

論 文

PTC セラミック半導体の抵抗率に影響を及ぼす因子

赤上陽出男*, 斎藤宏*, 佐藤正志*, 佐藤安弘*

(1990年8月30日受理)

Factors Affecting the Resistivity of PTC Ceramic Semiconductor

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

(Received August 30, 1990)

Semiconducting ceramics with the positive temperature coefficient of resistivity are referred to as PTC. The electrical properties of PTC elements depend on the temperature and the applied stress as well as inherent characteristics of PTC such as the Curie temperature and the minimum resistivity. In this paper, we extend our investigations of the static V(voltage)-I(current) characteristic tests on disc PTC elements, which we have mentioned in our previous paper. The results show that the temperature (T) of PTC elements varies with the applied stress (E) linearly. According to the T - E linearity, we study the conduction characteristics of PTC elements under thermal equilibrium states. Consequently, it is possible to estimate the resistivity (ρ_E) and the temperature (T) at a given stress (E), for specific values of the minimum resistivity (ρ_{\min}), the Curie temperature (T_C), the diameter (D) and the thickness (t) of PTC elements. We also study the effect of ρ_{\min} , T_C , D and t on the resistivity ρ_E .

1. まえがき

BiTiO_3 に La, Ce, Sm などの 3 倍の元素を添加すると半導体化して、抵抗率 ρ が正の温度特性を持つセラミックになる。ここではこのセラミック半導体を PTC と略称する。低い電圧で自己加熱のない状態で得られる PTC の抵抗率 ρ と温度 T との関係は次のようになる。すなわち、抵抗率 ρ は、温度上昇に伴ってキュリー温度 T_C で最低抵抗率 ρ_{\min} となり、さらに温度が上昇すれば、急激な正特性をとり、最大抵抗率 ρ_{\max} に達する。その後、再び負特性領域に入る。PTC セラミック半導体には ρ_{\max} と ρ_{\min} との比が 10^8 と著しく大きいものもある。しかし、電圧を印加して使用した際の PTC の抵抗率 ρ は、電圧を印加しない場合の ρ よりも著しく低くなる。このことは、PTC の抵抗率 ρ は温度上昇によって増大する要素と電界強度の増大によって低下する要素が存在するためである。すなわち、電圧が印加されている場合の PTC はこの二つの因子によって変化する¹⁻³⁾。さらに、PTC は同一の炉で製造されても、特性が大きくばらつくことがある。このため従来は個々の

PTC に対して電圧-電流 (V - I) 試験を行って、印加電圧に対する抵抗率 ρ を求めていた。この試験は静特性試験と呼ばれ、電圧の突然の印加による電流の過渡的変化を求める動特性試験に対して名付けられている試験法である。前報³⁾では、自己加熱の伴わないキュリー温度における抵抗率 ρ_{\min} のみで任意の電界強度における抵抗率 ρ_E の概数を予測する方式について提案した。これは実用電界とみられる破壊電界強度 E_b の $0.3 E_b$ より低い電界強度の範囲内に適用できた。しかし、PTC に電圧を印加した状態における抵抗率 ρ_E は熱平衡状態におけるものである。したがって、 ρ_E は、 ρ_{\min} のみではなくて、PTC の寸法によって変化することになる。

本研究は静特性試験の結果を用いて、電圧を印加した状態における PTC の温度 T と電界強度 E との関係について検討を行った。その結果、PTC の温度 T は電界強度 E に比例して昇降する。すなわち、 $T = T_K + CE$ で表わすことができる領域がある。したがって、電界強度 $E=0$ における温度 T_K とキュリー温度 T_C 、また単位電界強度あたりの温度上昇 C と ρ_{\min} が明らかになれば、PTC の寸法による効果が得られることになる。このような観点に立って、データを整理した結果、PTC の特性値である T_C と ρ_{\min} ならびに寸法を指定すれば、任意の電界強度における抵抗率 ρ_E を予測できることが明らかになった。また、この予測できる電界強度の範囲は前報の推測範囲より著しく拡大され、破壊近傍の電界強

キーワード：セラミック半導体、PTC、温度-電界特性、抵抗率の推定、抵抗率への影響因子

* 秋田大学鶴山学部電気工学科 (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

度、すなわちほぼ電界強度の全領域にわたって抵抗率 ρ_E を予測することができることを明らかにした。

本論文においては、最初、上述の式の電界強度零における温度 T_K ならびに単位電界強度あたりの温度上昇 C と PTC の特性値（キュリー温度 T_C および最低抵抗率 ρ_{min} ）および寸法との関係について検討した。その結果から、PTC の特性値および寸法を指定すれば、上述の温度 T と電界 E との関係式を用いることにより、任意の電界強度 E に対する抵抗率 ρ_E ならびに PTC の温度 T を予測できることを明らかにした。

最後に、最低抵抗率 ρ_{min} 、キュリー温度 T_C および寸法などの異なる PTC を作製する場合に、抵抗率 ρ_E がこれらの要素によってどのように変化するかの知見を得るために、上述の予測法を適用し、各要素の抵抗率 ρ_E への影響を調べた。

2. PTC の温度 T -電界強度 E 特性

2.1 静特性試験の概要

静特性試験の概要に関しては前報¹⁻³⁾に詳述しているので、ここでは必要と思われる点についてのみ述べる。静特性試験は交流 50 Hz で行っているが、PTC へ流入する電流はパリスタ効果によって、電圧の波高近くが突出する波形になる²⁾。このため 2 現象のオシログラフで電圧と電流波形を測定した。このオシログラムより、電圧の波高値に対応する瞬時の電流を抵抗成分電流 I_R とした。この I_R と PTC の寸法から、その印加電圧 V (波高値) における抵抗率 ρ_E を計算で求めた。なお、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。実際の課電状態では印加電圧の大部分が結晶粒間の粒界に加わるので、粒界での電界強度は著しく高いことになる。ここでは周囲の空気温度 20°C のもとで、各種円板形の PTC の電極（素体の両面に銀を焼き付ける）表面をフォーク形の電極に挟み電圧を印加して静特性試験を行った¹⁻³⁾。

電圧を印加した場合の PTC の入力 W と放熱出力 P は一般に平衡している。上述のような PTC 構成においては、放熱出力 P (W) と PTC の温度 T (°C) との間に

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

の関係があることを静特性試験結果およびサーモビュアによる試験から明らかにした¹⁻³⁾。ここで、 A は PTC の表面積 (mm²) である。上式の第 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。

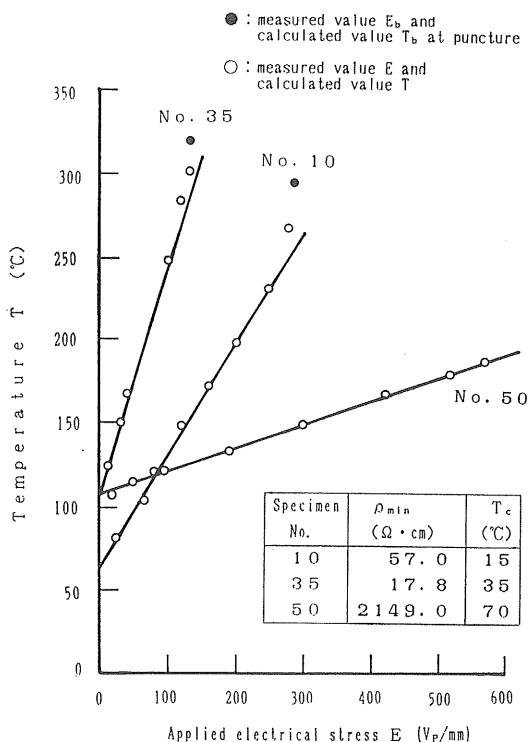


図 1 PTC の温度-電界強度特性

Fig. 1 Temperature-applied electrical stress characteristic of PTC.

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 15.4~4,920 $\Omega \cdot \text{cm}$ 、キュリー温度 T_C は 10~110°C、グレイン直径は 2.3~4.5 μm である。また、本研究は Sr を添加したキュリー温度 T_C が 120°C より低い PTC について行ったものである。

2.2 温度 T と電界強度 E

静特性試験の結果から、各電界強度 E における電流 I_R および電圧 V の波高値を読みとる。これらの値から、電界 E における入力 W を $VI_R/2$ として算出する。ただし、電圧および電流波形を正弦波で近似し、各波形の実効値は波高値の $1/\sqrt{2}$ と評価している。次に、この電気的入力 W と式(1)の放熱出力 P とが平衡しているとの仮定の下に、PTC の表面温度 T (°C) を求める。表面温度と内部温度とは当然異なるが、ここでは同一であるものとして扱っている。

温度 T と電界強度 E (波高値 V_P/mm) との関係、すなわち $T-E$ 特性を 3 種類の試料 (特性値は図中に示す) について図 1 に示した。一般に電界強度 E が著しく低い範囲と、 E が高く破壊電界強度 E_b (図中●印) に近い領域を除くと、 $T-E$ 特性は、実線で示したように、

次式のような直線でもって表わすことができる。

$$T = T_K + CE \quad (2)$$

直線と $E=0$ の縦軸との交点を T_K とする。温度 T_K は一般にキュリー温度 T_C より高い。

なお、図中の○印は実測の電界強度 E と入力 W などから算出した温度 T を示す。図中 No. 50 の PTC は破壊電界強度 E_b が約 800 V/mm と高いため、図 1 ではまだ E に対する T の急上昇の領域に入っていない。

2.3 温度 T_K 、単位電界強度あたりの温度上昇 C についての検討

本節においては、(2)式の電界強度零における温度 T_K および単位電界強度あたりの温度上昇 C と最低抵抗率 ρ_{min} キュリー温度 T_C および PTC の寸法との関係について検討する。

上述の(2)式中の温度 T_K および温度上昇 C は PTC の電気的入力 W とこれに平衡している放熱出力 P に関する。

放熱出力 P は、(1)式に示すように、PTC の電極表面積 A (mm^2) と温度 T ($^\circ\text{C}$) に関する。ただし、 $A=2\times\pi D^2/4+\pi Dt$ であり、 D は直径 (mm)、 t は厚さ (mm) である。したがって、放熱出力 P は温度 T 、直径 D および厚さ t の関数となる。

また、電気的入力 W は、次式に示すように、電圧 V (V) (したがって、電界強度 $E=V/t$) および PTC の抵抗 R (Ω) に関する。 R は任意の電界強度 E における抵抗率 ρ_E 、直径 D および厚さ t に関する。この抵抗率 ρ_E は、前報³⁾に述べたようにキュリー温度 T_C における最低抵抗率 ρ_{min} に関する。

$$\begin{aligned} W &= V^2/R = (Et)^2/f(\rho_E, D, t) \\ &= (Et)^2/f(\rho_{min}, D, t, T_C) \end{aligned} \quad (3)$$

したがって、電気的入力 W は電界強度 E 、直径 D 、厚さ t および最低抵抗率 ρ_{min} 、キュリー温度 T_C の関数となる。

電圧を印加した場合の PTC は電気的入力 W と放熱出力 P とは一般に平衡している。そのため、温度 T -電界強度 E 特性は、 ρ_{min} 、 T_C および PTC の直径 D 、厚さ t に関するものと考えられる。

一般には、温度 T_K および温度上昇 C を PTC の特性値として ρ_E ではなく、最低抵抗率 ρ_{min} とキュリー温度 T_C を用いて評価することが望ましい。ここでは、温度 T_K および温度上昇 C は、最低抵抗率 ρ_{min} 、キュリー温度 T_C および PTC の直径 D 、厚さ t に関するものとして検討する。実験式は ρ_{min} 、 T_C および寸法の異なる 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。なお、実験式においては、使用した試料の特性値の最大なものと最小のものによる変動

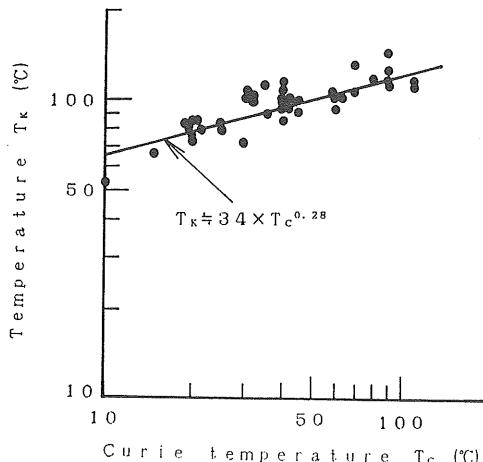


図 2 温度 T_K とキュリー温度 T_C との関係

Fig. 2 Relation between temperature T_K and Curie temperature T_C .

が 10% 以下の場合はその影響は無視できるものとした。例えば、次に述べる電界強度零における温度 T_K の実験式(4)の直径 D の項を取り説明する。 T_K は D の 0.04 乗に比例している。2.1 節に述べたように D の最大値は 19.8 mm、最小値は 6.8 mm である。測定範囲内での影響は $(19.8/6.8)^{0.04}=1.04$ 、すなわち、4% である。この場合の影響は 10% 以下となるので、 T_K への D の影響はほとんどないものとした。

2.3.1 温度 T_K とキュリー温度 T_C との関係

電界強度零に対応する温度 T_K ($^\circ\text{C}$) については次の実験式が得られた。

$$\begin{aligned} T_K &\approx 32.4 \times T_C^{0.28} D^{0.04} t^{-0.03} \rho_{min}^{-0.005} \\ &\approx 34 \times T_C^{0.28} \end{aligned} \quad (4)$$

ただし、 T_C はキュリー温度 ($^\circ\text{C}$) である。

図 2 に電界強度零に対応する温度 T_K とキュリー温度 T_C との関係を示す。図中の実線は(4)式より計算した値である。キュリー温度 T_C の高い試料ほど、温度 T_K は大きな値を示している。

2.3.2 単位電界強度あたりの温度上昇 C

単位電界強度あたりの温度上昇 C ($^\circ\text{C}/\text{V/mm}$) については次の実験式が得られた。

$$\begin{aligned} C &\approx 3.37 \times \rho_{min}^{-0.38} D^{-0.13} T_C^{0.08} t^{0.03} \\ &\approx 3.45 \times \rho_{min}^{-0.38} D^{-0.13} T_C^{0.08} \end{aligned} \quad (5)$$

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

図 3 に単位電界強度あたりの温度上昇 C と実験式(5)による C の算定値との関係を示す。図中の実線は横軸の値と縦軸の値が一致する点を示す。すなわち、図中の●印は種々の ρ_{min} 、 T_C および寸法に対する実測値よりの

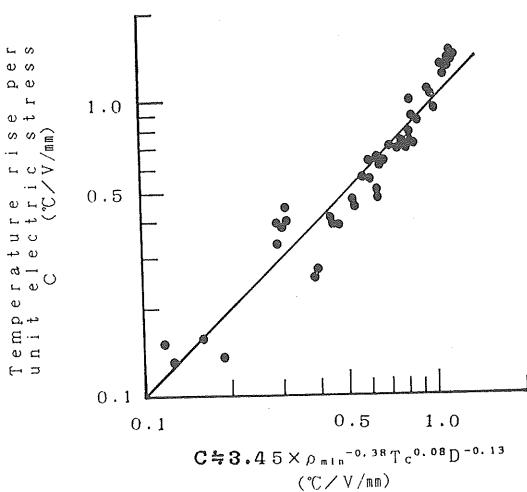


図3 単位電界強度あたりの温度上昇 C と ρ_{\min} , T_c , および D の関係

Fig. 3 Relation between temperature rise per unit electrical stress C and ρ_{\min} , T_c , D .

算定値であり、この算定点（●印）は実線の周りに分布しており、実験式(5)が各要素 (ρ_{\min} , D , T_c) の依存性をよく表わしていることが分かる。

(5)式からみて、温度上昇 C に対しては、最低抵抗率 ρ_{\min} が一番大きな影響を持ち、次に、直径 D およびキュリー温度 T_c が影響している。すなわち、 ρ_{\min} および直径 D が大きく、 T_c の低い試料ほど、 C の値は小さくなる傾向を有している。

D の影響は(1)式の熱平衡式に寸法に無関係の項（右辺第1項）が入っているためで、 D が大きくなるに伴って第1項の効果が小さくなるためである。また、 T_c が高くなると、 $C = (T - T_k)/E$ 、すなわち、 $C = (T - 34T_c^{0.28})/E$ であるため、 C の値が小さくなる。

3. 抵抗率 ρ_E の算定手順

電圧 V を印加した場合の PTC の電気的入力 W と放熱出力 P [(1)式] とは一般に平衡している。PTC の電極面積を A_E (mm^2) [直径 D (mm) の円板形の場合には $A_E = \pi D^2/4$]、厚さを t (mm) とすれば、電圧 V (V) と電流 I_r (A) とから電気的入力 W (W) は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} W &= VI_r/2 \\ &= (Et/\sqrt{2})^2 / [\rho_E(t/10)/(A_E/100)] \\ &= E^2 A_E t / (20 \rho_E) \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 ρ_E は任意の電界強度 E (V/mm) の下における抵抗率 ($\Omega \cdot \text{cm}$) である。

PTC の特性値 [最低抵抗率 ρ_{\min} ($\Omega \cdot \text{cm}$) およびキ

ュリー温度 T_c ($^\circ\text{C}$)] および寸法 [直径 D (mm) および厚さ t (mm)] が与えられた場合、任意の電界強度 E (V/mm) における PTC の抵抗率 ρ_E ($\Omega \cdot \text{cm}$) は次の手順で計算できる。

- ① PTC のキュリー温度 T_c ($^\circ\text{C}$) が指定されているので、(4)式から電界強度零における温度 T_k ($^\circ\text{C}$) が得られる。
- ② PTC のキュリー温度 T_c ($^\circ\text{C}$)、最低抵抗率 ρ_{\min} ($\Omega \cdot \text{cm}$) および直径 D (mm) が指定されているので、(5)式から単位電界強度あたりの温度上昇 C ($^\circ\text{C}/\text{V}/\text{mm}$) が得られる。
- ③ 任意の電界強度 E (V/mm) の下における PTC の温度 T ($^\circ\text{C}$) は次式で求められる。

$$T = T_k + CE \quad (2)$$

- ④ この温度 T ($^\circ\text{C}$)、PTC の表面積 A ($= 2 \times A_E + \pi D t$ (mm^2)) と(1)式とから、PTC の放熱出力 P (W) を求める。
- ⑤ PTCにおいては電気的入力 W (W) と放熱出力 P (W) とが平衡していると考え、電界強度 E (V/mm) の下における抵抗率 ρ_E ($\Omega \cdot \text{cm}$) を(6)式を変形した次式から算出する。

$$\rho_E = E^2 A_E t / (20 P) \quad (7)$$

以上の手順により、任意の電界強度 E の下における抵抗率 ρ_E の算定を行うことができる。

4. 電界強度 E における抵抗率 ρ_E と 温度 T の算定

前章に述べた計算手順により算定した抵抗率 ρ_E -電界強度 E 特性の計算結果を図4に示す。図中に PTC の寸法 (直径、厚さ) が小さく、最低抵抗率 ρ_{\min} およびキュリー温度 T_c の低い例として、試料 No. 14 の場合を実線 (○印は実測値) で示す。また、寸法のみが大きい例として試料 No. 15 の計算値を破線 (●印は実測値) で示した。さらに、寸法が大きく、しかも最低抵抗率 ρ_{\min} およびキュリー温度 T_c の高い例として、試料 No. 50 の計算値を一点鎖線 (△印は実測値) で示してある。

同図からみて、PTC の直径 D 、厚さ t および最低抵抗率 ρ_{\min} 、キュリー温度 T_c が相当に異なる試料であっても、上述の計算手順で得られた抵抗率 ρ_E -電界強度 E 特性の算定値と実測値がよい一致を示している。したがって、今後この計算手順により PTC 設計に際して必要な種々の知見が得られるものと期待される。

図4に示した各試料 (No. 14, No. 15, No. 50) の抵抗率 ρ_E -温度 T 特性を図5に示す。図中の○、●、△印は実測の ρ_E と算出温度 T を示している。ただし、この

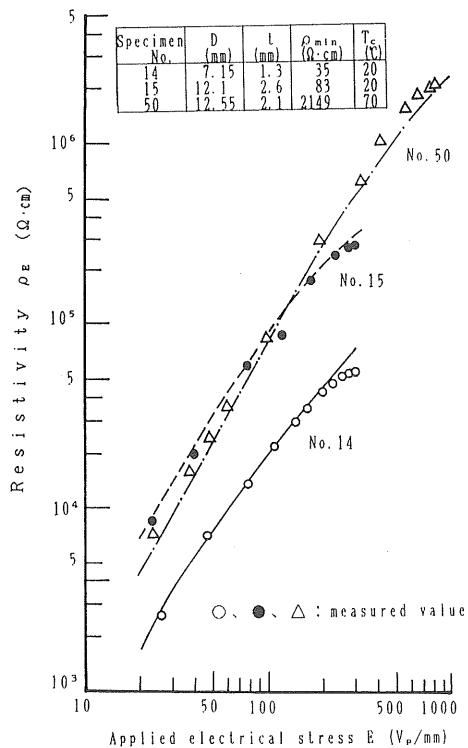
図4 PTCの抵抗率 ρ_E -電界強度 E 特性の推定

Fig. 4 Estimation of resistivity ρ_E -applied electrical stress E characteristic of PTC.

算出温度 T は実測の入力 W と(1)式で示す放熱出力 P とが平衡しているとして求めた値である。同図からみて、前章の計算手順により求めた PTC の温度 T (図中の実線、破線および一点鎖線) が実測結果から算出した温度 T (○印、●印、△印) と比較的よい一致を示していることが分かる。

したがって、前章の計算手順を用いることにより、種々の PTC の任意の電界強度 E における抵抗率 ρ_E ならびにその動作点での PTC の温度 T を推定できる。

5. 抵抗率 ρ_E への最低抵抗率 ρ_{min} 、キュリー温度 T_C および PTC 尺法 (直径 D 、厚さ t) の影響

本章においては、3章に述べた算定手順を用いて ρ_E を計算する。その結果から、 ρ_E への最低抵抗率 ρ_{min} 、キュリー温度 T_C および PTC 尺法の影響について検討する。

5.1 最低抵抗率 ρ_{min} の影響

抵抗率 ρ_E -電界強度 E への最低抵抗率 ρ_{min} の影響を見るための計算例を図 6 に示す。同図は直径 $D=14.9$ mm、厚さ $t=2.1$ mm、キュリー温度 $T_C=30^\circ\text{C}$ の場合

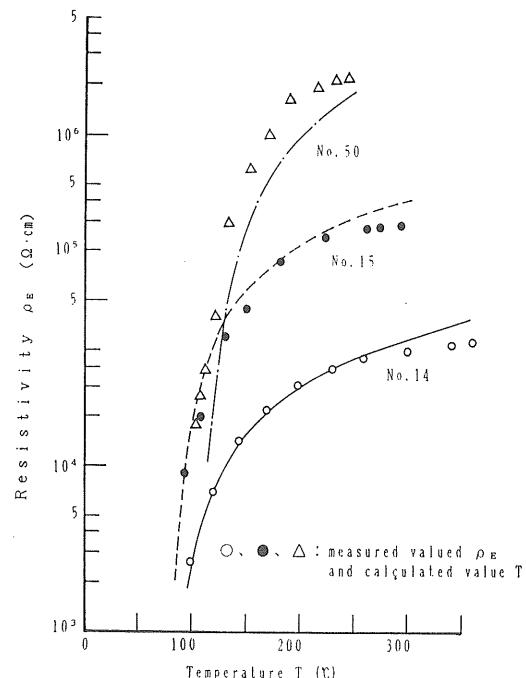
図5 PTCの抵抗率 ρ_E -温度 T 特性の推定

Fig. 5 Estimation of resistivity ρ_E -temperature T characteristic of PTC.

である。パラメータは ρ_{min} である。図中の○印は $\rho_{min}=22.2 \Omega \cdot \text{cm}$ の場合の実測値である。実効値 100 V の電圧を印加して使用するものとすれば、印加電界強度 E は約 67 V_p/mm ($\sqrt{2} \times 100 \text{ V}/2.1 \text{ mm}$) であり、図中にこの電界強度を一点鎖線で示してある。

図 7 に実際の使用電界強度 $E=67 \text{ V}_p/\text{mm}$ における抵抗率 ρ_E と最低抵抗率 ρ_{min} との関係を示す。 ρ_E は、 ρ_{min} の増大と共に増加しているが、その増大率は飽和する傾向を示している。 ρ_{min} の大きな場合には、温度上昇 C は、 $C=\text{const} \cdot \rho_{min}^{-0.38}$ にしたがって、小さな値となる。温度 T は、 $T=T_K+CT$ で変化するが、この場合 T_K および E は一定である。したがって、温度 T は ρ_{min} の増大と共に低下する。放熱出力 P は(1)式に示すように温度 T の低下と共に、小さくなる。この結果、(7)式中の分母の P が低下するため、 ρ_{min} の増大と共に抵抗率 ρ_E は増大する。

5.2 キュリー温度 T_C の影響

5.1 節と同様な寸法で、使用電界強度も等しい $E=67 \text{ V}_p/\text{mm}$ の場合の抵抗率 ρ_E とキュリー温度 T_C との関係を図 8 に示す。これは最低抵抗率 $\rho_{min}=22.2 \Omega \cdot \text{cm}$ の場合の計算結果である。抵抗率 ρ_E は、キュリー温度 T_C の増大と共に、両対数グラフ上でほぼ直線的に低下している。

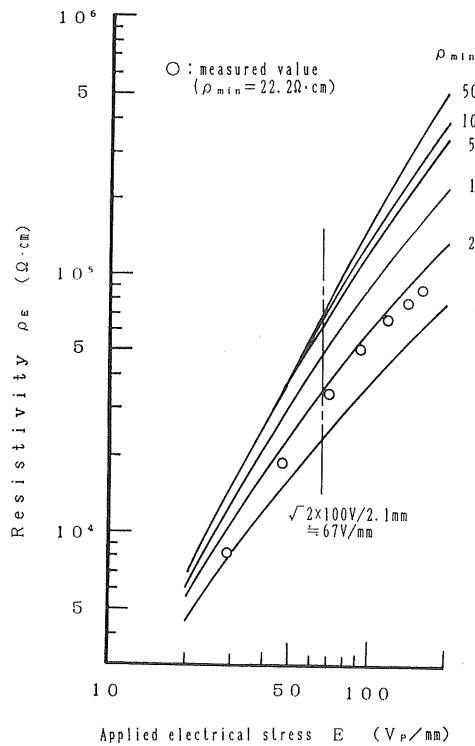


図6 抵抗率 ρ_E -電界強度 E 特性
($D=14.9 \text{ mm}$, $t=2.1 \text{ mm}$, $T_c=30^\circ\text{C}$)

Fig. 6 Resistivity ρ_E -applied electrical stress E characteristics.
($D=14.9 \text{ mm}$, $t=2.1 \text{ mm}$, $T_c=30^\circ\text{C}$)

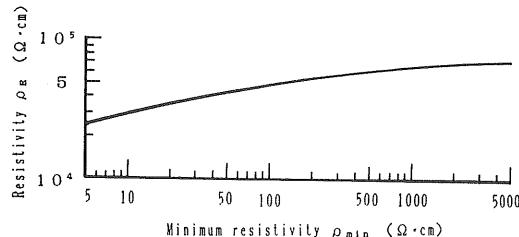


図7 抵抗率 ρ_E への最低抵抗率 ρ_{\min} の影響
($E=67 \text{ V}_p/\text{mm}$, $D=14.9 \text{ mm}$, $t=2.1 \text{ mm}$, $T_c=30^\circ\text{C}$)

Fig. 7 Effect of minimum resistivity ρ_{\min} on resistivity ρ_E .
($E=67 \text{ V}_p/\text{mm}$, $D=14.9 \text{ mm}$, $t=2.1 \text{ mm}$, $T_c=30^\circ\text{C}$)

T_K は $T_K=34T_c^{0.28}$ ((4)式), C は $C=\text{const} \cdot T_c^{0.08}$ ((5)式)にしたがって変化する。すなわち、 T_c の大きな試料においては、 T_K も C も大きくなる。そのため、PTC の温度 T は増大し、放熱出力 P も増大する。その結果、(7)式中の分母の P が増大するため、 ρ_E は低下する。

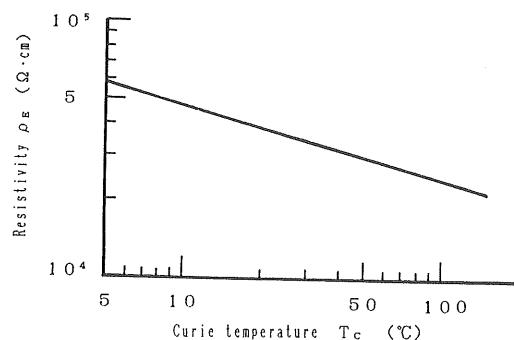


図8 抵抗率 ρ_E へのキュリーカーブ T_c の影響
($E=67 \text{ V}_p/\text{mm}$, $D=14.9 \text{ mm}$, $t=2.1 \text{ mm}$, $\rho_{\min}=22.2 \Omega \cdot \text{cm}$)

Fig. 8 Effect of Curie temperature T_c on resistivity ρ_E .
($E=67 \text{ V}_p/\text{mm}$, $D=14.9 \text{ mm}$, $t=2.1 \text{ mm}$, $\rho_{\min}=22.2 \Omega \cdot \text{cm}$)

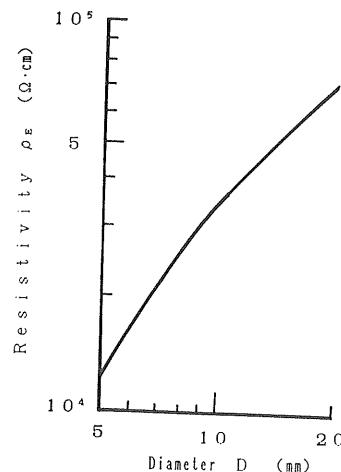


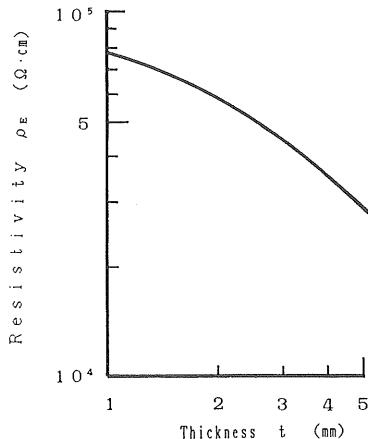
図9 抵抗率 ρ_E への直径 D の影響
($E=69 \text{ V}_p/\text{mm}$, $t=2.05 \text{ mm}$, $\rho_{\min}=57 \Omega \cdot \text{cm}$, $T_c=15^\circ\text{C}$)

Fig. 9 Effect of diameter D on resistivity ρ_E .
($E=69 \text{ V}_p/\text{mm}$, $t=2.05 \text{ mm}$, $\rho_{\min}=57 \Omega \cdot \text{cm}$, $T_c=15^\circ\text{C}$)

5.3 直径 D の影響

使用電界強度 $E=69 \text{ V}_p/\text{mm}$ ($=\sqrt{2} \times 100 \text{ V}/2.05 \text{ mm}$) における抵抗率 ρ_E と直径 D との関係を図9に示す。同図は厚さ $t=2.05 \text{ mm}$, 最低抵抗率 $\rho_{\min}=57 \Omega \cdot \text{cm}$, キュリーカーブ $T_c=15^\circ\text{C}$ の場合の計算結果である。抵抗率 ρ_E は、直径 D の増大と共に、増大している。

C は $C=\text{const} \cdot D^{-0.13}$ にしたがって変化する。直径 D の大きな試料においては、 C したがって T は幾分低下する (T_K および E は一定)。それに対して、PTC の表面積 A は、 D の増大に伴って、著しく大きくなる。そのため、放熱出力 P ((1)式) の第2項が大きくなる。また、

図 10 抵抗率 ρ_E への厚さ t の影響

($E = \sqrt{2} \times 100 \text{ V}/t \text{ mm}$, $D = 15.35 \text{ mm}$, $\rho_{\min} = 57 \Omega \cdot \text{cm}$, $T_c = 15^\circ \text{C}$)

Fig. 10 Effect of thickness t on resistivity ρ_E .
($E = \sqrt{2} \times 100 \text{ V}/t \text{ mm}$, $D = 15.35 \text{ mm}$, $\rho_{\min} = 57 \Omega \cdot \text{cm}$, $T_c = 15^\circ \text{C}$)

電極面積 A_E も直径の 2 乗に比例して増大する。(7) 式に示したように、抵抗率 ρ_E は A_E に比例し、 P に逆比例する。しかし、 D の増大に伴う P の増大（したがって、 ρ_E の低下）よりも A_E の増大の影響の方が大きいため、 D の増大に伴い、抵抗率 ρ_E も増大する。

5.4 厚さ t の影響

実際の使用電界強度が厚さ t と共に変化 ($\sqrt{2} \times 100 \text{ V}/t \text{ mm}$) とした場合の抵抗率 ρ_E と厚さ t との関係を図 10 に示す。すなわち、この場合は厚さ t に関係なく、実効値 100 V の電圧で PTC を使用することを想定したものである。抵抗率 ρ_E は、厚さ t の増大に伴って、低下する。

この場合には、 t が変化しても、 T_K 、 C および A_E は一定であり、 A のみが幾分増加する。しかし、電界 E は t に逆比例するから、 E は大きく変化する。そのため、 t の増大と共に温度 T が低下し、放熱出力 P も低下する。抵抗率 ρ_E は、(7)式に示すように $E^2 t / P$ に比例する。 t の増大に伴い、 P は低下するが、 T および P の影響よりも電界 E の低下の影響の方が著しいため、抵抗率 ρ_E は低下する。

6. ま と め

本研究においては、Sr を添加した PTC の温度 T と電界強度 E との関係について検討を行った。その結果、電界強度 E が低い範囲と、破壊電界強度 E_b に近い範囲を除くと、温度 T -電界強度 E 特性は直線で表わせるこ

とを明らかにした。さらに、この T - E 特性に基づき、PTC の導電特性が推定できることを明らかにした。それらの結果を以下にまとめて摘記する。

(1) 温度 T -電界強度 E 特性を次式で近似した。

$$T = T_K + CE \quad (\text{°C})$$

(2) 電界強度零に対応する温度 T_K (°C) および単位電界あたりの温度上昇 C (°C/V/mm) に関して、次の実験式が得られた。

$$T_K = 34 \times T_C^{0.28}$$

$$C = 3.45 \times \rho_{\min}^{-0.38} D^{-0.13} T_C^{0.08}$$

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

(3) PTC の特性値 [最低抵抗率 ρ_{\min} ($\Omega \cdot \text{cm}$) およびキュリー温度 T_C (°C)] および寸法 [直径 D (mm) および厚さ t (mm)] が与えられた場合、任意の電界強度 E (V/mm) 度における PTC の抵抗率 ρ_E ($\Omega \cdot \text{cm}$) は次式で推定できる。

$$\rho_E = E^2 A E t / (20P)$$

ただし、 A_E は電極面積 (mm^2) である。 P は放熱出力 (W) であり、次の実験式から算出する。

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

ここで A は PTC の表面積 (mm^2) である。

(4) 一定使用電界強度の下では、抵抗率 ρ_E は、最低抵抗率 ρ_{\min} の増大に伴い、増大する。また、キュリー温度 T_C の低い PTC ほど、抵抗率 ρ_E は大きい。

(5) PTC 試料の直径 D を大きくするほど、一定使用電界強度の下での抵抗率 ρ_E は大きくなる。

(6) 一定電圧を印加した場合、実際の使用電界強度は厚さ t に逆比例して変化する。この場合の抵抗率 ρ_E は、厚さ t が大きくなるに伴って、小さくなる。

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 の真崎隆郎技術部長、斎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、斎藤 宏、佐藤正志：電気学会論文誌A, 108 (1988) 191
- 2) 赤上陽出男、斎藤 宏、佐藤正志、佐藤安弘：静電気学会誌, 13 (1989) 509
- 3) 斎藤 宏、赤上陽出男、佐藤正志、佐藤安弘：静電気学会誌, 14 (1990) 241