

論 文

PTC セラミック半導体の破壊電圧の簡易推定法

赤上陽出男*, 斎藤宏*, 佐藤正志*, 佐藤安弘*

(1989年6月7日受理)

Simple Estimation Method of Puncture Voltage
of PTC Ceramic Semiconductor

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

and Y. SATO*

(Received June 7, 1989)

The puncture of semiconducting ceramics with the positive temperature coefficient (PTC) of resistance essentially occurs when the thermal equilibrium is destroyed due to an increase in applied voltage. In this paper, the relationship between the temperature T_e and relative dielectric constant ϵ_b at the puncture transition was studied in detail for various PTC ceramics. Consequently, the resistivity $\rho_{E0}(T_e)$ without the electrical stress E was estimated by extrapolations based on the $\rho(T_e)-E$ curves at the temperature of T_e , and was empirically expressed in terms of the ϵ_b . The paper shows that the determination of the resistivity ρ_{min} at the Curie point T_c and the ϵ_b on V (voltage)- I (current) characteristic curves allows the estimation of the puncture voltage of PTC ceramics under the non-destructive condition. Additionally, the measurement of ρ_{min} provides the puncture voltage of PTC ceramics of $T_c < 200^\circ\text{C}$ without testing for V - I characteristics. The results in this study are anticipated to be useful for the design of PTC element and for the rapid estimation of characteristics in the process of production of PTC ceramics.

1. まえがき

BaTiO_3 は、これに La, Ce, Sm などの 3 倍の元素を微量添加して 2 倍の Ba を置換すると、低抵抗率のセラミック半導体になる。このセラミック半導体を、ここでは PTC と略称する。一般にメーカーのカタログなどにある PTC の抵抗率と温度、すなわち、 $\rho-T$ 曲線は発熱を伴わない低い電圧で測定した値で示している。この $\rho-T$ 曲線では、キュリー温度 T_c までは T の上昇に伴い ρ が低下し、 T_c で最低抵抗率の ρ_{min} となる。 T_c より温度が上昇すると著大な正の温度特性をとる、ある温度 T_N で抵抗率が最大の ρ_{max} になる。さらに温度が T_N を超過すると、再び負の温度領域に移行する。しかし、実際には、PTC に電圧を印加すると、直ちに温度が T_c を超過して抵抗率が増大し、熱平衡条件を満足する電流が PTC に流れる。この BaTiO_3 半導体の変態

点温度（キュリー温度） T_c は約 100°C^1 である。 T_c を 100°C より低くするには一般に Sr で、高くするには Pb で微量の Ba を置換し、所要の特性の PTC を作っている²⁻⁴。ここでは前者を Sr 添加試料、後者を Pb 添加試料と分けて呼ぶことにする。

PTC の電圧-電流特性試験を静特性試験という⁵⁻⁷。PTC はこの電圧上昇の最終段階で貫通的に破壊する。一般にこの破壊電界強度 E_b に至るまでは、PTC への電気入力と放熱出力との平衡が保たれている。電界強度 E が E_b より高くなると、抵抗温度特性は正から負の領域へと移行して PTC は破壊する。この限界点の PTC の表面温度を T_r 、抵抗率 ρ を破壊抵抗率 ρ_b とした。PTC の ρ は温度 T と電界強度 E との両者によって変化する。したがって、低い電圧で測定した $\rho-T$ 特性は課電状態では変化し、負特性へ移行する温度の T_N と T_r および抵抗率の ρ_{max} と ρ_b とはかなり異なった値になる。

前報⁸では各種デスク形の PTC をフォーク電極に挟んで電圧を印加し、破壊するまでの各電圧に対する電流を測定した。この場合の電圧は交流 50 Hz で、PTC の周囲空気の温度は 20°C である。その結果、PTC の比

キーワード：セラミック半導体、PTC、破壊電圧、簡易推定法

* 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 Gakuendou, Akita, 010 Japan

誘電率 ϵ_s は電界強度 E の上昇とともに小さくなつて、一定の値 ϵ_b となる。さらに電界強度 E が上昇して E_b に達すると、ほぼ ϵ_b の値のままで破壊する^{8,9)}。この ϵ_b と E_b を関連づけて、破壊電界強度 E_b が推定できるようにした。すなわち、低い電圧による最低抵抗率 ρ_{min} と静特性試験からの ϵ_b との両者が分かると、 E_b を非破壊のもとで推定できる方式を提案した。

本研究は PTC の破壊特性をさらに検討したものである。すなわち、Pb 添加試料であっても、比較的低 ρ_{min} の場合は、Sr 添加試料として、また高 ρ_{min} の場合は Pb 添加試料として、破壊電界強度推定の表式が異なることを明らかにした。これによって E_b の推定できる PTC の材質の範囲を前報のそれより拡大でき、さらに実測値に近い推定値を得ることができた。特に Sr 添加試料はもちろん、Pb 添加試料であってもキュリー温度が 200°C 以下の PTC は、 ρ_{min} の値のみから、破壊電界強度 E_b を推定できる簡易推定法を見いだした。すなわち、この場合は静特性試験によって、 ϵ_b を測定する必要がなくなり、著しく短時間で簡単に E_b を推定することができる。

本研究は PTC の設計や製造過程における特性予測の高速化などに有用であるものと期待される。

2. 静特性試験による T_r と ϵ_s

図 1 のように PTC の電極（素体の両面に銀を焼き付ける）表面をフォーク電極で挟み、20°C の気温のもとで図 2 の回路で交流 50 Hz 電圧を印加した。PTC は温度によって抵抗が大きく変化するので、電流測定用の抵抗を適当に切換えて実験を行った。PTC の電流は、後述するようにパリスタ効果によって正弦波状とはならないで、電圧の波高近くが突出する波形となる。このため 2 現象のオシロスコープで電圧と電流を測定した。オシログラムより、電圧の波高値およびゼロに対応する瞬時の電流を、それぞれ抵抗成分電流 I_r 、静電容量成分電流 I_c とした。この I_r 、 I_c および素体の寸法より、その電界強度 E での抵抗率 ρ と比誘電率 ϵ_s を計算で求めた。

本研究で扱った試料は、直径 D が 3.7 から 34.0 mm、厚さ t が 1.0 から 5.0 mm、 ρ_{min} は $7.4 \sim 1.8 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 、 T_e は $0 \sim 290^\circ\text{C}$ 、 T_N は $180 \sim 330^\circ\text{C}$ および ρ_{max} は $3.3 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ と広範囲にわたっている。一般に、電圧と電流との関係を求める静特性試験は、熱平衡状態のもとで行われる。 t の小さいものは PTC の表面と内部との温度差が小さい。フォーク電極の幅は 5.0 mm であるので、 D がこれより小さいものやこれに近いものは放熱条件が変化する。また D が大きすぎると、電流密度の分布が不均一になりやすい。これ

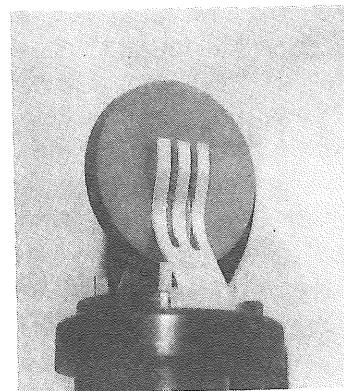


図 1 PTC 試料とフォーク電極
Fig. 1 PTC specimen and fork-type electrodes.

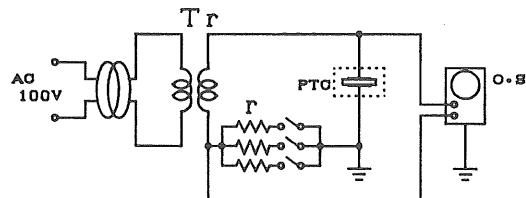


図 2 実験回路
Fig. 2 Experimental circuit.

表 1 特殊寸法の試料

Table 1 Specimen of particular size

Specimen No.	Thickness t (mm)	Diameter D (mm)	Addition agent
12	1.05	3.75	Sr
17	1.10	4.95	Sr
21	2.05	5.70	Pb
27	2.57	34.00	Pb
49	1.00	9.05	Sr
51	2.65	34.05	Pb

らに相当する試料を表 1 に示した。

比誘電率 ϵ_s は電界強度 E の上昇で小さくなり、ほぼ一定の最低値の ϵ_b のままで破壊する。ここでは ϵ_b を破壊比誘電率と呼ぶ。

一方、PTC に電圧を印加した状態で、走査形の温度観測装置サーモビュアで、その電極表面の温度分布を測定した。電圧の上昇とともに表面温度が高くなる。ある温度 T_r に達すると、電圧を上昇しないのに時間経過とともに温度が上昇し始め、遂に破壊する。実際の破壊時点の表面温度は T_r よりかなり高いが、この温度 T_r で PTC の抵抗が負特性領域に移行することになる。ここでは T_r を PTC の表面の破壊移行温度と称する。 T_r

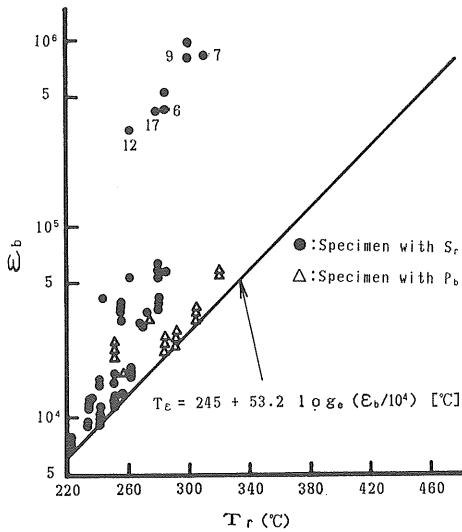
図 3 破壊比誘電率 ϵ_b と表面温度 T_r との関係

Fig. 3 Relation between relative dielectric constant ϵ_b at puncture and surface temperature T_r .

近くの温度分布の最高と最低との差は電極面であるため 10°C より小さいが、その最高温度をもって T_r とした。

各種 PTC の T_r と静特性試験より得られた ϵ_b との関係を図 3 に示した。前報⁸⁾においては、No. 6, 7, 9, 12 および 17 の各試料の実測破壊電界強度 E_b は、推定式による値に合わないので検討の対象から外していた。これらの試料の ϵ_b は図にあるように著しく大きい。また、一般の試料の平均粒径は $2.3 \sim 4.5 \mu\text{m}$ であるが、試料 No. 6 の結晶の平均粒径は $7 \mu\text{m}$ と大きい。

さて、図 3 の直線は T_r に対して ϵ_b の値がほぼ最低に近い点を包絡したものである^{8,10)}。この直線上の温度を T_e とすると、 T_e は ϵ_b に関して次式のように表わされる。

$$T_e = 245 + 53.2 \log_{10}(\epsilon_b/10^4) \quad (\text{°C}) \quad (1)$$

前報⁸⁾では T_r より T_e を採用する方が破壊電界強度 E_b の推測に適していた。すなわち、課電時の PTC の温度上昇は、主として PTC の抵抗率を支配する結晶粒界の発熱に起因している。したがって、PTC の内部の結晶粒界の温度は試料の厚さ t 、粒径の大小や熱伝導率等によって異なる。しかし E_b における粒界の温度は、表面の T_r よりも、(1)式による T_e に近いものと考えられる。ここでは T_e を破壊移行温度と称する。

3. 破壊電界強度の推定法の基礎

3.1 抵抗率 ρ と電界強度 E

PTC の抵抗率 ρ は電界強度 E と温度 T の両者に依存

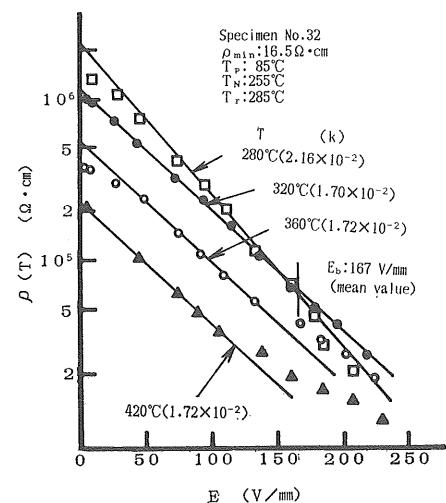
図 4 電圧突印による No. 32 試料の NTC 領域における $\rho(T)$ と E との関係

Fig. 4 Relation between $\rho(T)$ and E in NTC region of the specimen No. 32 by step-functional application of ac voltage.

する。これらをそれぞれ分離して測定するために、次のような実験を行った。一定温度 T の乾燥器内に PTC をフォーク電極で保持し、図 2 の回路を用いて交流 50 Hz 電圧を突印した。温度上昇による抵抗変化のない突印直後の電圧と電流との関係を、オシロスコープで測定した。一定温度での抵抗率 ρ は、 E に対して片対数目盛りのグラフで、直線で表わせる領域がある。その一例として高い温度領域での No. 32 試料の $\rho-E$ 直線を図 4⁸⁾ に示した。この直線の傾斜 k は ρ の E に対する依存指数であって、温度 T が破壊移行温度の T_e より高くなると、一定の値になる^{8,11,12)}。この例の T_e は 330°C である。各種 PTC について k を測定した結果、 k は、 ρ_{\min} の約 $1650\Omega\cdot\text{cm}$ を境に二つの領域に分けられ、次のように表わされることが分かった。

$$\rho_{\min} < 1650\Omega\cdot\text{cm}, k = 0.0735\rho_{\min}^{-0.5}$$

$$\rho_{\min} > 1650\Omega\cdot\text{cm}, k = 0.0018 \text{ (一定)} \quad (2)$$

3.2 热平衡条件

前報⁸⁾において、PTC の破壊電界強度 E_b を熱平衡条件から、次式のように表わした。

$$E_b = \{20\rho_{E0}(T_e) W_b / A_E t\}^{1/2} \times \exp(-kE_b/2) \quad (\text{V/mm}) \quad (3)$$

ここに、 W_b は破壊移行時の入力 (W)、 A_E は PTC の電極面積 (mm^2)、 t は厚さ (mm) である。

$\rho_{E0}(T_e)$ は、例えば図 4 に破壊移行温度 $T_e = 330^\circ\text{C}$ の $\rho-E$ 直線がある場合、その直線の外挿が E のゼロの縦軸に交差する点の抵抗率である。この $\rho_{E0}(T_e)$ を破壊無電

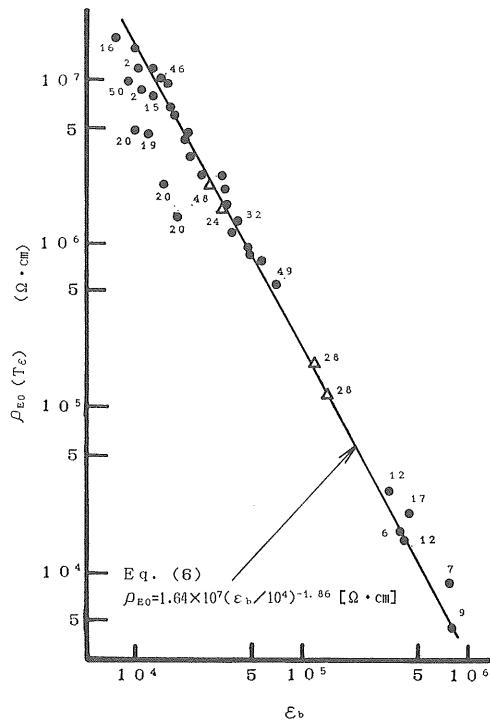


図 5 Sr 添加試料の E_b から得られる $\rho_{E0}(T_e)$ と ϵ_b の関係

Fig. 5 Relation between $\rho_{E0}(T_e)$ and ϵ_b of the specimen with Sr, where $\rho_{E0}(T_e)$ is a calculated value by E_b .

界抵抗率と呼ぶことにする。すなわち、この直線上に破壊抵抗率 $\rho_b = \rho_{E0}(T_e) \exp(-kE_b)$ がある。電流は正弦波として、その波高値より入力を求めると、
 $W_b = 5.9 \times 10^{-3}(T-20) + 3.05 \times 10^{-6}(T-20)^{1.43}A(W)$
(4)

となる⁸⁾。ただし、 A は PTC の表面積 (mm^2) である。

3.3 破壊無電界抵抗率 $\rho_{E0}(T_e)$ と ϵ_b

(3)式を書き換えると、破壊無電界抵抗率の $\rho_{E0}(T_e)$ は次式のように表わされる。

$$\rho_{E0}(T_e) = (E_b^2 A_{et} / 20 W_b) \exp(k E_b) \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (5)$$

したがって、静特性試験により破壊電界強度 E_b と破壊比誘電率 ϵ_b を測定し、さらに ϵ_b より T_e と W_b を(1)および(4)式から算出し、これに ρ_{\min} の測定から(2)式によって k を求めると、 $\rho_{E0}(T_e)$ が(5)式から得られる。その結果を両対数目盛りのグラフに ϵ_b に対してプロットしたのが図 5 (Sr 添加試料) と図 6 (Pb 添加試料)¹²⁾である。破壊電界強度 E_b は試料の寸法によって W_b が変化するので、 E_b から求めた $\rho_{E0}(T_e)$ はばらつくことになる。表 1 に示した試料 No. 12, 17 や後述するが E_b の高いもの (試料 No. 16, 19, 20, 50)

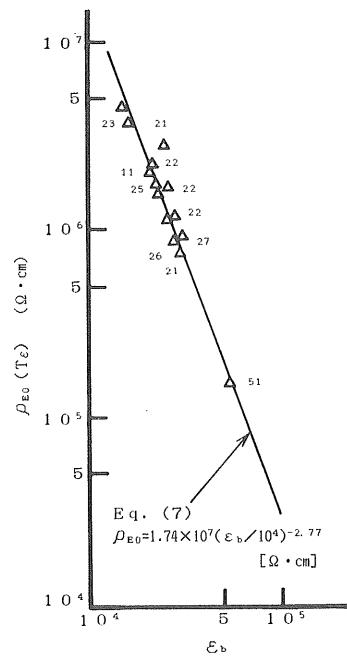


図 6 Pb 添加試料の E_b から得られる $\rho_{E0}(T_e)$ と ϵ_b の関係

Fig. 6 Relation between $\rho_{E0}(T_e)$ and ϵ_b of the specimen with Pb, where $\rho_{E0}(T_e)$ is a calculated value by E_b .

に、 $\rho_{E0}(T_e)$ のばらつきの大きいものが多くみられる。これらに該当する試料と注目を要する試料に番号を付している。図 5 および図 6 の実線の関係式は、それぞれ次のように表わした。

$$\rho_{E0}(T_e) = 1.64 \times 10^7 (\epsilon_b / 10^4)^{-1.86} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (6)$$

$$\rho_{E0}(T_e) = 1.74 \times 10^7 (\epsilon_b / 10^4)^{-2.77} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (7)$$

(6)式は Sr を添加した試料 (●印) で、キュリー温度 T_c が 100°C より低い、(7)式は Pb を添加した試料 (△印) で、 T_c が 100°C より高い PTC である。図 5 の(6)式には前報⁸⁾では検討の対象から除いた、 ϵ_b の著しく大きな No. 6, 7, 9, 12, 17 および 28 の各試料をも含むことができる。なお、前報ではこの関係を指数関数の形 $\rho_{E0}(T_e) = 1.5 \times 10^7 \exp\{-0.05(T-244)\}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$) で表わした。しかし、これを(6)および(7)の両式の形に換算すると、 $\rho_{E0}(T_e) = 1.43 \times 10^7 (\epsilon_b / 10^4)^{-2.66}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$) となり、(7)式に近い表式になる。これが ϵ_b の著しく大きなものは前報では処理ができなかった理由である。Sr を添加した試料の図 5 の実線に、Pb を添加した△印の No. 24, 48 および 28 の各試料の $\rho_{E0}(T_e)$ がよく乗っている。これらの試料のキュリー温度 T_c は前 2 者は 110°C で、No. 28 は 130°C である。Pb を添加した PTC であっても ρ_{\min} が小さい場合の $\rho_{E0}(T_e)$

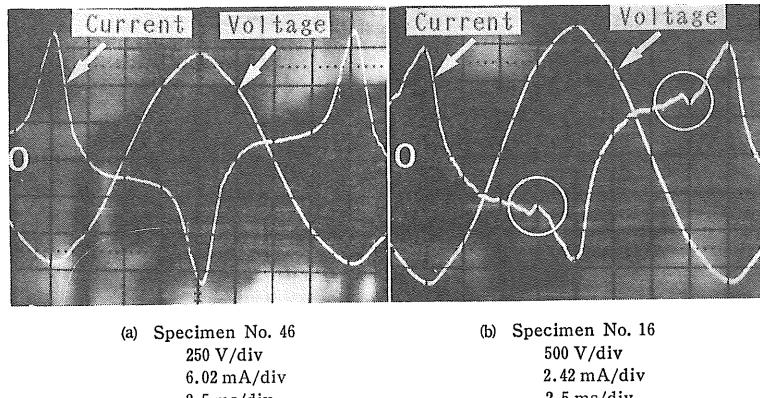


図 7 破壊移行近傍の電圧、電流波形

Fig. 7 Voltage and current wave forms near puncture.

は(7)式ではなく、(6)式の方が適しているようである。

なお、上述3者の ρ_{min} の値はいずれも $60\Omega\cdot\text{cm}$ より低い。

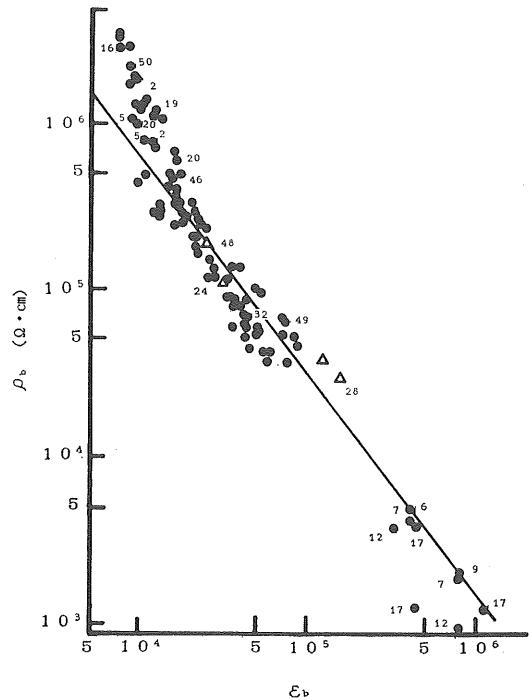
3.4 破壊抵抗率 ρ_b と ε_b

3.4.1 電圧、電流波形

図7にNo. 46および16試料の静特性試験による電圧、電流のオシログラムを示した。このオシログラムは図2の回路で測定しているので、電流と電圧とは互いに反転している。破壊電界強度 E_b はそれぞれ前者が 340 V/mm、後者は 757 V/mm（実測値）であり、いずれも破壊移行近傍のオシログラムである。電流は正弦波状ではなく、電圧の波高近くで突出するような波形を示している。(a)図の電流波形は連続的であるが、(b)図のそれは電圧の立ち上がりの前後（図中の白い丸で囲んだ領域）が振動しているように見受けられる。電圧の波高近くになると電流が急増しているので波高近傍には振動分が見かけ上現われていないものと思われる。一般に、電流は図7の(a)の波形のように、破壊近くまで連続的に変化する。しかし、次の項で述べるように、 E_b が 400 V/mm 程度より高くなると、破壊電圧より低い電圧で(b)図のような振動電流が現われる。一般に、PTC はその粒界層で印加電圧の大部分を分担する。一方、この粒界層は不純物や気孔などで、絶縁耐力が十分に高いとはいがたい。すなわち、この振動電流は電界強度の増大で、結晶粒界の局部に発生した放電によるものとみられるが、今後さらに検討を要する。

3.4.2 ρ_b と ε_b との関係¹³⁾

図8にSrを添加した試料および図9にPbを添加した試料の破壊抵抗率 ρ_b と ε_b との関係を示した。なお、 ρ_b と ε_b とは破壊電界強度近傍の電圧、電流オシログラムから、 I_r 、 I_c を読み取り、この値と素体寸法とから算出

図 8 Sr 添加試料の ρ_b と ε_b との関係Fig. 8 Relation between ρ_b and ε_b of the specimen with Sr.

した値である。 ρ_b と ε_b との関係は、図5および図6の $\rho_{E0}(T_e)$ と ε_b との関係よりばらつきが大きい。一般に、図5と図6で図中の実線より $\rho_{E0}(T_e)$ が小さく現われているものは、図8と図9で ρ_b が大きく現われている。すなわち、図8のSr添加試料中のNo. 16, 19, 20および50の各試料の ρ_b は、いずれも実線より大きく現われている。これらの試料の破壊電圧は高く、電流波形

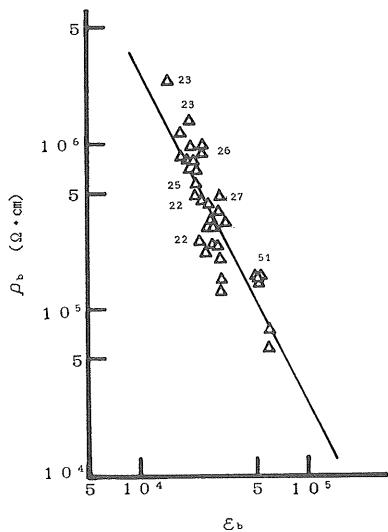
図 9 Pb 添加試料の ρ_b と ε_b との関係

Fig. 9 Relation between ρ_b and ε_b of the specimen with Pb.

上には、図 7 の(b)のような振動分が現われている。

以上のように、(6)および(7)式は、PTC の $\rho_{E0}(T_e)$ - ε_b 特性を十分に表わしているものと見なされる。

4. E_b の実測値と推定値との比較

ρ_{min} が分かると(2)式より ρ の電界強度 E 依存指數 k が得られる。また静特性試験より ε_b が分かると(1)式より破壊移行温度 T_e 、この温度 T_e より(4)式によって破壊移行入力 W_b が求められる。さらに Sr あるいは Pb 添加試料であるかによって前者は(6)式、また後者は(7)式より $\rho_{E0}(T_e)$ が得られる。なお、ここでは比較的低 ρ_{min} の Pb を添加した試料も、Sr 添加試料として取り扱う。これらの値と試料の寸法とを(3)式に入れることによって、破壊電界強度 E_b を非破壊の状態で推定することができる。

破壊電界強度の実測値を E_b とし、推定値を E_c として図 10 に両者を比較して示した。図中の両実線間は $\pm 10\%$ に相当する範囲を表わしている。また、両者の比 E_b/E_c と ρ_{min} との関係を図 11 に示した。大部分の結果がこの $\pm 10\%$ の範囲内に入っている。比が 0.9 より小さく現われている試料は Sr 添加試料での No. 16, 19, 20 および 50 であり、これらの試料は ρ_{min} が大きく、 E_b が高い。

以上の結果から、本推定法は破壊電界強度の非破壊推定法として十分であるものと考えられる。特に、抵抗率 ρ_{min} が小さく、前報では扱うことができなかつた No. 6, 7 および 9 の各試料の推定 E_c 値もこの範囲内に入

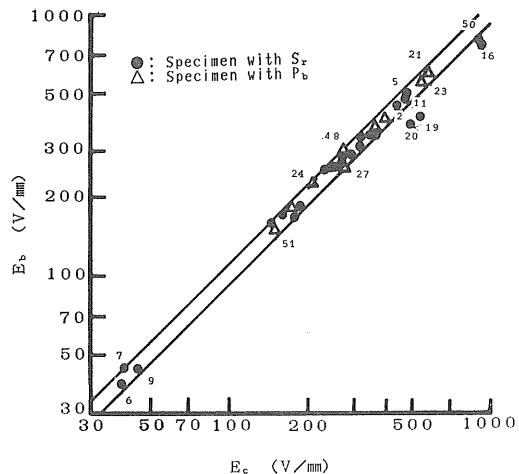
図 10 各種試料の破壊電界強度の実測値 E_b と推定値 E_c との比較

Fig. 10 Comparison of the measured value E_b with estimated value E_c of puncture stress.

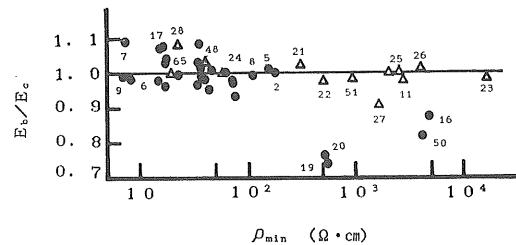
図 11 各種試料の E_b/E_c と ρ_{min} との関係

Fig. 11 Relation between E_b/E_c and ρ_{min} .

っている。

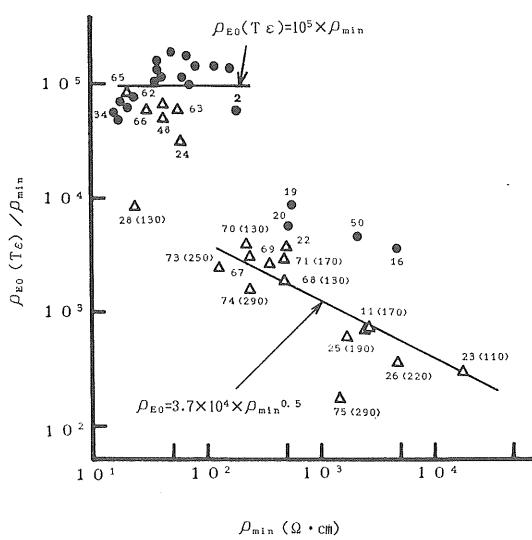
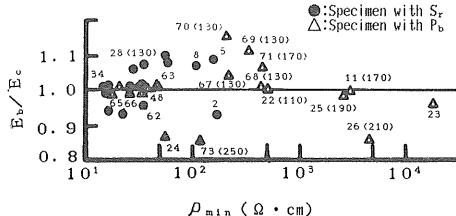
5. 破壊電界強度の簡易推定法

図 12 に $\rho_{E0}(T_e)$ と ρ_{min} との比、 $\rho_{E0}(T_e)/\rho_{min}$ と ρ_{min} との関係を示した。なお、 $\rho_{E0}(T_e)$ は実測の ε_b を用い、(6)および(7)式から算出した値である。Sr を添加した試料を●印で、Pb を添加した試料を△印で示してある。 $\rho_{E0}(T_e)/\rho_{min}$ と ρ_{min} との関係は ρ_{min} のほぼ $150 \Omega \cdot \text{cm}$ を境に二つの領域に分けられる。すなわち、無電界破壊抵抗率 $\rho_{E0}(T_e)$ を次式のようく表わす。

$$\rho_{min} < 150 \Omega \cdot \text{cm} \quad \rho_{E0}(T_e) = 10^5 \times \rho_{min} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (8)$$

$$\rho_{min} > 150 \Omega \cdot \text{cm} \quad \rho_{E0}(T_e) = 3.7 \times 10^4 \times \rho_{min}^{0.5} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (9)$$

したがって、簡易推定法では、次のような手順で破壊電界強度を推定する。すなわち、 ρ_{min} が分かれば、この(8)、(9)式より $\rho_{E0}(T_e)$ を略算し、前章の場合とは逆に、 $\rho_{min} < 150 \Omega \cdot \text{cm}$ の範囲では(6)式より、 $\rho_{min} > 150$

図 12 $\rho_{E0}(T_e)/\rho_{min}$ と ρ_{min} との関係Fig. 12 Relation between $\rho_{E0}(T_e)/\rho_{min}$ and ρ_{min} .図 13 各種試料の E_b/E_c と ρ_{min} との関係 (簡易推定法)Fig. 13 Relation between E_b/E_c and ρ_{min} (simple estimation method).

$\Omega \cdot \text{cm}$ の範囲では(7)式より ϵ_b を求める。前章では ϵ_b を静特性試験から求めているので、この測定には長時間を要している。すなわち、簡易推定法では ρ_{min} を測定するのみで ϵ_b が推定でき、この ρ_{min} と ϵ_b をもって前章と同様な方法で破壊電界強度 E_b が計算できる。

図 13 に実測した E_b と、この方式によって求めた E_c との比、 E_b/E_c を ρ_{min} に対して示した。大部分の試料の比が 0.9~1.1 の範囲の値に入っている。なお、図には示していないが、上述の範囲からはずれるとはいっても、この比 E_b/E_c は、試料 No. 16, 19, 20, 50においては幾分大きい 1.2~1.5 という値、試料 No. 28においては幾分小さな 0.65 という値である。試料のうちキュリー温度 T_c が 130°C より高いものには、括弧内にその温度を添示した。図 13 では No. 26 (210°C), No. 73 (250°C) と T_c が高くなると、この比の値が小さくなっている。図には示していないが、 T_c が 290°C の 3 種類の PTC の E_b/E_c の値が、それぞれ 0.58, 0.4, 0.4 となっている。すなわち、キュリー温度 T_c が高く

なるに伴って、 $\rho_{E0}(T_e)/\rho_{min}$ と ρ_{min} との関係曲線が(9)式よりも $\rho_{E0}(T_e)$ の低い方向に移行するものと思われる。しかし試料数が不十分であるので確認ができない。

以上のように、キュリー温度 T_c が 200°C より低い PTC においては、適当な昇温過程における ρ_{min} の検出のみで、この簡易推定法で破壊電界強度を推測することができる。

6. ま と め

本研究は、主として PTC の破壊電界強度 E_b の推定法について検討を行った。 E_b の推定に重要な因子となる破壊無電界抵抗率 $\rho_{E0}(T_e)$ と破壊比誘電率 ϵ_b との関係について(6)および(7)式を得た。前者の式は、前報で提案した式では適用できなかった ρ_{min} の著しく小さい PTC にも適用することができる。また、両式の適用は、Sr を添加した試料、あるいは Pb 添加試料であっても比較的 ρ_{min} の小さい PTC には(6)式、また Pb 添加試料で ρ_{min} の高い PTC には(7)式を適用する。これによって破壊電界強度の推定が著しく正確になった。

一方、キュリー温度 T_c が 200°C より低い PTC の破壊電界強度 E_b の簡易推定法を見出した。すなわち、 ρ_{min} が 150Ω·cm を境に、 $\rho_{E0}(T_e)$ を簡便に求める(8)、(9)式を導出した。これによって ρ_{min} の値のみで ϵ_b を推定することができる。この場合、 ρ_{min} は昇温過程で得られるので、 $\rho-T$ 曲線を求める必要がなく、また静特性試験によって ϵ_b をも求める必要もない。このため E_b の推定時間を極端に短縮することができ、 E_b の簡易推定法としての成果が十分に期待される。

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 セラミック事業部の真崎隆郎、斎藤一志、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) 三浦 蔡、伊藤宗宏：日本コンデンサ（ボジアール），p. 176, 技術 (1977)
- 2) P.W. Haaymann : German Patent No. 929,350; British Patent No. 714,935 (1952)
- 3) 佐藤利治：チタナリ系半導体 BaTiO₃ 半導体と応用 (1), p. 4, 技術 (1977)
- 4) 上岡久芳：「チタナリ系半導体 化学的立場からみた PTC サーミスター」, p. 72, 技術 (1977)
- 5) 赤上陽出男、佐藤正志、田口春男：昭和 60 年電気学会全国大会, No. 217 (1985)
- 6) 赤上陽出男、佐藤正志、田口春男：昭和 60 年電気学会東北支部連合大会, No. 2A20 (1985)
- 7) 脇野喜久男、藤川永生：チタナリ系半導体 BaTiO₃ 半

- 導体と応用 (3), p. 24, 技報 (1977)
- 8) 赤上陽出男, 斎藤 宏, 佐藤正志, 田口春男: 電気学会論文誌A, 108 (1988) 191
- 9) 赤上陽出男, 斎藤 宏, 佐藤正志: 昭和 62 年電気学会全国大会, No. 213 (1987)
- 10) 赤上陽出男, 斎藤 宏, 佐藤正志: 平成元年電気学会全国大会, No. 411 (1989)
- 11) 赤上陽出男, 佐藤正志, 田口春男: 昭和 61 年電気学会全国大会, No. 251 (1986)
- 12) 赤上陽出男, 斎藤 宏, 佐藤正志: 昭和 62 年電気学会東北支部連合大会, No. 2A7 (1987)
- 13) 赤上陽出男, 斎藤 宏, 佐藤正志, 橋本好道, 佐藤安弘: 昭和 63 年電気学会東北支部連合大会, No. 2D14 (1988)