

自己温度制御形面状発熱体の温度分布*

反町嘉夫**, 津端一郎**, 宮内信之助**, 大石安治**

Temperature Distributions for Planar Heaters with Self Control Temperature

Yoshio SORIMACHI, Ichiro TSUBATA, Shinnosuke MIYAUCHI and
Yasuharu OHISHI

For planar heaters with self control temperature, the quantitative influences of PTC characteristics and thermal parameters on the temperature distribution and electrical characteristics are discussed. The main results obtained are summarized in three points as follows;

(1) For the temperature distribution, the results of the numerical calculations using one dimensional thermal model were in good agreement with the experimental results.

(2) The product of thickness and thermal conductivity and the distance between electrodes have strongly influence on inhomogeneous temperature distribution. And then we obtain the improvement conditions for inhomogeneous temperature distribution.

(3) In order to improve the temperature distribution, laminating heater element together with metal plate is effective equivalently. This improvement does not degrade the self control temperature characteristics.

1. ま え が き

従来、電気を熱源として利用した発熱体は、その取扱いの簡便さや制御性の良好さ、不純物の発生がないこと等の利点で、広い分野で利用されている。しかも近年では面状発熱体が以下に述べるような特質を備えるため、表1で示すように家庭電気製品を始めとして、多くの機器に組込まれつつある^{1,2,3)}。面状発熱体は発熱面積が大きく、大面積発熱体に特に有利である。しかも発熱体の面積が広くとれることは、同一電力ではより低い熱源温度が可能になることを意味する。これにより、例えば発熱体の絶縁材料等の発熱体に附随する材料の選択が容易になり、又、発熱面が均一な温度分布を保てることとなる。さらに面状のため、薄形発熱体としての利用も期待される。

ところで最近、これらの面状発熱体にも素材に強い正の抵抗温度特性 (PTC 特性) を持たせ、自己温度制御機能を兼ね備えた面状発熱体が強く要望されている。それは定温度発熱もさることながら、過熱防止への安全性や温度上昇の立上りの早さからであろう。しかし通常の状態では PTC 特性に起因して、発熱体内に非常に不均

一な温度分布を生ずる^{4,5,6)}。しかもこの不均一性が発熱体内の電位分布に大きく影響し、ひいては熱出力の低下や温度制御性に悪影響を与え、その安全性が心配される。従って、自己温度制御機能を持たせることにより、逆に面状発熱体としての前述の特質が損われる結果にもなりかねない。

以上のような観点から、ここではこの種の面状発熱体の温度分布や電気的特性が素材の抵抗温度特性や熱的パラメータでどのように影響されるかを定量的に検討し、またその低減化をはかるための方策について検討した。

表1 面状発熱体の利用箇所

家庭電気製品

フロアヒータ、鏡の曇り止め、ミニパネル、電子アソカ、足温器、各種マット、衣袋ボックス、靴乾燥器、ヒートブーツ、パネルヒータ、ホットウエア、酒燗器、水ペット、ビデオデスク結露防止

建築、家屋

融雪板、ルーフヒータ、水道管凍結防止、カウンタヒータ、便器凍結防止、床暖房

産業、交通、通信

温調用タンク、擦染台、パラボラアンテナ結露防止、写真現像バット、道路標識、複写機、融雪形交通信号灯器

農業、畜産

豚舎の床ヒータ、育苗器、ブドウ防寒マット

*原稿受付 昭和58年3月30日

**長岡技術科学大学 (長岡市富岡町字長峰1803-1)

2. 自己温度制御の原理と実際の温度分布

発熱体の抵抗値を R (Ω), 印加電圧を V (V), 放熱係数を C (W/ $^{\circ}\text{C}$), 周囲温度を T_0 ($^{\circ}\text{C}$) とすれば, 発熱体はある温度 T ($^{\circ}\text{C}$) で(1)式で表わされる熱平衡状態にある⁷⁾.

$$V^2/R = C(T - T_0) \quad (1)$$

ただし発熱体の温度は一樣であるとする. これらのことをふまえて, PTC 特性を持った発熱体が自己温度制御することを図1を用いて以下簡単に説明する.

図1は印加電圧, 放熱係数共に一定で, 周囲温度が T_{01} から T_{02} に上昇した時の(1)式の関係を示したものである. 今, 同図中(1)の直線で表わした通常の発熱体(PTC 特性を持たないもの)では, 周囲温度が T_{01} の時に発熱体の温度は交点 a における T_1 の温度であり, 周囲温度が T_{02} に上昇すれば, ΔT の温度上昇を示す. 一方, 同図中, 曲線(2)のような PTC 特性を持った発熱体では, 周囲温度が T_{02} に上昇した場合でも, 発熱体の温度は点 c における T_2' にとどまり, 温度上昇は $\Delta T'$ に抑制され自己温度制御がなされる. この自己温度制御性は, 発熱体の抵抗温度特性(曲線(2))が急峻であるほど良好になるのは明らかである. なお, ここでは周囲温度が変化した場合を考えたが, 放熱係数, 印加電圧が変化した場合も同様に考えることができる.

以上は発熱体の温度が一樣であると仮定した場合であるが, 実際には発熱体内に温度分布が存在する. 特に強い PTC 特性を持った面状発熱体では電極間方向にのみ不均一な温度分布となる. 図2に一例を示すように, 印

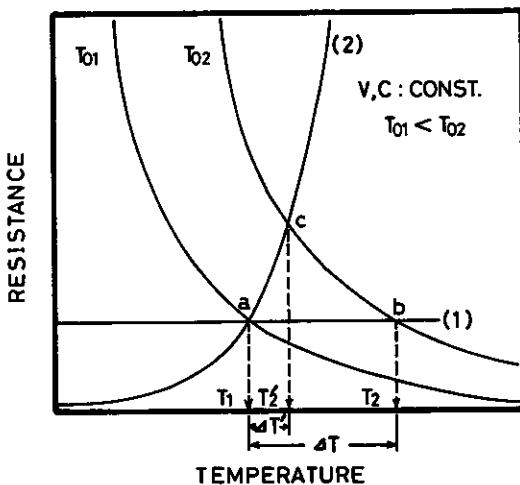


図1 自己温度制御の原理説明図

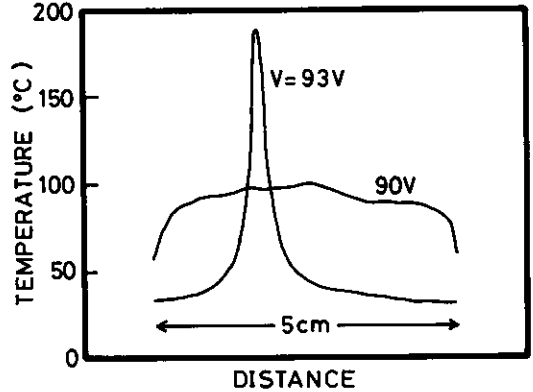


図2 温度分布の一例

加電圧が低い場合は比較的均一な温度分布でも, 印加電圧が高くなるに従い, 極端な温度分布を示すようになる. この極端な温度分布は電極間方向にのみ生ずるので直列モデルで考えれば, その原因は以下のように考えられる⁴⁾.

印加電圧により発熱体が加熱した時, 発熱体のある部分は何らかの原因で(例えば発熱体の中央部が放熱係数の場所による違いで)他の部分より高温になると, その部分の抵抗値は PTC 特性に起因して, 他の部分の抵抗値より大きくなる. このため高温部分に印加電圧の大部分が集中し, さらに温度上昇を引き起すという正帰還が働き, 増々高温になる. その結果, 図2で示したような非常に不均一な温度分布になる.

従って, この種の発熱体の動作を定量的に取り扱うには従来の発熱体温度を一樣と仮定した(1)式では不十分であり, 素子内温度分布を考慮した取り扱いが必要となる.

3. 温度分布の解析

解析において図3のような発熱体素子の形状モデルを考え, また表2で示した諸記号を導入する. 図3において W 方向の温度分布を一樣とみなし, X 方向のみについて一次モデルを考慮すれば, 式(2)の熱平衡微分方程式が導かれる⁴⁾.

$$\partial \lambda (d^2 T / dx^2) = 2h(T - T_0) - I^2 \rho(T) / W^2 \quad (2)$$

ここで $\rho(T)$ は温度依存性のある発熱体の面積抵抗値であり, カーボン樹脂系の素材では多くの場合式(3)で近似できる⁸⁾.

$$\rho(T) = \rho_g \{1 + \exp B_2(T - T_g)\} \quad (3)$$

ここで T_g は素材のガラス転移点温度, ρ_g は $T \ll T_g$ でのシート抵抗値, B_2 は $T \gg T_g$ での抵抗温度係数であ

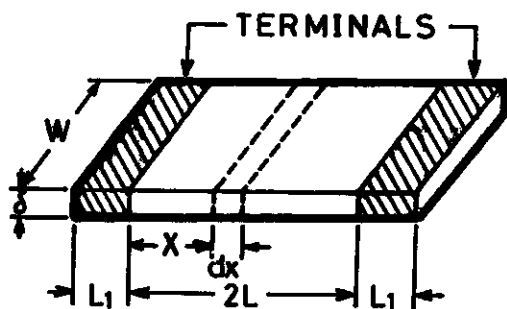


図3 発熱素子の形状モデル

表2 使用記号の定義

記号	意味	単位
λ	熱伝導率	$W/m \cdot ^\circ C$
h	平均熱伝達率 ¹¹⁾	$W/m^2 \cdot ^\circ C$
$2L$	電極間距離	m
L_1	電極幅	m
δ	厚さ	m
T_0	周囲温度	$^\circ C$
$\rho(T)$	面積抵抗値	$\Omega/\square$
I	電流	A
V	印加電圧	V
R	全抵抗値	Ω
$T(x)$	素子内温度分布	$^\circ C$
x	長さ	m

る。境界条件は試料の対称性および電極温度を一樣とし、リード線からの放熱を無視して、それぞれ(4)、(5)式で与えられる。

$$dT/dx|_{x=L_1}=0 \quad (4)$$

$$W\delta\lambda(dT/dx)|_{x=0}=2hWL_1(T|_{x=0}-T_0) \quad (5)$$

以上を数値解析し、素子内温度分布が求められる。さらに印加電圧 V は次式で与えられる⁹⁾。

$$V=(I/W)\int_0^{2L}\rho(T)dx \quad (6)$$

従って、あらゆる電流 I につき(2)式を解いて、それに対応する印加電圧 V を(6)式から計算すれば、この素子の電圧電流静特性も得られる。

以上のような数値解析で求めた自己温度制御形面状発熱体の電圧電流静特性の一例を図4に示す。同図では素子の熱伝導率 λ と厚さ δ の積、 $\delta\lambda$ をパラメータとしているが、この値により素子の電圧電流静特性曲線の形状が大きく変化することが分る。即ち、 $\delta\lambda$ が $0.00013 (W/^\circ C)$ と小さな値の場合には、特性曲線は電流ピーク点を過ぎると急激に電流が垂下しており、実際の場合とよく

一致する⁹⁾。一方、 $\delta\lambda$ が $0.007 (W/^\circ C)$ に増加した場合には、同図中点線で示す素子温度を一樣として式(1)より計算した結果とほぼ一致する。この結果から素子の熱伝導を高めることにより、素子内の温度分布を均一化できることが予想される。

図4中、○印の点は、素子中央部温度が $150^\circ C$ となる動作点である。この動作点における素子内温度分布を図5に示す。同図より明らかのように、 $\delta\lambda$ が $0.00013 (W/^\circ C)$ の場合の温度分布曲線は、図2で示した実際の温度分布曲線に類似して、非常に不均一なものである。

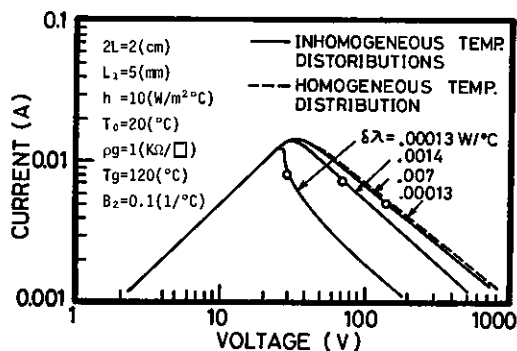


図4 電圧電流静特性(計算値)

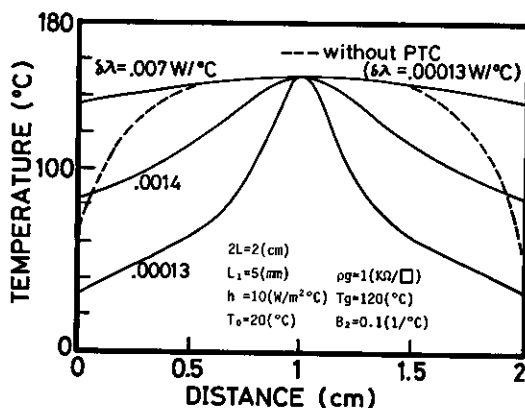


図5 温度分布(計算値)

一方、 $\delta\lambda$ が $0.007 (W/^\circ C)$ の場合には、図4の電圧電流静特性曲線からも予想されたように、素子内温度分布が大幅に均一化されている。これに対し、温度依存性のない抵抗値を持つ通常の抵抗体では、図5中、点線で示すように、 $\delta\lambda$ が $0.00013 (W/^\circ C)$ の場合でも極端な温度分布を示していない。従って、これら両者の差異は明らかに素子の抵抗温度特性の違いによるものと考えられる。

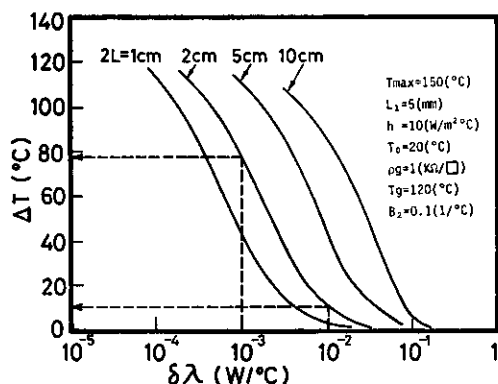


図6 温度分布の不均一性(計算値)

$\delta\lambda$ と同様の温度分布の不均一性への影響が電極間距離 $2L$ にもみられる。 $2L$ をパラメータとし、 $\delta\lambda$ に対する温度分布の不均一性を計算した結果を図6に示す。ここで縦軸の ΔT とは、素子中央の最高温度と電極温度との差を表わし、図5の場合と同様に素子中央部温度が 150°C の動作点で比較したものである。同図より、電極間距離が一定の場合、素材の熱伝導率が大きくなるほど ΔT は小さくなり、温度分布の不均一性が改善されること、そして電極間距離が短いほど、この効果は大きいことなどが分る。例えば同図中、点線で示すように、 $2L$ が 2cm では、 $\delta\lambda$ が $10^{-3} (\text{W}/^{\circ}\text{C})$ のときの温度差は約 80°C あるが、 $\delta\lambda$ を $10^{-2} (\text{W}/^{\circ}\text{C})$ 以上に増加すれば、その温度差を 10°C 以下に改善できることが計算から予想される。

4. 温度分布の改善と自己温度制御性

前章において不均一な温度分布を改善するには素子の熱伝導を高めることが有効な手段であることが分った。そこでこの章では素子の熱伝導を等価的に高めた面状発熱体を試作し、その温度分布を実測して温度分布均一化の効果を確める。また、この手法で不均一な温度分布を改善しても、自己温度制御機能が何ら損われないことも

合せて述べる。

発熱素子は大きさ $3 \times 5\text{cm}$ のカーボン・樹脂系素材のカーボンブラック・グラフトポリマ^{3,9,10)}を用い、電極間距離が 2cm となるよう、幅 5mm の電極を銀ペーストで付けたものを用いた。この発熱素子の熱伝導を等価的に高めるため、裏側に絶縁フィルムを介して金属の均熱板を貼った。このような試料の等価的 $\delta\lambda$ および抵抗温度特性の各パラメータ値をまとめて表3に示す。

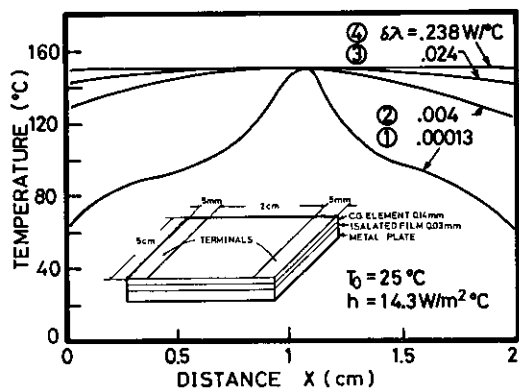
図7 $\delta\lambda$ による温度分布の変化(実測値)

図7は赤外線放射温度計を用いて、これらの試料の温度分布を測定した結果である。同図より、等価的 $\delta\lambda$ を増加すれば、図5で解析したと同様に温度分布の均一化がなされることが明らかである。

図8は図6の場合と同様に、 $\delta\lambda$ に対する温度分布の不均一性を実測値と計算値で比較したものである。同図より明らかのように、実測値は計算値に極めて一致している。従って、第3章で述べた解析方法は妥当なものであり、又図6の結果は自己温度制御面状発熱体における温度分布の均一化条件の設計に有用なものと考える。

次に均熱板を貼った自己温度制御面状発熱体の自己温度制御性を検討する。ここで用いた発熱体は電極間距離 2cm で、大きさ $3 \times 10\text{cm}$ のC.G.素材の裏側に、

表3 試料の各種パラメータ値

試料番号	均熱板の種類	熱伝導率 $\lambda (\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$	厚さ $\delta (\text{mm})$	$\delta\lambda$ $(\text{W}/^{\circ}\text{C})$	R_g (Ω)	T_g $(^{\circ}\text{C})$	B_2 $(1/^{\circ}\text{C})$
①	なし	0.93	0.14	0.00013	600	147.7	0.0471
②	アルミ箔	238 ⁽¹²⁾	0.017	0.004	733	146.1	0.0470
③	真鍮板	120	0.2	0.024	738	146.8	0.0470
④	アルミ板	238 ⁽¹²⁾	1	0.238	672	136.4	0.0458

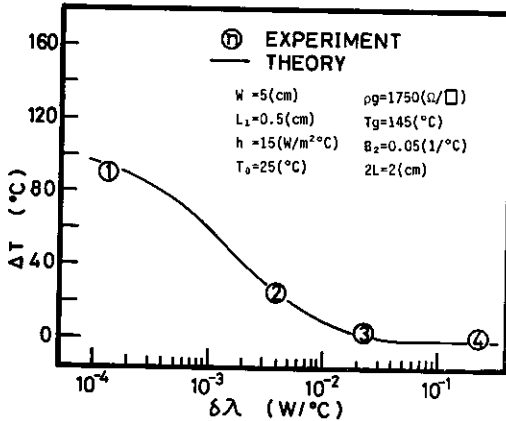


図8 温度分布の不均一性

厚さ0.15 mm のガラスエポキシ絶縁層を介して、厚さ1 mm のアルミニウム均熱板を加熱圧着したものである⁹⁾。

図9、図10は上記方法で製作した試料の、それぞれ放熱係数および周囲温度変化に対する発熱温度を示したものである。同図中の点線は PTC 特性を持たない通常の発熱体の場合であるが、これと比較し、均熱板を付加した試料では、放熱係数や周囲温度の変化に対して、発熱温度の変化が抑制されており、相変わらず自己温度制御がなされていることが明らかである。従って均熱板により、温度分布の不均一性を改善しても、自己温度制御性が大きく損われないことが分る。なお同図中の実線は、発熱体の温度を一樣として、(1)式より求めた理論曲線で

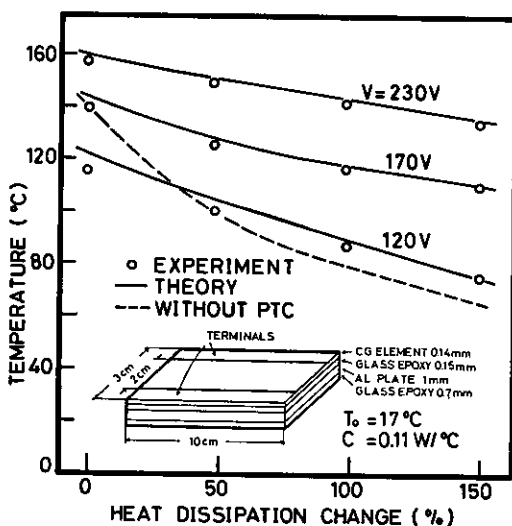


図9 放熱係数の変化に対する自己温度制御性

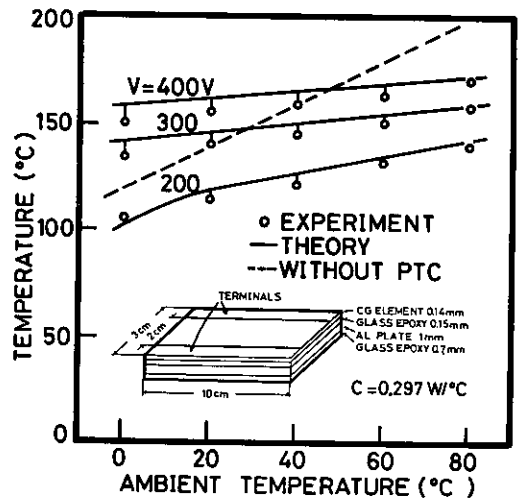


図10 周囲温度の変化に対する自己温度制御性

あるが、実測値にはほぼ一致している。従って均熱効果が充分出るような条件で $\delta\lambda$ を増加した場合には、発熱体の温度を一樣とした従来の理論式(1)が自己温度制御性を検討するための理論式として充分役立つと言えよう。

5. あとがき

強い正の抵抗温度特性を持った自己温度制御形状発熱体の温度分布や電気的特性が、発熱体素材の抵抗温度特性や熱的パラメータでどの様に影響されるかを定量的に検討し、またその均一化をはかるための方策について検討した。その結果、次の事項が明らかとなった。

- (1) 一次元モデルで数値解析した温度分布は実測値とよく一致する。
- (2) 温度分布の不均一性は素材の熱伝導、電極間距離に大きく左右される。そして温度分布の不均一性を低減するための均熱条件を求めた。
- (3) 発熱体素材に金属板を貼って等価的に熱伝導を良くすれば、不均一な温度分布が改善できる。またこの均熱化で自己温度制御性は低下しない。

なお本研究に関連し、C. G. 発熱体素材を提供戴いた、菱有工業株式会社に深謝致します。

参考文献

- 1) 大北：化学と工業，31，(27)，47 (1978)。
- 2) 大北：宮内：工業材料，27，(3)，48 (1979)。
- 3) 大北：カーボンブラックのグラフト化，ラバーダイジェスト社 (1983)。
- 4) 反町，津端：電子通信学会論文誌，J 60-C，(2)，80

- (1977).
- 5) 反町ほか: 電子通信学会技術研究報告, 81, (151), 28 (1981).
- 6) Sorimachi, Y. et al: Proceedings of the 1982 international microelectronic conference, 64 (1982).
- 7) 二木: サーミスタとその応用, 日刊工業新聞社, 18 (1980).
- 8) 反町ほか: 電子通信学会論文誌, J 61-C, (12), 767 (1978).
- 9) 津端, 反町: 電子通信学会技術研究報告, CPM 76-69, 31 (1976).
- 10) Miyauchi, S. et al: Proceedings of the 1982 International Carbon Symposium, 102 (1982).
- 11) Dwight E. Gray: American Institute of Physics Handbook, McGraw-Hill, 4~76 (1963).
- 12) William L. Everitt Ed.: Physical Design of Electronic Systems vol. 1, Prentice-Hall, 227 (1970).