

論 文

PTC セラミック半導体の抵抗率の簡易推定法

斎 藤 宏*, 赤上 陽出男*, 佐 藤 正 志*, 佐 藤 安 弘*

(1990年1月31日受理)

Simple Estimation Method of Resistivity of PTC Ceramic Semiconductor

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

(Received January 31, 1990)

Semiconducting BaTiO₃ ceramics with the positive temperature coefficient of a resistivity, which are simply called PTC, find wide usage such as the positive thermistor. Since the resistivity ρ of PTC is usually measured by making use of a low voltage resistance-meter, the self-heating of PTC is negligible. In this way, the ratio of the maximum ρ_{\max} and the minimum ρ_{\min} may even reach the order of 10⁸ in some PTCs. However, the resistivity is considerably different from that determined under a self-heating condition at an actual high voltage. For the practical application of PTC, therefore, the resistivity has been measured by means of the static V (voltage)- I (current) characteristic test at the operating voltage. This paper provides a simple estimation method of the resistivity ρ_E of PTC at an operating voltage. The results show that ρ_E is a function of ρ_{\min} when the applied electrical stress E is less than 30% of the puncture stress E_b of the PTC. Consequently, the estimation of ρ_E at an operating voltage becomes possible only by the determination of ρ_{\min} .

1. まえがき

BaTiO₃ は、これに La, Ce, Sm などの 3 倍の元素を添加すると半導体化し、抵抗率が正の温度特性をもつセラミック¹⁾になる。ここではこのセラミック半導体を PTC と略称する。BaTiO₃ 系の PTC は、その抵抗率 ρ と温度 T との関係、すなわち $\rho-T$ 特性の ρ が最低の ρ_{\min} になるキュリー温度 T_c は約 100°C である。この T_c を 100°C より低くするには Sr を、また 100°C より高くなるには Pb を添加して Ba の一部と置換²⁻⁴⁾している。自己加熱の伴わない低い電圧で得られる PTC の ρ は、温度 T が T_c より上昇すると急激な正特性をとり、最大抵抗率 ρ_{\max} を経て再び負特性領域に入る。この特性はメーカーのカタログなどに示されており、 ρ_{\max}/ρ_{\min} の値が 10⁸ に及ぶものもある。しかし、低い電圧で T を変化して測定した場合の抵抗率 ρ と、実際に電圧を印加して自己発熱状態にある場合の ρ とはかなり異なっている。同一温度における前者の抵抗率 ρ より、電圧を印加した場合の ρ は著しく低い値になる。す

なわち、PTC の ρ の変化は、温度上昇によって高くなる要素と、さらに同一温度であっても、電界強度の増大で低下する要素の二つから成り立っている。後者の場合は、 ρ の変化に大きく作用する結晶粒界に加わる実際の電界強度が、印加電圧を厚さで除した見かけ上の電界強度 E に比べて、極端に高くなるためである。電圧を印加した場合は、この温度および電界の二つの因子によって抵抗率 ρ 、したがって PTC に流れる電流が決まる。このため PTC を種々の回路に実際に使用するに際し、従来は個々の PTC について静特性試験を行って、電圧と電流との関係を求めていた。

PTC の使用には、上述の電圧-電流特性ならびに破壊電圧を知る必要がある。破壊電圧に関してはその推定法⁵⁾および簡易推定法を前報⁶⁾で提案した。

本研究は、電圧印加時の PTC の抵抗率 ρ_E を ρ_{\min} の値のみから簡単に推定できる方法を提案するものである。最初に、前報^{5,6)}と同様な静特性試験によって得られた結果をもとに、各種 PTC の抵抗率 ρ と電界強度 E (波高値) との関係について詳細な検討を行った。その結果、電界強度が破壊電界強度 E_b の 30% 以下の範囲内では、PTC の抵抗率 ρ_E の電界強度 E に対する依存性と最低抵抗率 ρ_{\min} との間に一定の関係があることを見出した。実際の使用時に印加される電界強度の上限値は、上述の 0.3E_b の範囲よりもさらに小さな値となっ

キーワード：セラミック半導体、PTC、抵抗率の電界依存性、簡易推定法

* 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 Gakuenchou,
Akita, 010 Japan

ている。したがって、PTC の ρ_{\min} の測定のみで、実際に印加される電圧範囲での抵抗率 ρ_E を、また、破壊電圧が必要な際には、前報⁶⁾の簡易推定法によってその値を推定することができる。なお、本報告で扱う ρ_{\min} と ρ_{\max} は、すべて自己加熱の伴わない低い電圧で測定したものである。

2. 電圧印加時の $\rho-T$ 特性

2.1 静特性試験の概要

前報^{5,6)}と同様にディスク形の PTC の電極面を幅 5 mm のフォーク電極で挟み、PTC に 50 Hz 電圧を印加して、その電圧-電流特性試験（静特性試験）⁷⁾を行った。今回は、PTC の初期温度ならびにその周囲の空気温度が等しくなるようにし、これを 20~160°C の範囲内で種々の値に設定し、静特性試験を行った。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⁶⁾になり、正弦波とはならない。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。このオシログラムより、電圧の波高値およびゼロ値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 と I_C および素体の寸法から、その印加電圧 V （波高値）での、抵抗率 ρ と比誘電率 ϵ_s を計算で求めた。なお、電圧 V を PTC の厚さ t で除して電界強度 E (V/mm) と称している。本研究で扱った試料は、直徑 D は 3.7 から 34.0 mm、厚さ t は 1.0 から 5.0 mm、 ρ_{\min} は 7.4 から $1.8 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 、 ρ_{\max} は 3.3×10^3 から $1.5 \times 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 、破壊移行温度 T_b は 240 から 380°C の広範囲にわたっている。

2.2 電圧印加の有無による $\rho-T$ 特性の比較

静特性試験は熱平衡状態のもとで行われる。フォーク電極の幅が 5 mm であるので、 D および t の特に小さい PTC は放熱の条件が変化するので、本研究の検討の対象から除いている。

破壊までに注入された電力 W_b と破壊温度 T_b との間には

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

の関係がある⁵⁾。ただし、 A は PTC の表面積 (mm^2) である。また、(1)式は PTC の周囲空気温度が 20°C におけるものである。

周囲温度を 20°C とした場合の静特性試験（電圧 V -電流 I 特性試験）での各印加電圧 V に対する入力 W より上式に準じて、PTC の温度 T を求める。これより各印加電界強度での抵抗率 ρ_E と T との関係、すなわち ρ_E-T 特性を 3 種類の試料について図 1 に実線で示した。

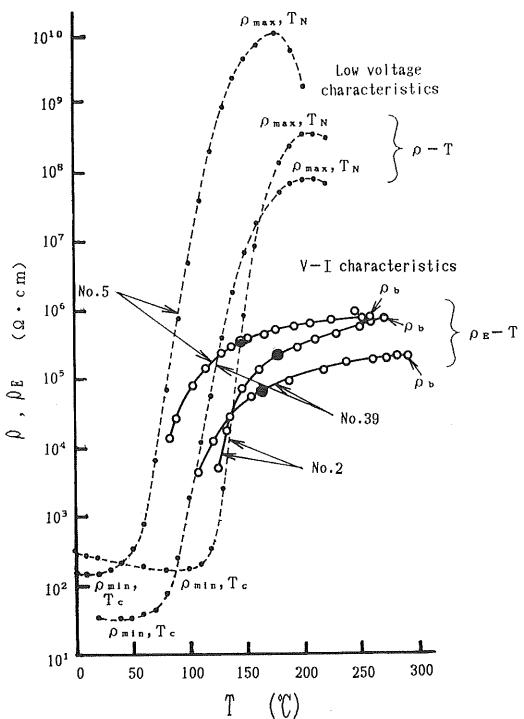


図 1 PTC の抵抗率 ρ, ρ_E -温度 T 特性

Fig. 1 Resistivity ρ, ρ_E -temperature T characteristic of PTC.

また比較のため、同図に低い電圧で測定した抵抗率 ρ と温度 T との関係を破線で示してある。これらの試料のキュリー温度 T_c は、いずれも 100°C より低い。 ρ と ρ_E との間には、電界強度の低い、すなわち温度 T が低い状態では大差がない。しかし、電界強度 E が高く、温度 T が上昇するに伴って、両者の間に大きな開きが生じ、 ρ_E が ρ より著しく小さくなっている。3 試料の低電圧試験における ρ_{\max} には大差があるので、静特性試験における破壊抵抗率 ρ_b （静特性試験曲線の右端の測点）の 3 試料間の開きは小さい。No. 2 と No. 39 の試料は電圧、すなわち温度の上昇過程のほぼ 140°C においてそれぞれの ρ_E-T 曲線が交差している。図 1において、3 試料のキュリー温度 T_c は異なっており、そのため ρ_E-T 特性が大きく異なっているように見える。一般に T_c の近くでは ρ_E の温度上昇に伴う増大率は大きい。この増大率は T_c の高低によっても異なる。

このように試料によって ρ_E-T 特性が異なるので、従来は個々の試料について流れる電流を予知するため、電圧を印加して静特性試験を行っていた。しかし ρ_E の T による変化率は、破壊抵抗率の ρ_b （図 1 中の静特性試験の右端の測点）と $0.3\rho_b$ （同図中に○で示す点）との

間ではかなり小さくなっている。

3. 抵抗率 ρ_E と電界強度 E との関係

3.1 周囲気温と ρ_E-E 特性

PTC の周囲の空気温度を変えた場合の ρ_E-E 特性の変化の一例を、図 2⁶⁾ に No. 32 試料について示した。この場合、電圧の印加時点の PTC の温度と周囲空気の温度とは等しいが、各測点は熱平衡状態に達したときの値であり、各時点での PTC の温度は周囲空気の温度より高くなっている。

いざれの気温のもとでも電界強度 E の比較的低い範囲では、 ρ_E と E との関係は両対数目盛りのグラフでほぼ直線で表わすことができる。この直線の傾斜は、指數 n として図中の括弧内に示している。周囲気温が 20°C と 50°C の場合ではほとんどこの傾斜に差がなく、気温がさらに高くなると傾斜は小さくなっている。すなわち、20~50°C の間の気温では E に対する ρ_E の値そのものは異なるが、この ρ_E と E との比例関係はほとんど変わらないと見ることができる。図中の各周囲温度での ρ_E と E の最も高い測点（図中右端の測点）は、破壊抵抗率 ρ_b と破壊電界強度 E_b を表わしている。周囲の気温が高くなるに伴って E_b が低くなり、これに対して ρ_b が高くなっている。また、周囲気温 160°C の E の低い2点は PTC の温度が高いため、電圧印加による温度上昇より、電界による抵抗率の減少効果が大きくなつて、 ρ_E が余り変化していない。しかし、 E が 20 V/mm より大きくなると、明らかに ρ_E と E の関係が直線で表

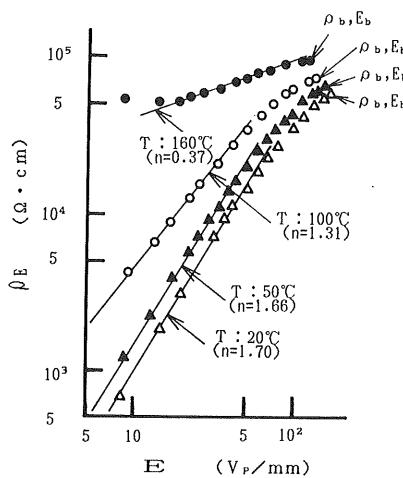


図 2 周囲空気温度による抵抗率 ρ_E と電界強度 E との関係 (試料 No. 32)

Fig. 2 Relation between resistivity ρ_E and applied electrical stress E at various temperature around specimen (Specimen No. 32)

わし得る範囲がある。なお、この試料の ρ_{\max} に対応する温度は約 260°C である。

3.2 周囲気温 20°C での ρ_E-E 特性

今後、抵抗率 ρ_E の推定を行う際に、取り扱いが簡単になるように周囲温度が常温と見なせる 20°C の場合の特性について検討する。

A. Sr を添加した試料

Sr を添加してキュリー温度 T_c を 100°C より低くした各試料について、周囲温度を 20°C として抵抗率 ρ_E と電界強度 E との関係を、図 3 および図 4 に示した。図 3 は ρ および ρ_E-T 特性を示した図 1 の各試料と同じ試料である。図 4 は図 3 の各試料の ρ_{\min} を補間する値の試料を選んで示した。これらの場合も図 2 と同様に、各試料の測点のうち最大の ρ_E あるいは E はそれぞれ破壊時の抵抗率 ρ_b と電界強度 E_b である。

図 3 および図 4 からみて、図 2 の周囲気温の 20°C の場合と同様に、いざれの試料の ρ_E も、少なくとも破壊電界強度 E_b の 30% 以下の範囲では、 E の 1.7 乗に比例している。参考のために、図 3 中に $0.3E_b$ の値を▼印で示してある。

次に、実際の使用電界強度について考える。PTC は、一般に熱源となる発熱体として使用する以外は、回路中で他の素子と直列に使用されることが多い。したがって、最悪の状態（熱源もしくは、温度上昇後の最終の使用状態）では全電圧が PTC の両端に印加されることになる。図 3 に示した試料の厚さ t はそれぞれ No. 2 が 2.55 mm, No. 5 が 3.10 mm, No. 39 が 2.60 mm である。これらを商用周波電圧 100 V で使用するとそれ

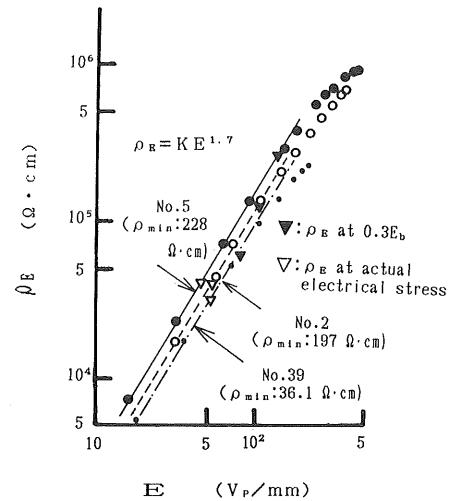


図 3 Sr を添加した試料の抵抗率 ρ_E と電界強度 E との関係

Fig. 3 Relation between resistivity ρ_E and applied electrical stress E of specimen with Sr.

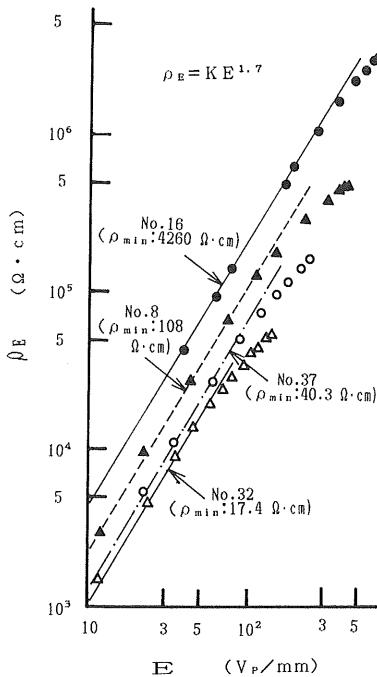


図 4 Sr を添加した試料の抵抗率 ρ_E と電界強度 E との関係

Fig. 4 Relation between resistivity ρ_E and applied electrical stress E of specimen with Sr.

ば、使用電界強度の上限は $46 \sim 55 \text{ V/mm}$ ($\sqrt{2} \times 100/t$, 電界強度は波高値で評価) となる。この値を図 3 中に△で示してある。使用電界強度は十分 $0.3E_b$ の範囲内にあることが分かる。

以上の結果から、電界強度が $0.3E_b$ の範囲（使用電界強度はこの範囲内に含まれる）においては、 ρ_E と E の間には

$$\rho_E = KE^{1.7} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (2)$$

の関係のあることが分かる。ただし、試料が異なっても E の依存性は同じであるが、材料によって ρ_E の大きさは異なる。したがって、 K は材料によって定まる定数である。一般に ρ_{min} が大きくなると、 K の値が大きくなる傾向を示している。

B. Pb を添加した試料

図 5 に Pb を添加して T_c を 100°C より高くした、各種試料の抵抗率 ρ_E と電界強度 E との関係を示した。一般に Pb を添加した試料の ρ_{min} は Sr を添加した試料のそれより大きいものが多い。この場合の ρ_E は E のほぼ 1.9 乗に比例している。すなわち、図 3 および図 4 の Sr を添加した試料と同様に、電界が $0.3E_b$ より小さい範囲では、

$$\rho_E = KE^{1.9} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (3)$$

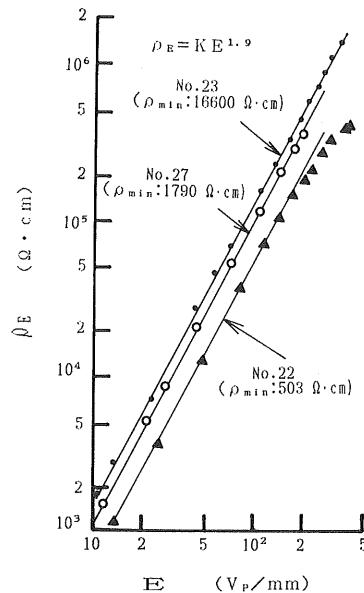


図 5 Pb を添加した試料の抵抗率 ρ_E と電界強度 E との関係

Fig. 5 Relation between resistivity ρ_E and applied electrical stress E of specimen with Pb.

の関係が満たされている。 K は材料によって定まる定数である。

C. 抵抗率の低い試料

図 6 に最低抵抗率 ρ_{min} が 6.6 から $7.5 \Omega \cdot \text{cm}$ と特に低い試料の ρ_E-E 特性を示した。 ρ_E は E のほぼ 1.5 乗に比例している。この場合は試料数が少ないので、これらの特性を明白にすることはできないが、参考までに

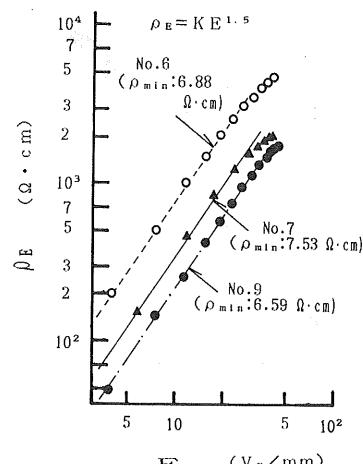


図 6 抵抗率の低い試料の抵抗率 ρ_E と電界強度 E との関係

Fig. 6 Relation between resistivity ρ_E and applied electrical stress E of low resistivity specimen.

示しておく。

D. ρ_E - E 特性

上述の結果から、破壊電界強度 E_b の 30% 以下の電界強度（使用電界強度の上限は勿論この範囲内に含まれる）においては ρ_E と E との間に次の関係が成り立つ。

$$\rho_E = KE^n \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (4)$$

ただし、 n は、キュリー温度 T_c を調整するために添加した元素によって異なり、次のような値となる。また、 K は材料によって定まる定数である。

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Sr を添加した試料} & n=1.7 \\ \text{Pb を添加した試料} & n=1.9 \\ \text{抵抗率の特に低い試料} & n=1.5 \text{ (参考)} \end{array} \right\} \quad (5)$$

4. 抵抗率 ρ_E の簡易推定法

4.1 ρ_{min} に対応する電界強度 E_{min}

周囲の空気温度が 20°C における PTC の ρ_E は電界強度 E の n 乗に比例する。ただし、 n は、Sr を添加した試料では 1.7、Pb を添加した試料では 1.9 となる。この比例関係が抵抗率の低い、最低抵抗率の ρ_{min} まで成り立つものと仮定すると、 ρ_{min} に対応する印加電界強度 E_{min} を定義することができる。

この印加電界強度 E_{min} は次のような手順で求める。すなわち、各試料の実測 ρ_E - E 特性が比例的である E の比較的低い範囲のデータを使用する。このデータの ρ_E は E に対して(4)式に示したように n 乗に比例する。今、任意の基準電界強度 (V/mm 波高値) を定め、この値を E_0 とし、この電界強度における抵抗率を ρ_0 とすれば、電界強度 E_{min} は次式で計算できる。

$$E_{min} = E_0 \times (\rho_{min}/\rho_0)^{1/n} \quad (\text{V/mm}) \quad (6)$$

例えば、基準電界強度 E_0 として、10 V/mm (波高値) を定め、この電界強度における抵抗率 ρ_0 をデータから読み取り、これらの値と低電圧試験で求めた ρ_{min} とを(6)式に代入し、 E_{min} を求める。

このようにして得られた各種試料の E_{min} と最低抵抗率 ρ_{min} との関係を図 7 に示した。同図中では、Sr および Pb を添加した試料別に特性を示してある。図中の破線はそれぞれの実線の値の ±20% 値に相当している。プロットした各点はすべてこの ±20% の範囲内に入っている。この両実線を実験式として、次式が得られる。

$$E_{min} = C \rho_{min}^{0.4} \quad (\text{V/mm}) \quad (7)$$

C は試料によって定まる定数であり、

$$\left. \begin{array}{ll} \text{Sr を添加した試料では} & C=0.25 \\ \text{Pb を添加した試料では} & C=0.66 \end{array} \right\} \quad (8)$$

である。

個々の試料では電界強度 E と抵抗率 ρ との間には、(4)式に示すように $E \propto \rho^{1/n}$ の関係があるが、 E_{min} と

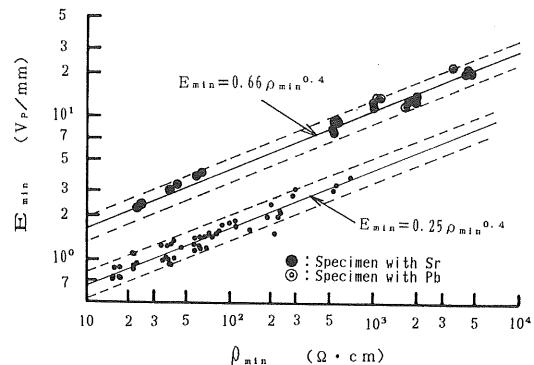


図 7 電界強度 E_{min} と抵抗率 ρ_{min} との関係

Fig. 7 Relation between electrical stress E_{min} and resistivity ρ_{min} .

ρ_{min} との関係としてみると、 ρ_{min} の指数は上述のように 0.4 乗となっている。

4.2 実用範囲での ρ_E の推定法

破壊電界強度 E_b の約 30% 程度までの範囲においては抵抗率 ρ_E は電界強度 E の n 乗にほぼ比例している。実際に印加される電界強度の上限は、前述のように 0.3 E_b 以下の範囲に十分入っている。

(4)式から

$$\rho_E/\rho_{min} = (E/E_{min})^n \quad (9)$$

が得られる。この式に(7)式を代入することにより、次式が得られる。

$$\rho_E = \rho_{min}^{(1-0.4n)} (E/C)^n \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (10)$$

なお、この式を Sr および Pb を添加した試料別に表すと、次のようになる。

$$\text{Sr : } \rho_E = \rho_{min}^{0.32} (E/0.25)^{1.7} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (11)$$

$$\text{Pb : } \rho_E = \rho_{min}^{0.24} (E/0.66)^{1.9} \quad (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (12)$$

したがって、 ρ_{min} を測定するのみで、(10)式 [あるいは(11)および(12)式] を用いることにより、各印加電界強度 E における ρ_E を推定することができる。

なお、図 7 において E_{min} が平均値の ±20% 値以上に変動している例はほとんどない。しかし、電界強度 E_{min} が ±20% 変動する値に対応する抵抗率 ρ_E の変動を考えると、Sr を添加した試料では $\pm[(1.2)^{1.7}-1]=\pm 0.36 \rho_E$ および Pb を添加したものでは $\pm[(1.2)^{1.9}-1]=\pm 0.41 \rho_E$ となり、かなりの誤差を含むことになる。

4.3 0.3 E_b における ρ_M/ρ_C

各種試料についてばらつきが一番大きくなると考えられる破壊電界強度 E_b (実測値) の 30% に当たる 0.3 E_b における抵抗率の実測値 ρ_M と計算値 ρ_C との比 ρ_M/ρ_C を求めた。この比 ρ_M/ρ_C とその試料の ρ_{min} との関係を

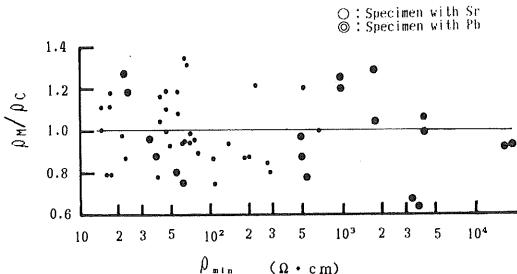


図 8 各種試料の比 ρ_M (実測値) / ρ_C (計算値) と ρ_{min} との関係

Fig. 8 Relation between ρ_M (measured value) / ρ_C (calculated value) and resistivity ρ_{min} .

図 8 に示した。なお、電界強度 $0.3E_b$ における抵抗率 ρ_M の実測値がない場合には、次のような処理を行い実測値としている。すなわち、 $0.3E_b$ に近い E で実測された ρ_E 値と(4)式から得られる $\rho_M = \rho_E(0.3E_b/E)^n$ なる関係式とから ρ_M を求め、この値を実測値として採用している。計算値 ρ_E は、(10)式 [あるいは(11)および(12)式] から、電界強度 E が $0.3E_b$ のときの抵抗率であるとして求めた値である。

図 8 からみて、両者の比 ρ_M/ρ_C は、大部分の試料において ρ_{min} の大きさに関係なく、0.8 から 1.2 の間に入っていることが分かる。したがって、PTC の ρ_{min} の測定によって破壊電界強度の 30% より低い、実際の使用電界強度の領域における抵抗率を推定することができる。

PTC の $\rho-E$ 特性を求めるには、かなりの長時間の試験が必要である。これに対して ρ_{min} は、温度を適当な速度で上昇する過程で最小の抵抗値を読みとることにより、得ることができる。したがって、 ρ_{min} を求めるには $\rho-T$ 特性を求める試験に比べて著しく短時間で、さらに温度の制御や測定も不要であるので簡便である。

5. 適用例

本研究で提案した方法によれば、 ρ_{min} の測定のみで、実際に使用される印加電圧（すなわち、電界強度）の領域での PTC の抵抗率 ρ_E が予測できる。

ここでは、実際の試料について本簡易推定法を適用した例を示す。Sr を添加した試料として No. 8 を、Pb を添加した試料として No. 22 を例にとる。温度を適当な速度で上昇する過程で得られた ρ_{min} は No. 8 試料では $108 \Omega \cdot \text{cm}$ であり、No. 22 試料では $503 \Omega \cdot \text{cm}$ であった。

ρ_{min} に対応する E_{min} を(7)および(8)式から求めると、No. 8 試料では 1.6 V/mm 、No. 22 試料では 7.9 V/mm となる。(10)式 [あるいは(11)および(12)

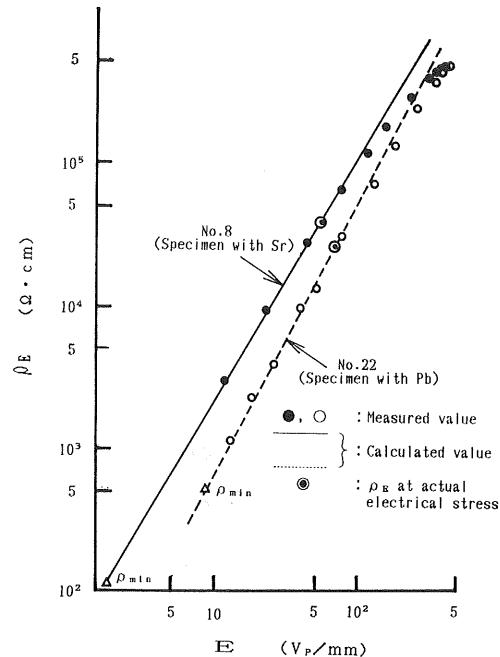


図 9 抵抗率 ρ_E の推定

Fig. 9 Estimation of resistivity ρ_E .

式] を用いることにより、各印加電界強度 E における ρ_E を推定する。

このようにして求めた ρ_E-E 特性を図 9 に示す。図中実線は No. 8 試料 (Sr を添加) の、破線は No. 22 試料 (Pb を添加) の計算曲線を示す。また、図中の△印は上述の ρ_{min} に対応する E_{min} 点を示す。図中の●、○はそれぞれ実測値を参考のために示したものである。

No. 8 試料の厚さ t は 2.55 mm で、最悪の状態で印加電圧 100 V の回路に、No. 22 試料は厚さ 4 mm で 200 V の回路に使用される。したがって、波高値で評価した使用電界強度はそれぞれ 55 V/mm ($\sqrt{2} \times 100/2.55$) および 71 V/mm となる。したがって、 100 V の回路に No. 8 試料を使用する場合には、抵抗率 ρ_E が $4 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 程度 (図中○印) で動作していることが分かる。また、 200 V の回路に No. 22 試料を使用した場合の動作点 (図中○印) は $2.8 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ であることが分かる。

上述のように、 ρ_{min} の測定のみで使用電界強度における抵抗率 ρ_E を簡単に推定することができる。

6. まとめ

前報⁶⁾の PTC の破壊電界強度の推定法につづいて、さらに静特性試験の結果について詳細な検討を行った。その結果、実際に印加される電圧の領域における ρ_E-E 特性を推定することができた。すなわち、自己加熱の伴

わないので $\rho-T$ 特性のキュリー温度 T_c に当たる最低抵抗率 ρ_{\min} の測定のみで、これが可能になった。以上、検討の経過をまとめると、次のような。

(1) 静特性試験の入力 W より求めた ρ_E-T 特性と、低い電圧で測定した $\rho-T$ 特性とは異なる。同一温度での ρ_E は ρ より著しく小さくなり、電界強度 E が高くなるに伴ってその差が極端に大きくなる。 ρ_E は電界強度が破壊 E_b の 30% より高くなると、一般にその増大率が著しく小さくなる。

(2) 実際に印加される電界強度の上限は破壊電界強度の 30% 程度以下と考えられる。この電界強度より低い電界強度の範囲では ρ_E の E 依存性が著しく大きく、また比例関係にある。この範囲での ρ_E と E との関係は、キュリー温度 T_c の調整のために添加する Sr と Pb によって異なる。Sr を添加した試料の ρ_E は $E^{1.7}$ に、Pb を添加した試料の ρ_E は $E^{1.9}$ に比例する。

(3) 各種試料の低い電圧で測定する最低抵抗率 ρ_{\min} に対応する印加電界強度 E_{\min} を求めると、添加する元素が Sr か Pb かによって、次式のように表わされる。

$$\text{Sr : } E_{\min} = 0.25\rho_{\min}^{0.4} \quad (\text{V/mm})$$

$$\text{Pb : } E_{\min} = 0.66\rho_{\min}^{0.4} \quad (\text{V/mm})$$

(4) 上式より $0.3E_b$ より低い範囲（実際に使用される電界強度はこの範囲に含まれる）での任意の電界強度

E における ρ_E は、次式より求めることができる。

$$\text{Sr : } \rho_E = \rho_{\min}^{0.32}(E/0.25)^{1.7} \quad (\Omega \cdot \text{cm})$$

$$\text{Pb : } \rho_E = \rho_{\min}^{0.24}(E/0.66)^{1.9} \quad (\Omega \cdot \text{cm})$$

この式によって、 ρ_{\min} の測定のみで実際に印加される電圧範囲における抵抗率 ρ_E を推定することができる。

終わりに、本研究を行うに当たって、PTC の試作品を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お礼申し上げます。

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，技献（1977）
- 2) P.W. Haaymann : German Patent No. 929, 350; British Patent No. 714, 935 (1952)
- 3) 佐藤利治：チタバリ系半導体 BaTiO₃ 半導体と応用(1)，p.4，技献（1977）
- 4) 上岡久芳：チタバリ系半導体 化学的立場からみた PTC サーミスタ，p.72，技献（1977）
- 5) 赤上陽出男、斎藤 宏、佐藤正志：電気学会論文誌 A, 108 (1988) 191
- 6) 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
- 7) 脇野喜久夫、藤川永生：チタバリ系半導体 BaTiO₃ 半導体と応用 (3), p.24, 技献 (1977)