{C}) \quad (4)$$

すなわち、図2の実線で温度 T -電界強度 E 特性が表わされる。なお、図中の○印は実測の電界強度 E と実測結果を用い(1)式から求めた温度 T の値を示す。図中の E_b は破壊時の電界強度 (Vp/mm) であり、 T_b は PTC の破壊時の温度 ($^\circ\text{C}$) であり、 T_b' は直線上の電界強度 E_b における温度 ($^\circ\text{C}$) である。さらに、 T_K は直線上の電界強度零における温度 ($^\circ\text{C}$) であり、 C は単位電界強度あたりの温度上昇 ($^\circ\text{C}/\text{Vp/mm}$) である。

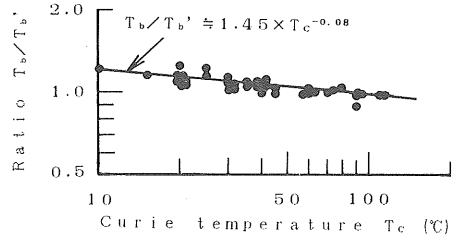
2. で述べたように温度 T と電界強度 E とは寸法 (D, t), ρ_{\min} および T_0 に関係すると考えられる。そこで、(4)式中の T_K および C について、寸法 (D, t), ρ_{\min} および T_0 の異なる 45 個の PTC の実測データをもとに各要素 (D, t, ρ_{\min}, T_0) の依存性を最小 2 乗法により求めた。その結果を次に示す^{4,5)}。

$$T_K \approx 32.4 \times T_0^{0.28} D^{0.04} t^{-0.03} \rho_{\min}^{-0.005} \approx 34 \times T_0^{0.28} \quad (^\circ\text{C}) \quad (5)$$

$$C \approx 3.37 \times \rho_{\min}^{-0.38} D^{-0.13} T_0^{0.08} t^{0.03} \approx 3.45 \times \rho_{\min}^{-0.38} D^{-0.13} T_0^{0.08} \quad (^\circ\text{C}/\text{Vp/mm}) \quad (6)$$

ただし、 T_0 はキュリー温度 ($^\circ\text{C}$)、 ρ_{\min} は最低抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)、 D は直径 (mm)、 t は厚さ (mm) である。

図2において破壊電界強度 E_b での(4)式から得られる温度 T_b' と実測の温度 T_b とは幾分異なっている。温度比 T_b/T_b' とキュリー温度 T_0 との関係を図3に示す。同図からみて、温度比 T_b/T_b' は T_0 の -0.08 乗に比例していることが分かる。この関係を次式に示す。

図3 温度比 T_b/T_b' とキュリー温度との関係Fig. 3 Relation between temperature ratio T_b/T_b' and Curie temperature.

$$T_b/T_b' \approx 1.45 \times T_0^{-0.08} \quad (7)$$

4. 貫通破壊時の電界強度 E_b の推定

4.1 電界強度 E_b の推定法

PTC の貫通破壊時の電界強度 E_b を次の手順で推定してみる。

- ① PTC の最低抵抗率 ρ_{\min} ($\Omega \cdot \text{cm}$)、キュリー温度 T_0 ($^\circ\text{C}$)、直径 D (mm) および厚さ t (mm) を指定する。
- ② 貫通破壊時の PTC の温度 T_b ($^\circ\text{C}$) を、(3)式から、推定する。
- ③ (7)式を変形した次式から、図2に示す $T-E$ 直線上の電界強度 E_b における温度 T_b' ($^\circ\text{C}$) を推定する。

$$T_b' \approx T_b / 1.45 T_0^{-0.08} \quad (^\circ\text{C}) \quad (8)$$

- ④ 任意の電界強度 E における PTC の温度 T は(4)式で与えられる。なお、(4)式中の $T-E$ 直線上の電界強度零における温度 T_K ($^\circ\text{C}$) は(5)式で、単位電界強度あたりの温度上昇 C ($^\circ\text{C}/\text{Vp/mm}$) は(6)式で算定できる。これらの値ならびに(4)式を変形した次式で貫通破壊時の電界強度 E_b (Vp/mm) を推定する。

$$E_b = (T_b' - T_K) / C \quad (\text{Vp/mm}) \quad (9)$$

4.2 電界強度 E_b の推定結果

寸法、 ρ_{\min} 、 T_0 の異なる PTC の貫通破壊時の電界強度 E_b の実測値は 130~900 Vp/mm の値を示す。上述の方法による推定値が実測値とどの程度一致しているかを見るため、実測値 E_b と上述の手順により推定した電界強度 E_b との関係を図4に示す。同図中の縦軸は実測値であり、横軸は推定値であり、実線は実測値と推定値が一致する点を示す。測定点はほぼこの直線の周りに存在しており、上述の方法により、貫通破壊時の電界強度 E_b を十分推定できるものと思われる。

4.3 破壊時の抵抗率 ρ_b

参考のために、貫通破壊時の抵抗率 ρ_b について検討

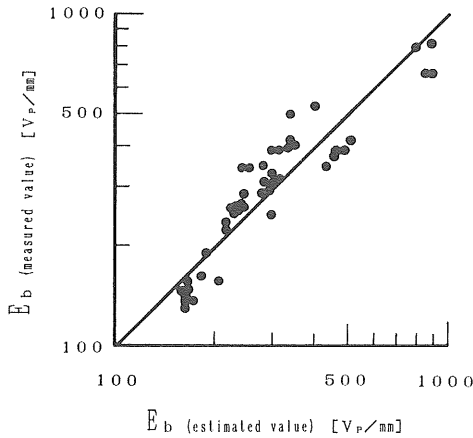


図4 破壊電界強度 E_b
Fig. 4 Puncture electrical stress E_b .

する。静特性試験における電圧、電流波形と PTC の寸法とから、貫通破壊直前の抵抗率 ρ_b を求めた。次に、以下のような手順で抵抗率 ρ_b を推定した。

- ①4.1 の手順により、破壊時の温度 T_b (°C)、 T_b' (°C) および破壊時の電界強度 E_b (VP/mm) を求める。
- ②この温度 T_b' (°C) における放熱出力 P_b (W) を(1)式から求める。
- ③この破壊時点における放熱出力 P_b と電気的入力 W_b (W) が一致すると仮定すれば、貫通破壊時の抵抗率 ρ_b ($\Omega \cdot \text{cm}$) は次式で計算できる。

$$\rho_b = E_b^2 \times A_E \times t / (20P_b) \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (10)$$

図5に貫通破壊時の抵抗率 ρ_b の実測値(縦軸)と上述の方法による推定値(横軸)との関係を示す。図中の実線は実測値と推定値が一致する点を示す。この場合も、図4と同じく実験に用いた PTC は寸法、 ρ_{\min} 、 T_C

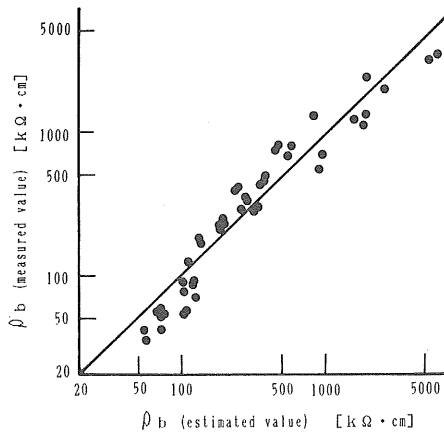


図5 破壊時の PTC の抵抗率 ρ_b
Fig. 5 Resistivity ρ_b at puncture.

が異なるため、実測の ρ_b は 30~5000 $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}$ の範囲にある。同図からみて、図中の●印が実線の周りに分布しており、貫通破壊時の抵抗率 ρ_b についても推定が可能と考えられる。

5. 貫通破壊電界強度への各要素の影響

最低抵抗率 ρ_{\min} 、キュリー温度 T_C 、寸法(直径 D 、厚さ t)の異なる PTC を作る場合に、PTC の破壊電界強度がどのようになるかは設計上重要な問題である。本章では、これらの要素 (ρ_{\min} 、 T_C 、 D 、 t) が破壊電界強度 E_b へどのような影響を及ぼすかについて検討する。

5.1 最低抵抗率 ρ_{\min} の影響

貫通破壊電界強度 E_b への最低抵抗率 ρ_{\min} の影響を図6(a)に示す。図6は PTC の直径 $D=14.85$ mm、厚さ $t=2.1$ mm でキュリー温度 T_C が 30°C の場合である。

同図(a)からみて、貫通破壊時の電界強度 E_b は、最低抵抗率 ρ_{\min} が大きな PTC ほど、高くなるのが分かる。この例において、最低抵抗率 ρ_{\min} が 10 $\Omega \cdot \text{cm}$ の時には電界強度 E_b は約 144 VP/mm であるのに対し、 ρ_{\min} が 100 $\Omega \cdot \text{cm}$ の時には E_b は約 295 VP/mm、 ρ_{\min} が 1000 $\Omega \cdot \text{cm}$ の時には E_b は約 595 VP/mm へと増大する。すなわち、電界強度 E_b は最低抵抗率 ρ_{\min} の 0.31 乗に比例して増大することが分かる。

図6(b)に破壊電界強度 E_b の最低抵抗率 ρ_{\min} による変化率を示す。最低抵抗率 ρ_{\min} が 10 $\Omega \cdot \text{cm}$ の時の変化率は約 4.5 VP/mm/ $\Omega \cdot \text{cm}$ であるが、 ρ_{\min} が 100 $\Omega \cdot \text{cm}$ では約 0.93 VP/mm/ $\Omega \cdot \text{cm}$ 、 ρ_{\min} が 1000 $\Omega \cdot \text{cm}$ では約 0.2 VP/mm/ $\Omega \cdot \text{cm}$ と、変化率は最低抵抗率 ρ_{\min} の -0.69 乗に比例して低下する。

単位電界強度当たりの温度上昇 C (°C/VP/mm) は、(6)式からみて、図6(c)に示すように最低抵抗率 ρ_{\min} の -0.38 乗に比例して低下する。

図6(d)の破壊時の PTC の温度 T_b (図中実線) および T_b' (図中破線) (°C) は、(3)ならびに(7)式から分かるように、どちらも最低抵抗率 ρ_{\min} の -0.047 乗に比例して低下している。また、電界強度零における温度 T_K (°C) は(5)式のように最低抵抗率 ρ_{\min} にはほとんど関係せず、本例では 88°C となる。そのため、温度差 ($T_b' - T_K$) (図中一点鎖線) は本例では最低抵抗率 ρ_{\min} の -0.07 乗に比例して低下している。貫通破壊時の電界強度 E_b は(9)式に示したように、($T_b' - T_K$)/ C で与えられる。したがって、 $E_b = (T_b' - T_K)/C \approx 230 \times \rho_{\min}^{-0.07} / (3.2\rho_{\min}^{-0.38}) \approx 72\rho_{\min}^{0.31}$ となり、 E_b は最低抵抗率 ρ_{\min} の 0.31 乗に比例して上昇することになり、図(a)に一致している。

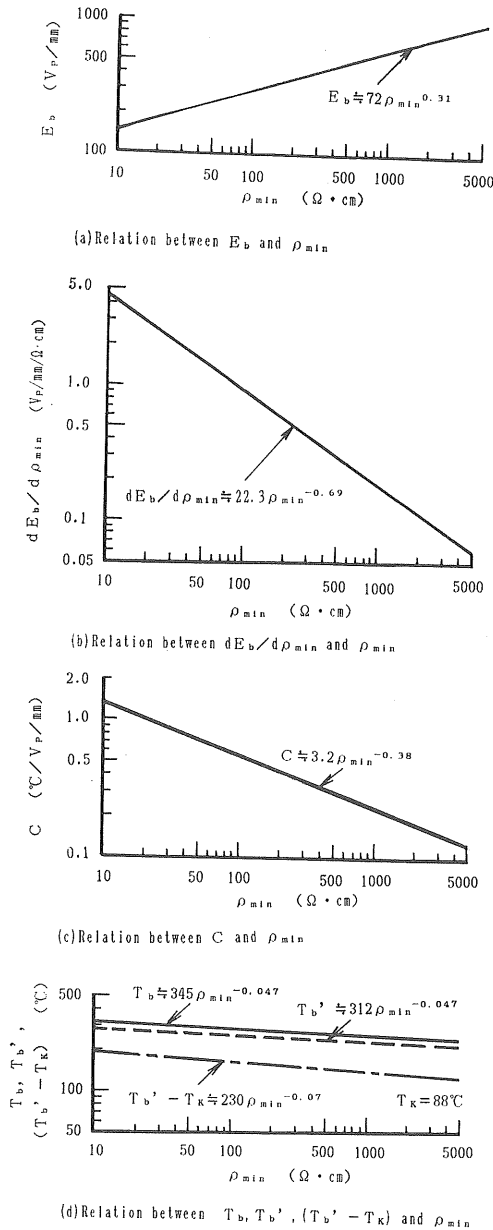


図6 破壊電界強度 E_b への最低抵抗率 ρ_{\min} の影響 ($D=14.85$ mm, $t=2.1$ mm, $T_C=30^\circ\text{C}$)

Fig. 6 Effect of minimum resistivity ρ_{\min} on puncture electrical stress E_b ($D=14.85$ mm, $t=2.1$ mm, $T_C=30^\circ\text{C}$).

貫通破壊時の電界強度 E_b への最低抵抗率 ρ_{\min} の影響において、一番大きな効果を持っているのは単位電界強度当たりの温度上昇 C である。最低抵抗率 ρ_{\min} の増大に対して、破壊時の PTC の温度 T_b は幾分低下するが、これよりも C の低下の方が大きい。破壊電界強度 E_b は C にはほぼ逆比例することになる。そのため、 ρ_{\min}

の増大にもなって電界強度 E_b が増大することになる。

最低抵抗率 ρ_{\min} の大きな試料を作製すれば、この試料の温度 T -電界強度 E 特性の単位電界強度当たりの温度上昇 C は小さなものとなる。すなわち、温度 T -電界強度 E 特性が緩やかな直線で表わせるような試料が得られる。その結果として、貫通破壊時の電界強度 E_b が大きな試料となる。

5.2 直径 D の影響

PTC の直径 D による貫通破壊電界強度 E_b への影響を図 7(a) に示す。図 7 は PTC の厚さ $t=2.05$ mm, 最低抵抗率 $\rho_{\min}=57 \Omega \cdot \text{cm}$, キュリー温度 $T_C=15^\circ\text{C}$ の場合である。

図 7(a) からみて、貫通破壊時の電界強度 E_b は、直径 D が大きな PTC ほど、低くなるのが分かる。この例において、直径 D が 5 mm の時には電界強度 E_b は約 369 Vp/mm であるのに対し、 D が 10 mm の時には E_b は約 286 Vp/mm, D が 20 mm の時には E_b は約 214 Vp/mm へと低下する。すなわち、電界強度 E_b は直径 D の -0.394 乗に比例して低下することが分かる。

図 7(b) に破壊電界強度 E_b の直径 D による変化率を示す。直径 D が 5 mm の時の変化率は約 -29 Vp/mm/mm であるが、 D が 10 mm では約 -11 Vp/mm/mm, D が 20 mm では約 -4 Vp/mm/mm と、変化率は直径 D の -1.394 乗に比例して低下する。

単位電界強度当たりの温度上昇 C ($^\circ\text{C}/\text{Vp/mm}$) は、(6)式からみて、図 7(c) に示すように直径 D の -0.13 乗に比例して低下する。

図 7(d) の破壊時の PTC の温度 T_b (図中実線) および T_b' (図中破線) ($^\circ\text{C}$) は、(3)ならびに(7)式から分かるように、どちらも直径 D の -0.378 乗に比例して低下している。また、電界強度零における温度 T_K ($^\circ\text{C}$) は(5)式のように直径 D にはほとんど関係せず、本例では 73°C となる。そのため、温度差 $(T_b' - T_K)$ (図中一点鎖線) は本例では直径 D の -0.524 乗に比例して低下している。貫通破壊時の電界強度 E_b は(9)式に示したように、 $(T_b' - T_K)/C$ で与えられる。したがって、 E_b は直径 D の -0.394 乗 ($= -0.524 + 0.13$) に比例して低下することになり、図(a)に一致している。

貫通破壊時の電界強度 E_b への直径 D の影響において、一番大きな効果を持っているのは破壊時の PTC の温度 T_b , したがって、温度差 $(T_b' - T_K)$ である。これに、単位電界強度当たりの温度上昇 C が幾分影響する。すなわち、直径 D の増大にもない、温度差 $(T_b' - T_K)$ が低下する。この温度差の低下による電界強度 E_b の低下を C の低下分が幾分緩和する。しかし、結果として、

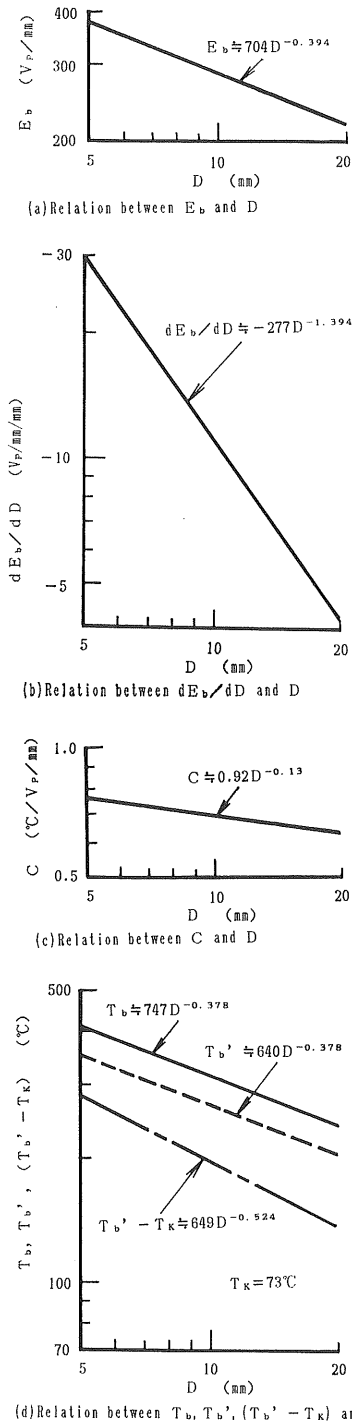


図7 破壊電界強度 E_b への直径 D の影響 ($t=2.05$ mm, $\rho_{\min}=57 \Omega \cdot \text{cm}$, $T_C=15^\circ\text{C}$)

Fig. 7 Effect of diameter D on puncture electrical stress E_b ($t=2.05$ mm, $\rho_{\min}=57 \Omega \cdot \text{cm}$, $T_C=15^\circ\text{C}$).

直径 D の増大にもなると、電界強度 E_b が低下することになる。

直径 D の大きな試料を作製すれば、破壊時の PTC の温度 T_b は低くなる。主として、 T_b の低下のため貫通破壊時の電界強度 E_b が低くなる。PTC の作製に際しては、直径 D を大きくすれば、破壊時の電界強度 E_b が低くなることに十分留意することが必要である。

5.3 キュリー温度 T_C の影響

PTC のキュリー温度 T_C による貫通破壊電界強度 E_b への影響を図8に示す。同図は PTC の直径 $D=14.58$ mm, 厚さ $t=2.1$ mm, 最低抵抗率 $\rho_{\min}=22.2 \Omega \cdot \text{cm}$ の場合である。

同図(a)の破壊電界強度 E_b とキュリー温度 T_C との関係からみて、貫通破壊時の電界強度 E_b は、キュリー温

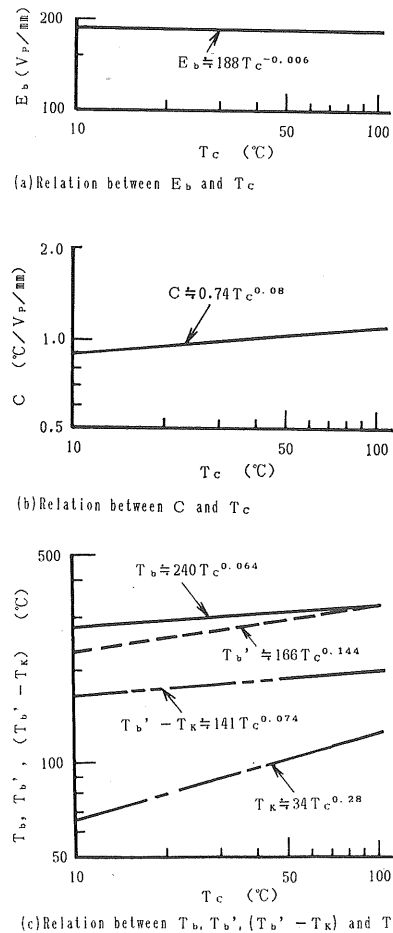


図8 破壊電界強度 E_b へのキュリー温度 T_C の影響 ($D=14.58$ mm, $t=2.1$ mm, $\rho_{\min}=22.2 \Omega \cdot \text{cm}$)

Fig. 8 Effect of Curie temperature T_C on puncture electrical stress E_b ($D=14.58$ mm, $t=2.1$ mm, $\rho_{\min}=22.2 \Omega \cdot \text{cm}$).

度 T_C が大きな PTC ほど、幾分低くなるのが分かる。この例において、キュリー温度 T_C が 10°C の時には電界強度 E_b は約 185 Vp/mm であるのに対し、 T_C が 50°C の時には E_b は約 184 Vp/mm 、 T_C が 100°C の時には E_b は約 183 Vp/mm へと低下する。すなわち、電界強度 E_b はキュリー温度 T_C の -0.006 乗に比例しているが、 E_b は T_C にほとんど影響を受けないと見なせる。

単位電界強度当たりの温度上昇 C ($^\circ\text{C}/\text{Vp/mm}$) は、(6)式からみて、図 8(b) に示すようにキュリー温度 T_C の 0.08 乗に比例して増大する。

破壊時の PTC の温度 T_b (図(c)中の実線) は(3)式から分かるようにキュリー温度 T_C の 0.064 乗に比例して増大し、 T_b/T_b' は(7)式から分かるように、温度 T_C の -0.08 に比例している。したがって、 T_b' (図(c)中の破線) は温度 T_C の 0.144 乗に比例して増大することになる。電界強度零における温度 T_K (図中の一点鎖線) は(5)式のようにキュリー温度 T_C の 0.28 乗に比例して増大する。そのため、温度差 $(T_b' - T_K)$ (図(c)中の二点鎖線) は本例ではキュリー温度 T_C の 0.074 乗に比例して増大している。貫通破壊時の電界強度 E_b は(9)式に示したように、 $(T_b' - T_K)/C$ で与えられる。したがって、 E_b はキュリー温度 T_C の -0.006 乗 ($=0.074 - 0.08$) に比例して低下することになる。すなわち、キュリー温度 T_C の増大により温度差 $(T_b' - T_K)$ は増大するが、温度上昇 C も増大しており、結果的には貫通破壊時の電界強度 E_b はキュリー温度 T_C によってほとんど影響を受けないことになる。

PTC の厚さ t は貫通破壊時の温度 T_b ならびに破壊電界強度 E_b にほとんど影響を与えない。

6. ま と め

本研究においては、静特性試験における結果と放熱出力に関する実験式とから、PTC の貫通破壊時の温度について検討した。さらに、これらの結果と温度-電界特性とから破壊時の電界強度への PTC の最低抵抗率、キュリー温度、寸法などの影響について検討した。それらの結果を以下にまとめて示す。

(1) PTC の貫通破壊時の温度 T_b ($^\circ\text{C}$) に関し次の実

験式が得られた。

$$T_b \approx 769 \times D^{-0.378} \rho_{\min}^{-0.047} T_C^{0.064} \quad (^\circ\text{C})$$

ここで、 D は PTC の直径 (mm)、 ρ_{\min} は最低抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)、 T_C はキュリー温度 ($^\circ\text{C}$) である。

(2) 温度 T -電界強度 E 特性は次式で近似できる。

$$T = T_K + CE \quad (^\circ\text{C})$$

上式の電界強度零における温度 T_K ($^\circ\text{C}$) および単位電界強度当たりの温度上昇 C ($^\circ\text{C}/\text{Vp/mm}$) に関しては、次の実験式が得られた。

$$T_K \approx 34 \times T_C^{0.28} \quad (^\circ\text{C})$$

$$C \approx 3.45 \times \rho_{\min}^{-0.38} D^{-0.13} T_C^{0.08} \quad (^\circ\text{C}/\text{Vp/mm})$$

破壊時の温度 T_b と破壊電界強度 E_b における T - E 直線上の温度 T_b' との比に関して次の実験式が得られた。

$$T_b/T_b' \approx 1.45 \times T_C^{-0.08}$$

(3) PTC の最低抵抗率、キュリー温度および直径を指定し、上述の実験式を使用することにより、貫通破壊電界強度を推定できることを示した。

(4) 最低抵抗率の大きな PTC においては、貫通破壊電界強度は大きくなる。

(5) PTC の直径を大きくした場合には、貫通破壊電界強度は低下する。

(6) PTC のキュリー温度ならびに厚さは、貫通破壊電界強度にほとんど影響を与えない。

終わりに、本研究を行うに当たって、PTC の試作や提供をしてくださった TDK の真崎隆郎技術部長、齋藤一志セラミック事業部長ならびに古川喜代志、岩谷昭一の各氏ならびに関係された方々に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 赤上陽出男, 齋藤 宏, 佐藤正志: 電気学会論文誌 A, 108 (1988) 191
- 2) 赤上陽出男, 齋藤 宏, 佐藤正志, 佐藤安弘: 静電気学会誌, 13 (1989) 509
- 3) 齋藤 宏, 赤上陽出男, 佐藤正志, 佐藤安弘: 静電気学会誌, 14 (1990) 241
- 4) 赤上陽出男, 齋藤 宏, 佐藤正志, 佐藤安弘: 静電気学会誌, 14 (1990) 503
- 5) 赤上陽出男, 齋藤 宏, 佐藤正志, 佐藤安弘: 静電気学会講演論文集 '90, p.343, 静電気学会 (1990)