

自己温度制御形面状発熱体の温度分布(2)

反町嘉夫*・岩田孝清*・津端一郎*・宮内信之助*

Temperature Distributions for Planar Heaters with Self Control Temperature (2)

Yoshio SORIMACHI, Takasumi IWATA, Ichiro TSUBATA
and Shinnosuke MIYAUCHI

The temperature distribution of a PTC planar heater with parallel structure has been investigated. Because of its parallel rather than single structure, the temperature distribution of the heater shows a peak at every two heater elements, whereas the boundary conditions of individual heater elements approach adiabatic condition with the increase in the number of parallel heater elements.

The degree of inhomogeneous temperature distribution is introduced by S value which is the standard deviation normalized by the mean value for the given temperature distribution. When the inhomogeneity of temperature distribution is valued by the S value, the value at self controlled temperature region is affected by the length between electrodes and the number of parallel heater elements. Finally, the design method for PTC planar heater with parallel structure is showed concretely.

Key words: PTC planar heater/self controlled temperature/parallel structure/temperature distribution

1. ま え が き

近年、面状発熱体¹⁻³⁾の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備えた面状発熱体が強く要望されている⁴⁾。恒温度発熱機能に加え、過熱防止の安全性や立上りの早い温度上昇特性が期待できるからであろう。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じてしまう⁴⁻⁷⁾。そこで前論文⁸⁾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、また不均一な温度分布を低減化するための方策について検討した。その結果、不均一な温度分布を改善するには、電極間隔を小さくすると同時に、熱伝導率の大きな均熱板を併用することが効果的であることを示した。

前論文での改善策は電極間隔が小さい場合にはかなり効果的である。しかし電極間隔が長い大面積の発熱体になると、この方法だけでは無理が生じる。例えば、電極間隔4cmで必要なアルミニウムの均熱板の厚

さが0.4mmのものが、電極間隔が20cmに増加すると、必要な均熱板の厚さは1cmにもなる。この1cmの厚さのアルミニウム板はPTC面状発熱体としては、非実用的な値であろう。

従って、実用範囲内の均熱板厚さで、しかも大面積の発熱体を実現するには、電極間隔の小さな発熱体を複数個並列に接続して、必要な面積を得る方法が考えられる。しかしこの種の発熱体を複数個並列にすると、今までの単体の場合と違った熱的特性を示すようになる。そこで本論文では、まず並列構造発熱体の温度分布の特長を実測と解析で示す。次に温度分布の不均一性を表す評価量を導入し、この種の発熱体での温度分布の改善法を解析と実験で検討する。最後に、実際の並列構造発熱体の設計方法についても述べる。

2. 並列構造発熱体の温度分布

図1(b)のような並列構造の発熱体において、同図(a)のような単体のものと異なる熱的特性は、まず発熱部2つ単位で温度分布のピークができることである。図2は発熱部が4つある場合の温度分布を赤外線放射温度計で測定した結果の一例である。4つの各発熱部ごとに、電極間の中心に1つの温度ピークができる訳では

原稿受付：平成元年3月24日

*長岡技術科学大学電気系

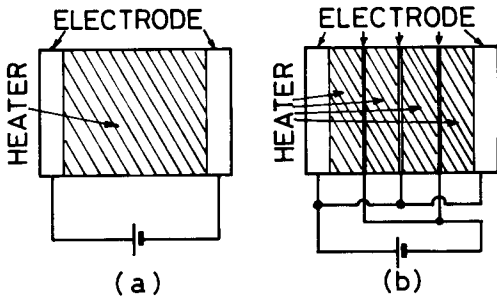


Fig. 1 (a)Single and (b)parallel structure.

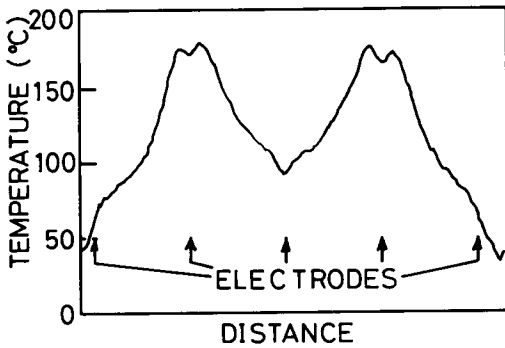


Fig. 2 Temperature distribution of a parallel structure (Measured).

なく、発熱部2つ単位で1つの温度ピークができてい
るのが分る。並列構造発熱体が単体の場合と異なる第
2の熱的特性は、各発熱部の境界条件が並列数を多く
するほど断熱条件に近づくと考えられることである。
そして断熱条件に近づくほど、素子内の温度分布は均
一化すると思われるので、並列構造による温度分布の
改善も予想される。これら並列構造発熱体の特異な熱
的特性を、数値解析によって以下検討する。

PTC特性のある面状発熱体では電流方向に温度分
布が不均一になり、それと垂直方向には均一になると
いう性質があるので、温度分布解析は電流方向に1次
元とみなすことができる⁴⁾。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1で示した
諸記号を導入する。このとき熱伝導方程式は式(1)で表
される⁴⁾。

$$\delta\lambda \frac{d^2T}{dx^2} = 2h(T - T_0) - \frac{I^2\rho(T)}{W^2} \quad (1)$$

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(2)
で表される⁴⁾。

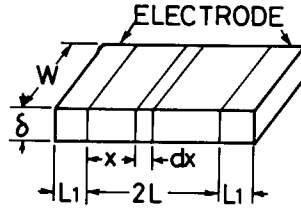


Fig. 3 Structural model.

Table 1 Definition of symbols.

記号	意味	単位
λ	熱伝導率	W/m ² C
h	平均熱伝達率	W/m ² C
$2L$	電極間距離*	m
W	幅	m
δ	厚さ	m
T_0	周囲温度	°C
$\rho(T)$	面積固有抵抗	Ω
I	電流	A
V	印加電圧	V
R	全抵抗	Ω
$T(x)$	素子内温度	°C
x	長さ	m
L_1	両端の電極長	m

*) ただし、並列構造の場合は、 L とする。発熱部2つ単位で
単体のものに相当する温度分布になるからである。

$$\rho(T) = \rho_g \{1 + \exp B_2(T - T_g)\} \quad (2)$$

ここで T_g は素材のガラス転移温度、 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
である。境界条件は電極温度を一樣とし、リード線か
らの放熱を無視して、式(3)で与える。

$$x = 0 \quad \text{で} \quad \delta\lambda \frac{dT}{dx} = 2hL_1(T - T_0) \quad (3)$$

$$x = 2L \quad \text{で} \quad \delta\lambda \frac{dT}{dx} = 2hL_1(T - T_0)$$

式(1)は右辺第2項の発熱項が T の関数となるので、
非線形の微分方程式となり、解析的手法では解けない。
従って有限要素法により数値解析した。また式(1)は発
熱項が温度に依存しているの、非定常解を計算し、
解が収束したところでその結果を定常解とした。なお、
要素は3節点、2次A要素を使用し、計算時間は100
node 以内で、10分程度であった。

解析に用いたモデルを図4に、パラメータ値を表2
に示す。モデルは①から⑦までであるが、同図には①②
③⑦だけを示してある。それぞれのモデルについての
温度分布、電圧電流特性の解析結果の一例をそれぞれ

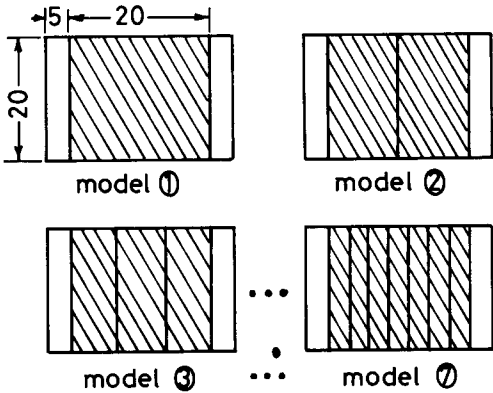


Fig. 4 Model of parallel structure.

Table 2 Value of parameter.

パラメータ	パラメータ値
L	20 mm
δ	1 mm
λ	0.13 W/m ² C
h	10 W/m ² C
W	20 mm
L_1	5 mm
R_g	100 Ω
T_s	120 $^{\circ}$ C
B_s	0.11 / $^{\circ}$ C
T_0	20 $^{\circ}$ C

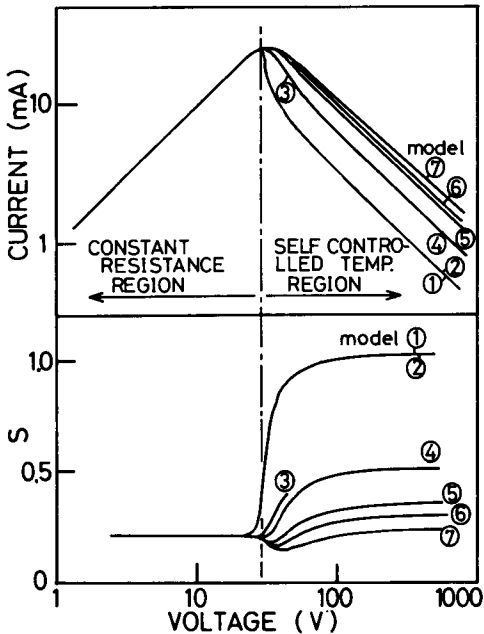


Fig. 6 Voltage-current and voltage-S value characteristics.

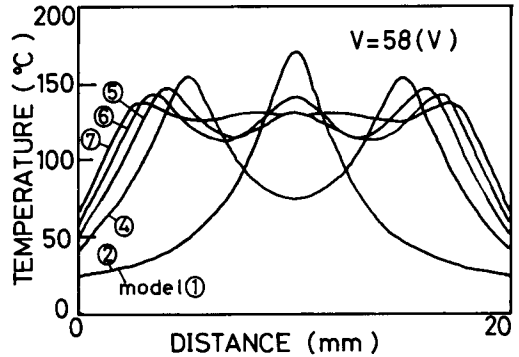


Fig. 5 Temperature distribution (Calculated).

図5、図6上段に示す。並列数が2, 4, 6のモデルでは、それぞれ温度ピークが1, 2, 3個現われており、解析においても実験と同様の結果が得られる。その理由は、温度分布の2次微係数が小さく、すなわち拡散熱流が小さくて、より低いエネルギー状態で安定するためと考えられる。また並列数が3, 5, 7のモデルでは、それぞれ温度ピークが2, 3, 4個現われているが、その出現位置は発熱部の境界上ではなく、中途半端な位置にある。従って、並列数が奇数個の発熱体は、熱的に不安定な状態になると予想されるので、好ましくない。

温度分布の不均一さという観点から図5を見ると、明らかに並列数が増加するに従って不均一さは改善されているのが分る。しかしこの不均一さをさらに詳細に検討するには、定量的な評価が必要であろう。次章でこれらを検討する。

3. 温度分布の不均一性

図5に見るような不均一な温度分布を定量的に表す評価量として次のような温度分布のバラツキ, S を新に導入する。

$$S = \frac{\sqrt{(1/2L) \int_0^{2L} (T(x) - T_m)^2 dx}}{(T_m - T_0)} \quad (4)$$

ただし、

$$T_m = \frac{1}{2L} \int_0^{2L} T(x) dx$$

すなわちこの温度分布のバラツキ S は、温度分布 $T(x)$ の平均温度 T_m のまわりの標準偏差を平均上昇温度で正規化したものである。

図6下段は前章でのモデル①~⑦について、この温度分布のバラツキ S を計算したものである。図の一定抵抗領域では、いずれのモデルも一定の S 値を示して

いる。また自己温度制御領域では、各モデルとも高電圧の領域で S 値がそれぞれ一定値に漸近している。

まず一定抵抗領域の S 値は、一定抵抗 ($\rho(T) = \text{const.}$) の場合の熱伝導方程式(1)を解き、その解について S 値を計算した場合と同じになる。式(1)を解くと式(5)が得られ、これより S 値を計算すると式(6)を得る。

$$T(x) = \frac{Q}{2h} \left\{ 1 - \frac{kL_1 \cdot \cosh k(x-L)}{\sinh kL + kL_1 \cdot \cosh kL} \right\} \quad (5)$$

ただし、

$$Q = \frac{I^2 \rho}{W^2}, \quad k = \sqrt{\frac{2h}{\delta \lambda}}$$

$$S = \frac{\beta}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{(a/2) \sinh 2\alpha - \cosh 2\alpha + a^2 + 1}}{(\alpha - \beta) \sinh \alpha + a\beta \cosh \alpha} \quad (6)$$

ただし、

$$\alpha = kL, \quad \beta = kL_1$$

式(6)には、変数は α と β しか含まれておらず、従って一定抵抗の場合の S 値は α と β (kL と kL_1) のみで決定されることが分る。モデル①～⑦については素子の全長が全て等しいので、各モデルとも同一の S 値となる。図7は、この一定抵抗領域における S 値の kL に対する変化を kL_1 をパラメータとして示したものである。

次に自己温度制御領域では各モデルとも、 S 値がそれぞれある一定値に漸近している。このそれぞれの S 値は、電極間隔と並列数の2つの要因に左右される。まず並列数1、即ち単体の発熱体の場合の電極間隔に関して以下で考察し、並列数に関しては次章で考察する。 kL_1 をパラメータとし、 S 値の kL に対する変化を計算した結果を図8に示す。なお計算では、 B_2 を0.1 [$1/^\circ\text{C}$] とし、十分高い印加電圧値で計算した S 値を、その電極間隔における一定値とした。また $kL_1 = 0$ (断

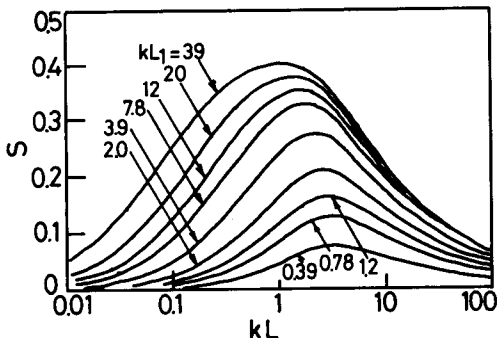


Fig. 7 S value for constant resistance region.

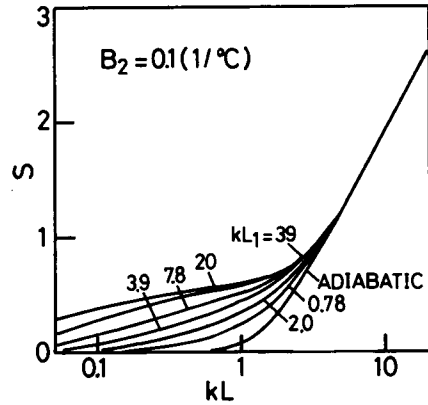


Fig. 8 S value for self controlled temperature region.

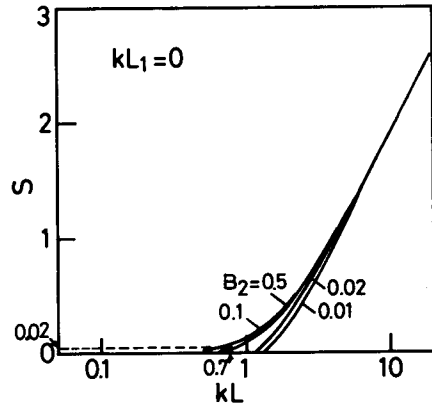


Fig. 9 S value for self controlled temperature region.

熱) の場合の S 値は、 B_2 をパラメータとして図9に示す。図8、図9ともに、 $kL = 1$ を境にして S 値の変化が急峻になっている。 $kL < 1$ の領域では、 kL の増加とともに S 値も増加しているが、その増加率は小さい。また kL_1 の変化による S 値の変化が大きいことも分る。 $kL > 1$ の領域では、 S 値の増加率が急激に大きくなり、どの曲線も1つの直線に漸近している。従ってこの領域の S 値には、 kL_1 や B_2 の影響はなく、 kL の値のみが左右している。従って、面状発熱体の自己温度制御領域での S 値は、電極間隔が素子の熱拡散距離 ($D = 1/k$) より小さい場合 ($kL < 1$) には、電極間隔と電極の長さによって決り、電極間隔が素子の熱拡散距離より大きい場合 ($kL > 1$) には、電極間隔のみによって決まることが分る。また B_2 の影響は、電極間隔や電極長さの影響に比べてはるかに小さいといえる。

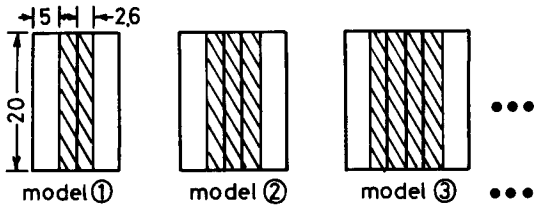


Fig. 10 Model of parallel structure.

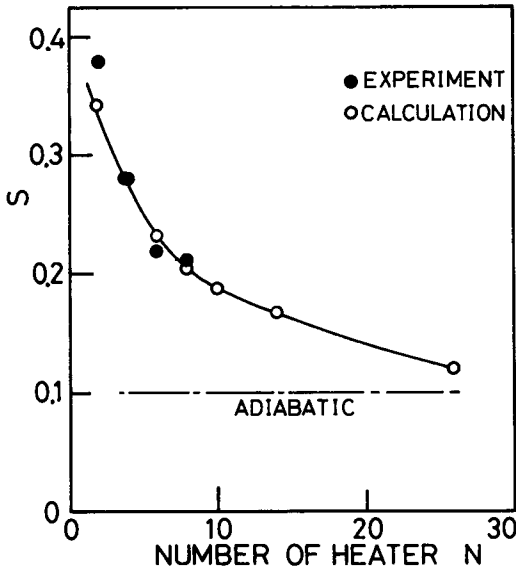


Fig. 11 Comparison between measured and calculated result for S value.

4. 並列構造による温度分布の改善

第2章の始めて述べたように、並列数が多くなると個々の発熱体の境界条件は断熱条件に近くなり、温度分布が均一になると考えられる。そこで並列数と S 値の関係を計算によって求めた。図 10 は計算に用いたモデルであり、いずれのモデルも両端に 5 mm の電極がある。その他のパラメータ値は表 2 に示す値を用いた。図 11 に並列数の異なる各モデルに対して得られた S 値を示す。同図より明らかのように、並列数の増加とともに S 値は減少し、同図中、一点鎖線で示す断熱条件に漸近することが分る。従って、比較的多い並列数の場合の S 値は、境界条件が断熱条件の単体の発熱体の値 (図 9) が使える。例えば、既にまえがきで示した 20 cm の長さの場合を検討してみる。各発熱部の電極間距離を $L = 1$ cm とすれば、並列数は 20 となり、温度分布はほぼ断熱条件を仮定できる。S 値を 0.02 (最高温度 38°C で温度差 0.5°C 以内) とすれば、図 9 に点線で示すように、 $kL = 0.7$ が読み取れ、 $k = 70$ とな

る。従って、 $k = 70$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{C}$ (平板の自然対流平均熱伝達率), $\lambda = 238 \text{ W/m}^2\text{C}$ (アルミニウムの熱伝導率) を式(5)の下式に代入して δ を求めると、 $\delta = 0.017 \text{ mm}$ となる。まえがきで示した、電極間距離 20 cm の単体の発熱体では、1 cm 厚の均熱板を必要として非現実的であったのに対し、0.017 mm 厚の均熱板でよい並列構造発熱体は、はるかに実現可能なものと言えよう。

並列数 2, 4, 6, 8 で、図 10 と同一の試料を製作し、各試料の図 2 と同様の温度分布を実測して、S 値を求めた結果を図 11 中に示す。同図より明らかのように、実験結果と計算結果は極めてよく一致していることから、本章で示した計算法およびその結果はこの種の発熱体の設計、評価に有用なものと考えられる。

5. 並列構造発熱体の設計法

第 3, 第 4 章での考察から、並列構造発熱体の温度分布の不均一性、即ち S 値を左右するパラメータは、 kL , kL_1 , B_2 および並列数 N であることが分かった。この内、パラメータ B_2 は他のパラメータに比較し、S 値への影響が少なく (第 3 章参照)、また材料の定数で固定される場合も多いので、ここでは除外し、他の 3 つのパラメータについて検討する。 kL , kL_1 , N の 3 つのパラメータによって、温度分布の不均一性、即ち S 値は変化するので、これを式(7)のように表す。

$$S = f(kL, kL_1, N) \quad (7)$$

ここで $f(kL, kL_1, N)$ は、 kL , kL_1 , N の 3 つのパラメータによって決まる関数の意味である。従って、あらゆる、 kL , kL_1 , N についてこれを計算しておけば、並列構造発熱体の設計は可能である。しかし式(7)はパラメータの数が多く、すぐ設計に役立つような簡単な図表に表すことは難しい。

ところで実際の設計では、S 値がある許容値以下になるような各パラメータの値を求める場合が多いであろう。従って S 値がある許容値に固定すれば、式(7)のパラメータ数を減らし図表化できる。以下、この方法を述べる。今 S 値の許容値を $S = 0.05$ とする。この値は、平均温度上昇が 100°C で温度分布が正弦波とすれば、その振幅が 7°C 程度の不均一さに相当する。式(7)を式(8)のように書き直す。

$$\begin{aligned} S = 0.05 &= f(kL, kL_1, N) \\ N &= g(kL, kL_1) \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)で表された N は、S 値を 0.05 以下にする最小の

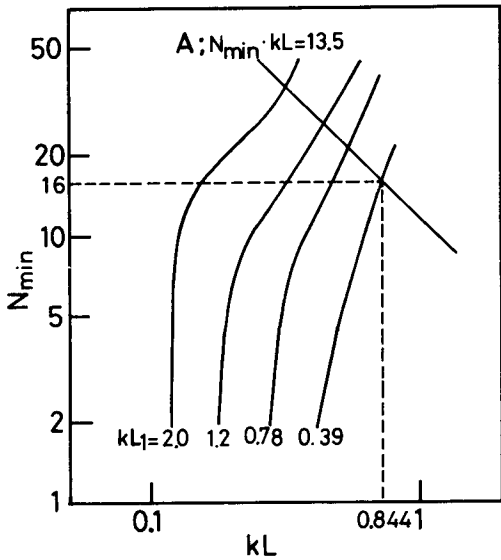


Fig. 12 The variation of N_{min} as a function of kL for kL_1 .

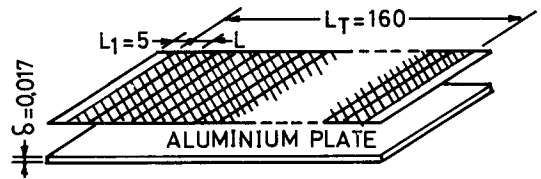


Fig. 13 Model of parallel structure.

Table 3 Value of parameter.

パラメータ	Sample ①	Sample ②
均熱板	なし	アルミ箔
N		16
L [mm]		10
L_1 [mm]		5
δ [mm]	0.13	0.017
λ [W/m ² C]	0.93	238
h [W/m ² C]		14.3
R_g [KΩ]	29.6	33.5
B_2 [1/°C]	0.0867	0.0853
T_g [°C]	112.1	108.9

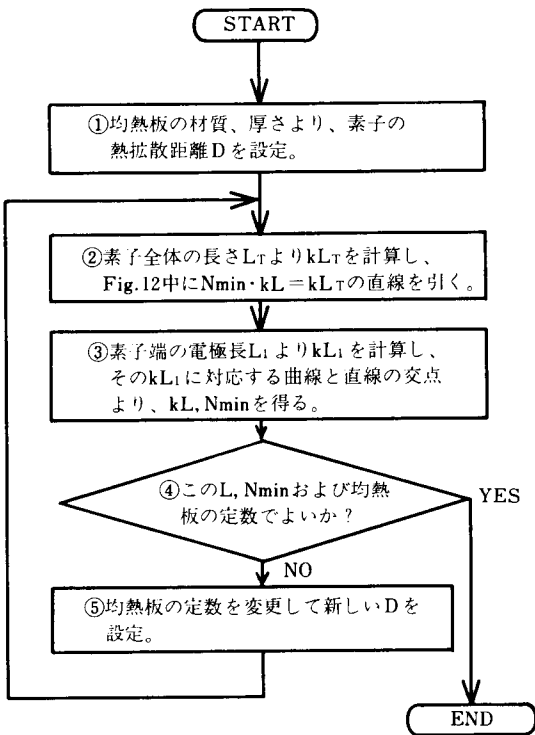


Fig. 14 Flow chart for design of parallel structure.

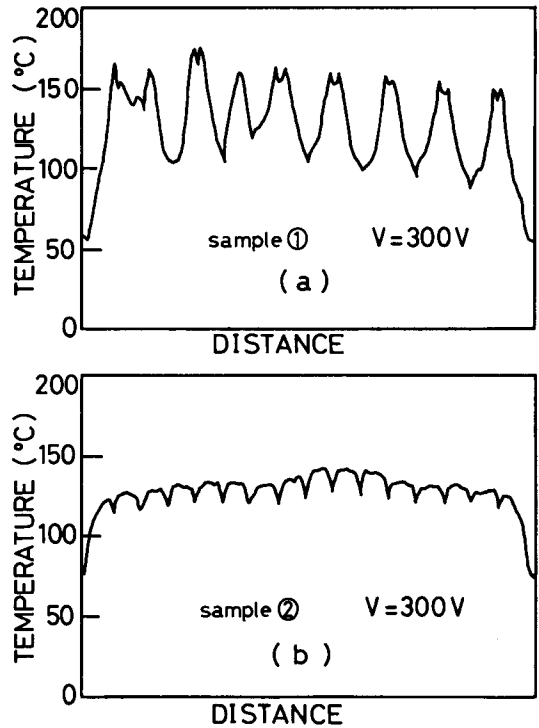


Fig. 15 Measured temperature distribution of (a)Sample① and (b)Sample②.

N であるから、この N を N_{\min} と記し、式(9)のように表す。

$$N_{\min} = g(kL, kL_1) \quad (9)$$

式(9)の関数 g は、 kL を横軸に、 kL_1 をパラメータにして、1つの図に表せる。図12に解析結果から得られた $N_{\min} = g(kL, kL_1)$ の関係を示す。この図から、 S 値の許容値を0.05以下とする kL 、 kL_1 、 N の値を全ての場合について求めることができる。以下、設計の具体例を示す。

図13に並列構造の設計モデルを示す。同図において、素子の全長 L_T が与えられた時、均熱板と並列数の設計のフローチャートを図14に示す。以下、このフローチャートに沿って説明する。

- ① 均熱板はアルミ箔とする。ゆえに、 $\delta = 0.017 \times 10^{-3} [\text{m}]$ 、 $\lambda = 238 [\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}]$ 、また $h = 14.3 [\text{W}/\text{m}^2\text{C}]$ とすれば、 $D = 1/h = \sqrt{\delta\lambda/2h} = 0.0119 [\text{m}]$ 、従って $k = 84 [1/\text{m}]$ 。
- ② $L_T = 0.16 [\text{m}]$ より、 $kL_T = 13.5$ 。図13中に直線 $A: N_{\min}kL = 13.5$ を引く。
- ③ $L_1 = 0.005 [\text{m}]$ より、 $kL_1 = 0.42$ 。0.42に近い $kL_1 = 0.39$ の曲線を選び、直線 A との交点より、 $N_{\min} = 16$ 、 $kL = 0.844$ を得る。
- ④ $N_{\min} = 16$ 、 $L = L_T/N_{\min} = 0.01 [\text{m}]$ 、 $\delta = 0.017 \times 10^{-3} [\text{m}]$ 、 $\lambda = 238 [\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}]$ が得られた。この値に決定する。

以上述べた設計例で、並列構造発熱体を実際に製作した。表3に製作した発熱体の諸定数を示す。Sample ①は比較のために均熱板のないもの、Sample ②はアルミ箔の均熱板を積層したものである。図15にこれら並列構造発熱体の温度分布を測定した結果を示す。同図(a)では不均一な温度分布になっているが、同図(b)ではかなり均一な温度分布に改善されているのが分る。なお、それぞれの温度分布には、 10°C 程度の急峻なくぼみが周期的に見られるが、これは並列電極の銀ペーシトの放射率が低いために、実際の温度より低くなっ

たものと思われる。

6. む す び

これまで述べてきたことをまとめると以下のものである。

(1) 並列構造の PTC 面状発熱体は単体のものとは違う性質が2つある。1つは発熱部が2つ単体で温度ピークが生じること、もう1つは並列数が多くなると個々の発熱部の境界条件が断熱条件に近くなる結果、温度分布の均一化が図られることである。

(2) 不均一な温度分布を定量的に表す評価量 S 値を導入した。 S 値は与えられた温度分布の平均温度のまわりの標準偏差を平均上昇温度で正規化したものである。

(3) 温度分布の不均一さを S 値で評価した場合、自己温度制御領域の S 値は、電極間隔と並列数に左右される。

(4) 並列構造発熱体の具体的設計法を示した。

なお本研究に関連し、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，宮内，大石：長岡技術科学大学研究報告，5，13 (1983)。
- 5) 反町，津端：電子通信学会論文誌，J60-C，(2)，90 (1977)。
- 6) 反町，津端，宮内，一ノ瀬：電子通信学会技術研究報告，81，(151)，29 (1981)。
- 7) Sorimachi, Y., Tsubata, I., Miyauchi, S.: Proceedings of the 1982 international microelectronic conference, 64 (1982)。
- 8) 反町，岩田，津端，宮内：電子通信学会技術研究報告，84，(38)，95 (1984)。