

## 精密抵抗体内の発熱と放熱の研究

### The Studies of Heat Transfer from Precision Resistance Device

高橋カネ子 (教育文化学部), 山田 悦郎 (鉱業博物館)

佐藤 牧夫 (アルファ・エレクトロニクス株)

Kaneko TAKAHASHI, Etsuro YAMADA, Makio SATO

#### Abstract

In this paper, the heat transfer from precision resistance device on transient behavior and steady state temperature field have been studied. The methods using in this investigation are mainly numerical simulation and a little experiment by infrared temperature measurement system.

Main results obtained in this study are as follows:

- (1) The time from switch on to steady state of temperature field is estimated about 20 sec.
- (2) At the steady state, temperature distributions of Ni foil and near region of it are almost equal value. And out side material around the range stated before are affected on properties and size of out side materials.
- (3) The attaching of heat pipe or fin decrease the temperature of its neighboring range, however best method for temperature decrease is to increase of heat transfer coefficient of full surface of device.

**Key Words:** precision resistance device, heat source, heat transfer, numerical simulation, infrared temperature measurement system

#### 1. はじめに

電子機器の発達に伴って、これらの機器は一般に小型化し高集密化の傾向にあることは周知のことといっている。これに伴って機器からは高密度の発熱を生じ、それを適切に放熱することが性能維持の重要な技術になっている。ここで対象とする精密抵抗体もその例に漏れるものではない。後述するように、この精密抵抗体の抵抗を構成するニクロム箔は優れた温度性能を有し、温度が広い範囲で変化しても抵抗が殆ど変化しない特性を持っているが、その性能を安定して維持するためには抵抗体内の温度分布を出来るだけ均等であつ常温に近く保つ方が望ましい。

この研究は上記の目的を達成するために、(1) 電力を投入後どのように抵抗体の温度が変化し定常状態にまで到達するか、(2) 定常状態の温度分布がどのようになっているか、また、抵抗体中の温度分布に影響を与える要素と温度分布を出来るだけ均等にする手段、を主に数値シミュレーションによって検討し、更に、赤外線温度計

を使用してシミュレーションの妥当性を確かめる実験も加え考察を行ったものである。

[主な記号]

$c$  : 比熱容量 [J/(kgK)]

$T$  : 温度 [°C]

$a$  : 熱伝達率 [W/m<sup>2</sup>K]

$\kappa$  : 温度伝導率 [m<sup>2</sup>/s]

$\lambda$  ; 熱伝導率 [W/(mK)]

$\rho$  : 密度 [kg/m<sup>3</sup>]

$\tau$  : 時間 [s]

添字

b : 基板, d : 抵抗体底面, e : エポキシ樹脂, g : シリコンゴム, n : ニクロム箔, p : ポリイミド被覆, s ; 周囲または抵抗体側面, u : 抵抗体上面

#### 2. 抵抗体と物性

本研究で検討する金属箔抵抗体 (金属箔部分のみ) の

代表的な例を平面図で示すと図1のようである。即ち、同一幅の箔が同じ間隔で多数並べられ、それらを上下にあるU字型の回路で接続して所要の抵抗値を得るように構成されている。今、図のS-Sに示される部分で断面を取り、上に述べた幾何学的な箔の配置を考えると、熱的に温度の対称性が成立することから、図2で示されるような断面で基本的な考察を行ってよいと言える。

次に、抵抗体の主体であるニクロム箔およびそれを保護し抵抗体を構成する図2に示されるような物質について述べる。

ここで使用されているニクロム箔の電気抵抗の温度依存性<sup>(1)</sup>を示すと図3のようである。この図から、箔は広い温度範囲にわたって抵抗変化が少なく、きわめて安定した抵抗を保持できることが分かる。とはいえ、箔内に大きな温度変化を存在させることは出来るだけ防がなければならないことは言うまでもない。また、箔を接着し、それらを保護する物質は図に示すようであり、これらの物性値<sup>(2)</sup>をまとめて表1に示す。

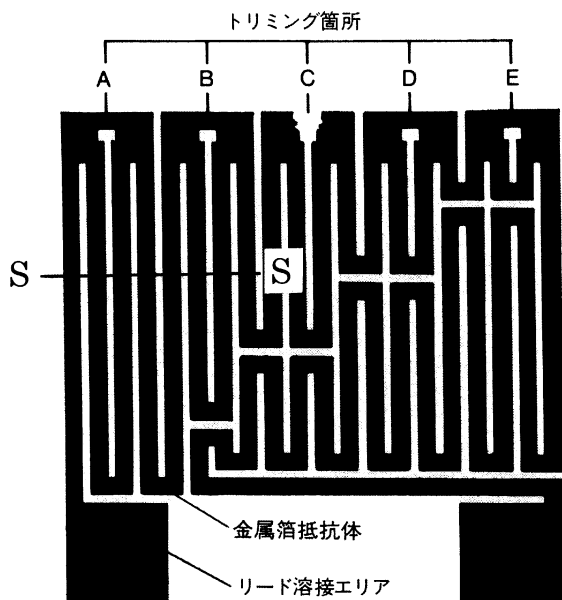


図1 代表的な金属箔抵抗体（箔部分のみ）

### 3. 非定常温度変化

#### 3.1 非定常熱伝導方程式と境界条件

電力を投入してから電流が抵抗に流れ回路内に規定の抵抗値を持つ部品として働くことになるが、それと同時に抵抗値と流れる電流に基づきいわゆるジュール熱が発生し、ニクロム箔およびそれを保護するために取り巻いている幾つかの素材を加熱し温度を上昇させることになる。我々の最初の興味は、定常状態に達するまでの時間と途中の温度場内の温度変化の様子を知りたい、という2点であった。ただし、図1に示されたような温度場を

保護素材も含めて3次元全てにわたって計算を行うことは最小の格子で分割しなければならないニクロム箔（ここでは、厚さ方向の格子として箔の半分を採用したので、時間刻み $\Delta\tau$ は $10^{-7}$  [s]以下を用いる必要があった）を考えると、スーパーコンピュータを使用しない限り無理であり、また、この研究の目的の本質を探るには、先に述べたニクロム箔が比較的長い距離にわたって平行に配置されていることから、温度場の対称性が存在するので、それほど温度範囲は必要がないと考えた。即ち、ここで計算対象の温度場は先に示した図2の範囲に限定できる。この図にはニクロム箔を保護するためのポリイミド被覆その他の抵抗体全体の構造を示している。

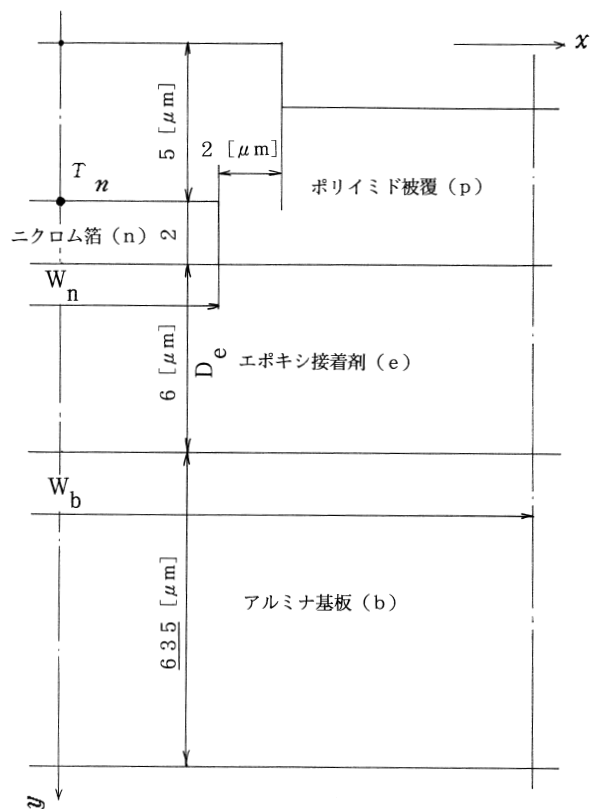


図2 箔を含む二次元断面

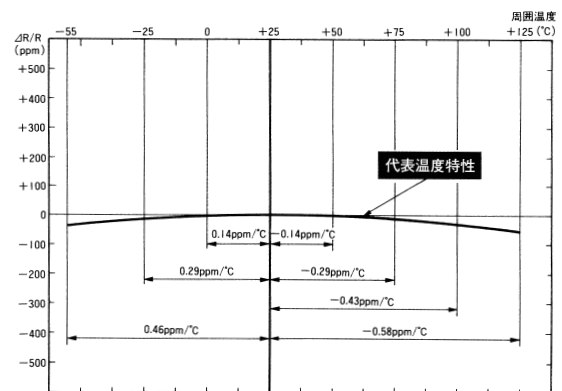


図3 ニクロム箔の電気抵抗の温度依存性

この2次元温度場で成立する熱伝導方程式は以下のように表される。

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} = \frac{1}{\kappa_i} \frac{\partial T_i}{\partial \tau} \quad (1)$$

ここで、添え字の*i*および後述の境界条件の式にある*j*は、抵抗体の構成要素であるニクロム箔 (*n*)、ポリイミド被覆 (*p*)、エポキシ接着剤 (*e*)、アルミナ基板 (*b*)のそれぞれについて取る。従って、計算は4本の連立方程式を解くことに帰着する。また、境界条件と初期条件は*n*を法線方向として以下のようになる。

$$\text{初期条件は, } \tau \leq 0 \text{ で } T_i = T_s \quad (2)$$

$$\text{各構成物質の境界面で } T_i = T_j \quad (3)$$

$$\lambda_i \partial T_i / \partial n = \lambda_j \partial T_j / \partial n \quad (4)$$

$$\text{基板の下面で } \lambda_b \partial T_b / \partial n = \alpha_b (T_b - T_s) \quad (5)$$

$$\text{被覆の上面で } \lambda_p \partial T_p / \partial n = \alpha_p (T_p - T_s) + \varepsilon \sigma F_y (T_p^4 - T_s^4) \quad (6)$$

ここで、外気に対する部分の境界条件のうち、放射伝熱をP面のみで考慮したのはこれまでの類似の計算経験<sup>(3)</sup>から、厚さの大きい基盤下面は温度が殆ど上昇しないことが知られているためこのようにした。

数値解析法は前進差分法<sup>(3),(4)</sup>によった。また、計算に用いる熱物性値などは文献<sup>(2)</sup>により、先に表1に示した値を主に用いた。また、ニクロム箔の電気抵抗の温度依存性は図2に示したように殆ど見られないので表1

表1 構成物質の物性値

物質名	$\lambda$	$c$	$\rho$
ニクロム ( <i>n</i> )	12.6	444.0	8310.0
ポリイミド被覆 ( <i>p</i> )	0.20	1400.0	1200.0
エポキシ接着剤 ( <i>e</i> )	0.63	1130.0	1800.0
アルミナ基板 ( <i>b</i> )	39.6	779.0	3890.0
ニクロム箔の電気抵抗率=107.3x10 <sup>-8</sup> [ $\Omega m$ ]			

表2 計算におけるパラメーター等

1/2 $W_n$ [ $\mu m$ ]	5	10
全抵抗 [ $\Omega$ ]	100x10 <sup>3</sup>	15x10 <sup>3</sup>
1/2 $W_b$ [ $\mu m$ ]	10~20	
$D_p$ [ $\mu m$ ]	2~6	
$\alpha_p \cdot \alpha_b$ [ $W/(m^2 K)$ ]	10~100	
$\varepsilon$ [-]	0.0~0.9	
$\lambda_e$ [ $W/(mK)$ ]	0.63, 0.2	

に示した値で一定とした。さらに、幾何学的な寸法などを表2に示す主なパラメーターとして変化させ温度場に与えるその因子の影響度を検討した。

### 3.2 結果と考察

#### 3.2.1 温度分布

代表的な計算結果の温度分布を $\tau = 0.1$ [sec]の場合について図4(a),(b)に示す。いずれの図においても、ニクロム箔 (*n*) がほぼ等温状態にあること、熱は箔上方のポリイミド被覆 (*p*) の方により多く流れている様子が見られる。この理由として、前者では周囲の物質よりは*n*が大きな温度伝導率 ( $\kappa$ ) を持っているためである。また、次では*n*の上方と下方の熱抵抗の相違が大きく、その小さい上部に熱がより多く流れるからだと思われる。

また、(a)と(b)のいずれにおいても前述の現象が認められるといっても、*n*周辺の温度場は等温線を0.01~0.06幅にとっていることを考えると、温度変化が小さく、等温場に近しい状態で温度上昇を続けていると表現してよいように思われる。これは通電を開始してから短時間経過した場合での温度分布を示したことが主な原因であろう。

#### 3.2.2 $T_n$ の上昇の様子

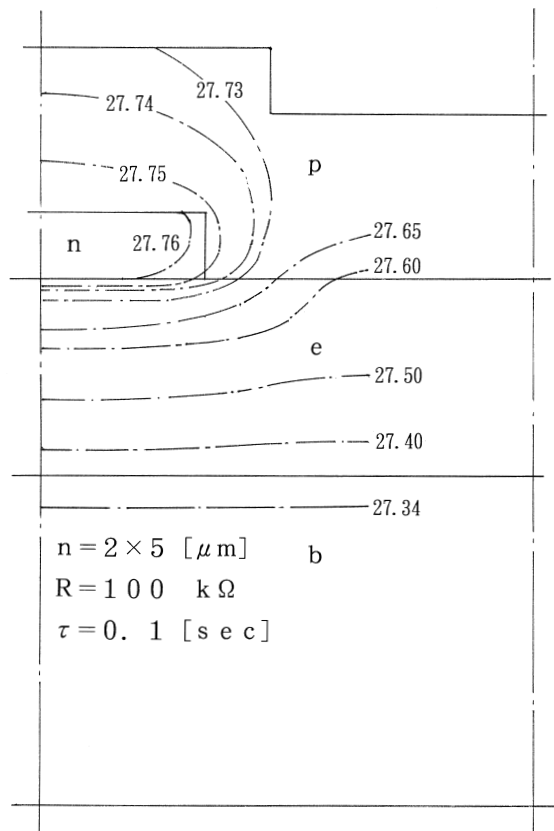
ニクロム箔の代表点として、図2に示される $T_n$ の位置を選び、時間の経過に伴う温度変化を図5に示した。ここには、抵抗体の放熱促進のために、*e*の厚さを変化させた計算結果も示している。

ニクロム箔の幅 $W_n=10$ および20のいずれの場合も時間の経過につれて温度上昇率は次第に減少してはいるが、その程度は小さく、定常状態に到達するまでには相当の時間を要すると予想される。この研究の目的では後述の実験結果から考えて $\tau=30$ [sec]程度までの計算を意図していたが、先に述べたニクロム箔の厚さ方向の格子寸法により時間刻みを小さく取らざるを得ないことから、ホストコンピュータの使用時間制限により0.1[sec]に止まっている。

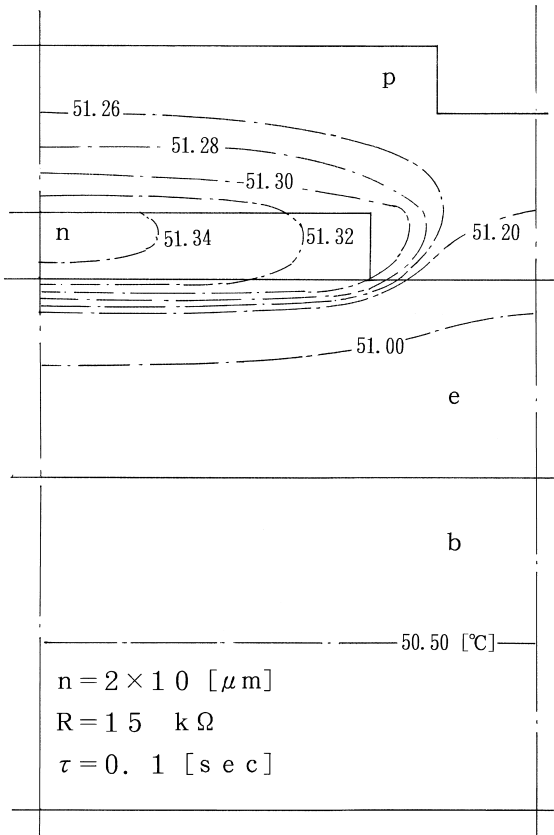
上述の放熱の目的でエポキシ接着剤の厚さ*e*を変化させた場合には、 $W_e$ が大きいほど接着剤減少の効果が大きいことが明らかである。これは図4(a),(b)で見られるごとく、箔下部の伝熱面積の大きさの相違によると考えられ、箔と基板との接着方法の工夫によって更なる効果が得られると予想される。

#### 3.2.3 他のパラメーターの影響

表2に示したように、幾つかの因子を変化させて計算を行ったが、これらの概略を述べると以下のようである。



(a)  $W_n=10$  の場合



(b)  $W_n=20$  の場合

図4 過渡温度分布 ( $\tau=0.1$  [s])

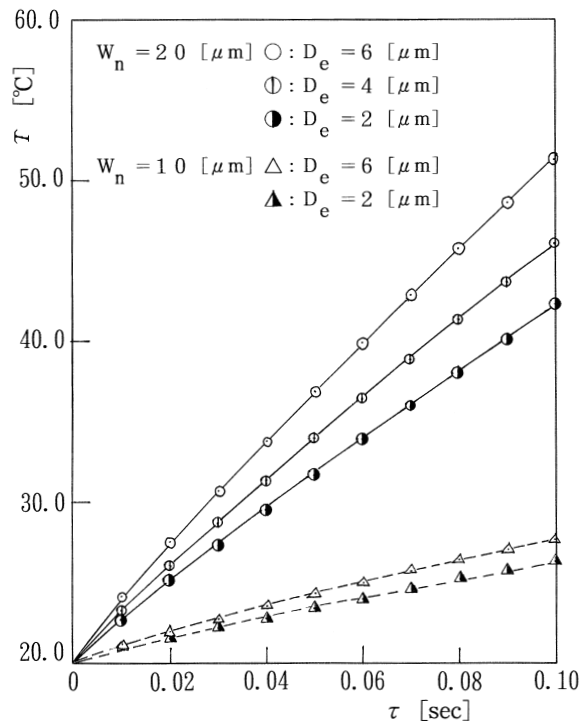


図5  $T_n$ の温度上昇の様子

ポリイミド被覆 $p$ 表面の放射伝熱は温度上昇量が小さいために大きな動きをなさず、放射率を変えても温度分布に殆ど影響しない。箔の間隔を示す $W_b$ は少なくともこの短時間の現象に対しては大きな変化を与えなかった。外気と接する表面の熱伝達率 $a$ は予想していたよりも温度場への影響が少なかったが、これは温度上昇量がまだ十分でなく、表面からの放熱量と箔内のジュール熱との熱平衡にまだ到達していない（この計算範囲では熱が構成材料の温度上昇に消費されている）ことも原因の一つと考えられる。

### 3.3.1 定常状態への到達時間の推定と赤外線温度計による可視化実験

上述のように、電力投入から非定常過程を経て定常状態に到達する時間を求めたいという要求は前述のように、時間刻み $\Delta\tau$ を非常に小さくせざるを得ないので、特に $T_n$ のみに着目した計算を行い、出来るだけ長い実時間を得る目的の場合でも1.0[sec]がせいぜいであった。それまでの得られた0.1[sec]おきの温度上昇量を図6のようにプロットし、更にそれらの点を外挿すると約20[sec]で外挿曲線の値が0になる。即ち、定常状態になると予想できる。

一方、赤外線温度計を用い、実際の代表的な抵抗体2種に通電してその様子を見た結果を図7 (a), (b)に示す。これらはいずれも約30[sec]経過した後の観察結果であり、既に定常に到達したと判断した写真である。

熱はニクロム箔と導線との接続部から発熱が始まるが、すぐに箔全体が発熱する様子が観察された。図に示した時間よりも数秒から10秒程度早く発熱の状況およびそれに伴う温度上昇が収斂したように観察されたことから、図5の推定は比較的良好な近似を示していると思われる。しかしながら、抵抗体の本来の目的は、定常に到達したときに、その温度分布が抵抗体の性能劣化に関係していないかが最大の関心事であることから、次章において

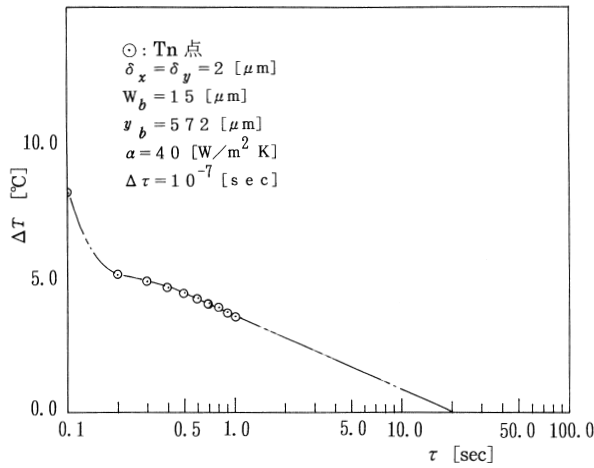
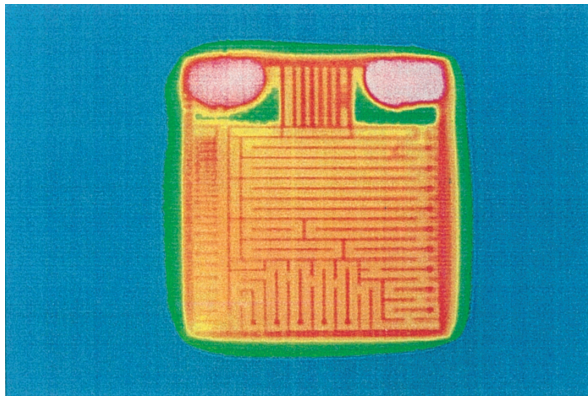
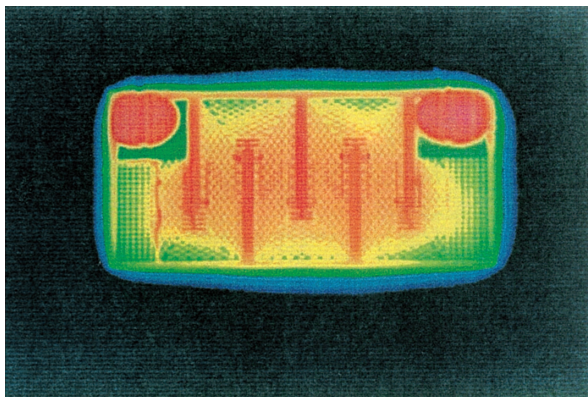


図6 ニクロム箔上部の温度上昇量



(a) A-0180型の場合



(b) F-900型の場合

図7 赤外線温度計による箔の温度上昇の観察

3次元モデルを考えて温度分布を検討する。

#### 4. 定常温度分布と影響因子の考察

##### 4.1 試料の定常問題へのモデル化と解析方法

###### 4.1.1 抵抗体のモデル化

著者らは前章において図1の断面においてニクロム箔が等間隔に並べられていることから、箔1本のみを取り出した2次元温度場を対象にして電流付加後の遷移状態について検討を加えた。その結果、興味のある現象も得られたが、前述のように、時間刻みの制限から非常に長い計算時間を要し定常状態にまで現象を追求したいという希望は満たされず、最長に計算できた時間を外挿して定常状態に到達する時間を20[sec]と推定した。従って、必要な抵抗体の定常状態の温度分布は得られていない。この問題・要求を解決するため、箔が接近して配置されていることに着目し、抵抗体全体をニクロム箔1枚の板に近似して、その他の部分は製品の通りの構造の温度場を考えて検討を加えることにした。抵抗体を図1のような回路のままに解析しない理由は、それを行うと水平方向の格子分割が膨大な数になると考えられ、定常問題の場合でも格子数の面からの限界が生ずると考えたからである。また、回路を1枚の板に近似はしても、発熱量は規定の負荷に合わせて計算する。さらに、この近似に伴う表面温度の誤差は箔の間隔が狭いことから迷路状の回路を1枚の板に置換しても後の図8に示す抵抗体の外部被覆のエポキシ樹脂の表面に到達するまでには実際の製品の温度分布に極めてよい近似が得られるものと推定している。

ここで検討する抵抗体のモデルは実際の製品を参考にして、形状・寸法・材質は製品そのままのものに近似した。これを図8に示す。

###### 4.1.2 数値シミュレーション

図8において成立する定常3次元熱伝導方程式は周知のものであり、境界条件も3章で述べたものと初期条件がない以外殆ど同一であるのでここでは省略する。ただし、熱は抵抗体内では熱伝導のみで伝わり、また、外表面から周囲には熱伝達で放熱するものとした。従って、放射のメカニズムは考慮していない。この理由は、前章の結果から、表面温度はそれほど上昇せず放射の寄与は殆どないか、あるとしても表面の熱伝達率を少し増大させることで評価できると考えたからである。また、図8の断面に見られるように内部は材質および厚さの異なる数層から構成されているが、この間の接触熱抵抗は無視できるものと仮定した。従って、境界面での熱流および温度連続の条件を満足している。

各構成物質間で成立する連立偏微分方程式の解法は幾

つかあるが、ここでは板状の構成要素に適合しやすいように直方体格子に温度場を分割する差分法<sup>(4)</sup>によって定常解を求めた。この方法は良く知られたものであり、著者の一人も別のテーマで述べている<sup>(3)</sup>ので説明は省略するが、この温度場で困難な点は、材料の厚さが2[ $\mu\text{m}$ ]から635[ $\mu\text{m}$ ]まで極端に異なることであり、厚さ方向の格子を適切に切ること特に配慮した。今後の報告で構成物質の物性値の影響も検討する予定ではあるが、この章でも前章と同じく、表1に示した値を用いた。

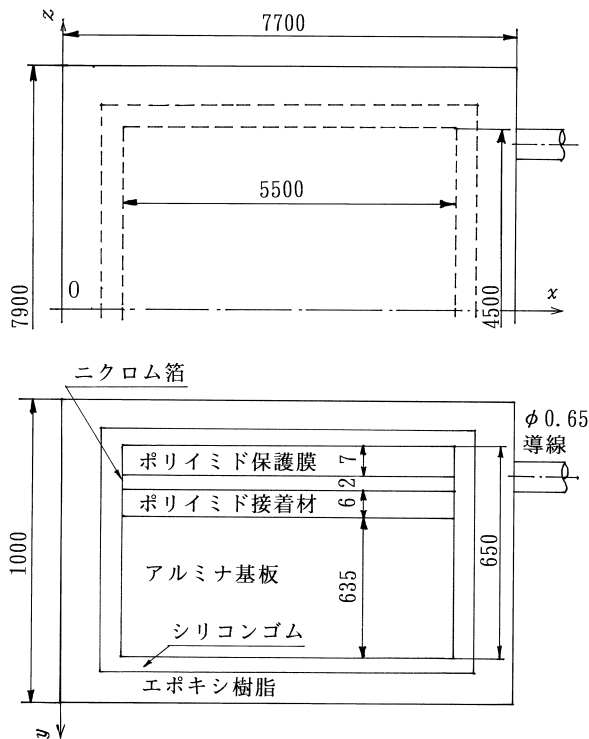


図8 抵抗体の三次元モデル

#### 4.1.3 拡大伝熱面またはヒートパイプの取り扱い

発熱する物体から熱を有効に放熱するために、拡大伝熱面（一般には、フィンと呼ばれる）やヒートパイプを使用する手段が多く使用されている。特に前者は家庭で見られるエアコンや暖房機にも見られ、広く普及・使用されている。ここで取り上げている精密抵抗体に対してもフィン付き放熱器が作られ販売されている。この報告においても放熱器の影響を検討することにしたが、フィンそのものを抵抗体と組み合わせて温度場を構成し、それを計算することは計算容量から考えても不可能と推定される。

表面からの熱伝達による伝熱量 $Q$ は $\alpha$ を周囲の流体の種類や流速・固体の表面形状などに関する熱伝達率、 $S$ を表面積、 $T_w$ を壁面温度、 $T_s$ を周囲の流体温度とすれば、

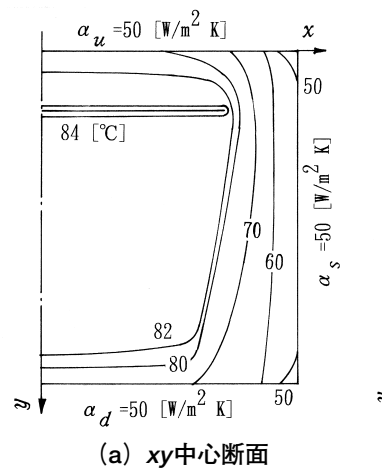
$$Q = \alpha S(T_w - T_s) \quad (8)$$

で与えられることは良く知られている。フィンの取り付けは $S$ の拡大を目指したものはあるが、放熱量の増加を考慮する上では、表面の熱伝達率 $\alpha$ を大きくしたと処理しても同様であり、ここでの計算においては表面の $\alpha$ を変化させることによって、その部分にフィンを取り付けた効果を検討できる。ヒートパイプについても同様である。厳密に言えば、フィン取り付け部の熱伝達率は一様ではなく、局所の値を与えて計算する必要があると思われるが、近似的には上述の手段で十分に検討が可能と考えられる。

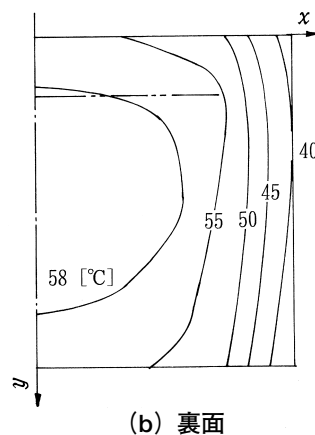
## 4.2 結果と考察

### 4.2.1 温度分布

抵抗体表面の熱伝達率 $\alpha$ を50[ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]とすべて一様であると仮定した場合の中央断面の温度分布を図9(a)に、また、裏面の温度分布を同図(b)に示す。厚さ方向の拡大率を大きく取って現しているので実際の抵抗体を直感的に理解しにくい点もあるが、ニクロム箔で発生した熱は熱抵抗の小さい、即ち、厚さ方向、特に上方に多く流れていることがわかる。 $z$ 方向の裏面の温度(b)は中央断面と定性的には類似しているが最高温度の部分の範囲が狭くかつ約25[ $^{\circ}\text{C}$ ]低下している。しか



(a) xy中心断面



(b) 裏面

図9 定常温度分布の例



し、周辺部の温度の低下は $10[^\circ\text{C}]$ 程度でそれほど大きくはない。これは箔と基板を取り巻くシリコンゴムとエポキシ樹脂の熱抵抗が大きいことに起因する。

この温度分布を更に観察すると、上面の温度は下面よりも高温であるので、現在販売されているフィン付き放熱器は下方への熱の流れを促進する効果を目指しているが、これだけではなく、上面の放熱も温度分布に大きく影響することが推定できる。図10に前図と同じ条件で、上、下面の温度分布を代表的な等温線で示す。

図11に $\alpha$ を変化させた場合の上面の等温線の様子を代表例で示す。図9とも比較しながら考察すると、 $\alpha$ の増加に伴って表面温度が次第に減少していくことが明らかである。また、等温線の形状はニクロム箔の存在の影響を受け、それを取り囲むように、定性的にはほぼ相似の曲線群を構成することが認められる。

#### 4.2.2 フィンまたはヒートパイプの効果

前述のように、最近では直径または偏半径が $2[\text{mm}]$ 程度の寸法を持ち、相当に自由な曲率で曲げ加工できるヒートパイプ（以下、HPと記す）が製造されている。一方、フィンには内部構造に無関係であるので更に薄く、また、自由な形状が製作可能である。ただし、一本の放熱性能から考えるとHPの方が大きいと考えられること、フィンの性能評価はHPの結果から類推可能であると予想されることから、ここではHPを想定して結果を

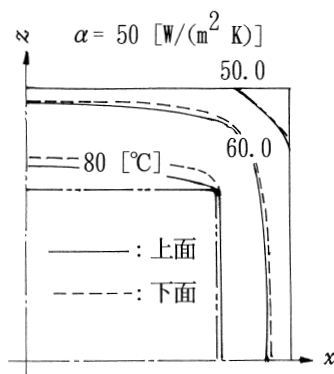


図10 上面，下面の温度分布

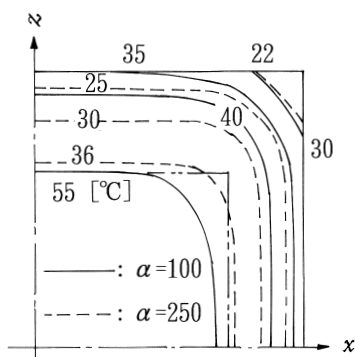


図11 熱伝達率を変えた場合の上面の温度分布

求めた。即ち、直径 $d=2[\text{mm}]$ のパイプを3本上面に取り付けたと仮定して温度分布を求めた。断面の温度分布の例を図12に示す。図8に示した $x$ 方向にパイプが置かれており、その位置で温度低下が見られるがその効果の及ぶ範囲は比較的小さい。このような状況から、メーカーは出来るだけ全面を冷却出来るようにパイプをブロックに合体させたヒートシンクを製作・販売している。従って、以下の計算では上下面が $\alpha$ の同じ値を持つとした条件で結果を求めた。図13は $\alpha=200[\text{W}/(\text{m}^2\text{K})]$ で全面一様とした場合の断面の温度分布を示している。箔を取り囲む等温線群を構成していることは明らかで、これら2図から、抵抗体全面を平均的に冷却することが最も望ましいと推定できる。

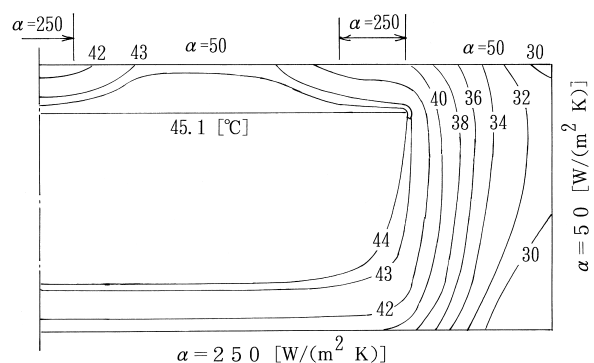


図12 ヒートパイプを取り付けた場合の温度分布 (xy中心断面)

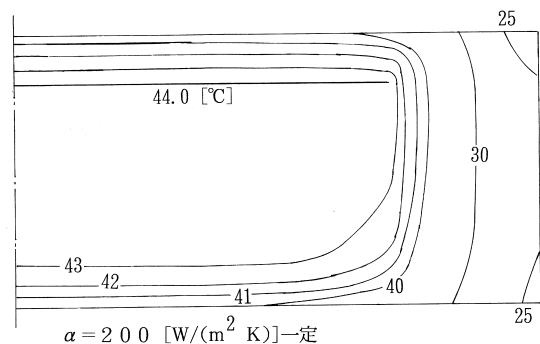


図13 全面の熱伝達率を向上させた場合 (xy中心断面)

#### 4.2.3 その他の要素からの検討

図14に温度場内の最高温度 $T_{\text{max}}$ （箔の $xz$ 面の中心部分）と $\alpha$ 、および、 $T_{\text{max}}$ と最低温度 $T_{\text{min}}$ （抵抗体の角の部分）との差 $\Delta T$ の関係も併せて示す。予想されるように、 $\alpha$ の増加に伴って $T_{\text{max}}$ ははじめは急速に、更に、次第に緩やかに一義的に減少することが認められた。一方、 $\Delta T$ は一度極大値を取った後に次第に減少していく。これは興味ある現象と思われる。また、 $\Delta T$ は出来るだけ小さい方が望ましいが、内部で発生する熱を放出するためには温度勾配の存在が必須であるのでこれを無くす

ることは出来ず、色々な要因を総合的に考慮して望ましい  $\Delta T$  と、それを実現する  $\alpha$ 、即ち、それをもたらす冷却方法を決定すべきであろう。

図15には  $\alpha$  とHPの有無をパラメーターとし、中心部分の  $y$  軸方向の温度分布を示した。熱はニクロム箔から  $y$  方向に主に流れているが、温度勾配は小さく、その大部分をシリコンゴムとエポキシ樹脂が担っている。図の右に示した  $\Delta T'$  はこの2者間の温度差を示したもので、 $\alpha$  の大きいほどこの値が増大している。また、先の図13のように、部分的にヒートパイプをおいた場合には熱伝達率 ( $\alpha$ ) が全面一定の場合に比べて、温度が大きく増大していることが認められ、先に主張した全面冷却の効果を改めて示している。

### 5. ま と め

著者らは、電子デバイスの中で重要な働きをなす精密抵抗体に着目し、主に数値シミュレーションによって、その発熱現象を過渡状態と定常に到達した場合の温度分布を求め、性能の安定化をもたらす要因について考察を加えた。また、少例ではあるが、実際の抵抗体に通電を行い定常に到達するまでの時間を推定し数値シミュレーションの結果とも比較した。

得られた結果の主なものを箇条書きで表すと以下のようである。

- (1) 電流の投入から抵抗体が定常状態に到達するまでの時間は、機種により多少の変動はあると考えられるが、約20~30[sec]程度と推定される。
- (2) 定常状態に到達した場合、ニクロム箔付近はほぼ定温状態に達するが、周囲の温度分布はそれを取り囲む物質の物性・寸法などの因子に依存する。
- (3) ヒートパイプまたはフィンを取り付けることはその部分の温度を低下させるが不均質な局所温度分布を発生させるので、場合によっては熱応力発生の原因になりうる。従って、最も望ましいのは周囲全体にわたって熱伝達率を向上させる手段をとることであると考える。

終わりに、通電実験において、顕微鏡つき赤外線温度計の使用・測定にご協力くださった、アルプス電気盛岡工場（当時）寺尾博年氏に感謝申し上げる。

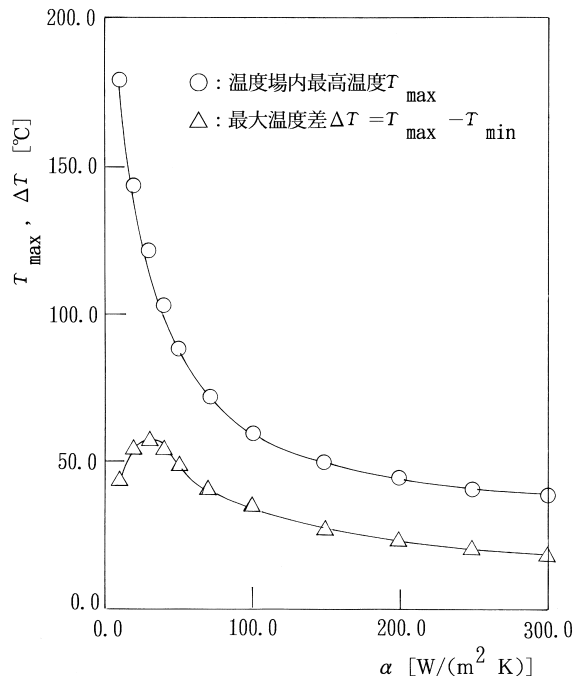


図14 最高温度および最大温度差と熱伝達率との関係

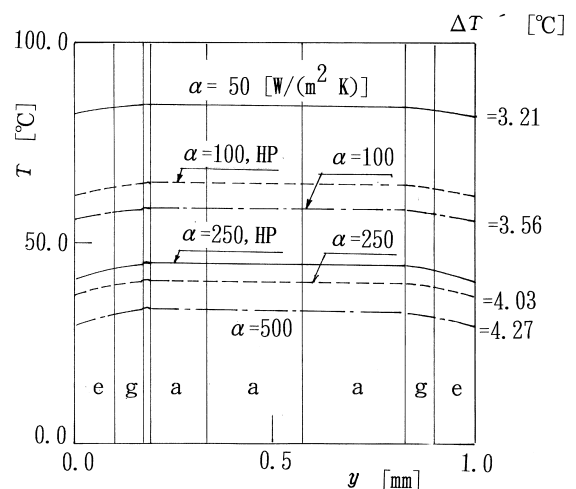


図15 厚さ方向の温度分布の様子

### 【文 献】

- (1) アルファ・エレクトロニクス（株）：アルファ金属箔抵抗器（カタログ），3.
- (2) 日本機械学会編：伝熱工学資料，日本機械学会(1986),320-322.
- (3) 高橋カネ子：秋田大学教育文化学部研究紀要，59(2004),11-15.
- (4) 赤坂 隆：数値計算，コロナ社（1991）,392-411.