

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-414

熱電対温度計の埋め込みの温度場への影響

西村 英明

1975 年 7 月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 温度場と電場間の相似性について .....	2
3. 模型作製 .....	2
4. 熱電対温度計の内部構造による温度場の乱れ .....	7
測定結果 .....	18
5. 熱電対温度計を埋め込んだ翼について .....	22
翼についての測定結果 .....	23
6. まとめ .....	27
7. 参考文献 .....	27
8. 付 録 .....	29

# 熱電対温度計の埋め込みの温度場への影響\*

西村 英明\*\*

## Influence of Thermocouple on Temperature Fields

by Hideaki NISHIMURA

### ABSTRACT

Thermocouples are widely used for measuring temperature. However, there are some possible errors which may be caused by the heat conduction of a thermocouple itself, radiation from its surroundings, defects and/or defective instrumentation of the thermocouple and by other reasons.

Many statistical analyses of the influence of thermocouples on temperature fields under simplified geometrical conditions have been published.

The present paper deals with the same problem, but under more practical conditions, by using an analogy between temperature and electric potential fields.

Carbon-paper i.e. Teledeltus paper was used for making the analogical model.

Local non-uniformity of the thermal conductance in the temperature field was simulated in the electric field by distributing small holes and/or applying electric conductor paints on the carbon-paper.

The physical boundary-conditions, such as distributions of heat transfer rate, and temperatures at the outer edge of flow boundary layers, were also simulated by the electric resistance and potential distributions on the boundary of the model.

Measurements were made for a practical model of an air-cooled airfoil with 14 thermocouples.

The results of the measurements are given and the influences are discussed in this paper.

### 1. はじめに

温度の場の中のある点の温度を計測する場合熱電対温度計が広く用いられるが熱電対温度計を埋め込むことによって温度場は乱され熱電対温度計は正確にその点の温度を計測していることにはならない。熱電対温度計によって乱されていない温度場の温度を知るためには熱電対温度計の埋め込みによって受ける温度場の乱れを量的に表現し両者の関係を明らかにしなければならない。

熱電対温度計の測定値に影響を及ぼす要因には

1. 熱電対温度計の素線を通して熱電対温度計軸方向への熱伝導。
  2. 熱電対温度計の内部構造による温度場の乱れ。
  3. 数個の熱電対温度計が埋め込まれている場合に、乱された温度場の相互の干渉による温度場の乱れ。
- 等があげられる。

1.については例えば K.N. Newhouse<sup>1)</sup> が二次元領域内のある点に熱の発生のないしは吸収を想定してエネルギーの収支から関係式を得て理論的に解析し計算を行っている。2.については V.S. Novopavlovskii<sup>2)</sup>, A.B. Turner<sup>3)</sup>, J.V. Beck and H. Hurwitz<sup>4)</sup> 等がモデルとしてある基材の中に基材とは異なる熱伝導率を有する矩

\* 昭和49年10月22日受付

\*\* 原動機部

形の物体が埋め込まれたものを取り扱っている。特に V. S. Novopavlovskii は熱伝導の方程式を数値解法によって解き、数多くのパラメータの中から温度場の乱れに強い影響を及ぼすパラメータを決定している。その中で一つの重要なパラメータとして Biot 数をあげている。3. については詳細な研究は見当たらない。

また熱電対温度計の接着の方法、製作法等による温度計測値への影響も実際面では非常に大きな要素となる。<sup>5)6)7)</sup>

本研究では上述の 2, 3 の場合について熱電対温度計の感温部の存在する断面における二次元的な温度場を電導紙により模型化し実験解析した。これまでの研究では熱電対温度計の感温部を非常に簡略化しているが本研究では電導紙に穴をあけるか銀粉を塗布するかして熱電対温度計の熱伝導率の異なる内部構造の模型化を行った。この模型による計測結果と理論計算結果は非常に良い一致を示した。

2. 温度場と電場との相似性について

三次元非定常の熱伝導の場合に領域内に熱の発生ないしは吸収のある温度場において温度  $T$  の満たす方程式と三次元非定常で領域内で電流が流入または流出する電位場において電位  $\phi$  を支配する方程式の間の相似性に着眼し熱伝導による温度場を電位場に置き換えて実験するのが電導紙による相似法である。

両方の場を支配する偏微分方程式を無次元化し両方程式が相似になるための条件として次の式を得る<sup>8)</sup>

$$i) \quad \frac{\lambda t_0}{c \rho l_0^2} = \frac{\kappa t_a}{r l_a^2}$$

$$ii) \quad \frac{Q t_0}{c \rho T_0} = \frac{i t_a}{r \phi_0}$$

また両方の場にたいする境界条件の無次元表示から相似の条件として次の関係式を得る。

$$iii) \quad \frac{\alpha}{\lambda} \cdot l_0 = \frac{l_a}{\kappa \cdot F_v \cdot R_v}$$

ここに

温度場		電場	
$\lambda$ [J/m·s·k]	熱伝導率	$\kappa$ [1/Ω·m]	導電率
$c$ [J/kg·k]	比熱	$r$ [A sec/V·m <sup>3</sup> ]	電気容量
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	密度	$i$ [A/m <sup>3</sup> ]	電流
$Q$ [J/m <sup>3</sup> ·sec]	熱発生量	$T_a$ [sec]	代表時間
$\alpha$ [J/m <sup>2</sup> ·s·k]	熱伝達率	$l_a$ [m]	代表長さ
$t_0$ [sec]	代表時間	$\phi_0$ [V]	代表電圧
$l_0$ [m]	代表長さ	$R_v$ [Ω]	第 $v$ 番目の紙片の抵抗
$T_0$ [k]	代表温度	$F_v$ [m <sup>2</sup> ]	第 $v$ 番目の紙

片の断面積

である。

相似の条件 i) は時間に関するものであり ii) は熱の発生ないしは吸収と電流の流入ないしは流出の関係を示している。条件 iii) は熱伝達率と電気抵抗の間の関係を意味している。この場合原形と模型の形状は相似でなければならない。

本研究では定常状態で温度の場の内部では熱の発生、吸収のない場合について考察するので条件 i), ii) は不要であり、実験用の模型作製にあたっては条件 iii) のみを満たせばよい。

3. 模型作製

模型の製作は次の二種類について行う。まずまえがきの中の 2. に相当する場合として最も有用性の高い平行四辺形の温度の場を考える。この平行四辺形の大きさはその中に埋め込まれる熱電対の模型の影響が及ばない大きさとする。この平行四辺形の一方の長辺に沿って冷却が

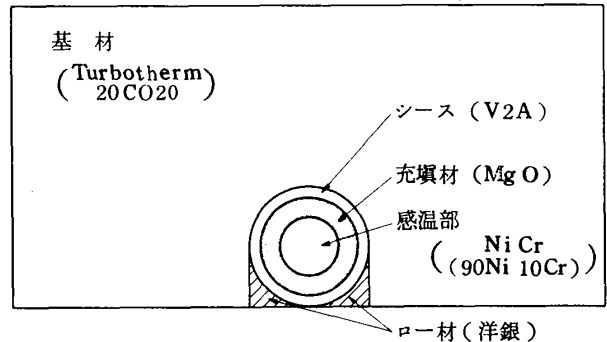


図1 平行四辺形の温度場の模型

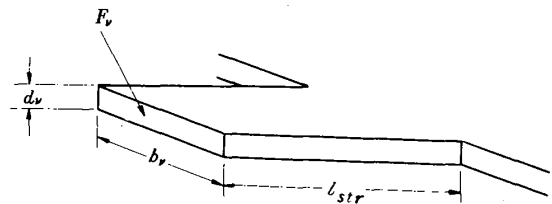


図2 模型に付けた矩形の紙片

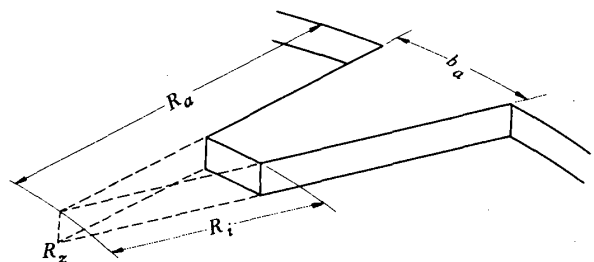


図3 模型に付けた先細形の紙片

スが流れ他方の長辺に沿って高温ガスが流れている場合を考え、第二の模型は3.に相当する場合として冷却孔を有するタービン翼を適用する。

模型の原型に対する倍率、原型の熱伝導率、熱伝達率分布を決定すると電導紙による模型の製作が可能になる。<sup>8)10)12)</sup>

熱伝達率に相当する抵抗はiii)式から算出できるが電導紙による模型の作製に適した式にする必要がある。ここで関係式iii)についてより詳しく記述する。<sup>8)9)11)</sup>

電気抵抗は電導紙上の模型の縁に沿って取り付けられる紙片の長さ  $l_{str}$  に比例し、導電率に反比例し、紙片の断面積  $b_v \times d_v$  に反比例する。すなわち

$$R_v = \frac{l_{str}}{\kappa \cdot b_v \cdot d_v} \quad (1)$$

$b_v$ ,  $d_v$  は  $v$  番目の紙片の巾と厚みを意味している。(図2参照)

さらに次の抵抗を定義する。

$$R^{\square} = \frac{1}{\kappa \cdot d_v} \quad (2)$$

この抵抗は  $l_{str} = b_v$  の場合の抵抗値を示し、紙片の辺の長さがどのようなものであろうとも正方形ならば同じ値を示すもので通常良く用いられる便利な抵抗値である。この抵抗  $R^{\square}$  を用いて(1)式を書き改めると次式を得る。

$$R_v = \frac{R^{\square} \cdot l_{str}}{b_v} \quad (3)$$

なおここで図3に示すような先細り形の紙片の場合には次の式で抵抗が求められる。

$$R_v = R^{\square} \cdot \left(\frac{R_a}{b_a}\right) \cdot \ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right) \quad (4)$$

ここで  $R_a$ ,  $b_a$ ,  $R_i$  はそれぞれ円の中心  $R_2$  から紙片の根元までの距離、紙片の根本における巾、円の中心から紙片の先端までの距離を意味する(図3参照)。

相似の条件iii)と関係式(3), (4)から次の式を得る。

$$l_{str} = \frac{l_a}{l_0} \cdot \frac{\lambda}{a} \quad (\text{□}) \quad (5)$$

$$(R_a + R_i) \ln\left(\frac{R_a}{R_i}\right) = \frac{l_a}{l_0} \cdot 2 \cdot \frac{\lambda}{a} \quad (\text{□}) \quad (6)$$

ここで  $l_a/l_0$  は電導紙による模型と原型との比を示している。

この関係式から  $l_{str}$ ,  $R_a$ ,  $R_i$  等を算出することができる。ここではさきに述べたように定常状態、熱の発生または吸収のない場合を取り扱うのであるから模型作製にあたっては原型と模型の間の幾何学的形状を相似にし、紙片の長さを(5)または(6)式によって計算し決定する。もし算出された紙片の長さが余りにも長すぎる場合にはポテンシオメータを代りに使用することができる。Fischer

& Riess<sup>8)</sup>によると紙片の巾は大きな模型の場合には10mm, 小さな模型の場合には5mmが望ましく、紙片の長さは50~100mmが適当である。紙片は模型の縁に対して直角にとりつけなければならない。

紙片の長さの計算の際、電導紙の抵抗  $R^{\square}$  が必要であることは(3), (4)式から分かるが  $R^{\square}$  は電導紙の種類によって大きく異なるとともに電導紙の非一様性に基づく変動もあり一定の値を示すとは限らない。(図4, 図5参照)

#### 電導紙について<sup>13)</sup>

理想的な電導紙は全表面において一様な抵抗  $R^{\square}$  を有し、かつ柔軟性を持つことが要求されるがこれらの条件を完全に満足するものはみあたらない。

電導紙としては次のものが主としてあげられる。

1. WIGGINS, TEAPE & ALEX, PIRIE  
(Export) LTd.

GATEWAY HOUSE

1 Watling street

London EC 4

名称 ; Teledeltus Paper  $\frac{1}{3}$

Teledeltus Paper  $\frac{1}{4}$

容積 ; ロール巻

(巾74cm; 長さ120mまで)

2. ITT Standard

Zürich 4

Zweierstr. 35 Schweiz

名称 ; L-48

容積 ; ロール巻

(巾68cm; 長さ30m)

3. RENKER-BELIPA GmbH

516 Düren Deutschland

名称 ; Safir Fu 80/6

容積 ; ロール巻

(巾78cm; 長さ80m)

これらの電導紙の中で Teledeltus Paper  $\frac{1}{3}$  が最も良く使われており、その性質も詳しく研究されているので本研究は、この Teledeltus Paper  $\frac{1}{3}$  を使って実験を行った。

図4, 5に Teledeltus Paper  $\frac{1}{3}$ , と  $\frac{1}{4}$  のロール巻方向に垂直および平行方向の抵抗値の測定結果を示すこの資料は一つの測定例にすぎないが、電導紙の抵抗分布は非一様であることがわかる。

#### 熱電対温度計について

アナログ実験に際して想定した熱電対温度計の構成と周囲の基材は次の通りである。熱電対はシースにより保護されておりその内側には絶縁物として MgO の粉末が

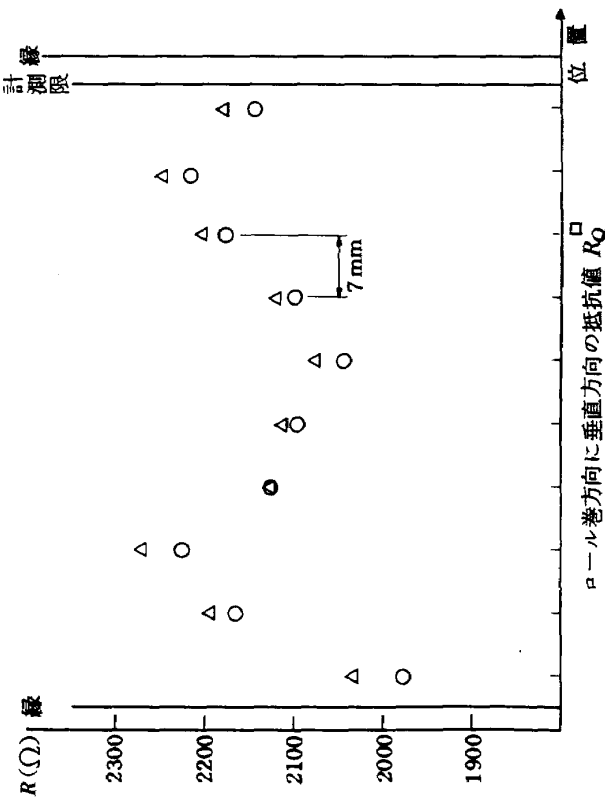
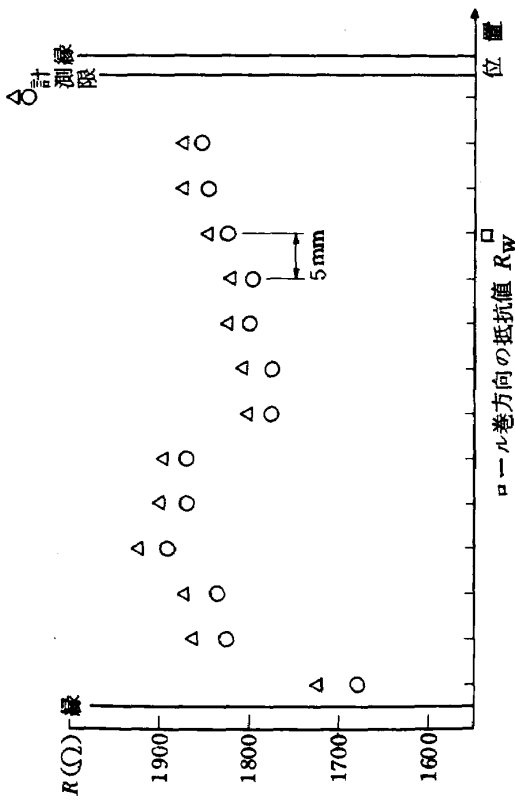
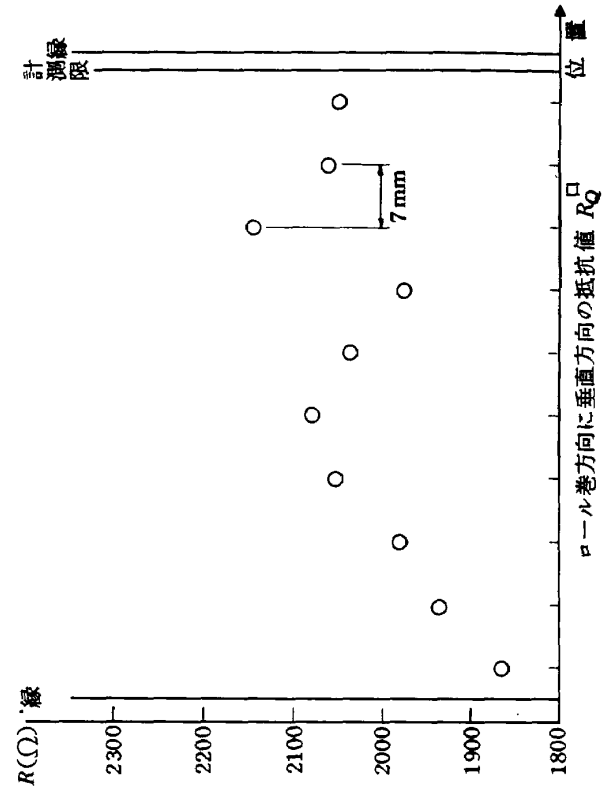
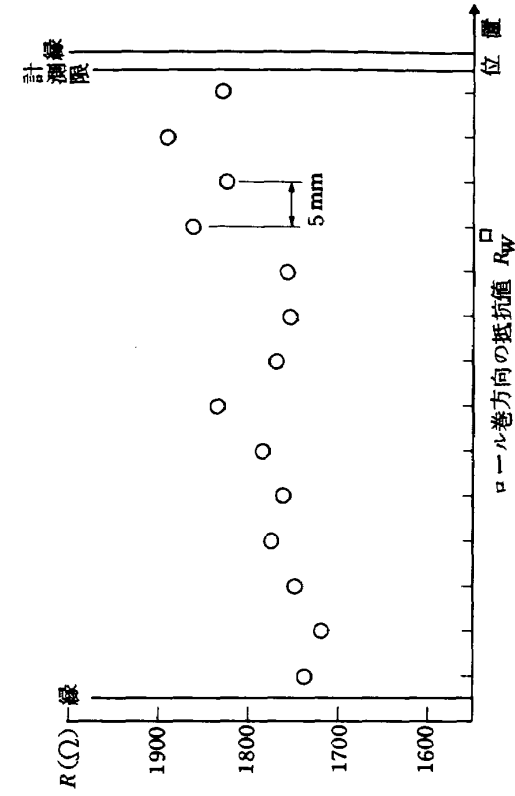


図 5 抵抗値  $R_Q$  (Teledeltus Paper 1/4)

図 4 抵抗値  $R_Q$  (Teledeltus Paper 1/3)

詰め込んであり、二本の素線の先端は溶接してあり感温部となる。この感温部はNi, Ni Cr, シースは耐コーション性の強い鉄, バナジウム系のV2Aより出来ており, 熱電対温度計は Turbotherm 20 CO 20 の基材(ないしは翼)に洋銀で固定する, 熱電対温度計の構造および寸法を図6に示す。

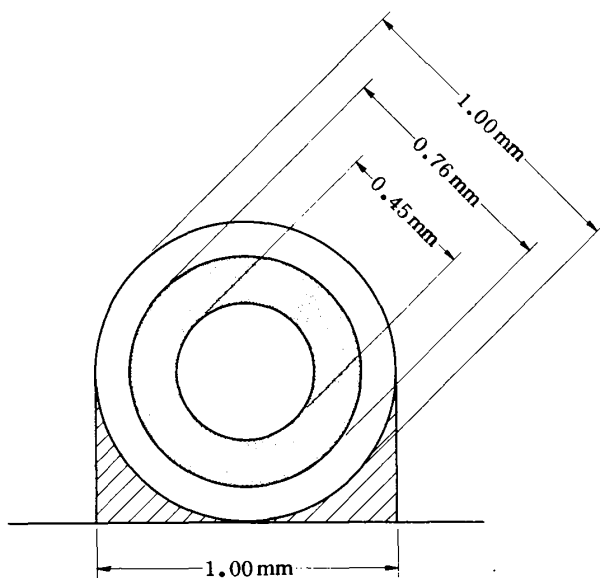


図6 熱電対温度計(ハンダ部分も含む)の構造

#### 電導紙の打ち抜きと洋銀の塗付

異なる熱伝導率を持つ物質から出来ている熱電対温度計を電導紙上に具体的に表現するために電導紙を打ち抜くか又は導電率の高い銀粉を電導紙上に塗り付けることが必要である。

まず原型と模型間の関係に注目しよう。

$$\text{熱抵抗} \quad W = \frac{l_0}{\lambda \cdot F_0} \quad (7)$$

$$\text{電気抵抗} \quad R = \frac{l_a}{\kappa \cdot F_v} \quad (8)$$

ここで  $F_0$  は原型の  $F_v$  に相当する断面積を意味する。この模型は原型と同じ倍率を持っているものとする。電導紙は一定の導電率を持っているので, そのままでは熱伝導率の変化をモデル化できない, そこで以下に述べるような方法で電導紙の導電率を変化させられることを示す。

電導紙の抵抗は

$$R_{leit} = \frac{l_{leit}}{\kappa_{leit} \cdot F_{leit}} \quad (9)$$

であるから(8)式との関係から次の式を得る。

$$\frac{R}{l_a} = \frac{R_{leit}}{l_{leit}} = \frac{1}{\kappa_{leit} \cdot F_{leit}} = \frac{1}{\kappa \cdot F_v}$$

但し, 添字  $leit$  は電導紙についての量を意味する。

右の二つの関係から導電率  $\kappa$  が変化する場合にこの値を等しくするために  $F_{leit}$  を変化させれば良いことがわかる。このことによって電気的な模型と電導紙の模型は同じ状態にすることができる。

結局, 次の二つの関係式を得る。

$$R_{leit} = R \cdot \left( \frac{l_{leit}}{l_a} \right) \quad (10)$$

ここに,  $l_{leit}/l_a$  は電導紙の模型と電気的模型の倍尺。

$$F_{leit} = \frac{1}{\kappa_{leit}} \cdot \left( \frac{R_{leit}}{l_{leit}} \right) \quad (11)$$

最後の式(11)は電導紙の打ち抜きと銀粉の塗り付けの際に重要な意味を持つてくる。

模型を電導紙から切り抜いた場合  $R_{leit}/l_{leit}$  の値は一定である, したがって(11)式より面積の大きさは導電率に反比例する。

(7)式より(11)式と同様な関係を原型に対しても得られる。

$$F_0 = \frac{1}{\lambda} \cdot \left( \frac{W}{l_0} \right)$$

したがって(11)式と比較すると

$$F_0 \cong F_{leit} \propto \frac{1}{\kappa_{leit}} \propto \frac{1}{\lambda}$$

一般的に次の関係を得る。

$$\left( \frac{1}{F_{leit}} \right)_I ; \left( \frac{1}{F_{leit}} \right)_II ; \dots = (\lambda)_I ; (\lambda)_II ; \dots$$

すなわち熱伝導率と電導紙の断面積の逆数は比例関係にある。また次の関係式にも注目する。

$$R = \frac{l_a}{\kappa \cdot F_v} = \frac{l_a \cdot d_v}{\kappa \cdot d_v \cdot F_v} = R^{\square} (l_a d_v) \cdot \frac{1}{F_v}$$

$$R_{gelocht} = R^{\square} (l_{leit} \cdot d_{leit}) \cdot \frac{1}{F_{gelocht}}$$

添字  $gelocht$  は電導紙を打ち抜いたときまたは銀粉を添付したときの量を示す。

上の式から  $R_{gelocht}/R^{\square}$  と  $1/F_{gelocht}$  の関係を得る。

$$\frac{R_{gelocht}}{R^{\square}} = \frac{1}{F_{gelocht}}$$

一般に次の関係式を得る。

$$\left( \frac{R_{gelocht}}{R^{\square}} \right)_I ; \left( \frac{R_{gelocht}}{R^{\square}} \right)_II ; \dots = \left( \frac{1}{F_{gelocht}} \right)_I \\ : \left( \frac{1}{F_{gelocht}} \right)_II ; \dots = (\lambda)_I ; (\lambda)_II ; \dots \quad (12)$$

$F_{gelocht}$  は電導紙の断面積を意味しているが, 模型作製の際に非常に薄い炭素の層から出来ている電導紙の断面に穴をあけたり銀粉を塗付することはできない。しかし電導紙の表面に銀粉を塗付するか電導紙に穴をあけて同じ効

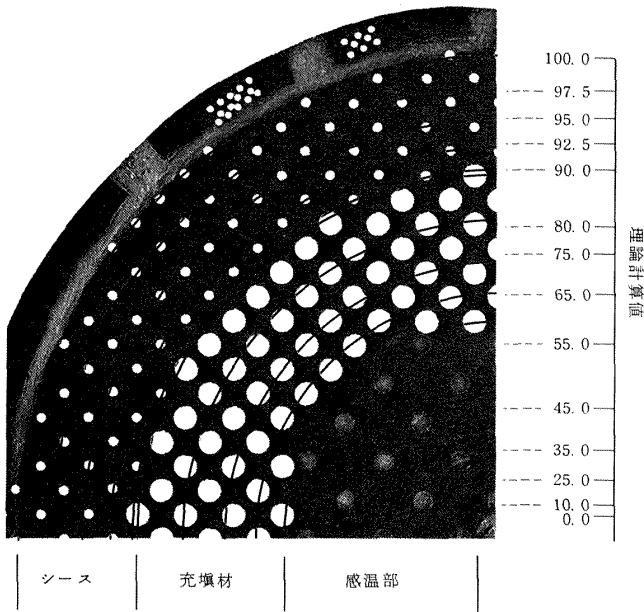


図 7-a 電導紙の打ち抜きと銀粉の塗付による熱伝達率の相異の模型

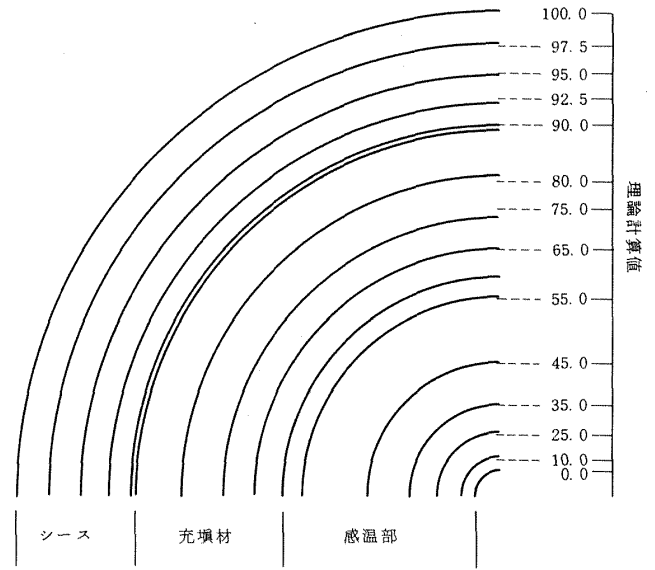


図 7-b 実験測定値と理論値

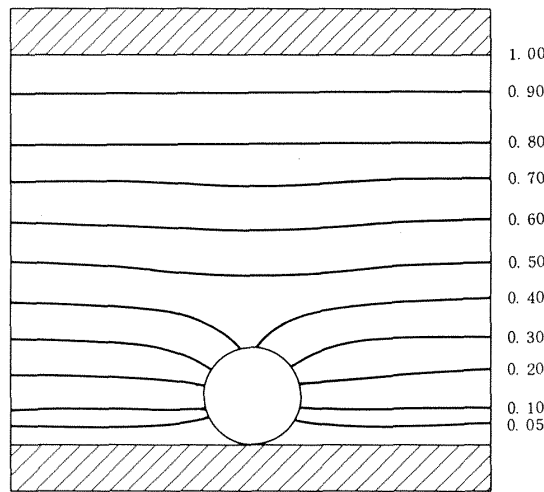


図 8 電導紙に丸穴をあけたときの無次元等温線

果を得ることができる。

すなわち、熱伝導率  $\lambda$  が与えられると(2)式の比例関係から二つの抵抗の比 ( $R_{gelocht}/R^{\square}$ ) が決まり、面積比又は  $d/s$  (円孔の直径対 1 ピッチの距離) など所要の形状を決定することができる。(付録図 1, 2 参照)

ここで一つの例を示す。(図 7-a, 7-b 参照)

シース (Inconel), 充填材 (MgO), 感温部 (90Ni, 10Cr) と基材 (Turbotherm 20 CO 20) からできている模型を考える。

熱電対温度計と基材の物性値は 773 K の場合の値を採用する。(図 9, 10, 11, 12 参照)

材 料	基 材	シース	充填材	感温部
$\lambda(\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	0.05	0.04	0.02	0.06

したがって面積比は、

$$1/F_{\text{基材}} : 1/F_{\text{シース}} : 1/F_{\text{充填材}} : 1/F_{\text{感温部}} = 0.05 : 0.04 : 0.02 : 0.06$$

ここで  $F_{\text{基材}}$  を 1 とする。すると

$$1/F_{\text{基材}} : 1/F_{\text{シース}} : 1/F_{\text{充填材}} : 1/F_{\text{感温部}} = 1 : \frac{5}{4} : \frac{5}{2} : \frac{5}{6}$$

となる。

感温部の  $R_{gelocht}/R^{\square} (\propto \lambda_{\text{基材}}/\lambda_{\text{感温部}})$  の値は 1 よ



り小さい。このことは電導紙に穴（抵抗は無限大）をあけることではなく逆に導電性のよい銀粉を電導紙に塗付することである。一方、シース、充填材に相当する部分にはそれぞれ  $R_{gelocht}/R^{\square}$  の値  $5/4$ ,  $5/2$  に対応する  $d/s$  を検定曲線（付録図1参照）から読み取ることができる。また銀粉を塗付する面積についても同様に検定曲線から読み取ることができる。<sup>11)12)13)14)</sup>（付録図2参照）

このようにして作製した模型を図7-aに示す（ただし円形の対称性を考慮して  $1/4$  の模型）図7-bでは測定結果と理論計算結果の比較を行なった。多少のばらつきは認められるが大体両者は一致していると考えられることができる。

#### 4. 熱電対温度計の内部構造による温度場の乱れ

前章までで述べた準備をもとに熱電対温度計の内部構造による温度場の乱れを平行四辺形の温度場の模型によって実験解析をする。

空冷タービンの熱的状態量として次の値を一例として想定する。

ガス温度	1,123 K
冷却空気温度	423 K
冷却孔の熱伝達率	600 (J/m <sup>2</sup> ·s·K)

熱流の方向については次の三つの場合を考える。

- 1) 境界に垂直方向
- 2) 境界に並行
- 3) 境界に斜め方向

ここで境界とは被測定領域の長手方向の境界線を意味する。模型の大きさは電導紙の上に作られる熱電対温度計の模型の影響が及ぶ範囲より大きくなければならない。熱電対の形状が与えられたとき最も広い範囲に影響を及ぼすのは断熱状態すなわち丸穴を電導紙に打ち抜きを行った場合である。図8は熱電対温度計に相当する形状の打ち抜きを行った時の無次元等温線を示す。この結果から長さは丸穴の直径の6倍、巾は5倍程度で十分であることがわかる、測定領域は Biot 数で0.005から0.080までとする。冷却翼の測定結果は例えば文献<sup>9),10)</sup>に見出すことができる。それらのなかから7個の資料を抜粋し表1, 2に示す。

表1, 2において  $T_{EG}$ ,  $T_{WG}$ ,  $R_{ges}$ ,  $R_{str}$ ,  $T_{EK}$ ,  $T_{WK}$  はそれぞれ、ガスのよどみ点温度、ガス側の壁温、与えられた熱伝達率  $\alpha$  より計算に求められる全抵抗 (3), (5)式より  $l_{str}$  を消去すると  $R_{ges} = \left(\frac{l_a}{l_0}\right) \cdot \left(\frac{R^{\square}}{b_r}\right) \cdot \left(\frac{\lambda}{\alpha}\right)$  を得る), 模型の紙片の抵抗, 冷却側のよどみ

点温度, 冷却側の壁温を意味する。熱伝達率  $\lambda$  は図9から読み取ることができガス側の熱伝達率  $\alpha_G$  は熱のバランスから計算される。

7個の資料について熱伝達率  $\alpha$  から模型の紙片の長さを計算できる。すなわち, まず相似の条件iii)から全抵抗  $R_{ges}$  が得られる。

$$R_{ges} = R_v = \left(\frac{l_a}{l_0}\right) \cdot \frac{1}{\kappa F_v} \cdot \left(\frac{\lambda}{\alpha}\right) \quad (13)'$$

この式を抵抗  $R^{\square}$  を使って表示すると

$$R_{ges} = \left(\frac{l_a}{l_0}\right) \cdot \left(\frac{R^{\square}}{b_r}\right) \cdot \left(\frac{\lambda}{\alpha}\right) \quad (13)$$

したがって(13), (13), (13)式を用いると模型の紙片の長さ  $l_{str}$  は次の式によって表示される。

$$l_{str} = \left(\frac{l_a}{l_0}\right) \cdot \frac{\lambda}{\alpha} \quad (14)$$

(14)式によって算出される  $l_{str}$  の値は, 一般的にいって非常に大きい。例えば1,875 m (温度873 K,  $\alpha = 600$  (J/m<sup>2</sup>·s·K),  $l_a/l_0 = 50$ ,  $\lambda = 22.5$  (J/m·s·K)) にも達する。

さてはじめに熱伝達率が高温ガス側, 冷却側においてそれぞれ一定であるような境界条件を取り扱う, このような場合には模型の紙片の長さ  $l_{str}$  をいし紙片の抵抗  $R_{ges}$  を大幅に小さくすることができる。その方法は高温ガス側と冷却側においてそれぞれの抵抗 (この抵抗は並列である) を一つにまとめてしまうことである。このことを以下において記述する。

次のオームの法則に注目する。

$$I_i = \frac{\Delta \varphi_i}{R_i}$$

ここで  $\Delta \varphi_i$  は  $i$  番目の紙片の電圧差,  $R_i$  は同じ紙片の抵抗,  $I_i$  はその紙片を流れる電流である。

すべての紙片を一つにまとめた場合の抵抗と電圧の関係は次式によって与えられるものとする。ただし,

$$\Delta \varphi = \Delta \varphi_i$$

$$I = \Sigma I_i$$

の関係にあるから, 電圧差が両方の場合において等しいとすると次の関係式を得る。

$$\frac{1}{R} = \Sigma \left(\frac{1}{R_i}\right) \quad (15)$$

一つの紙片の幅を  $b_r$  とし, 模型全体の幅を  $b$  とすると次の関係がある。

$$Z_{str} = \frac{b}{b_r} \quad (16)$$

表 1 抵抗値 (熱伝達率に相当)

実験 模型 番号	$T_{EG}(K)$	$T_{WG}(K)$	$\lambda_G$ ( $J/m \cdot s \cdot K$ )	$\alpha_G$ ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )	$R_{ges}(\Omega)$	$R_{str}(\Omega)$	$R_{ges}-R_{str}$	$\frac{R_{ges}-R_{str}}{25}$	$T_{EK}(\Omega)$	$T_{WK}(\Omega)$	$\lambda_K$ ( $J/m \cdot s \cdot K$ )	$\alpha_K$ ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )	$R_{ges}(\Omega)$	$R_{str}(\Omega)$	$R_{ges}-R_{str}$	$\frac{R_{ges}-R_{str}}{25}$
I	1,260.5	923.0	23.4	800.0	$295.4 \times 10^3$	$20.2 \times 10^3$	$275.2 \times 10^3$	$11.0 \times 10^3$	423.0	873.0	22.5	600.0	$378.8 \times 10^3$	$20.2 \times 10^3$	$358.6 \times 10^3$	$14.34 \times 10^3$
I	1,085.5	823.0	21.7	800.0	273.96	"	253.76	10.15	"	773.0	20.9	"	351.8	"	331.6	13.26
I	2,108.0	800.0	21.3	150.0	1,434.2	"	1,414.0	56.56	"	750.0	20.5	"	345.1	"	324.9	13.00
II	1,352.7	850.0	22.1	450.0	496.0	"	475.8	19.03	"	800.0	21.3	"	358.6	"	338.4	13.53
I	1,246.1	875.0	22.6	650.0	351.2	"	331.0	13.24	"	825.0	21.7	"	365.3	"	345.1	13.80
II	1,345.9	1,123.0	26.7	1,750.0	154.1	"	133.9	5.36	"	1,073.0	25.9	"	436.0	"	415.8	16.63
I	1,691.8	800.0	21.3	220.0	977.9	"	957.7	38.30	"	750.0	20.5	"	345.1	"	324.9	13.00

仮定

- 1)  $T_{WG} - T_{WK} = 50 (K)$
- 2)  $l$  模型 /  $l$  原型 = 50
- 3)  $R_Q^{\square} = 2,020 (\Omega)$

公式

- 1)  $\lambda (J/m \cdot s \cdot K) = 0.0167 \times T (K) + 7.95$
- 2)  $\alpha_G = \frac{600}{T_{EG} - T_{WG}} \times (T_{WG} - 473)$
- 3)  $R_{ges} = (l \text{ 模型} / l \text{ 原型}) \times R_Q^{\square} / b, \times (\lambda / a) = 10,100 \times \frac{\lambda}{a} \times 10^3$
- 4)  $Q = 600 \times (T_{WK} - 423)$

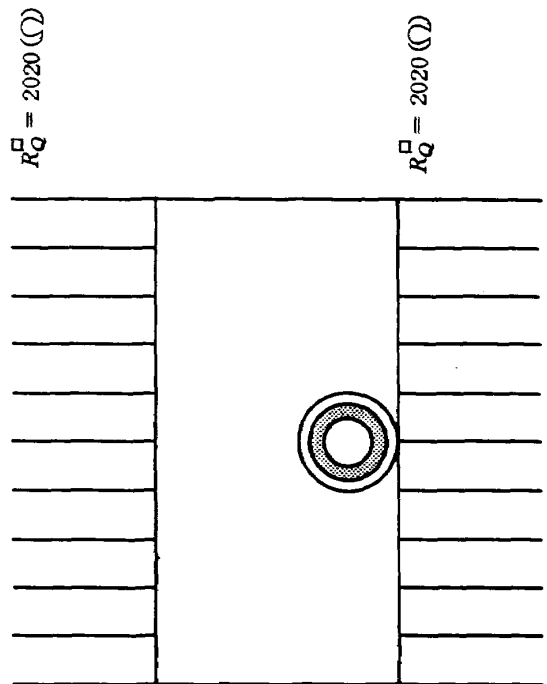


表2 抵抗値(熱伝達率に相当)

実験 模型 番号	$T_{EL}(K)$	$T_{WL}(K)$	$\lambda_L$ ( $J/m \cdot s \cdot K$ )	$\alpha_L$ ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )	$R_{ges}(\Omega)$	$R_{str}(\Omega)$	$R_{ges} - R_{str}$	$\frac{R_{ges} - R_{str}}{13}$	$T_{ER}(K)$	$T_{WR}(K)$	$\lambda_R$ ( $J/m \cdot s \cdot K$ )	$\alpha_R$ ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )	$R_{ges}(\Omega)$	$R_{str}(\Omega)$	$R_{ges} - R_{str}$	$\frac{R_{ges} - R_{str}}{13}$
I I	1,260.5	973.0	24.2	939.1	$230.9 \times 10^3$	$17.92 \times 10^3$	$212.9 \times 10^3$	$16.38 \times 10^3$	423.0	873.0	22.5	600.0	$336.0 \times 10^3$	$17.92 \times 10^3$	$318.1 \times 10^3$	$24.47 \times 10^3$
I II	1,085.5	873.0	22.5	988.2	204.0	"	186.1	14.31	"	773.0	20.9	"	312.1	"	294.2	22.60
I III	2,108.0	850.0	22.15	156.0	1,272.2	"	1,254.2	96.48	"	750.0	20.5	"	306.1	"	288.2	22.17
II IV	1,352.7	900.0	23.0	499.7	412.4	"	394.5	30.35	"	800.0	21.3	"	318.1	"	300.2	23.09
I V	1,246.1	925.0	23.4	751.2	279.1	"	261.2	20.10	"	825.0	21.7	"	324.1	"	306.1	23.55
II VI	1,345.9	1,173.0	27.5	2,255.6	109.2	"	91.3	7.02	"	1,073.0	25.9	"	386.8	"	368.9	28.37
I VII	1,691.8	850.0	22.15	233.1	851.4	"	833.5	64.10	"	750.0	20.5	"	306.1	"	288.2	22.17

仮定

1)  $T_{WL} - T_{WR} = 100 (K)$

2)  $l$  模型 /  $l$  原型 = 50

3)  $R_W^{\square} = 1,792 (\Omega)$

公式

1)  $\lambda (J/m \cdot s \cdot K) = 0.0167 \times T (K) + 7.95$

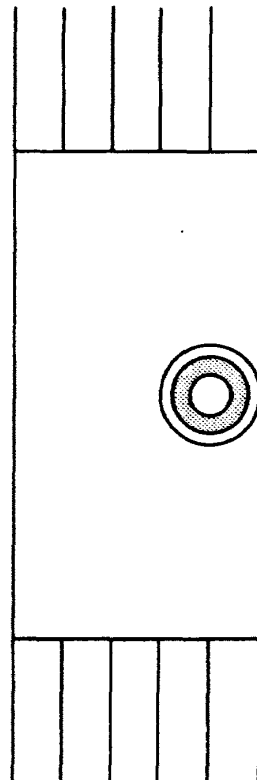
2)  $\alpha_L = \frac{600}{T_{EL} - T_{WL}} \times (T_{WL} - 523.0)$

3)  $R_{ges} = (l \text{ 模型} / l \text{ 原型}) \times R_W^{\square} / b_p \times (\lambda / a) = 8,960 \times \frac{\lambda}{a} \times 10^3$

4)  $Q = 600 \times (T_{WR} - 423.0)$

$R_W^{\square} = 1792 (\Omega)$

$R_W^{\square} = 1792 (\Omega)$



ここに  $Z_{str}$  は紙片の総数を表わす。

(15), (16)式から, もしすべての紙片の抵抗が同じであるとすると,  $R$  は次式によって得られる。

$$R = \frac{R_i}{Z_{str}} \quad (17)$$

この関係式から, 抵抗  $R$  は模型の紙片の数に比例して小さくなるということがわかる。

模型の倍率は 50 が適当であるとの判断から平行四辺形の温度場の長手方向は 25 cm, 幅は 12.5 cm とする。

熱伝達率に相当する紙片の幅は 1.0 cm, 長さは 10.0 cm とする。このような紙片の大きさを持った模型は熱流が境界に垂直方向に流れる場合で, 熱流が境界に対して並行に流れる場合には模型の大きさは全く同じであるが紙片の巾は一つだけ 0.5 cm (模型全体の幅は 12.5 cm のため) となる。この紙片だけは長さを 5.0 cm とする。このことによって他の紙片と同じ抵抗を持たせることができる。

また, 熱流の方向が境界に対して斜め方向にむかう場合については後に述べる。

以上の方法によって計算して得た値を表 1, 表 2 に示す。

表 1, 表 2 において壁温差 ( $T_{WG} - T_{WK}$ ) と ( $T_{WL} - T_{WR}$ ) が異なっているのは熱電対温度計における平均温度を両者の場合において等しくするためである。

**熱電対温度計の模型**

すでに 3 で述べたように, まず材料の熱伝導率を求めなければならない。温度に対する熱伝導率は図 9, 10, 11 に示されており, それらから熱伝導率を読み取ることができる。

このようにして熱伝導率を決めたのちに式(12)から  $R_{gelocht} / R^{\square}$  の値が求まる。次に抵抗比  $R_{gelocht} / R^{\square}$  と  $d/s$  の関係は例えば付録図 1, 2 等<sup>11) 12) 13) 14)</sup>に示されており  $d/s$  の値を読み取ることができる。

このようにして読み取った値を表 3 に示す。

表 3 の最後の行は, 熱電対温度計の模型作製に当って必要な一ピッチ  $S$  に対する直径  $D$  の比を表わしている。この結果 7 個の異なる状態に対して 2 個の模型で十分であることがわかる。基材の  $R_{gelocht} / R^{\square}$  比を 1 としたため, その比とほとんど同じ値を示すシーズの部分は模型上では打ち抜き, ないしは銀粉の塗付をすることなく両者の差は全くない。感温部は  $2/5$ , ロー付け部分は  $4/5$  ですべての場合に同じ値であるが, Mg O の充填材が入っている部分では  $1/2$  と  $3/5$  の二つの場合が考えられる。そこでこの部分で  $R_{gelocht} / (R_{gelocht})_{\text{基材}}$  の比が  $1/2$  の

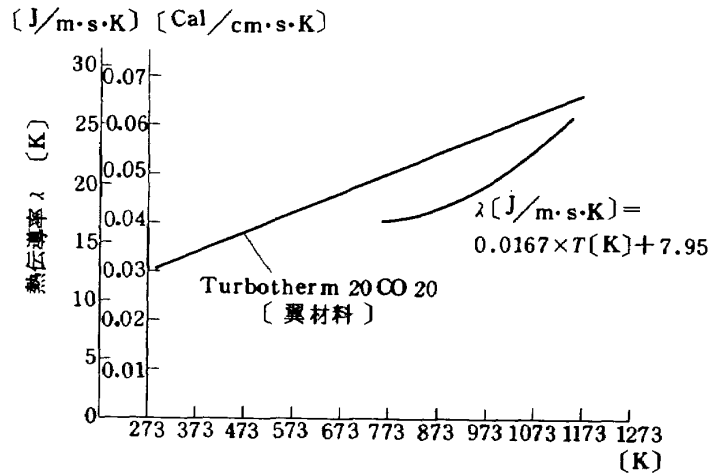


図 9 熱伝導率

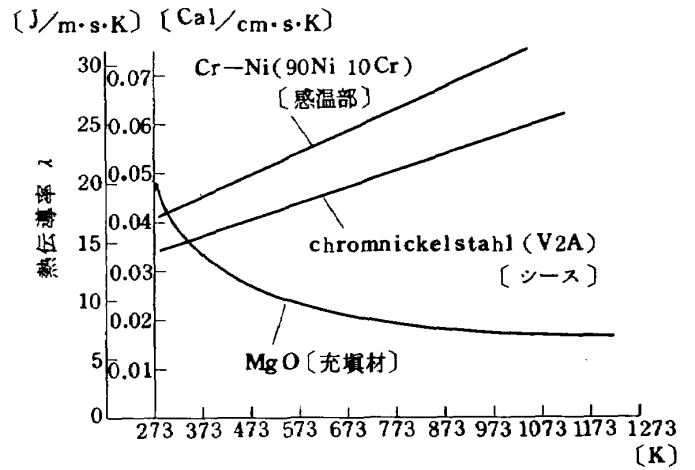


図 10 熱伝導率

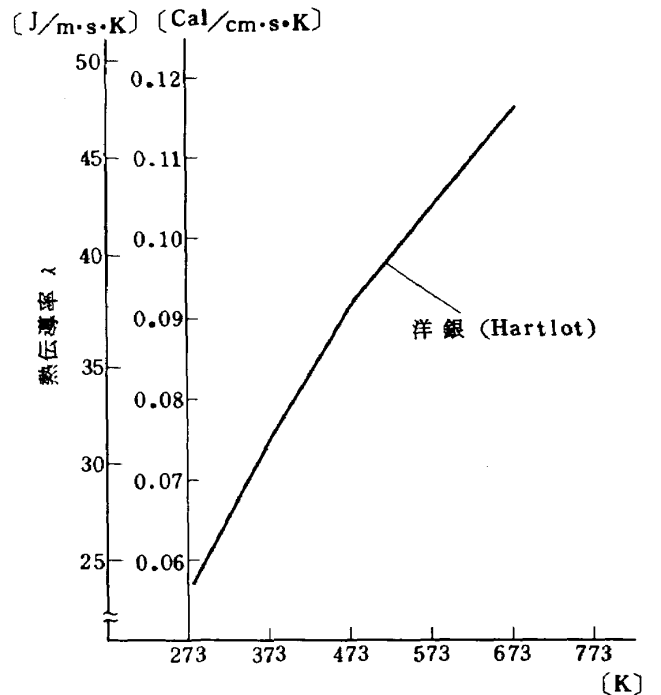


図 11 熱伝導率

表3 熱伝導率と抵抗比

I ( 923 K )					
	基 材	シ ー ス	充 填 材	感 温 部	ハ ン ダ
熱伝導率 (J/m·s·K)	23.3	23.0	7.5	28.4	67.0
$(R/R^{\square})/(R/R^{\square})_G$	1.00	1.01	3.11	0.82	0.35
$d/s$	—	—	0.53	0.40	0.80
分 数 型	—	—	1/2	2/5 又は 1/2.5	4/5 又は 2/2.5

II ( 823 K )					
	基 材	シ ー ス	充 填 材	感 温 部	ハ ン ダ
熱伝導率 (J/m·s·K)	21.77	21.8	7.9	28.3	60.0
$(R/R^{\square})/(R/R^{\square})_G$	1.00	0.999	2.756	0.769	0.363
$d/s$	—	—	0.506	0.417	0.783
分 数 型	—	—	1/2	2/5 又は 1/2.5	4/5 又は 2/2.5

III ( 800 K )					
	基 材	シ ー ス	充 填 材	感 温 部	ハ ン ダ
熱伝導率 (J/m·s·K)	21.3	21.7	8.0	26.9	54.2
$(R/R^{\square})/(R/R^{\square})_G$	1.00	0.98	2.66	0.79	0.39
$d/s$	—	—	0.5	0.38	0.77
分 数 型	—	—	1/2	2/5 又は 1/2.5	4/5 又は 2/2.5

IV ( 850 K )					
	基 材	シ ー ス	充 填 材	感 温 部	ハ ン ダ
熱伝導率 (J/m·s·K)	22.1	22.3	5.4	27.4	55.8
$(R/R^{\square})/(R/R^{\square})_G$	1.00	0.99	4.10	0.807	0.40
$d/s$	—	—	0.58	0.40	0.77
分 数 型	—	—	3/5	2/5 又は 1/2.5	4/5 又は 2/2.5

V ( 875 K )					
	基 材	シ ー ス	充 填 材	感 温 部	ハ ン ダ
熱伝導率 (J/m·s·K)	22.6	22.6	7.7	28.2	56.7
$(R/R^{\square})/(R/R^{\square})_G$	1.00	1.00	2.94	0.80	0.40
$d/s$	—	—	0.52	0.40	0.77
分 数 型	—	—	1/2	2/5 又は 1/2.5	4/5 又は 2/2.5

VI ( 1,123K )					
	基 材	シ ー ス	充 填 材	感 温 部	ハ ン ダ
熱伝導率 (J/m·s·K)	26.7	25.9	7.1	32.8	67.0
$(R/R^{\square})/(R/R^{\square})_G$	1.00	1.03	3.76	0.81	0.40
$d/s$	—	—	0.57	0.40	0.77
分 数 型	—	—	3/5	2/5 又は 1/2.5	4/5 又は 2/2.5

添字Gは基材を意味する。

場合の模型を模型(I)とし, 3/5 の場合の模型を模型(II)と名付ける。

ここで熱流の方向が境界に斜めになる場合について解説する。(すなわちハ)の場合)

イ), ロ) の場合の計測結果から模型の大きさは検査領域として十分な大きさを持っていることがわかる。特に模型の長さは 13.0 cm で十分であることから, 長さ 13.0 cm, 幅 12.5 cm の模型とした。幅は 12.5 cm と先の場合と同じ値である。これは, 後に翼の模型について熱電対温度計を埋め込んだ場合について温度場を求めるが, その際少なくとも幅が熱電対温度計の直径の 2.5 倍あるということ念頭においたため模型の幅は一定とした。

イ), ロ) の場合ガス側, 冷却側, とともに境界上ではそれぞれ一定の熱伝達率としたが, ハ) の場合等温線(ないしは熱流方向)を境界に対して斜め方向にするために熱伝達率は一定でなく変化する。

次に模型上の紙片の長さを計算によって求める必要がある。その際  $T_{WG} - T_{WK} = 50$  (K),  $|T_1 - T_{13}| = |T_{14} - T_{26}| = 50$  と仮定した。さらに熱の収支を考慮すると次の式を得る。

$$\alpha_G \cdot (T_{EG} - T_{WG}) = \alpha_K \cdot (T_{WK} - T_{EK})$$

この関係式が単位長さについて成立するとする。そのとき, 単位長さ当りの熱量は次式で表わされる。

$$Q = \alpha_G \cdot (T_{EG} - T_{WG}) \quad (19)$$

このようにして得られた値を表 4 に示す。

この表において ( $R_{ges} - R_{srr}$ ) の列に二つの数値が記述されているが下に ( ) の中に入って数値は上の数値の  $\frac{1}{2}$  の値である。この数値は実験装置の都合上(17)式に基づいて得たものである。このことを説明するために図 12 に配線図を示す。すなわち二つの異なる紙片に同じポテンシャルを与えるために二枚の紙片は一つのポテンシャルに結合されている, このような場合はすでに 5 の(17)式で表わされるようにポテンシャルに与えられる抵抗値はそれぞれの紙片に与えられるべき(両者に与えられる抵抗は等しい)抵抗値の半分でよい。

$T_1$  と  $T_{26}$  の温度差が 100 (K) あることは模型作製の場合, 熱伝達率が異なるからこの事実を考慮しなければならないが予備実験を行った結果この温度差による影響は無視してよいことがわかった。

最後に模型を電導紙から切り抜くわけであるが, ここ

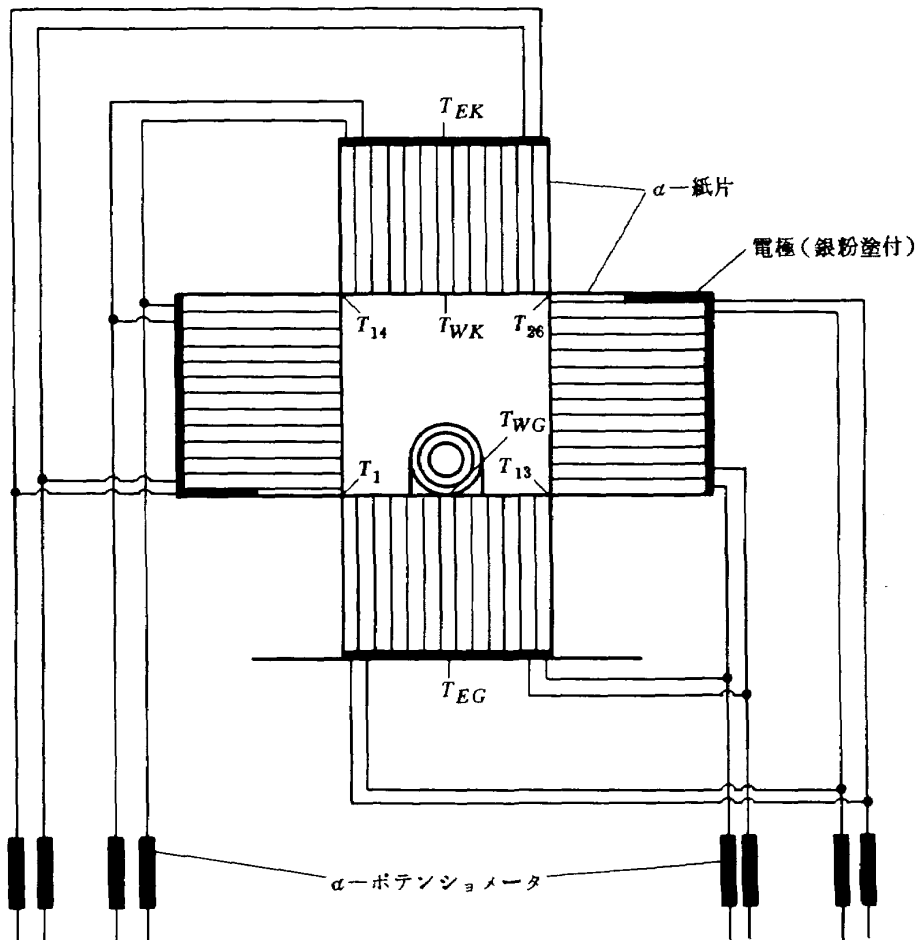


図 12 結線図

表4 抵抗値

(I) 模型 (I)

	$T_{emp}$	$\alpha_G$ ( $\frac{J}{m^2 \cdot s \cdot K}$ )	$\lambda$ ( $\frac{J}{m \cdot s \cdot K}$ )	$R_{ges} \times 10^3$ ( $\Omega$ )	$R_{etr} \times 10^3$	$R_{ges} - R_{str}$		$T_{emp}$	$\alpha_K$ ( $\frac{J}{m^2 \cdot s \cdot K}$ )	$\lambda$ ( $\frac{J}{m \cdot s \cdot K}$ )	$R_{ges} \times 10^3$ ( $\Omega$ )	$R_{str} \times 10^3$	$R_{ges} - R_{str}$
$T_1$	947.0	861.2	23.8	256.0	18.53	237.5 (118.7)	$T_{14}$	897.0	569.6	22.9	372.5	18.53	354.0 (177.0)
$T_2$	943.0	850.4	23.7	258.2	"	239.7 (119.3)	$T_{15}$	893.0	574.5	22.8(6)	368.7	"	350.2 (175.1)
$T_3$	939.0	839.8	23.6	260.4	"	241.9 (120.9)	$T_{16}$	889.0	579.4	22.8	364.6	"	346.1 (173.0)
$T_4$	935.0	829.5	23.5(6)	263.15	"	244.6 (122.3)	$T_{17}$	885.0	584.4	22.7	359.9	"	341.4 (170.7)
$T_5$	931.0	819.4	23.5	265.7	"	247.2 (123.6)	$T_{18}$	881.0	589.5	22.6(6)	356.1(4)	"	337.6 (168.8)
$T_6$	927.0	809.6	23.4	267.8	"	249.3 (124.6)	$T_{19}$	877.0	594.7	22.6	352.1	"	333.6 (166.8)
$T_{pc}$	923.0	800.0	23.3(6)	270.5	"	252.0 (126.0)	$T_{20}$	873.0	600.0	22.5	347.4	"	328.9 (164.4)
$T_8$	919.0	790.6	23.3	273.05	"	254.5 (127.2)	$T_{21}$	869.0	605.4	22.4(6)	343.7	"	325.2 (162.6)
$T_9$	915.0	781.5	23.2	275.0	"	256.5 (128.2)	$T_{22}$	865.0	610.9	22.4	339.7	"	321.2 (160.6)
$T_{10}$	911.0	772.5	23.1(6)	277.8	"	259.3 (129.6)	$T_{23}$	861.0	616.4	22.3	335.2	"	316.7 (158.3)
$T_{11}$	907.0	763.8	23.1	280.2	"	261.7 (130.8)	$T_{24}$	857.0	622.1	22.2(6)	331.5	"	313.0 (156.5)
$T_{12}$	903.0	755.2	23.0	283.2	"	263.7 (131.8)	$T_{25}$	853.0	627.9	22.2	327.6	"	309.1 (154.5)
$T_{13}$	899.0	746.9	22.9(6)	284.8	"	266.3 (133.1)	$T_{26}$	849.0	633.8	22.1	323.0(6)	"	304.5 (152.2)

(II) 模型 (I)

$T_1$	847.0	880.5	22.1	232.5(5)	18.53	214.0 (107.0)	$T_{14}$	797.0	561.5	21.2(6)	350.8	18.53	332.3 (166.1)
$T_2$	843.0	866.0	22.0	235.4	"	216.8 (108.4)	$T_{15}$	793.0	567.6	21.2	346.0(5)	"	327.5 (163.7)
$T_3$	839.0	851.9	21.9(6)	238.8	"	220.3 (110.1)	$T_{16}$	789.0	573.8	21.1	340.7	"	322.2 (161.1)
$T_4$	835.0	838.3	21.9	242.0(4)	"	223.5 (111.7)	$T_{17}$	785.0	580.1	21.0(6)	336.3(6)	"	317.8 (158.9)
$T_5$	831.0	825.1	21.8	244.8	"	226.3 (113.1)	$T_{18}$	781.0	586.6	21.0	331.7	"	313.1(5) (156.5)
$T_6$	827.0	812.4	21.7(6)	248.1(6)	"	229.6 (114.8)	$T_{19}$	777.0	593.2	20.9	326.4	"	307.9 (153.9)
$T_{pc}$	823.0	800.0	21.7	251.3	"	232.8 (116.4)	$T_{20}$	773.0	600.0	20.8(6)	322.1	"	303.6 (151.8)
$T_8$	819.0	788.0	21.6	254.0	"	235.4 (117.7)	$T_{21}$	769.0	606.9	20.8	317.5	"	299.0 (149.5)
$T_9$	815.0	776.3	21.5(6)	257.3	"	238.8 (119.4)	$T_{22}$	765.0	614.0	20.7	312.3(5)	"	293.8 (146.9)
$T_{10}$	811.0	765.0	21.5	260.4	"	241.8(6) (120.93)	$T_{23}$	761.0	621.3	20.6(6)	308.1	"	289.5(5) (144.7)
$T_{11}$	807.0	754.0	21.4	263.0	"	244.4 (122.2)	$T_{24}$	757.0	628.7	20.6	303.6	"	285.0(5) (142.5)
$T_{12}$	803.0	743.4	21.3(6)	266.2	"	247.7 (123.8)	$T_{25}$	753.0	636.4	20.5	298.4	"	279.9 (139.9)
$T_{13}$	799.0	733.0	21.3	269.2	"	250.7 (125.3)	$T_{26}$	749.0	644.2	20.4(6)	294.2(6)	"	275.7 (137.8)

仮定

- i)  $T_{WG} - T_{WK} = 50$ ,  $|T_1 - T_{13}| = |T_{14} - T_{26}| = 50$
- ii)  $Q = 270000.0$  (I)  
 $Q = 210000.0$  (II)
- iii)  $\alpha_G = 270000 / (1.260.5 - T_{emp})$ ,  $\alpha_K = 270000 / (T_{emp} - 423.0)$  (I)  
 $\alpha_G = 210000 / (1.085.5 - T_{emp})$ ,  $\alpha_K = 210000 / (T_{emp} - 423.0)$  (II)
- iv)  $\lambda = 0.0167 \times T(K) + 7.95$
- v)  $R_{ges} = 9.265 \times (\lambda/\alpha) \times 10^3$  ( $\Omega$ ) (模型 (I) に対して)

表 4 ( 続 )

Ⅲ) 模型 (I)

	$T_{emp}$	$\alpha_G$ ( $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ )	$\lambda$ ( $\text{J}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ )	$R_{ges} \times 10^3$ ( $\Omega$ )	$R_{str} \times 10^3$	$R_{ges} - R_{str}$		$T_{emp}$	$\alpha_K$ ( $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ )	$\lambda$ ( $\text{J}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ )	$R_{ges} \times 10^3$	$R_{str} \times 10^3$	$R_{ges} - R_{str}$
$T_1$	824.0	152.8	21.7	1,315.8	18.53	1,297.2 (648.6)	$T_{14}$	774.0	559.0	20.8(8)	346.1	18.53	327.5 (163.7)
$T_2$	820.0	152.3	21.6(4)	1,316.4	"	1,297.9 (648.9)	$T_{15}$	770.0	565.4	20.8	340.8	"	322.3 (161.1)
$T_3$	816.0	151.9	21.5(8)	1,316.2	"	1,297.7 (648.8)	$T_{16}$	766.0	572.0	20.7(4)	335.9	"	317.4 (158.7)
$T_4$	812.0	151.4	21.5	1,315.7	"	1,297.2 (648.6)	$T_{17}$	762.0	578.8	20.6(8)	331.0	"	312.5 (156.2)
$T_5$	808.0	150.9	21.4(4)	1,316.4	"	1,297.8 (648.9)	$T_{18}$	758.0	585.7	20.6	325.9	"	207.3 (153.6)
$T_6$	804.0	150.5	21.3(8)	1,316.2	"	1,297.7 (648.8)	$T_{19}$	754.0	592.7	20.5(4)	321.1	"	302.5 (151.2)
$T_{WG}$	800.0	150.0	21.3	1,315.6	"	1,297.1 (648.5)	$T_{WK}$	750.0	600.0	20.4(8)	316.2	"	297.7 (148.8)
$T_8$	796.0	149.5	21.2(4)	1,316.3	"	1,297.8 (648.9)	$T_{21}$	746.0	607.4	20.4	311.2	"	292.6 (146.3)
$T_9$	792.0	149.1	21.1(8)	1,316.1	"	1,297.6 (648.8)	$T_{22}$	742.0	615.0	20.3(4)	306.4	"	287.9 (143.9)
$T_{10}$	788.0	148.6	21.1	1,315.6	"	1,297.0 (648.5)	$T_{23}$	738.0	622.9	20.2(8)	301.6	"	283.1 (141.5)
$T_{11}$	784.0	148.2	21.0(4)	1,315.4	"	1,296.8 (648.4)	$T_{24}$	734.0	630.9	20.2	296.6	"	278.1 (139.0)
$T_{12}$	780.0	147.7	20.9(8)	1,316.04	"	1,297.5 (648.7)	$T_{25}$	730.0	639.1	20.1(4)	292.0	"	273.4 (136.7)
$T_{13}$	776.0	147.3	20.9	1,314.6	"	1,296.0 (648.0)	$T_{26}$	726.0	647.5	20.0(8)	287.3	"	268.8 (134.4)

Ⅳ) 模型 (II)

$T_1$	874.0	472.5	22.5(4)	442.4	18.54	423.9 (211.9)	$T_{14}$	824.0	564.1	21.7	356.6	18.54	338.0(6) (169.0)
$T_2$	870.0	468.6	22.4(8)	444.7	"	426.2 (213.1)	$T_{15}$	820.0	569.8	21.6(4)	352.0(6)	"	333.5 (166.7)
$T_3$	866.0	464.8	22.4	446.7	"	428.2 (214.1)	$T_{16}$	816.0	575.6	21.5(8)	347.5	"	329.0 (164.5)
$T_4$	862.0	461.0	22.3(5)	449.4	"	430.9 (215.4)	$T_{17}$	812.0	581.5	21.5	342.7	"	324.2 (162.1)
$T_5$	858.0	457.2	22.2(8)	451.7	"	433.2 (216.6)	$T_{18}$	808.0	587.5	21.4(4)	338.3	"	319.7(5) (159.8)
$T_6$	854.0	453.6	22.2	453.7	"	435.1(5) (217.5)	$T_{19}$	804.0	593.7	21.3(8)	333.8	"	315.3 (157.1)
$T_{WG}$	850.0	459.0	22.1(4)	456.1	"	437.5 (218.7)	$T_{WK}$	800.0	600.0	21.3	329.1	"	310.5 (155.2)
$T_8$	846.0	446.4	22.6(8)	458.5	"	440.0 (220.0)	$T_{21}$	796.0	606.4	21.2(4)	324.7	"	306.1(5) (153.0)
$T_9$	842.0	442.9	22.00	460.5	"	441.9 (220.9)	$T_{22}$	792.0	613.0	21.1(8)	320.3	"	301.8 (150.9)
$T_{10}$	838.0	439.5	21.9(4)	462.8	"	444.2 (222.1)	$T_{23}$	788.0	619.7	21.1	315.6	"	297.1 (148.5)
$T_{11}$	834.0	436.1	21.8(8)	465.1	"	446.5(5) (223.4)	$T_{24}$	784.0	626.6	21.0(4)	311.3	"	292.7 (146.3)
$T_{12}$	830.0	432.8	21.8	466.9	"	448.4 (224.2)	$T_{25}$	780.0	633.6	20.9(8)	306.9(5)	"	288.4 (144.2)
$T_{13}$	826.0	429.5	21.7(4)	469.2	"	450.7 (225.3)	$T_{26}$	776.0	640.8	20.9	302.3	"	283.8 (141.9)

仮定

i)  $T_{WG} - T_{WK} = 50$ ,  $|T_1 - T_{13}| = |T_{14} - T_{26}| = 50$

ii)  $Q = 196200$  (Ⅲ)

$Q = 226200$  (Ⅳ)

iii)  $\alpha_G = 196200 / (2,108 - T_{emp})$ ,  $\alpha_K = 196200 / (T_{emp} - 423.0)$  (Ⅲ)

$\alpha_G = 226200 / (1,352.7 - T_{emp})$ ,  $\alpha_K = 226200 / (T_{emp} - 423.0)$  (Ⅳ)

iv)  $\lambda = 0.0167 \times T(\text{K}) + 7.95$

v)  $R_{ges} = 9,265 \times (\lambda / \alpha) \times 10^3$  (Ⅲ)

$R_{ges} = 9,270 \times (\lambda / \alpha) \times 10^3$  (Ⅳ)



表4 (続)

(V) 模型(I)

	$T_{emp}$	$\alpha_K$ ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )	$\lambda$ ( $J/m \cdot s \cdot K$ )	$R_{ges} \times 10^3$	$R_{str} \times 10^3$	$R_{ges} - R_{str}$		$T_{emp}$	$\alpha_G$ ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )	$\lambda$ ( $J/m \cdot s \cdot K$ )	$R_{ges} \times 10^3$	$R_{str} \times 10^3$	$R_{ges} - R_{str}$
$T_1$	899.0	694.9	22.9(6)	306.1	18.53	287.6 (143.8)	$T_{14}$	849.0	566.2	22.1(3)	362.1	18.53	343.6 (171.8)
$T_2$	895.0	687.0	22.9	308.8	"	290.3 (145.1)	$T_{15}$	845.0	571.6	22.0(6)	357.5(7)	"	339.0 (169.5)
$T_3$	891.0	679.2	22.8(3)	311.4	"	292.9 (146.4)	$T_{16}$	841.0	577.0	22.0	353.2(6)	"	334.7 (167.3)
$T_4$	887.0	671.7	22.7(6)	313.9	"	295.4 (147.7)	$T_{17}$	837.0	582.6	21.9(3)	348.7(5)	"	330.2 (165.1)
$T_5$	883.0	664.3	22.7	316.6	"	298.0 (149.0)	$T_{18}$	833.0	588.3	21.8(6)	344.2(7)	"	325.7 (162.8)
$T_6$	879.0	657.0	22.6(3)	319.1	"	300.6 (150.3)	$T_{19}$	829.0	594.1	21.8	340.0	"	321.4(4) (160.7)
$T_{wc}$	875.0	650.0	22.5(6)	321.5(7)	"	303.0 (151.5)	$T_{20}$	825.0	600.0	21.7(3)	335.5	"	317.0 (158.5)
$T_8$	871.0	643.0	22.5	324.2	"	305.6 (152.8)	$T_{21}$	821.0	606.0	21.6(6)	331.1(5)	"	312.6 (156.3)
$T_9$	867.0	636.2	22.4(3)	326.6(5)	"	308.1 (154.0)	$T_{22}$	817.0	612.2	21.6	326.9	"	308.3(6) (154.1)
$T_{10}$	863.0	629.6	22.3(6)	329.0(4)	"	310.5 (155.2)	$T_{23}$	813.0	618.5	21.5(3)	322.5	"	304.0 (152.0)
$T_{11}$	859.0	623.1	22.3	331.6	"	313.0 (150.5)	$T_{24}$	809.0	624.9	21.4(6)	318.2	"	299.6 (149.8)
$T_{12}$	855.0	616.7	22.2(3)	334.0	"	315.4 (157.7)	$T_{25}$	805.0	631.4	21.4	314.0	"	295.5 (147.7)
$T_{13}$	851.0	610.5	22.1(6)	336.3	"	317.8 (158.9)	$T_{26}$	801.0	638.1	21.3(3)	309.7	"	291.1(7) (145.5)

(VI) 模型(II)

$T_1$	1,147.0	1,960.8	27.1	128.1	18.54	109.6 (54.8)	$T_{14}$	1,097.0	578.6	26.2(7)	420.9	18.54	402.3 (201.1)
$T_2$	1,143.0	1,922.1	27.0(4)	130.4	"	111.8(7) (55.9)	$T_{15}$	1,093.0	582.1	26.2	417.2	"	398.7 (199.3)
$T_3$	1,139.0	1,885.0	26.9(7)	132.6	"	114.1 (57.0)	$T_{16}$	1,089.0	585.6	26.1(4)	413.8	"	395.2(5) (197.6)
$T_4$	1,135.0	1,849.2	26.9	134.8(5)	"	116.3 (58.1)	$T_{17}$	1,085.0	589.1	26.0(7)	409.9	"	391.3(8) (195.6)
$T_5$	1,131.0	1,814.8	26.8(4)	137.1	"	118.5(6) (59.2)	$T_{18}$	1,081.0	592.7	26.0	406.6(5)	"	388.1 (194.0)
$T_6$	1,127.0	1,781.6	26.7(7)	139.3	"	120.7(5) (60.3)	$T_{19}$	1,077.0	596.3	25.9(4)	403.2(6)	"	384.7 (192.3)
$T_{wc}$	1,123.0	1,749.7	26.7	141.4(5)	"	122.9 (61.4)	$T_{20}$	1,073.0	600.0	25.8(7)	399.7	"	381.1(5) (190.5)
$T_8$	1,119.0	1,718.8	26.6(4)	143.7	"	125.1 (62.5)	$T_{21}$	1,069.0	603.7	25.8	396.1(7)	"	377.6 (188.8)
$T_9$	1,115.0	1,689.0	26.5(7)	145.8	"	127.3 (63.6)	$T_{22}$	1,065.0	607.5	25.7(4)	392.8	"	374.2 (187.1)
$T_{10}$	1,111.0	1,660.3	26.5	147.9(6)	"	129.4 (64.7)	$T_{23}$	1,061.0	611.3	25.6(7)	389.3	"	370.7 (185.3)
$T_{11}$	1,107.0	1,632.5	26.4(4)	150.1	"	131.6 (65.8)	$T_{24}$	1,057.0	615.1	25.6	385.8	"	367.3 (183.6)
$T_{12}$	1,103.0	1,605.6	26.3(7)	152.2	"	133.7 (66.8)	$T_{25}$	1,053.0	619.0	25.5(4)	382.5	"	363.9 (181.9)
$T_{13}$	1,099.0	1,579.6	26.3	154.3	"	135.8 (67.9)	$T_{26}$	1,049.0	623.0	25.4(7)	379.0	"	360.4 (180.2)

仮定

- i)  $T_{WG} - T_{WK} = 50$ ,  $|T_1 - T_{13}| = |T_{14} - T_{26}| = 50$
- ii)  $Q = 241200$  (V)  
 $Q = 390000$  (VI)
- iii)  $\alpha_G = 241200 / (1,246.1 - T_{emp})$ ,  $\alpha_K = 241200 / (T_{emp} - 423.0)$  (V)  
 $\alpha_G = 390000 / (1,345.9 - T_{emp})$ ,  $\alpha_K = 390000 / (T_{emp} - 423.0)$  (VI)
- iv)  $\lambda = 0.0167 \times T(K) + 7.95$
- v)  $R_{ges} = 9,265 \times (\lambda/\alpha) \times 10^3$  (V) (V)  
 $R_{ges} = 9,270 \times (\lambda/\alpha) \times 10^3$  (VI) (VI)

表 4 ( 続 )

(M) 模型 (I)

	$T_{emp}$	$\alpha_G$ ( $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ )	$\lambda$ ( $\text{J}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ )	$R_{ges} \times 10^3$	$R_{str} \times 10^3$	$R_{ges} - R_{str}$		$T_{emp}$	$\alpha_K$ ( $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ )	$\lambda$ ( $\text{J}/\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K}$ )	$R_{ges} \times 10^3$	$R_{str} \times 10^3$	$R_{ges} - R_{str}$
$T_1$	824.0	226.1	21.7	889.2	18.53	870.7 (435.3)	$T_{14}$	774.0	559.0	20.8(8)	346.0(7)	18.53	327.5 (163.7)
$T_2$	820.0	225.1	21.6(4)	890.7	"	872.1(6) (436.1)	$T_{15}$	770.0	565.4	20.8	340.8	"	322.3 (161.1)
$T_3$	816.0	224.0	21.5(8)	892.6	"	874.0(5) (437.0)	$T_{16}$	766.0	572.0	20.7(4)	335.9	"	317.4 (158.7)
$T_4$	812.0	223.0	21.5	893.2(6)	"	874.7 (437.3)	$T_{17}$	762.0	578.8	20.6(8)	331.0	"	312.5 (156.2)
$T_5$	808.0	222.0	21.4(4)	894.8	"	876.2(5) (438.1)	$T_{18}$	758.0	585.7	20.6	325.9	"	307.3 (153.6)
$T_6$	804.0	221.0	21.3(8)	896.3	"	877.8 (438.9)	$T_{19}$	754.0	592.7	20.5(4)	321.0(8)	"	302.5(5) (151.2)
$T_{WK}$	800.0	220.0	21.3	897.0	"	878.5 (439.2)	$T_{WK}$	750.0	600.0	20.4(8)	316.2	"	297.7 (148.8)
$T_8$	796.0	219.0	21.2(4)	898. (6)	"	880.0 (440.0)	$T_{21}$	746.0	607.4	20.4	311.2	"	292.6 (146.3)
$T_9$	792.0	218.0	21.1(8)	900.1	"	881.6 (440.8)	$T_{22}$	742.0	615.0	20.3(4)	306.4	"	287.9 (143.9)
$T_{10}$	788.0	217.1	21.1	900.5	"	881.9 (440.9)	$T_{23}$	738.0	622.9	20.2(8)	301.6	"	283.1 (141.5)
$T_{11}$	784.0	216.1	21.0(4)	902.0(6)	"	883.5 (441.7)	$T_{24}$	734.0	630.9	20.2	296.6	"	278.1 (139.0)
$T_{12}$	780.0	215.2	20.9(8)	903.2(5)	"	884.7 (442.3)	$T_{25}$	730.0	639.1	20.1(4)	292.0	"	273.4 (136.7)
$T_{13}$	776.0	214.2	20.9	904.00	"	885.5 (442.7)	$T_{26}$	726.0	647.5	20.0(8)	287.3	"	268.8 (134.4)

仮定

- i)  $T_{WG} - T_{WK} = 50$ ,  $|T_1 - T_{13}| = |T_{14} - T_{26}| = 50$
- ii)  $Q = 196200$
- iii)  $\alpha_G = 196200 / (1,691.8 - T_{emp})$ ,  $\alpha_K = 196200 / (T_{emp} - 423.0)$
- iv)  $\lambda = 0.0167 \times T \text{ (K)} + 7.95$
- v)  $R_{ges} = 9,265 \times (\lambda / \alpha) \times 10^3 \text{ (}\Omega\text{)}$

で電導紙の非一様性を考慮しなければならない。

一つの紙片 (長さ 10.0 cm, 幅 1.0 cm) 当りの平均抵抗値はロール巻さの Teledeltus Paper の長手方向の抵抗値  $R_W$  とそれと垂直方向の抵抗値  $R_Q$  に分けられる。

その測定値は

$$\begin{aligned}
 R_W &= 16.89 \times 10^3 \text{ (}\Omega\text{)} && \text{模型 (I)} \\
 R_Q &= 18.53 \times 10^3 \text{ (}\Omega\text{)} \\
 R_W &= 16.92 \times 10^3 \text{ (}\Omega\text{)} && \text{模型 (II)} \\
 R_Q &= 18.54 \times 10^3 \text{ (}\Omega\text{)}
 \end{aligned}$$

ここで、この抵抗値  $R_W$ ,  $R_Q$  を調整するために紙片の長さを長くするか短くするかしなければならない。長手方向の抵抗  $R_W$  はそれに垂直方向の抵抗  $R_Q$  より小さいが、模型(I), (II)の場合ともに長手方向の紙片の長さを1.0

cm 長くすると両者の抵抗値はほぼ等しくなる。

紙片の幅が 0.5 cm のものについては 0.5 cm だけ長くすれば良い。

**熱電対温度計の模型の抵抗の測定値**

熱電対温度計の模型の電気抵抗を温度 800 K, 823 K, 850 K, 923 K と 1,123 K の場合について境界に並行, 垂直, 斜め方向について計測した結果を表 5 に示す。

抵抗差が負であることは、熱電対温度計の模型は基材より抵抗が少ないことを意味し、正の符号は基材より抵抗が大きいことを示す。

ここで、熱電対温度計の平均熱伝導率  $\lambda_{mittel}$  を求めることは興味あることである。なぜなら熱電対温度計の指示値と真の温度との差は基材と熱電対温度計の熱伝



表7 各構成要素の面積(m<sup>2</sup>)

	シース	充填材(MgO)	感温部	ハンダ	全面積
面積(m <sup>2</sup> )	0.159 × 10 <sup>-6</sup>	0.2946 × 10 <sup>-6</sup>	0.3318 × 10 <sup>-6</sup>	0.1073 × 10 <sup>-6</sup>	0.8927 × 10 <sup>-6</sup>

表8 熱伝導率(J/m·s·K)

	λ <sub>シース</sub>	λ <sub>充填材</sub>	λ <sub>感温部</sub>	λ <sub>ハンダ</sub>	λ <sub>平均</sub>
I ( 923 K )	23.0	7.5	28.4	67.0	25.18
II ( 823 K )	21.8	7.9	28.3	60.0	24.22
III ( 800 K )	21.7	8.0	26.9	54.2	23.02
N ( 850 K )	22.3	5.4	27.4	55.8	22.64
V ( 875 K )	22.6	7.7	28.2	56.7	23.86
VI ( 1,123 K )	25.9	7.1	32.8	67.0	27.20

表9 (λ)<sub>T</sub>/λ<sub>基材</sub> — 値

	計測値(λ/λ <sub>G</sub> )	計算値(λ <sub>mittel</sub> /λ <sub>G</sub> )
I ( 923 K )	0.9892	1.0806
II ( 823 K )	0.9889	1.1125
III ( 800 K )	0.9892	1.0807
N ( 850 K )	1.0266	1.0244
V ( 875 K )	0.9889	1.0557
VI ( 1,123 K )	1.0269	1.0187

伝導率の比(λ)<sub>熱電対</sub>/λ<sub>基材</sub>と(λ)<sub>mittel</sub>/λ<sub>基材</sub>を表9に示す。この結果この熱伝導率の比の値はほぼ1.0とみてよい。ただし、電導紙による模型I ( I, II, III, Vの場合に相当する。)の場合は1.0以下であり、理論値よりやや小さめの値を示している。この誤差は模型作製法の改良によってさらに少なくすることができる。

測定結果

測定は熱電対温度計の指示値(出力)になると予想される感温部の中心点のみならず、その他の等温線を描くに必要な点についても行った。

温度場における熱電対温度計の影響を表現するに適しているパラメータとしてV.S. Novopavlovskii<sup>2)</sup>は

$$\frac{\alpha_G \cdot b}{\lambda_1} \text{ (Biot 数)}, \frac{t_c - t_\infty}{q_0 \cdot b / \lambda_1}, \frac{t_c - t_\infty}{t_s - t_\infty}, \frac{t_c - t_\infty}{t_g - t_s}, \frac{t_c - t_s}{t_g - t_s} \text{ 等}$$

A.B. Turnerは<sup>3)</sup>上述のパラメータにさらに実用的なパラメータとして

$$\frac{t_c - t_\infty}{t_s - t_\infty}$$

を推せんしている。

ここに

t<sub>c</sub> ; 感温部の中心点の温度(K)

t<sub>0</sub> ; 熱電対を埋め込む前の感温部の中心の位置に相当する点の温度(K)

t<sub>s</sub> ; 熱電対を埋め込む前の境界(壁)における温度(K)

t<sub>g</sub> ; ガス温度(K)

q<sub>0</sub> ; 単位面積当りに流れる熱量(J)

平行四辺形の温度場の模型による温度場の計測結果は必ずしも理論的に期待した値を示さなかった。これは模型作製の際の抵抗 R<sup>□</sup>の値の誤差に基づくものが最大の原因であると思われる。その他の原因としては電圧の測定誤差、模型の相似性、電導紙の抵抗の非一様性、抵抗値 R<sup>□</sup>の湿度による変化、電圧測定針の接触方法、接触圧による誤差等があげられる。

あらかじめ境界上に与えた温度分布と電導紙による模型での測定結果が必ずしも一致しなかったので測定結果の温度を使って資料の整理をする。

パラメータについての計算結果を表10に示す。

ただし

λ<sub>1</sub> ; 基材の熱伝導率 (Turbotherm 200020) (J/m·s·K)

λ<sub>2</sub> ; シースの熱伝導率 (V2A) (J/m·s·K)

λ<sub>3</sub> ; 充填材 (MgO) の熱伝導率 (J/m·s·K)

λ<sub>4</sub> ; 感温部の熱伝導率 (90Ni, 10Cr) (J/m·s·K)

λ<sub>5</sub> ; ロー材の熱伝導率 (洋銀) (J/m·s·K)

表 10 パラメータ計算値

実験番号	$\lambda_1(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_2(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_3(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_4(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_5(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_6(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\alpha_G \times b / \lambda_1$	$\lambda_1 / \lambda_2$	$\lambda_1 / \lambda_3$	$\lambda_1 / \lambda_6$	$\xi = \frac{t_c - t_\infty}{q_0 \cdot b / \lambda_1}$	$\frac{t_c - t_\infty}{t_s - t_\infty}$	$\theta = \frac{t_c - t_\infty}{t_g - t_s}$	$\frac{t_c - t_s}{t_g - t_s}$
I	22.9	22.8	7.60	28.7	62.3	0.033	1.00	3.01	0.37	0.00	0.00	0.0000	-0.017	
II	21.3	21.4	7.98	26.9	56.2	0.035	1.00	2.67	0.38	0.00	0.00	0.0000	-0.016	
III	20.4	20.7	8.25	25.9	53.0	0.007	0.99	2.47	0.38	-0.09	-0.21	-0.0007	-0.004	
IV	21.6	21.7	7.92	27.2	57.4	0.020	1.00	2.73	0.38	-0.05	-0.10	-0.0009	-0.011	
V	22.1	22.1	7.81	27.8	59.2	0.028	1.00	2.83	0.37	0.00	0.00	0.0000	-0.014	
VI	26.4	25.7	7.08	32.7	75.2	0.064	1.03	3.73	0.35	-0.09	-0.20	-0.0060	-0.036	
VII	20.6	20.9	8.23	26.1	53.5	0.010	0.99	2.50	0.39	-0.02	-0.05	-0.0002	-0.005	

I) 熱流が境界に垂直方向の場合 (  $b = 0.001 \text{ m}$  )

実験番号	$\lambda_1(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_2(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_3(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_4(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_5(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_6(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\alpha_G \times b / \lambda_1$	$\lambda_1 / \lambda_2$	$\lambda_1 / \lambda_3$	$\lambda_1 / \lambda_6$	$\xi = \frac{t_c - t_\infty}{q_0 \cdot b / \lambda_1}$	$\frac{t_c - t_\infty}{t_s - t_\infty}$	$\theta = \frac{t_c - t_\infty}{t_g - t_s}$	$\frac{t_c - t_s}{t_g - t_s}$
I	23.2	23.0	7.54	29.0	63.1	0.036	1.01	3.08	0.37	-0.32	-0.12	-0.0116	-0.105	
II	21.6	21.7	7.92	27.2	57.2	0.040	1.00	2.73	0.38	-0.17	-0.06	-0.0070	-0.116	
III	20.3	20.6	8.33	25.7	52.4	0.007	0.99	2.44	0.39	-0.10	-0.05	-0.0007	-0.016	
IV	21.7	21.8	7.92	27.4	57.7	0.021	1.00	2.74	0.38	-0.17	-0.07	-0.0036	-0.053	
V	22.3	22.3	7.77	28.0	59.9	0.030	1.00	2.87	0.37	-0.15	-0.06	-0.0045	-0.082	
VI	26.7	25.9	7.04	32.9	76.2	0.078	1.03	3.79	0.35	-0.16	-0.06	-0.0123	-0.210	
VII	20.6	20.8	8.23	26.1	53.5	0.010	0.99	2.50	0.39	-0.24	-0.11	-0.0025	-0.026	

II) 熱流が境界に平行の場合 (  $b = 0.001 \text{ m}$  )

実験番号	$\lambda_1(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_2(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_3(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_4(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_5(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\lambda_6(\text{J/m}\cdot\text{s}\cdot\text{K})$	$\alpha_G \times b / \lambda_1$	$\lambda_1 / \lambda_2$	$\lambda_1 / \lambda_3$	$\lambda_1 / \lambda_6$	$\xi = \frac{t_c - t_\infty}{q_0 \cdot b / \lambda_1}$	$\frac{t_c - t_\infty}{t_s - t_\infty}$	$\theta = \frac{t_c - t_\infty}{t_g - t_s}$	$\frac{t_c - t_s}{t_g - t_s}$
I	23.1	22.9	7.54	28.9	62.9	0.034	1.01	3.06	0.37	-0.05	-0.12	-0.0017	-0.016	
II	21.4	21.5	7.96	27.0	56.5	0.035	1.00	2.69	0.38	0.06	0.13	0.0022	-0.014	
III	22.4	22.4	7.92	28.1	60.3	0.007	1.00	2.83	0.37					
IV	21.3	21.5	7.98	26.9	56.3	0.019	0.99	2.67	0.38	0.12	0.28	0.0024	-0.006	
V	22.1	22.1	7.81	27.8	59.2	0.028	1.00	2.83	0.38	0.00	0.00	0.0000	-0.012	
VI	26.8	26.0	7.04	33.1	76.6	0.069	1.03	3.81	0.35	0.19	0.08	0.0024	-0.026	
VII	19.3	19.8	8.75	24.6	48.7	0.010	0.97	2.21	0.40	0.31	0.84	0.0032	-0.001	

III) 熱流が境界に斜め方向の場合 (  $b = 0.001 \text{ m}$  )

ここで図 13 に A.B. Turner によって提案されたパラメータ  $(t_c - t_{\infty}) / (t_s - t_{\infty})$  について測定結果をプロットした。

熱流の方向が境界に垂直方向の場合 (イ) と並行の場合 (ロ) についてはこのパラメータは負の値を示すが、熱流の方向が境界に斜め方向の場合 (ハ) には正の値を示す、このことは熱伝導率の非常に高い洋銀からなるロー材の影響が (ハ) の場合とイ), ロ) の場合では異なってくることを意味している。

イ) の場合 Biot 数が 0.034 で誤差が 0 になる、(ハ) の場合には誤差が Biot 数が増加するとともに減少しているが

この Biot 数の範囲ではまだ零にはなっていない、ロ) の場合には誤差はほとんど Biot 数に依存せず一定の値を示す。

図 14, 15 に等温線を代表的例として示す。図 14 はイ) の場合で Biot 数 0.064 に相当し、図 15 は (ハ) の場合で Biot 数 0.069 に相当する。

充填材に相当する部分で等温線は著るしく曲折しており、感温部では熱伝導率が高いため充填材の部分より急激に逆の方向に等温線が曲っている。点線は熱電対温度計を埋め込まなかった場合の等温線を示し、かっこ内の数字はこの点線に相当する温度を示している。

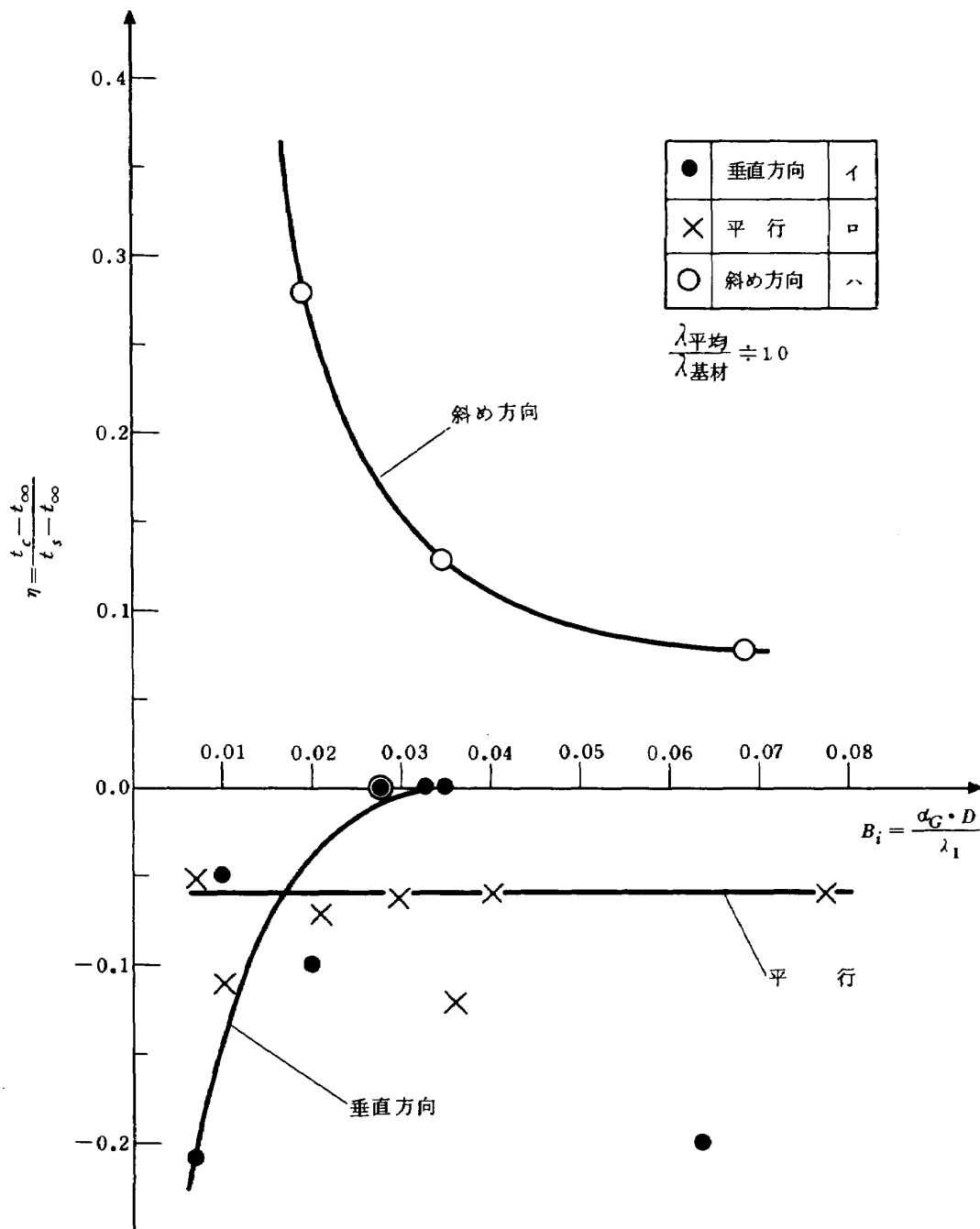


図 13 Biot 数 - η

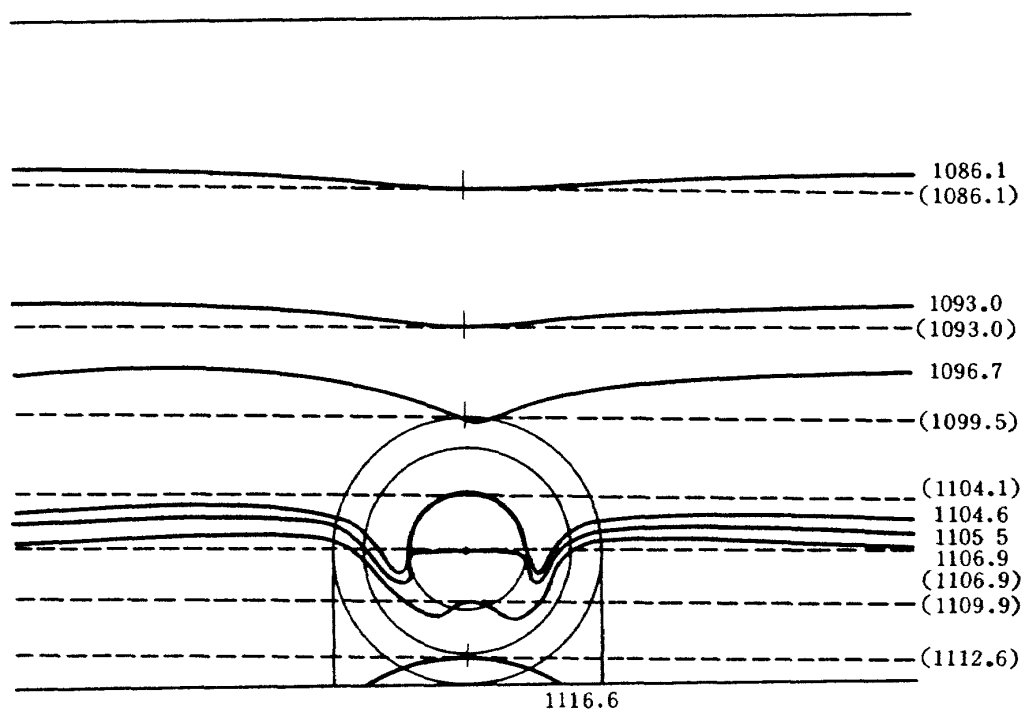


図 14 熱流が境界に垂直方向の場合 (実験番号 V)

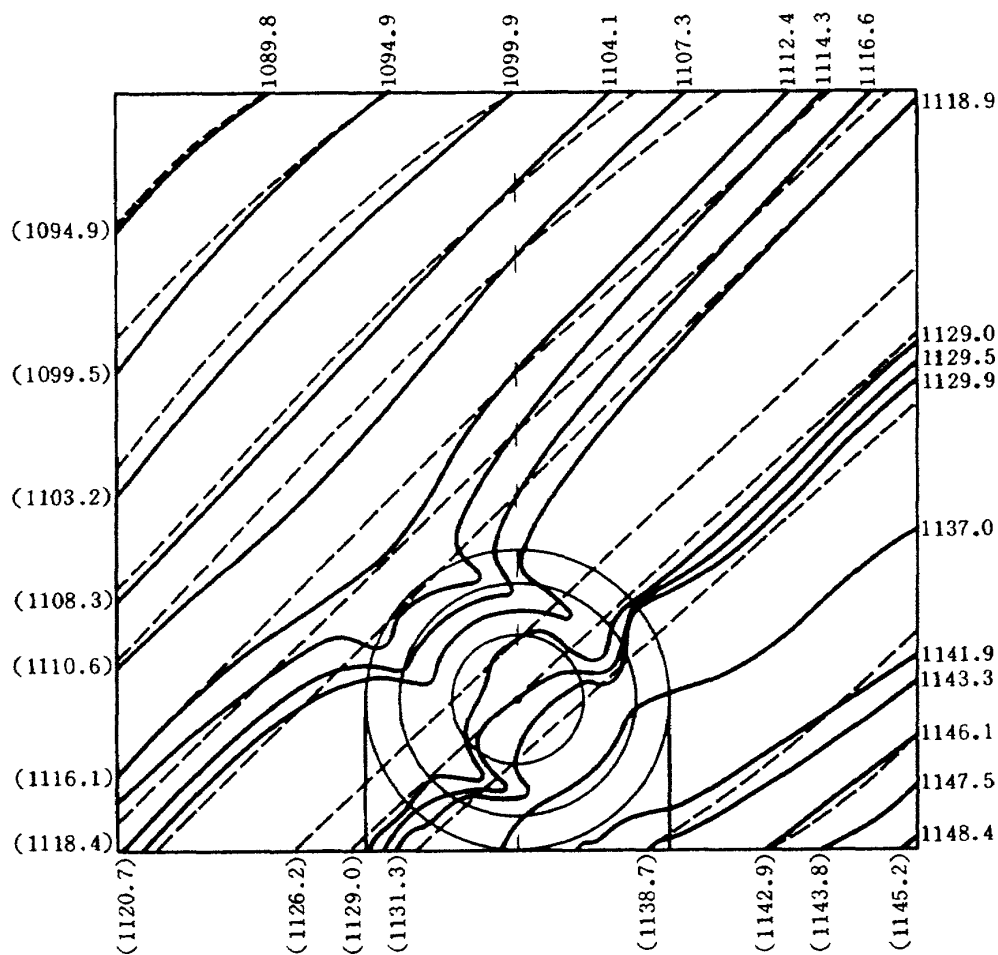


図 15 熱流が境界に斜め方向の場合 (実験番号 VI)

図15における等温線から熱伝導率の非常に高いロー材の部分による等温線への影響を認めることができる。すなわち、熱電対温度計を埋め込まなかった場合の等温線を示す点線に垂直で熱電対温度計の中心を通っている点線に対して実線で示す等温線が対称でないことがロー材の影響を明白に示している。

熱電対温度計の中心点を通っている等温線は、熱電対温度計の外側においては、中心点における傾きを持って中心点を通る直線とほぼ一致するといえる。このことは逆に言えば熱電対温度計のシース、充填材の粉末、感温部の部分の温度を計測することなく熱電対温度計の中心点における温度を予測することができることを意味する。

### 5. 熱電対温度計を埋め込んだ翼について

これまででは簡単な温度場に熱電対温度計のモデルを作りその真の値と熱電対温度計の中心において示す値の差について調べた。

翼形の場合その形状はやや複雑であるし、熱電対温度計の付近の熱流の方向は非常に複雑である。したがってこれまで述べてきた非常に簡単な温度場で得た資料で熱電対温度計の誤差を評価することははなはだ困難である。そのため一つの翼模型について計測を行うことは必要である。

翼の形状は、これまで述べたような平行四辺形の温度

場ばかりから出来ているとは限らず曲線からも構成されている。そのため曲率の影響についても考慮しなければならないが、曲率  $1/10$  (cm) に関する単純なモデルによる実験の測定結果によるとこの曲率の影響は一般的に考慮する必要がないことがわかった。

模型作製の際に歪曲比を考慮しなければならない。定義式は

$$\frac{L_W}{L_Q} = \sqrt{\frac{R_Q^{\square}}{R_W^{\square}}} \tag{20}$$

ここに  $L_W$  ; 導電紙のロール方向の長さ、 $L_Q$  ; 導電紙のロール方向に垂直方向の長さ、 $R_Q^{\square}$  ; ロール方向に垂直方向の抵抗、 $R_W^{\square}$  ; ロール方向の抵抗 である。

Teledeltus paper  $1/3$  を使ったこの模型では、

$$R_Q^{\square} = 2249 (\Omega)$$

$$R_W^{\square} = 1976 (\Omega)$$

したがって  $L_W/L_Q = 1,067$  を得る。(平均的にこの値は  $L_W/L_Q = 1.05$  といわれている。)

すなわち導電紙のロール方向の長さ ( $L_W$ ) をそれに垂直方向の長さ ( $L_Q$ ) より 6.7% だけ長くすればよい。

次にその場合の平均抵抗は抵抗  $R_W$  と  $R_Q$  の幾何平均で与えられる。

$$R_m^{\square} = \sqrt{R_Q^{\square} \cdot R_W^{\square}} \tag{21}$$

上の値をこの式に代入すると、 $R_m^{\square} = 2,108.0 (\Omega)$  を

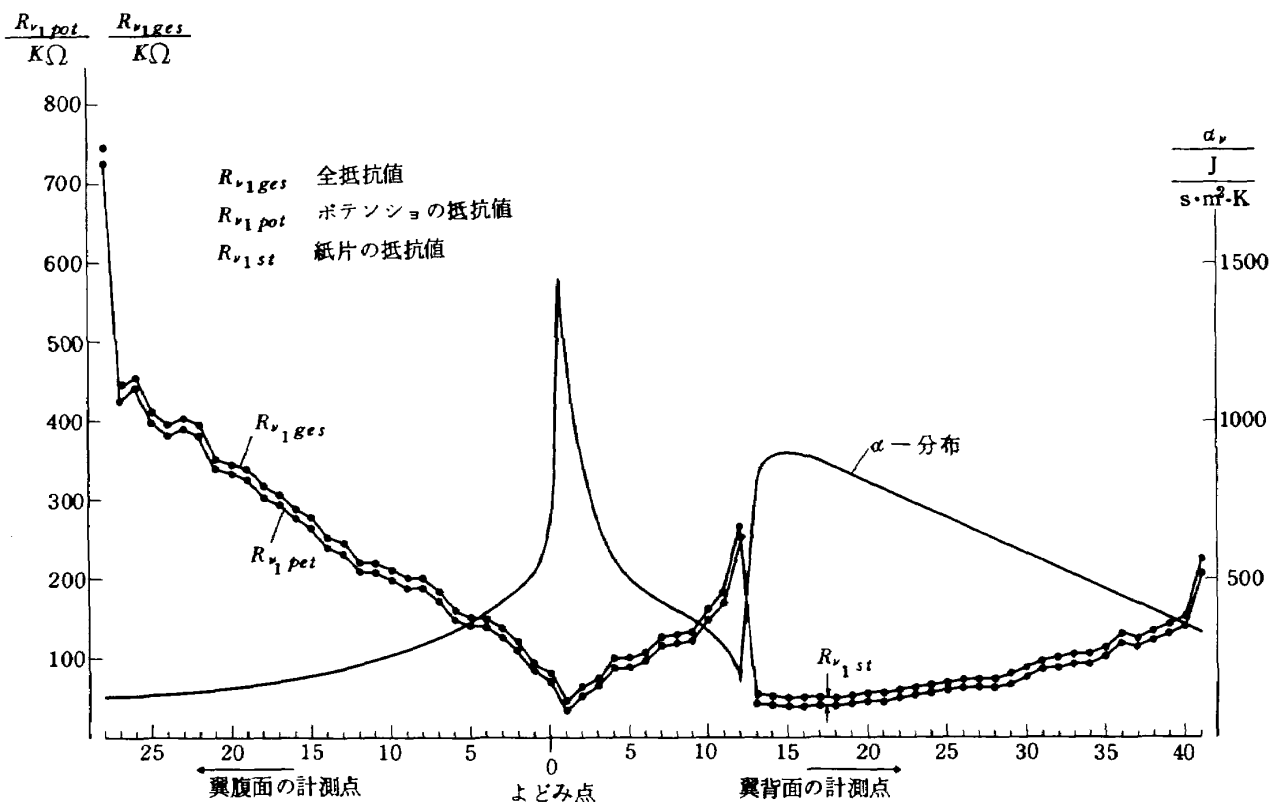


図 16 熱伝達率分布と抵抗の計算値



得る。

ここで解析する翼形模型の大きさでは6.7%の修正長さは最大で20mm程度である。

**翼形状と境界条件**

温度場の測定には翼形状と境界条件としてガス温度、冷却空気温度および熱伝達率などを与える必要がある。ここでは実験による計測と電導紙による三次元的な計測資料に基づいた非常に精度の高い研究報告を行っているW. Kühl<sup>16)</sup>の文献を引用し次の資料を得た。

熱伝達率分布から計算した抵抗値を熱伝達率分布と一緒に図16に示し、翼形状は図17に示す。

与えたデータ

ガス温度	1,123 (K)
冷却空気温度	423 (K)
ガス側の熱伝達率分布	図16

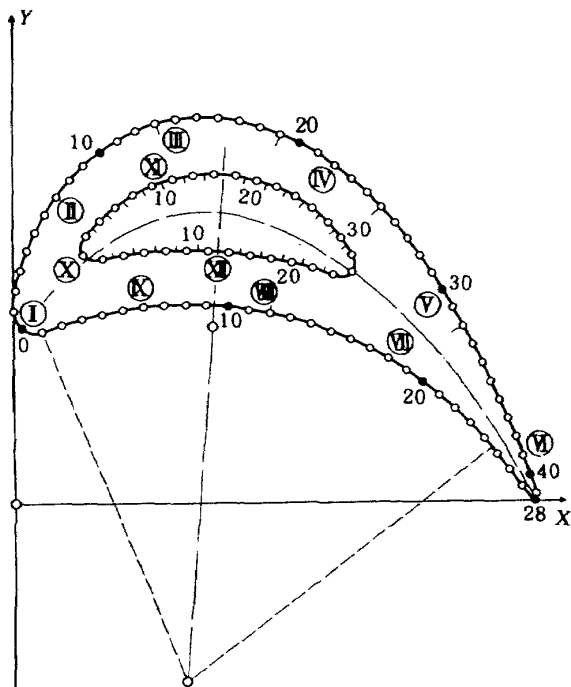


図17 翼形状

冷却孔における熱

伝達率  $300 (J/m^2 \cdot s \cdot K)$

与えられた熱伝達率分布から計算された全抵抗 $R_{viges}$ と $\alpha$ -ポテンシャル抵抗 $R_{vipot}$ (熱伝達率に相当するポテンシャルメータの抵抗値)は図16に、そして冷却孔側の熱伝達率に相当する抵抗値を式(4)、(3)を利用して各位置における形状を考慮して計算しなければならない。その際抵抗値 $R^{\square}$ は $2,100 (\Omega)$ とした。 $\alpha$ -抵抗を計算する際ガス側、冷却空気側においてよどみ温度は $1,123K, 423K$ で一定とし、模型の倍率は10とした。紙片の長さ、幅は図18に示されるように必ずしも一定ではない。したがって抵抗値 $R_{vipot}$ の算出の場合このことを考慮しなければならない。計算結果を表11に示す。ここに紙片の位置を示す数字I, II...Vについては図18に示す通りである。

翼全体の形状は図18に、アナロジー計測のための配線図は図19に示す。

温度の計測位置と14個の熱電対温度計の位置を番号を付けて図17に示す。

模型の倍率10では表3に示されるような熱電対温度計の模型を翼模型の中に作ることが非常に困難なため極端な場合として丸穴(熱伝達率零に相当)をあけた。しかし、熱電対温度計は表9にもみられるように翼の熱伝達率とほぼ同じ熱伝達率を持っている。

翼についての計測結果<sup>14) 15) 16)</sup>

熱電対温度計を翼に埋め込まない場合についての模型に関してまず等温線を図20に点線で示す。最高温度は後縁で $1,038 K$ で最低温度は翼腹面の計測点9で $937 K$ である。冷却孔側では後縁部付近で最高温度約 $974 K$ で最低温度は翼腹面の計測点12又は13で $925 K$ である。これらの数値は図21, 22から簡単に読み取ることができる。図21はガス側、図22は冷却空気側翼表面の温度である。ガス側翼表面温度は後縁を除いては、前縁において最も高い温度を示す。この事実は熱伝達率が高いことに基づく、翼背面の計測点17, 18の近傍で比較的高い温度を示すのは層流境界層から乱流境界層に移すこ

表11 冷却孔側の抵抗値

位置	$b_{str} (m)$	$R_{viges} \times 10^3 (\Omega)$	$R_{vipot} \times 10^3 (\Omega)$	差 $\times 10^3 (\Omega)$
I	0.009	163.36	161.50	1.86
II	0.010	147.02	145.23	1.79
III	0.008	183.78	182.61	1.17
IV	0.004	267.56	266.76	0.80
V	0.010	147.02	146.18	0.84

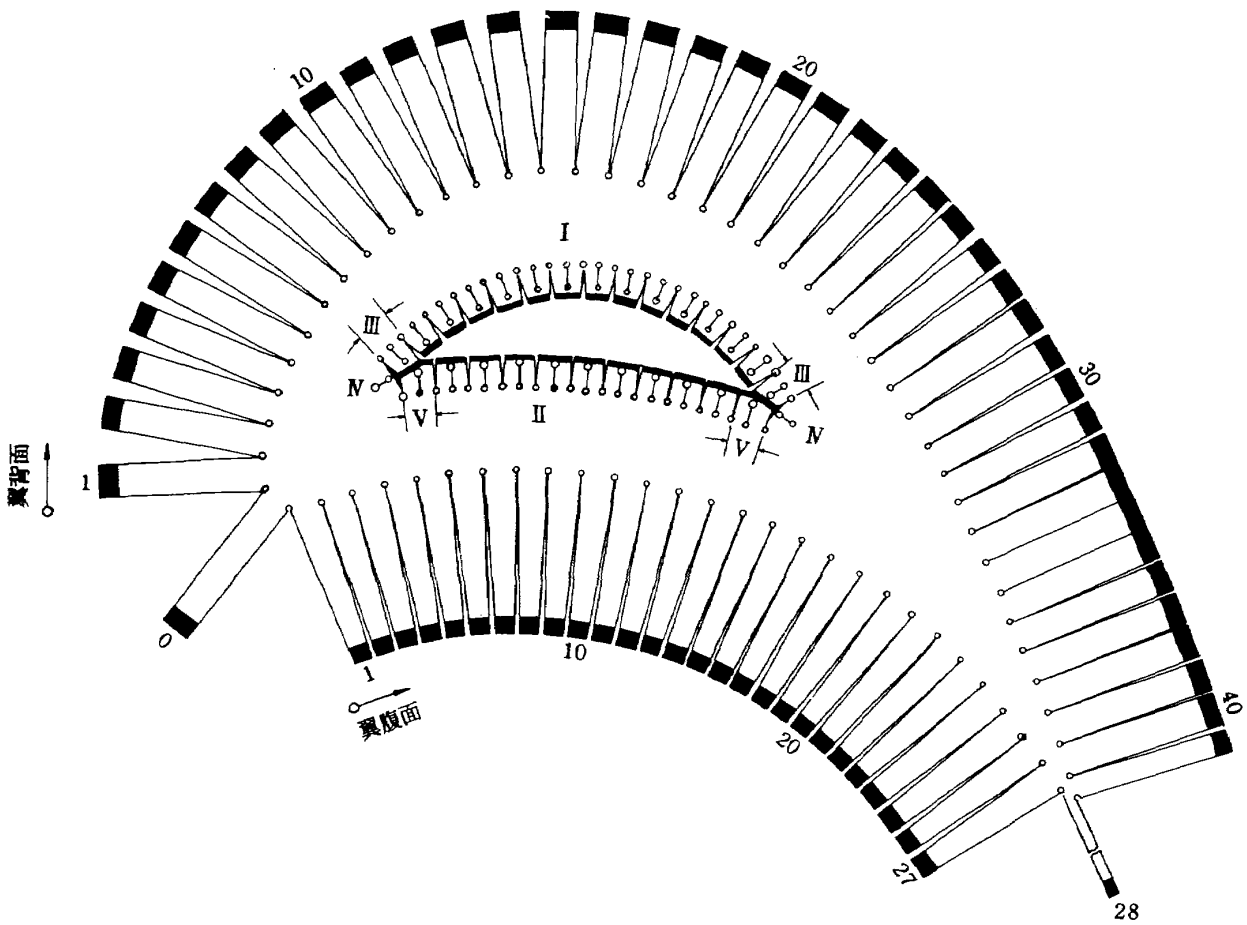


図 18 冷却翼の形状

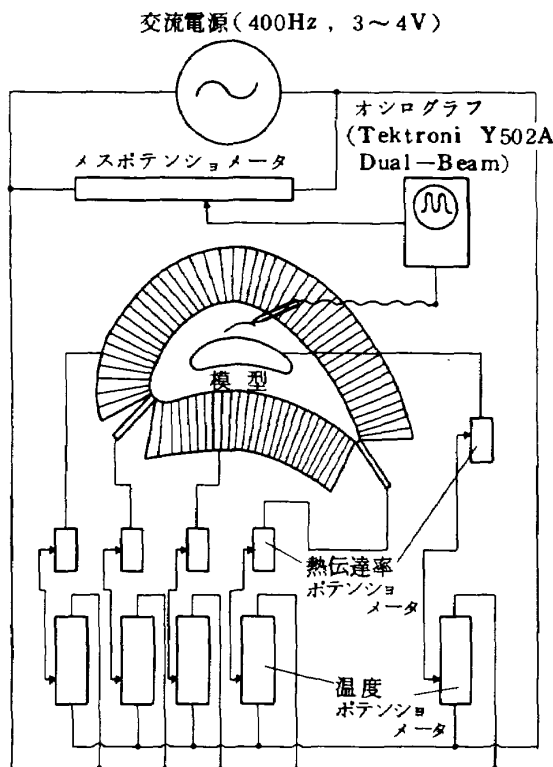


図 19 アナロジー計測のための配線図

とに基づくと考えられる。冷却孔の背面側では殆んど一定の温度を示している。いずれにしても最低温度を示す領域は翼面腹側の中心付近に存在する。

翼表面付近に穴あけられた丸穴は翼内に流れ込む熱量を妨げ翼内の温度を低下させる効果があり、逆に冷却孔付近に穴あけられた丸穴は冷却孔へ流出する熱量を妨げるため翼内の温度は上昇すると一般的に述べる事ができる。

第VI番目の丸穴は他のものと比べて多少異なる効果を示す。この丸穴と後縁の間の領域における温度は丸穴をあける前の温度より約20度も高くなっている。これは後縁付近からの熱流は断熱材に相当するこの丸穴によって妨げられるためであり、この領域ではほぼ一様な温度分布を示す。またこの丸穴(VI)の前面における温度も幾分高くなりこの温度が境界条件となって作用するため翼内の温度は高めになっている。

丸穴 I, VI, X, XIII は翼内の温度分布に対して非常に大きな影響を持ち、つづいて丸穴 II, III, N, V, VII, VIII, K が比較的大きな影響を与え、冷却孔側の丸穴 M, XII, XIV は非常に影響が少ない。

翼内の温度分布に対して強い影響を与える丸穴 I, VI,

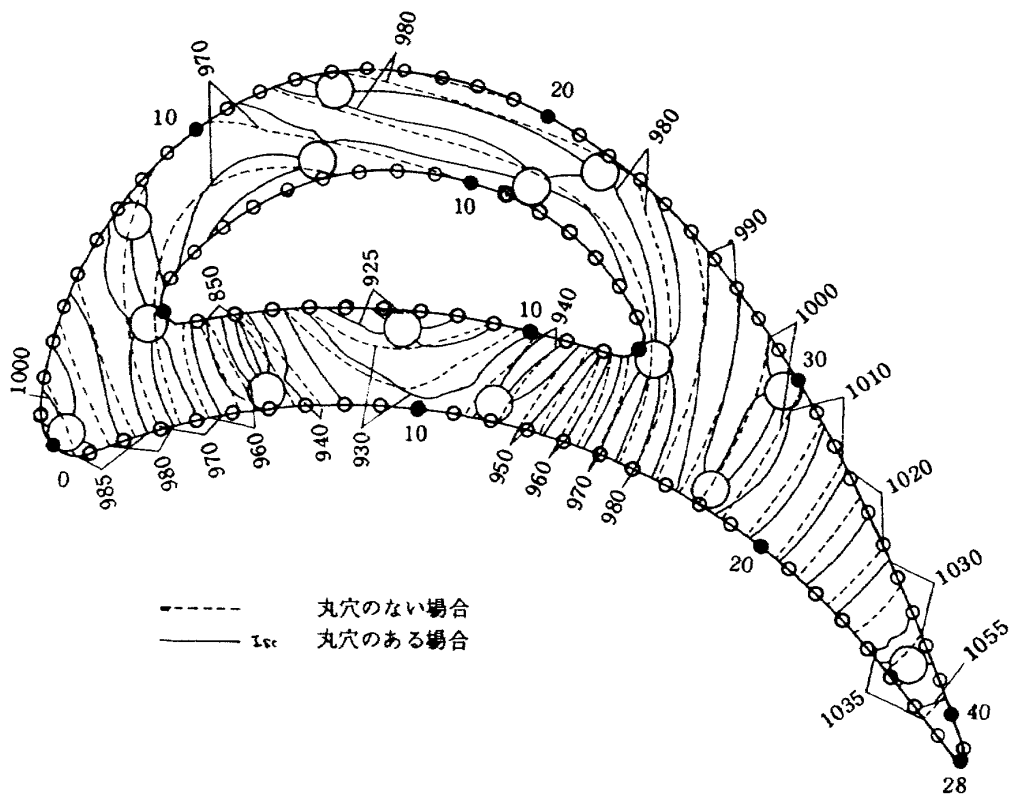


図20 等温線 (K)

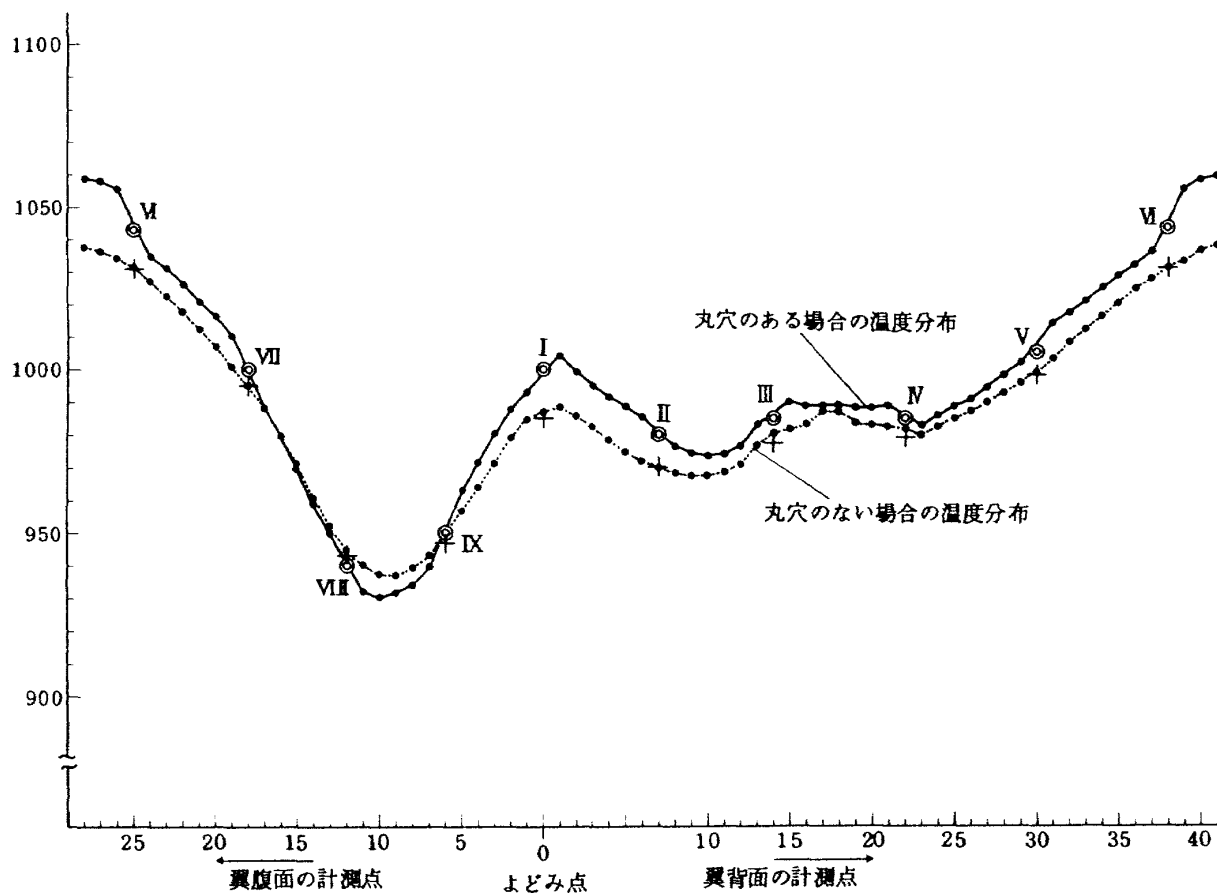


図21 翼面温度分布

表 12 評価される温度 (K) (図 21 参照)

番 号	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
丸穴のない温度場	985.0	970.0	977.5	979.0	998.0	1,031.0	995.0	943.0	947.5	966.0	966.0	974.0	975.0	927.0
丸穴をあけた温度場	1,000.0	980.0	985.0	985.0	1,005.0	1,043.0	1,000.0	940.0	950.0	980.0	970.0	975.0	980.0	922.0
$\Delta T$	15.0	10.0	7.5	6.0	7.0	12.0	5.0	-3.0	2.5	14.0	4.0	1.0	5.0	-5.0

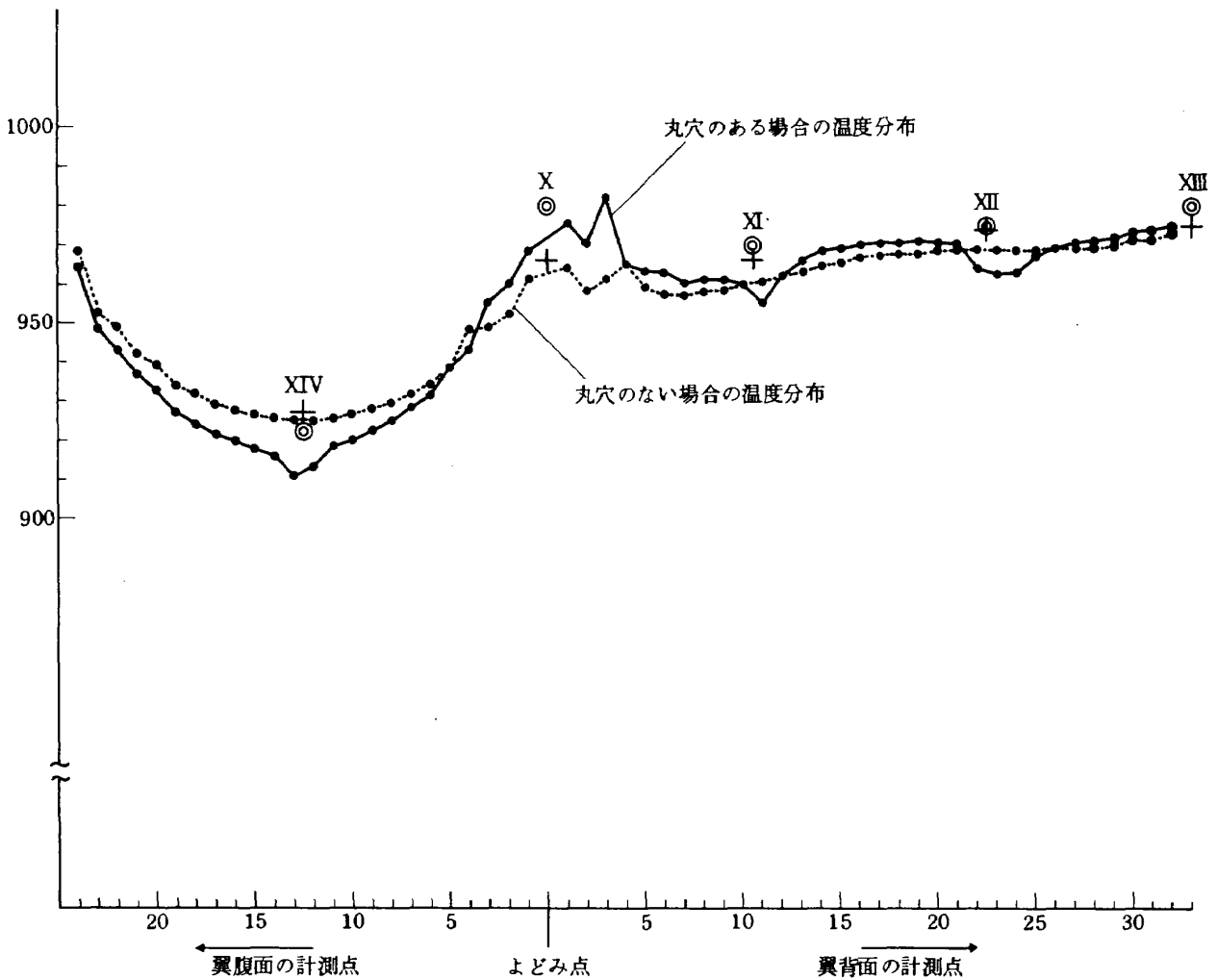


図 22 冷却孔側温度分布

X, XIIIは局所的に温度が高く、等温線が密で、翼面に並行にはしっている場所に位置しているのが特徴的である。

一方、丸穴 VI, XII, XIV 等は等温線が疎で温度が低いか温度がほとんど一定の場所に存在している。翼全体についてみると丸穴をあけた場合の方がほぼ翼面全体において温度は上昇しているが翼腹面においては温度が下がっている。冷却孔側では翼背面側では両者においてほとんど同じで変化はないが翼腹面側ではやはり温度が下がっている。翼内部における温度はほとんど全領域において丸穴

をあけた場合に上昇しているが、翼腹面の中央部付近では下降している。

これまで、翼内部に埋め込まれた断熱体(電導紙による模型では丸穴に相当する)の温度場に対する影響、すなわち、等温線がどの程度移動するかについて述べてきたが、その他に熱電対温度計のような異なる熱伝導率を有する物質から出来ているものに対しては、図14, 15からもわかるように熱電対温度計自身の中を通過している等温線も熱電対温度計自身の構成要素の熱伝導率の相異

からその影響を受ける。この模型における丸穴は断熱体に相当しているためその中心における温度を決定することはできない。そこで丸穴の周囲の等温線の様子から平均的温度を推定した、この推定評価した値を表12に示す。

図21, 22において記号⊙, ⊕はそれぞれ丸穴をあけた場合と丸穴をあけなかった場合の推定評価した値を意味している。

翼内部に丸穴をあけた場合と丸穴をあけない場合の温度差はガス側では前縁付近, 後縁付近また冷却孔側では前縁付近で大きく15~25度(その点における温度の2%前後の値)であり, ガス側, 冷却孔側ともに翼背面, 翼腹面中央部では温度差が少くなっている。しかし, 熱量の流入する点に存在する丸穴XIVの付近では熱流出がせき止められるために温度差が大きくなっていることが図21, 図22からわかる。

熱電対温度計を丸穴の代りに埋め込んだ場合には平均熱伝導率は表9からわかるように基材の熱伝導率とほぼ同じであるから温度場の乱れは丸穴の場合よりもはるかに少くなると期待できる。

## 6. ま と め

熱と電気の流れの場の相似性(流れ場を支配する方程式の相似性)に注目することにより, 実験計測の非常に困難な温度を直接対象とせず, 電圧等の計測を行うことにより間接的に温度を得ることができる。しかしながら電気の流れの場における模型を作製する場合その相似性を保つために若干の工夫が必要になる。本報では熱の流れ場においては現象は二次元, 定常状態, 熱の発生ないしは吸収のない場合を取り扱った。境界条件としては熱伝達率 $\alpha$ が与えられ, かつ温度の場には熱電対温度計が埋め込まれているものとした。

熱伝達率 $\alpha$ は(5)ないし(6)式の関係から倍率 $l_a/l_0$ と熱伝導率 $\lambda$ がわかれば $l_{sr}$ (図2, 3又は図18参照)と反比例の関係にあり計算により $l_{sr}$ は決まる。一方熱電対温度計の模型化は3章に記述したようにして可能となる。この模型化が一つの成果である。このことによって従来の数値計算的方法では非常に困難であった点を解消することができた, この模型を使って温度場に熱電対温度計を埋め込んだ場合に熱電対温度計の示す温度と真の温度との関係をごく一般的な熱電対(シース, 充填材, 感温部, ロー材より出来ている)に対して述べた。結果は例えば図13, 14, 15に見られる。実験計測範囲はBiot数で0.005から0.080とした。熱流の方向が境界に対して垂直方向の場合Biot数0.030で誤差はほとんど無視することができ, それ以下では急激に増加する。また熱流が

境界に並行の場合には誤差がBiot数に依存せずほぼ一定である。さらに熱流が境界に対して斜め方向(ほぼ45°)の場合にはBiot数が小さくなると急激に誤差が増加するが, ほぼ0.06付近で一定の値に近づく, なおこれらの場合熱電対温度計の平均熱伝導率はほぼ基材の熱伝導率と同じである。

応用として冷却孔を有するタービン翼に14個の断熱体(本来熱電対温度計とすべきであるが模型の作製が不可能のため)を埋め込んだ場合について温度場を計測しかつ熱電対温度計を埋め込んだら示すであろう温度を推定し, どのような位置におかれた熱電対温度計が最も大きい誤差を生ずるかについて検討した結果, 翼後縁付近と冷却孔側の前縁付近で最大で約20度(その点の温度の約2%)高い値を示し, 冷却孔側の丸穴XIV付近で約15度(その点の示す温度の約1.7%)低い値を示した。

最後に本研究はアーヘン工科大学留学中, 同大学のDr. Ing. K. Graf氏の問題の提起によりW. Kühl氏の指導のもとに行ったものである。ここに両氏ならびに本研究の機会を与えてくれた同大学の方々に感謝の意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) K.N. NEWHOUSE: Thermocouple Conduction Errors in a Vacuum Cold Wall Environment. ASME-Paper 67-HT-57.
- 2) V.S. NOVOPAVLOVSKII: The Error of Measurement of a Surface Temperature By a Resistance Thermometer, Inzhenerno-Fizicheskii Zhurnal 1964. 7(5) 52-58
- 3) A.B. TURNER: Heat Transfer Instrumentation. In High Temperature Turbines. AGARD CP 73 (1971)
- 4) J.V. BECK und H. HURWITZ: Effect of Thermocouple Cavity on Heat Sink Temperature. Trans. ASME Heat Transfer Vol. 81-82 (1959-60) P. 27-36
- 5) W.K. MOEN: Significance of Errors in High Temperature Measurement.
- 6) L.M.K. BOELTER, F.E. ROMIE, A.G. GUIBERT and M.A. MILLER: An Investigation of Aircraft Heaters. XXVIII—Equations for Steady-State Temperature Distribution caused by Thermal Sources in Flat Plates Applied to Calculation of Thermocouple Errors, Heat Meter Corrections and Heat Transfer by Pin-Pin Plates. NACA TN 1452 (1948)

- 7) Taschenbuch für Chemiker und Physiker.
- 8) P. FISCHER und W. RIESS: Einfaches Analogieverfahren für technische Wärmeleitungsprobleme. Konstruktion 12 (1960) Nr. 7, S. 285-291.
- 9) W. RIESS und P. FISCHER: Analogieuntersuchung der Luftkühlung von Scheibenrotoren für Gasturbinen. Konstruktion 14 (1962) Nr. 6, S. 234-239
- 10) O. CONRAD: Praktische Durchführung der Elektroanalogie mit elektrisch leitendem Papier. Jahrbuch 1960 der WGL S. 183-190.
- 11) M. HACKENSCHMIDT: Die Inhomogenisierung elektrisch leitender Papiere zur Messung komplizierter Felder. Maschinenbautechnik 14 (1964) Nr. 9, S. 474-478.
- 12) K. GRAF: Bestimmung der Temperatur- und Wärmeübertragungsverhältnisse am Turbinenlaufrad eines Strahltriebwerks. Jahrbuch 1966 der WGLR, S. 314-321.
- 13) W. KÜHL: Analogie-Untersuchungen zur Bestimmung der Wärmeübertragungskoeffizienten an einer Turbinenschaufel. Institut für Strahltriebwerke und Turboarbeitsmaschinen der TH Aachen 1966, Nicht veröffentlichter Bericht.
- 14) K. GRAF: Analogie-Untersuchungen zur Bestimmung der Wärmeströmung in einem Gasturbinenläufer. Institut für Strahltriebwerke und Turboarbeitsmaschinen der TH Aachen 1966, Nicht veröffentlichter Bericht.
- 15) H. KOCH: Analogie-Untersuchungen an einem dreidimensionalen Modell zur Bestimmung der instationären Wärmeströmung in einem Gasturbinenläufer. Institut für Strahltriebwerke und Turboarbeitsmaschinen der TH Aachen 1968, Nicht veröffentlichter Bericht.
- 16) W. KÜHL: Experimental investigation on a single-stage air-cooled gas turbine. In; High Temperature Turbines. AGARD CP 73 (1971) S. 16.1-16.15.
- 17) K. GRAF und W. KÜHL: Beitrag zur Anwendung der Analogie zwischen thermischer und elektrischer Strömung. Z. Flugwiss. 20 (1972), Heft 1/2 S. 14-21.
- 18) L.M.K. BOELTER and R.W. LOCKHART: An investigation of aircraft heaters. XXXV—Thermocouple conduction error observed in measuring surface temperatures. NACA TN 2427.
- 19) W. DETTMERING: Bericht über neuere Forschungsarbeiten zur Ermittlung des dreidimensionalen Temperaturfeldes in konvektionsgekühlten Gasturbinenschaufeln.
- 20) S. EISELE: Flugzeugantriebsturbinen. Institut für Strahltriebwerke und Turboarbeitsmaschinen der TH Aachen, 1970, Nicht veröffentlichter Bericht.

付 録

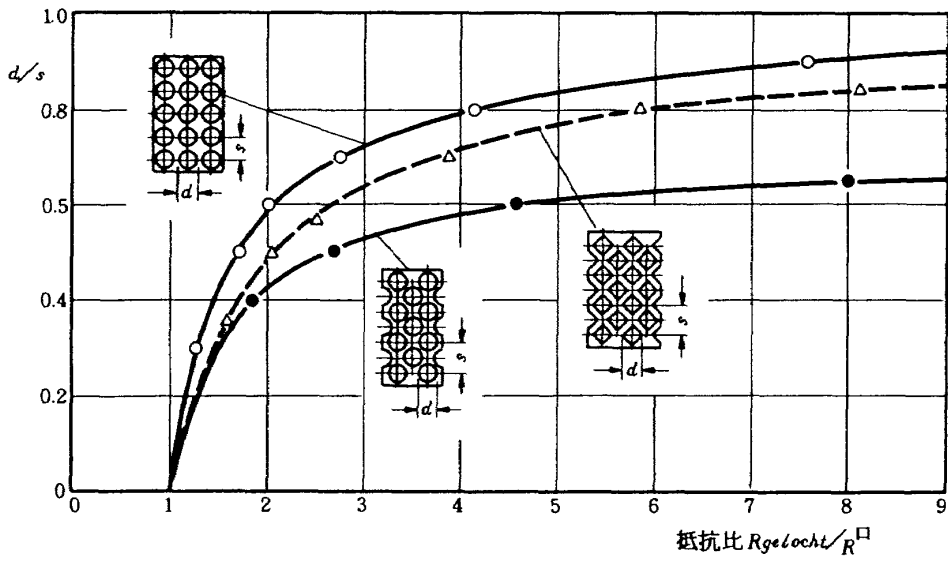


図1 電導紙に穴を打ち抜いたときの抵抗比と  $d/s$ <sup>17)</sup>

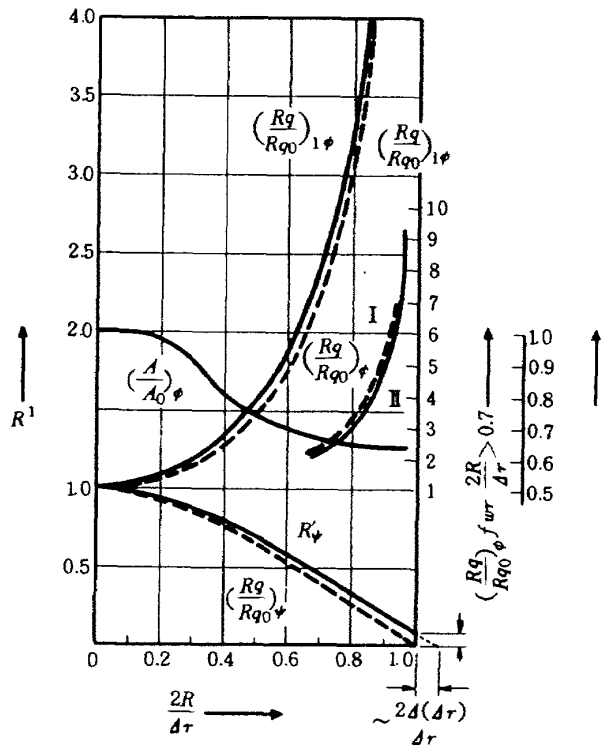


図2 銀粉の塗付面積と抵抗比<sup>11)</sup>  
 ( $d\tau$  は正方形の一辺の長さで  $R$  は半径)

# TR-414 正誤表

15頁

誤  
↓  
(V) 模型 (I)

表4 (続)

誤  
↓

	$T_{emp}$	$\alpha_K$ ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )	$\lambda$ ( $J/m \cdot s \cdot K$ )	$R_{ges} \times 10^3$	$R_{str} \times 10^3$	$R_{ges} - R_{str}$		$T_{emp}$	$\alpha_G$ ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )	$\lambda$ ( $J/m \cdot s \cdot K$ )	$R_{ges} \times 10^3$	$R_{str} \times 10^3$	$R_{ges} - R_{str}$
$T_1$	899.0		22.9(6)	306.1		287.6 (143.8)	$T_{14}$	849.0		22.1(3)	362.1	18.53	343.6 (171.8)

15頁

正  
↓  
(V) 模型 (I)

表4 (続)

正  
↓

	$T_{emp}$	$\alpha_G$ ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )	$\lambda$ ( $J/m \cdot s \cdot K$ )	$R_{ges} \times 10^3$	$R_{str} \times 10^3$	$R_{ges} - R_{str}$		$T_{emp}$	$\alpha_K$ ( $J/m^2 \cdot s \cdot K$ )	$\lambda$ ( $J/m \cdot s \cdot K$ )	$R_{ges} \times 10^3$	$R_{str} \times 10^3$	$R_{ges} - R_{str}$
$T_1$	899.0		22.9(6)	306.1	18.53	287.6 (143.8)	$T_{14}$	849.0		22.1(3)	362.1	18.53	343.6 (171.8)
$T_2$				308.8		290.3	$T_{15}$	845.0		22.1(6)	357.5(7)		290.0



---

## 航空宇宙技術研究所報告414号

昭和50年7月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社 共 進  
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)

---