厚膜抵抗体の微細構造と導電機構(Ⅱ)

Microstructure and Electrical Conduction in Thick Film Resistor(Ⅱ)

武田 義章*

1. はじめに

先に厚膜抵抗体の微細構造と、導電機構について述べた¹⁾。今回は抵抗体の微細構造を観察し、それをもとに厚膜抵抗体の電気的特性を、数学的に表現する方法について述べる。

厚膜抵抗体の電気的特性は、抵抗体を構成する導電成分とガラスの粒径、この両者の混合比、使用する基板の材質、抵抗ペーストの印刷、および焼成条件などの影響を受ける。このような影響を及ぼす因子を考慮し、その電気的特性を数学的に表わそうとする試みとしては、主にRuO₂やガラスフリットの粒径と混合比をもとにした、材料から出発する方法がある^{2)~5)}。しかし、まだ利用できるような結果は得られていないのが現状である。

ここに述べる数学的な表現は、従来の方法とは逆に、焼成された結果をもとにするとともに、抵抗体材料の抵抗値と粒径や、抵抗体と基板間の熱膨張係数の相違により生じる熱応力などのような要因をも取り込んで、議論を進めるユニークな方法である。この結果を用いると、厚膜抵抗体を構成する素材の粒径や熱膨張係数がわかれば、抵抗値と抵抗温度係数(TCR)をあらかじめ予測できる。

もちろん、厚膜技術には微粉末、ガラス、粉体混合、有機材料、焼結など学問的に泥臭いといわれている技術が、すべて使用されている。そのため厚膜で現われる現象は複雑怪奇であり、説明されている現象よりも不明な点のほうが多いのが、まだ、今の現状である。ここに述

べるのは、混沌としたカオス的な厚膜を解明するための、ひとつのトライの方法である。

2. 試料

RuO₂厚膜抵抗体の微細構造と電気的特性との関係の内で、抵抗体の抵抗値およびTCRの間の数学的な関係を調べるための材料と、その物理的・電気的特性は、Tab. 1とTab. 2に示したようなものである。

このような素材を用いた抵抗体ペーストを、250メッシュのステンレススクリーンを用いて、寸法が25.4mm×25.4mm×0.635mm、純度96%のアルミナ基板ヘスクリン印刷する。印刷後、抵抗体は炉内時間50minで、8~10minの間、800℃または850℃で焼成したものである。抵抗体の寸法は幅4mm、長さ4mm、膜厚12μm、電極はPdAgである。このような使用材料の物理的性質と焼成後の抵抗体の電気的特性に基づいて製作される抵抗体の、抵抗値とTCRの予測式を求めてみる。

3. 結果と議論

3.1 微細構造と電気的特性

2.5%HF溶液でガラス成分を除いた後、表面状態を調べた結果の一例をFig. 1に示す。参考のため、この抵抗体を使用したガラスフリットも示してある。写真で白く筋状に見える部分が導電路で、この導電路で囲まれた内部はガラスである。RuO₂量が増しガラスが減るにつれて、またはガラス粒径が大きくなると、導電路の編目状の様子ははやけてくる。

導電路に囲まれた編目の大きさを測定してみると、最初に使用したガラスの粒径が5.0μmの場合には焼成後

*Yoshiaki Taketa
日本大学/Nihon University

Tab.1 Various factors of specimens.

(1) Sample's Number	(2) Mixing Ratio RuO ₂ /Glass	(3) Glass Size (μm)	(4) Block Size (μm)	(5) Number of Glass. <i>n</i>	(6) RuO ₂ Content,s (μg/cm ²)	(7) Calculated Resistivity <i>R</i> (Ω/□)	(8) Measured Resistivity <i>R'</i> (Ω/□)
1	60/40	5.0	6.0	2	561	5.5×10^{-2}	9.2×10^0
2	60/40	3.0	3.0	4	281	5.5×10^{-2}	9.3×10^0
3	60/40	1.0	2.0	6	187	5.5×10^{-2}	9.1×10^0
4	60/40	0.5	1.5	8	140	5.5×10^{-2}	9.5×10^0
5	50/50	5.0	6.0	2	374	8.3×10^{-2}	2.2×10^1
6	50/50	3.0	3.0	4	187	8.3×10^{-2}	2.4×10^1
7	50/50	1.0	2.0	6	125	8.3×10^{-2}	2.1×10^1
8	50/50	0.5	1.5	8	94	8.3×10^{-2}	1.7×10^1
9	40/60	5.0	6.0	2	250	1.2×10^{-1}	4.3×10^1
10	40/60	3.0	3.0	4	125	1.2×10^{-1}	6.8×10^1
11	40/60	1.0	2.0	6	83.1	1.2×10^{-1}	7.4×10^1
12	40/60	0.5	1.5	8	62.3	1.2×10^{-1}	1.2×10^2
13	25/75	5.0	6.0	2	125	2.2×10^{-1}	1.8×10^2
14	25/75	3.0	3.0	4	62.3	2.2×10^{-1}	4.0×10^2
15	25/75	1.0	2.0	6	41.6	2.2×10^{-1}	1.0×10^3
16	25/75	0.5	1.5	8	31.2	2.2×10^{-1}	2.0×10^3
17	15/85	5.0	6.0	2	66.0	4.7×10^{-1}	1.7×10^3
18	15/85	3.0	3.0	4	33.0	4.7×10^{-1}	3.3×10^3
19	15/85	1.0	2.0	6	22.0	4.7×10^{-1}	1.9×10^4
20	15/85	0.5	1.5	8	16.5	4.7×10^{-1}	4.5×10^4
21	10/90	5.0	6.0	2	41.6	7.4×10^{-1}	6.5×10^3
22	10/90	3.0	3.0	4	20.8	7.4×10^{-1}	1.8×10^4
23	10/90	1.0	2.0	6	13.9	7.4×10^{-1}	1.5×10^5
24	10/90	0.5	1.5	8	10.4	7.4×10^{-1}	1.8×10^6

(2)mixing ratio of RuO₂ and glass, (3)size of starting material, (4)block size surrounded by conductive path, (5)number of glass piled up towards thickness direction, (6)RuO₂ content per unit area attached on surface of glass. Calculated by eq.(2). (7)Calculated resistivity by eq.(1) and (3), (8) Measured resistivity by experiments.

Tab.2 Symbols and these values used.

Symbol	Description	Value	Unit	Ref.
r_c	RuO ₂ particle size	0.15, 0.35	μm	
r_g	Glass particle size	1.6, 4.5	μm	
b	Resistor thickness	12	μm	
ρ	RuO ₂ resistivity	0.35	Ω·μm	31)
Q	Proportional constant	1.2×10^{-5}	Ω·g/μm ²	32)
D	Diffusion coefficient	3.12×10^{-6}	μm ² /s	33)
t	Firing time	600	s	
C_0	RuO ₂ surface density	1.0×10^{-10}	g/μm ²	34)
x	Distance	$0 \leq x \leq 0.7$	μm	
D_0	Frequency factor	2.8×10^{-4}	m ² /s	33)
E	Activation energy of diffusion	300	kJ/mol	33)
k	Boltzmann constant	8.31441	J/mol·K	
T	Firing temperature	1123	K	
T_{soft}	Glass softening temperature	600	°C	
T_{work}	Working temperature	25	°C	
A_{RuO_2}	Gaure factor of RuO ₂	2		35)
A_{glass}	Gauge factor of glass	500		36)
α_{re}	Thermal expansion coefficient of resistor	50×10^{-7}	°C ⁻¹	2)
α_{sub}	Thermal expansion coefficient of substrate	73×10^{-7}	°C ⁻¹	13)
	Glass composition	52PbO·35SiO ₂ ·10B ₂ O ₃ ·3Al ₂ O ₃

Fig. 1 SEM photographs.
(a) glass particles, (b) as-fired resistor surface, (c) etched surface.

の網目の径は平均 $6.0\mu\text{m}$, $3.0\mu\text{m}$ で $3.0\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$ では $2.0\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$ では $1.5\mu\text{m}$ のようになり、焼成前のガラス粒子の大きさに近い値である。焼成中に微小なガラス粒子は大きなガラス粒子に吸収され、大きな粒子は角や端が変形して丸みを帯びるなどの変化が起こることを考えれば、網目の大きさと抵抗体を使用したガラス粒子の大きさは、かなりよい一致を示している。

抵抗体中の導電路の太さとその数に関する違いは、Fig. 1 に示したように、最初に使用したガラスの粒子径に依存する。それ故、ガラス粒径を考慮に入れると、焼成した抵抗体中に形成される導電路は Fig. 2 のように表わすことができる。

すなわち、ガラス粒子の径が大きくなると、ガラス粒

子の粒界に生成される導電路の数は減少するが、個々の径路は太くなり、導電路が結合している場所での RuO_2 濃度はさほど高くない。しかし、ガラス粒径が小さな場合には、この逆の現象が起こる。

以上のことからわかるように、焼成でガラスの変形はほとんど起こらず、使用した粒子の粒径がほぼそのまま保たれる。そこで、厚膜抵抗体は一辺が長さ l の立方体状のガラスが積み重なり、この立方体の間に、抵抗率 $r\Omega/\square$ の RuO_2 導電層が満たされていると仮定する。このような立方体の集合体から成る厚膜抵抗体のディメンションは、Fig. 3 のように幅 ml , 長さ ml , 厚さ nl である (ここで m と n は整数)。このような抵抗体の面 ABCD から面 EFGH へ電流が流れるとき、Fig. 3 に示した一辺が l の

Fig. 2 Schematic figures in formation of conductive path. (a) large glass particle, (b) small particle.

立方体の、 $A'B'C'D'$ 面と $E'F'G'H'$ の間の抵抗値は $r/4$ であるから、立方体の集合である抵抗膜の抵抗値 R は(1)式ようになる。

$$R = r / 4 \cdot n \quad (\Omega / \square) \quad (1)$$

ガラスよりも RuO_2 の粒径は極端に小さいので、抵抗体の膜厚は、ほぼ抵抗体中で膜厚方向に積み重なった立方体ガラスの個数に等しい。たとえば n は、膜厚 $12\mu\text{m}$ の抵抗体では $l = 6\mu\text{m}$ の場合に $n = 2$ 、 $l = 3\mu\text{m}$ では $n = 4$ のようになる。

r は次のようにして求めることができる。ガラスの表面に付着する RuO_2 の量が x のとき、抵抗体の組成比 $\text{RuO}_2/\text{glass}$ は $x/(100-x)$ 、立方体状のガラスの一辺は l 、ガラスの密度は $3.74\text{g}/\text{cm}^3$ であるから、正方形状の各ガラス表面の単位面積当りに付着している RuO_2 量 s は(2)式のようにになる。

$$S = \frac{x}{6l^2 \times (100-x) / (3.74 \times l^3)} \quad (\text{g}/\text{cm}^2) \quad (2)$$

RuO_2 粒子の密度と抵抗率は $7.05\text{g}/\text{cm}^3$ と $3.5 \times 10^{-5}\Omega \cdot \text{cm}$ であるから、ガラス表面に付着する RuO_2 層の抵抗率 r は、(3)式のようにになる。

$$r = \frac{3.5 \times 10^{-5}}{S / 7.05} \quad (\Omega / \square) \quad (3)$$

これらの式から求めた R と S の値をTab. 1の欄(6)と(7)に示す。なお、Tab. 1の欄(8)は実測抵抗値 R' である。

Fig. 4 (a)にガラス表面に分布する RuO_2 濃度と、計算で求めた抵抗値 R の関係を示す。同図(b)と(c)は RuO_2 濃度と実測抵抗値 R 、およびTCRとの関係を示した。(a)と(b)にみるように、 RuO_2 濃度が減ると抵抗値はすべて同じような傾向で急激に増加する。もし $\text{RuO}_2/\text{glass}$ の比が一定なら、(a)のように抵抗値は粒径に依存

Fig. 3 Schematic illustration for resistivity calculation, (a) unit cube with the length of l , (b) resistor film structure piled up by the cube, (c) piling of cubes towards the thickness direction.

することなく、同じ値になることがわかる。

抵抗値の粒径依存性の物理的な意味は、次のように理解できる。抵抗体の形状寸法と $\text{RuO}_2/\text{glass}$ の比が一定のときには、ガラスの粒径あるいは導電路の数が変わっても、電極間に存在する RuO_2 濃度は一定である。それ故、大きなガラス粒子の場合には、数は少ないが太い導電路が形成されており、微小なガラス粒子の場合には、多数の細い導電路が形成されている。このため、抵抗値は一定に保たれている。このことはFig. 1 (b)の結果とも矛盾せず、またFig. 4 (b)のように、 RuO_2 濃度が高い抵抗体の場合でも、同図(a)にみるのと同じ傾向になる。

また $\text{RuO}_2/\text{glass}$ 比が、およそ35/65よりも大きな低抵抗体でも、抵抗体の微細構造は使用したガラス粒子にほぼ近い大きさをもつガラス粒子がFig. 3 (b)のように積み重なった状態を形成しており、このガラス粒子の間隙に、 RuO_2 粒子が鎖状に連なった導電路が形成されているようなモデルが適用できる。

ガラス粒子の表面に形成されている導電路は均一な太さであり、連続した RuO_2 粒子に粒界や種々の欠陥も無く、均質であるという理想の場合には、抵抗値は $\text{RuO}_2/\text{glass}$ の値が決まれば、ガラス粒子の大きさに関係なく常に一定の値になる。しかし実際の厚膜抵抗体では、低抵抗状態であっても、導電路の不均一性や導電粒子のガラスによる濡れなどのために、理想の場合よりも高い抵抗値を示すようになる。

Fig. 4 Relations between resistivity and TCR and RuO₂ content on glass surface.

(a) Resistivity versus RuO₂ content in theoretical case, (b) realistic case, (c) relation between experimental TCR and RuO₂ content, (d) sheet resistance versus TCR in theoretical cases.

るガラス層が問題になる。この層が薄い場合には、トンネル効果あるいはホッピング伝導などの導電機構により、抵抗値は導電性を保持することができる。しかしRuO₂粒子間に介在するガラス層の厚さが増すと、これらの導電機構による導電性は期待できない。この場合には、RuO₂とガラスの反応により、ガラスの表面に非晶質半導体的な性質をもつ反応層が形成される。この層が生成されるために、導電粒子が孤立した状態でも、抵抗値は導電性を保持することができる。

このように、絶縁体と導電体の粒子が混合した抵抗体では、抵抗値とTCRとの間に、Fig. 4 (d)のような $TCR \propto 1/R$ の関係が存在することがわかる。

3.2 導電現象の数学的表現

3.2.1 RuO₂量と抵抗値

Fig. 5の実線は、RuO₂添加量を体積分率で現わした値と、抵抗値の関係である。

RuO₂の粒径が小さく、ガラスフリットの径が比較的大きな場合、抵抗値の変化はゆるやかである。このように厚膜抵抗体を構成する材料の粒径や、使用する基板と抵抗体の熱膨張係数、焼成条件などに抵抗値は大きな影響を受ける⁶⁾。そこで、これらの要因を考慮しながら、RuO₂量と抵抗値の間の関係を数学的に表わすことを試みる。このとき、次のような仮定をする。

- 1) Fig. 6 (a)のように、ガラス母体中において一辺の長さ r_c のRuO₂立方体が均一に分散して骨格を形成し、これらRuO₂粒子の中心間の距離を r_d とする。
- 2) 電極間を結ぶ方向にRuO₂粒子が配列して形成される導電路の抵抗値は、各RuO₂立方体粒子の抵抗値と、RuO₂立方体の間にあるガラスの抵抗値が、直列

RuO₂/glassの値とガラスフリットの粒径が小さくなると、RuO₂添加量の減少と共に抵抗値は急激に増加する。この高抵抗状態では、

- 1) ガラスの混合量が同じでも、ガラスフリット粒径の大小によって、焼成後の抵抗体の膜構造にはFig. 2のような違いが現われる。
- 2) RuO₂の量が減少して、RuO₂粒子の相互接触が不可能になり、部分的に不連続な導電路が形成される。
- 3) RuO₂の量が非常に少ない場合には、ガラス中にRuO₂粒子はほぼ孤立した状態で分散している。

などのような膜構造が考えられる。

導電体が孤立した場合には、導電体成分の間に介在す

結合されたものである。

3) 図(a)のように寸法が幅 a 、厚さ b 、電極間の距離が l 、抵抗値 R であるような、電極間にある導电路の各々が、並列に接続して形成されている。

4) 抵抗体中に空隙や格子欠陥などは存在しない。

いま1本の導电路で、Fig. 6 (b)のように1個のRuO₂粒子と、2個のRuO₂粒子A、Bの間にあるガラスから成る部分を、基本抵抗体と考える。一辺が r_c で抵抗値が ρ のRuO₂立方体の抵抗値 R_c は、(4)式のように表わせる。

$$R_c = \rho_c / r_c \quad (4)$$

またRuO₂粒子間に存在するガラス部分の抵抗率を ρ_g とし、RuO₂面から距離 x だけ離れたところで、一辺が r_c 、厚さ dx の層の部分 (Fig. 6 (b)) の抵抗値 dR_g は、(5)式の

ようになる。

$$dR_g = \rho_g \frac{dx}{r_c^2} \quad (5)$$

したがって、RuO₂粒子A、B間のガラスの抵抗値 R_g は、(6)式のように表わせる。

$$R_g = 2 \int_0^{\frac{r}{2}} \frac{\rho_g}{r_c^2} dx \quad (6)$$

(1), (3)式から中心距離 r_d にある R_d は、(7)式のようになる。

$$R_d = R_c + R_g = \frac{\rho_c}{r_c} + 2 \int_0^{\frac{r}{2}} \frac{\rho_g}{r_c^2} dx \\ = \frac{\rho_c}{r_c} + 2 \frac{Q}{r_c^2 C_0} R_{glass} \int_0^{\frac{r_d - r_i}{2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) dx \quad (7)$$

(a) RuO₂ particle-size is 0.15 μm.

(b) RuO₂ particle-size is 0.35 μm.

Fig. 5 Resistance versus RuO₂ concentration.

Fig. 6 Illustration of microstructure of RuO₂ thick-film resistor.

(a) RuO₂ particles are dispersed into the glass matrix and they form a skeletal structure, (b) RuO₂ particle and glass layer, (c) change in glass particle-size after firing.

ここで,

$$D = D_0 \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \quad (7')$$

$$r_d = \left[\frac{3(1-V_c)r_c^3}{V_c r_g^3} \{ r_g(1-V_c)^{-\frac{1}{3}} - r_c \}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7'')$$

(4)式で表わされるような抵抗値をもつ抵抗体が、長さ l の導电路には l/r_d 個が直列に接続されているので、電極間を結ぶ 1 本の導电路の抵抗値は、 $R_d \cdot l/r_d$ となる。

抵抗体の寸法が Fig. 6 (a) のように幅 a 、厚さ b である場合には、抵抗値が $R_d l/r_d$ の抵抗体が、幅方向に a/r_d 個、厚さ方向に b/r_d 個並列に連結している。このために厚膜抵抗体の抵抗値は R は、(8)式のように表わすことができる。

$$R = R_d \cdot r_d \cdot \frac{l}{ab} \quad (8)$$

本試料では $a=l$ であるから(8)式は(9)式のようにになる。

$$R = R_d \cdot r_d \cdot \frac{1}{b} \quad (9)$$

厚膜や薄膜のように、基板上に形成される膜状抵抗体

がある。このため抵抗体の雰囲気温度が変化すると、抵抗の熱膨張係数 α_{re} と、基板の熱膨張係数 α_{sub} の間には相違抵抗に歪 ϵ が発生する。この歪 ϵ の抵抗値に及ぼす影響を(9)式にも考慮する必要がある。

この影響は、抵抗体に歪が加わる前後で RuO_2 粒子とガラス部分の抵抗値を、それぞれ R_{RuO_2} , R'_{RuO_2} , R_{glass} , R'_{glass} , 歪抵抗係数を A_{RuO_2} , A_{glass} とすると(10)式のように表わせる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{R_{RuO_2} - R'_{RuO_2}}{R_{RuO_2}} &= A_{RuO_2} \cdot \epsilon \\ \frac{R_{glass} - R'_{glass}}{R_{glass}} &= A_{glass} \cdot \epsilon \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

また ϵ は、抵抗体に使用したガラスの軟化温度を T_{soft} とすると、(11)式のように表わせる。

$$\epsilon = (\alpha_{sub} - \alpha_{re}) \cdot (T_{soft} - T_{work}) \quad (11)$$

(11)式を(10)式へ代入すると、(12)式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} R'_{RuO_2} &= R_{RuO_2} \cdot \{ 1 - A_{RuO_2} \cdot (\alpha_{sub} - \alpha_{re}) \cdot (T_{soft} - T_{work}) \} \\ R'_{glass} &= R_{glass} \cdot \{ 1 - A_{glass} \cdot (\alpha_{sub} - \alpha_{re}) \cdot (T_{soft} - T_{work}) \} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

(7)式と(12)式より、厚膜抵抗体の抵抗値 R は、(13)式のように表わせる。

$$R = \frac{r_d}{b} \left[\frac{\rho_c}{r_c} \{ 1 - A_{RuO_2} \cdot (\alpha_{sub} - \alpha_{re}) \cdot (T_{soft} - T_{work}) \} \right]$$

Fig. 7 Fitness between measured and calculated values, when α_{sub} is constant and α_{re} is changed from $\alpha_{rel} = 4.0 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ to $\alpha_{rel} = 11.1 \times 10^{-6}/^{\circ}C$.

Fig. 8 Fitness between measured and calculated values, when α_{re} is constant and α_{sub} is changed from $\alpha_{sub1} = 5.3 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ to $\alpha_{sub5} = 9.5 \times 10^{-6}/^{\circ}C$. (LTF ceramics; Low temperature Firable Ceramics)

$$+ \frac{2Q\sqrt{\pi Dt}}{\gamma_c^2 C_0} \{1 - A_{\text{glass}} \cdot (\alpha_{\text{sub}} - \alpha_{\text{re}}) \cdot (T_{\text{soft}} - T_{\text{work}})\} \int_0^{\frac{T_{\text{re}} - T_{\text{c}}}{2}} \exp\left(\frac{x^2}{4Dt}\right) dx \quad (13)$$

以上のようにして、使用した素材と抵抗値の関係を(13)式より求めることができる。次に抵抗体のTCRを計算により求めることを試みる。

3.2.2 抵抗値とTCRの関係式

Fig. 7 は、ごく平均的な熱膨張係数 $\alpha_{\text{sub}}=7.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ をもつ純度96%のアルミナ基板上に、抵抗体の熱膨張係数 α_{re} が異なる抵抗体を形成した場合の、抵抗値 R とTCRとの関係である。またFig. 8 は抵抗体の α_{re} が一定で、材質の異なる基板を使用した例である。このようにRuO₂厚膜抵抗体の R とTCRの間には、抵抗体の組成と使用する基板の材質が同じであれば、前述のように、ほぼ反比例のような関係がある。

そこで R とTCRの間に、

$$TCR = X + \frac{Y}{(\log_{10} R + Z)^n} \quad (14)$$

の関係を仮定した。(14)式で X , Y , Z , n は定数である。

よく知られているように、厚膜抵抗体と基板の熱膨張係数の相違で生じる内部応力の大小により、 R -TCRの関係は種々変化するが、この応力の影響は(14)式の X , Y , Z , n に含まれるとする。

熱膨張係数の相違が、抵抗体の電気的特性に関係するのは、次の2つのような場合である。

(1)材質の同じ基板に、メーカーや抵抗体の種類やサイズの異なる厚膜ペーストを使用したような場合であり、これは基板の熱膨張係数 α_{sub} が一定で、厚膜抵抗体の熱膨張係数 α_{re} が変化する場合である(厚膜抵抗体中で量的に多い成分はガラスであり、これに超微粒子の導電体が分散して相互接合することで導電路が形成されるとともに、膜は基板に付着する。このため α_{re} と α_{glass} はほぼ等しいとみなしてよい。そこで抵抗体に使用したガラスの α_{glass} の値を抵抗体の α_{re} とする)。

(2)同じ抵抗体でも、使用した基板の材質が違う場合である。これはアルミナの純度が違う場合とか、低温焼成基板、厚膜多層構造の製作のような例が相当し、 α_{re} が一定で α_{sub} が変化する場合である。

(1)の例がFig. 7 である。これは $\alpha_{\text{sub}}=7.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ で、 α_{re} が $\alpha_{\text{re1}}=4.0 \times 10^{-6}$ から $\alpha_{\text{re7}}=8.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ まで変化した場合の実測値が実線で示してある。(2)の例がFig. 8 である。抵抗体の α_{re} が平均的な $7.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ で、 α_{sub} が $\alpha_{\text{sub1}}=5.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ から $\alpha_{\text{sub5}}=9.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ まで変わる場合の実測値が実線で示してある。

Fig. 7 のように異なる α_{re} をもつ各抵抗体の R -TCR曲

Vol.7, No.4

線に、(14)式が適合するように定数を求めた。その結果は(15)式のようなものである(もし求め方に興味のある方は文献7を参照してください)。

$$X = -7500 - 4.2 \times 10^9 \alpha - 6.4 \times 10^{14} \alpha^2 \quad (15-1)$$

$$Y = 7800 + 3.4 \times 10^9 \alpha + 4.3 \times 10^{14} \alpha^2 \quad (15-2)$$

$$Z = 0.15 \quad (15-3) \quad (15)$$

$$n = 0.17 - 7.5 \times 10^4 \alpha + 9.4 \times 10^9 \alpha^2 \quad (15-4)$$

$$\alpha = \alpha_{\text{re}} - \alpha_{\text{sub}} \quad (15-5)$$

(15)式のうちで、(15-1)に含まれる定数-7500は使用したガラスのTCR, (15-3)は $\log R_0 = -Z = 0.15$ より $R = 0.7$ となり、この値は100%RuO₂焼結体の抵抗値に相当する。

この(15)式の各々を(14)式へ代入し、種々の α_{re} と α_{sub} について計算した結果が、Fig. 7, 8 にみる点線である。Fig. 7 の α_{sub} が一定の場合も、Fig. 8 の α_{re} が一定の場合にも、ともに測定値と計算値はよい一致を示している。

次に(14)式の有効性を確かめるため、現在注目されているAlN基板へ形成した厚膜抵抗体の場合と、アルミナ基板へ印刷された抵抗体が、繰り返し焼成された場合について(14)式を適用してみる。

AlN基板の α_{sub} は約 $4.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ である。この基板へ α_{re} が $4.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ の抵抗体を形成した場合の実測値が、Fig. 9 の実線である。(14)式と(15)式の定数を用いて、各抵抗値 R に対するTCRを計算した結果が、同図の点線である。

Fig. 9 Fitness between measured and calculated values, when α_{re} of the glass for AlN and α_{sub} of AlN are used. Broken line is drawn by extrapolation of measured data.

厚膜抵抗体を繰り返し焼成し、各焼成毎の抵抗値とTCRを測定した結果をTab. 3に示す。また10回の再焼成による抵抗値とTCRの変化の様子を示したのがFig.10である。このように変化はR-TCR曲線に沿って現われる。この結果にみるように、繰り返し焼成後の抵抗値がわかれば、(14)式を計算することによりTCRを知ることができる。われわれの経験によると、 α_{re} 、 α_{sub} がFig. 7およびFig. 8のような範囲にあれば、(14)式の定数に(15)式を使用すると、実測値と計算値はほぼ一致する。

以上述べた結果を要約してみると、厚膜抵抗体に使用する素材の物理的性質や焼成条件がわかると、この素材と条件により製作される抵抗体の抵抗値は(13)式から知ることができ、このような抵抗値に対してTCRも(14)、(15)式より予測できる。このような計算をすることにより、どのような特性をもつ抵抗体ができあがるのかを知ることが可能である。

☆

☆

厚膜抵抗体の製作は、従来から経験と勘に頼っていた。しかし優れた電気的特性をもつ抵抗体を得るためには、抵抗体の物性的な性質、たとえば微細構造や内部応力などのような事柄を詳しく知っておく必要がある。そしてこのような物理的特性をもとにして、厚膜抵抗体の電気的特性を数学的に表現して抽象化し、その結果を考察・検討することが必要である。このような検討結果を用いて、抵抗体の製作、改良、そして実装技術の改善に対する足がかりを得ることができる。

ここに述べた数学的な表現はかなり複雑なものであり、式の内容もまだ充分把握できていない。そこで、この後さらに式の内容を理解するとともに、より簡潔な式による表現を求めて、研究を進める必要がある。

Fig.10 Fitness between measured and calculated values in the case of refiring.

参考文献

- 1) 武田：HYBRIDS, Vol.5, No.1, p.2 (1989)
- 2) D. H. Smith and J. C. Anderson：Thin Solid Films, Vol. 71, p.79 (1980)
- 3) P. S. Ewen and J. M. Anderson：J. Phys. D, Vol.14, p.2253 (1980)
- 4) D. H. Smith and J. C. Anderson：Phil. Mag. B, Vol.43, p. 797 (1981)
- 5) R. W. Vest and B. S. Lee：Proc. IMC 1990, p.83
- 6) O. Abe and V. Taketa：Active and Passive Elec. Comps., Vol.13, p.67 (1988)
- 7) 阿部、武田：電気学会論文誌A, 109巻, p.172 (1989)

Tab. 3 Fitness between measured and calculated values in the case of refiring.

Firing Cycle	$\alpha_{re}=50 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$			$\alpha_{re}=73 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$			$\alpha_{re}=108 \times 10^{-7} / ^\circ\text{C}$		
	Measured		Calculated	Measured		Calculated	Measured		Calculated
	R	TCR	TCR	R	TCR	TCR	R	TCR	TCR
1	0.116	+125	+91	0.579	-375	-386	4.80	-1050	-1066
2	0.118	+120	+89	0.805	-400	-419	7.90	-1130	-1122
3	0.119	+120	+88	1.11	-435	-450	12.1	-1185	-1168
4	0.118	+115	+90	1.27	-450	-463	15.3	-1200	-1192
5	0.121	+110	+87	1.39	-465	-471	20.2	-1210	-1220
6	0.126	+110	+83	1.50	-475	-478	26.1	-1230	-1245
7	0.132	+110	+78	1.53	-480	-480	32.1	-1270	-1265
8	0.134	+105	+77	1.58	-485	-483	38.2	-1295	-1282
9	0.137	+105	+75	1.63	-490	-485	44.6	-1300	-1296
10	0.139	+100	+73	1.71	-500	-490	50.8	-1300	-1308

(Unit : R : kΩ/□ : TCR : ppm/°C)