

UDC 621.452.32.034:  
662.75:  
536.5

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-504

金属壁面上の液体の蒸発と壁面温度(1)

相波哲朗・松末勝利  
・橋本良作

1977 年 7 月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 金属壁面上の液体の蒸発と壁面温度(1)\*

相波 哲朗\*\*・松末 勝利\*\*\*

・橋本 良作\*\*\*

## A Study on the Evaporation of a Liquid Mass on a Metal Wall and Metal Wall Temperature (I)

By Tetsuro AIBA, Katsutoshi MATSUSUE  
and Ryosaku HASHIMOTO

### ABSTRACT

Evaporation of a liquid mass on a metal plate located in a hot air stream and temperature distribution on the plate were studied by experimental and numerical methods. The study simulates an evaporation process of a liquid fuel mass on a linear wall or on a vaporizer wall of an aircraft gas turbine combustor. The evaporation process and the temperature distribution on the walls produce significant effects on the amount of unburned exhaust hydrocarbons from a combustor and on the performance of a vaporizer.

Evaporation of water, in place of a liquid fuel, was measured in the experiment as the first step of the study. An infrared type thermometer was employed in the measurement of the plate temperature distribution. Calculations of plate temperature distributions and the evaporation rate of the water mass by a finite element method were conducted assuming simplified models based on the experiment. A reasonable agreement is obtained between the experimental and calculated values.

#### 1. まえがき

航空用ガスタービン燃焼器は通常液体燃料を燃料噴射弁や燃料蒸発管から供給しており、供給燃料の一部は燃焼器のライナ壁面や蒸発管壁面に衝突する。衝突した燃料の蒸発や壁面温度は排気中の未燃炭化水素や燃料蒸発管の蒸発性能に大きな影響を与える。これらの基礎的な資料を得るため本研究では簡単化した実験装置により実験を行ない、さらに、計算も行なう。今回の実験では第一段階として加熱空気流中におかれた金属平板上に水を供給し現象を観察すると共に、水の蒸発量と壁面温度を測定した。壁面の温度分布の測定は赤外線映像装置(サーモカメラ)によって行なった。温度分布の計算を有限

要素法で行ない、実験に基いた各種データを与えて等温線図を電算機に画かせた。また、蒸発量を実験と計算から求めて比較した。

本報告の特色としては、従来多く示されている静止空気中の実験に対して流れのある場の液体の蒸発と壁面温度を対象にしたこと、液体の存在する場に赤外線映像装置を適用したこと、および、有限要素法による温度分布の計算にふく射の項も含めたことである。

#### 2. 実験装置および方法

実験装置の測定部の概略を図1に示す。主流は上流側で最大入力 110 kW の電気加熱器で加熱されており、加熱器出口の最高温度は 600 °C である。測定部は 100×100 mm の正方形流路で長さが 150 mm あり、上方はサーモカメラによる観察のため開放になっている。測定部入口

\* 昭和52年5月13日 受付

\*\* 航空機公害研究グループ

\*\*\* 原動機部

の上下方向と下流側から見た左右に関して速度ヘッドの分布を図2に示す。同様に温度分布と速度分布を図3と図4に示す。これらの結果は速度ヘッドがほぼ平坦な分布であるが、温度分布は左右に平坦で上下方向にはかなりの温度差のあることを示している。速度分布は速度ヘッドと温度の双方の分布に関係するため、これらの分布の中間的な変化を示している。温度分布に関しては空気加熱器と測定部間が約 15 m あること、整流器直前の流れの片寄りや整流器の保温の不足で図示の状態が得られたものと思われる。試験片は温度分布の影響の最も少ない測定部流路中心部に水平に置かれている。

ライナ壁面や蒸発管壁面に相当するものとして  $100 \times 98 \times 1$  mm のステンレス鋼製平板の試験片を使用した。この試験片は熱損失を低下させるため流路側壁との間に 1 mm の間隙を設けてあり、周辺 4 箇所固定片により流路側壁に固定されている。固定片は 0.5 mm 厚、5 mm 幅のステンレス鋼板で熱損失量低下のため一旦主流側に

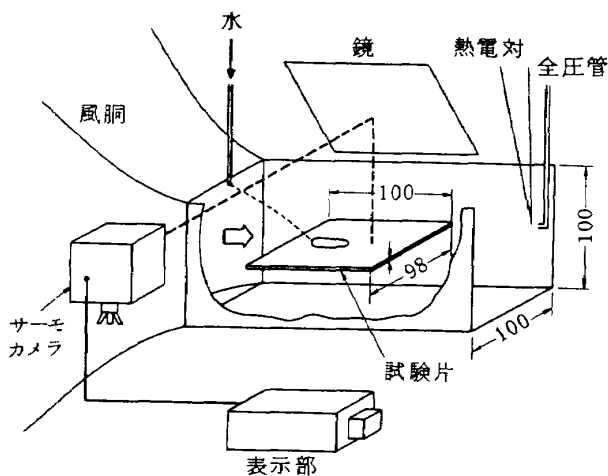


図1 実験装置

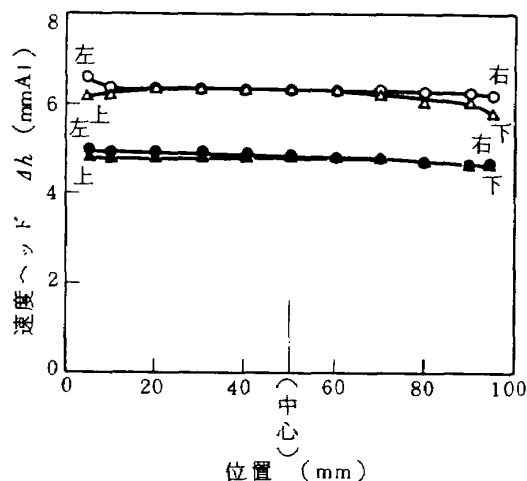


図2 測定部入口の速度ヘッドの分布

屈曲した形状になっている。試験片の前縁は境界条件を明確にするためナイフエッジ状にしてある。試験片の上面にはふく射率を1に近づけるため黒色エナメル(住友ベルベット・コーティング・ブラック)を吹きつけて塗布してある。

試料として用いた水は直径 400 mm のタンクからヘッドにより供給した。水の供給口は銅管をつぶしたもので

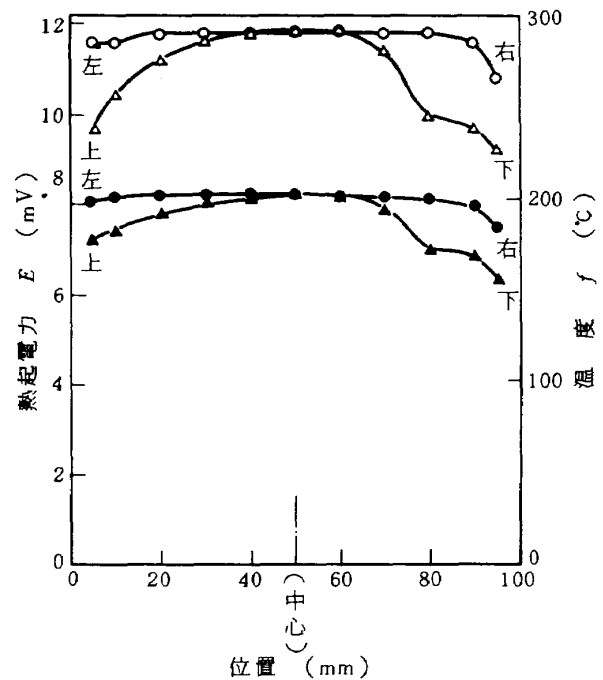


図3 測定部入口の温度分布

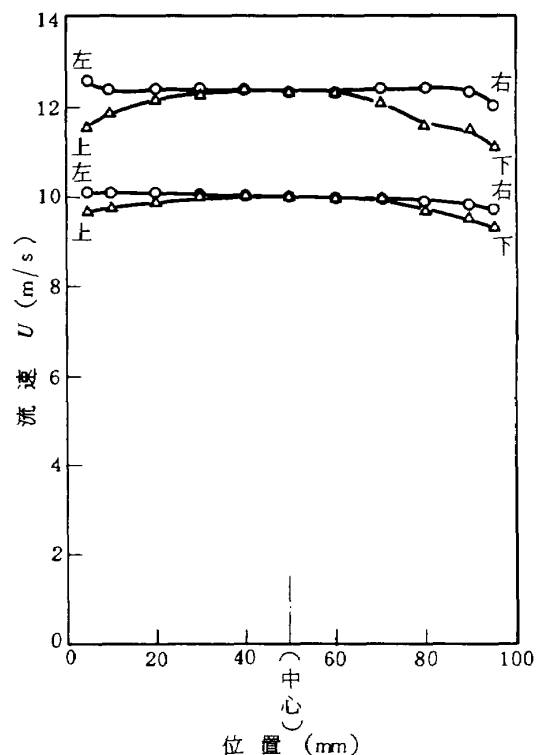


図4 測定部入口の速度分布

手造りである。水滴の時間当りの供給回数と流量はストップウォッチとメスシリンダによって求めた。主流の温度と流速は測定部出口に設けたクロメル・アルメル熱電対と全圧管によって測定した。試験片の表面温度の測定にはキャノン・サーモカメラCT-4Bを使用した。このサーモカメラは物体表面より放射される赤外線エネルギーを検出し、そのエネルギーに対応した温度分布をブラウン管上に輝度の強弱、および、その波形として書き出し、等温線も書き出せる。サーモカメラの主要諸元を表1に示す。サーモカメラのヘッドを測定部に設置した状態を図5に示す。試験片上面からの光は図示の鏡を介してヘッドに入る。サーモカメラの表示部を図6に示す。分解能に基く試験片表面の検出スポットの直径は約2mmである。

実験では主流の温度と流速、および、水の供給量をかえた。測定は試験片上に定常的に30～50mm程度の大きさの水塊が存在する状態で行なった。供給された水は水塊の上流端に定期的に追加され、水塊の蒸発量と平均的に釣合った状態になっている。

表1 サーモカメラの主要諸元 (キャノン CT-4B)

光学系型式	ミラー対物鏡タイプ
走査系型式	水平走査 - 4面ミラードラム回転方式 垂直走査 - 平面ミラー揺動方式
検出素子	InSb (液体窒素冷却)
測定温度範囲	-20℃～1850℃
水平走査線数	60(1秒)または300(5秒)
水平分解能	400画素
表示サイズ	左右130×上下100mm

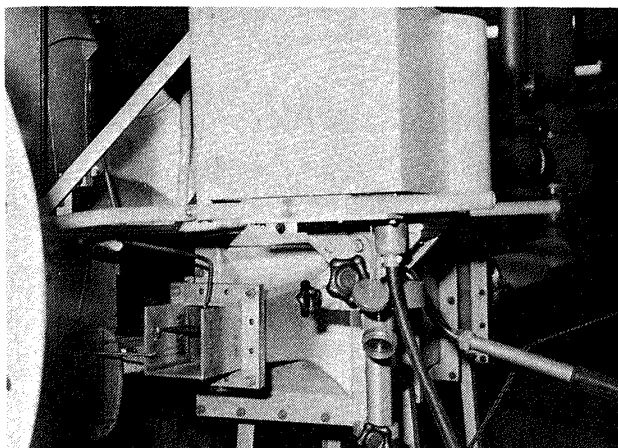


図5 測定部に設置したサーモカメラのヘッド部

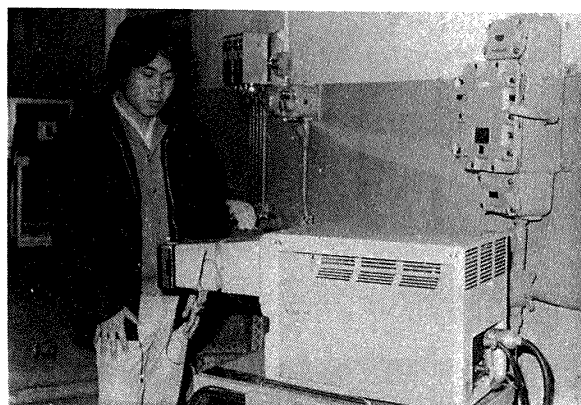


図6 サーモカメラの表示部

### 3. 実験結果

水を用いた今回の実験は予備実験を数回行なった後、Run No.1～No.4まで行ない、試験片上に水のない場合の温度測定も2回行なった。実験条件を表2に示す。試験片の温度測定はサーモカメラによって行なったのみで、熱電対等による測定はなく、水塊の温度測定も行なわれていない。

サーモカメラによって得られた等温線像を図7～9に示す。いずれも写真の右から左へ主流が流れ、画面の明るい部分は高温になっている。画面中央部の左右に引かれた暗い線に沿う温度の変化を画面下段の曲線が示している。図7は試験片上に水塊のない場合で、上流側から下流側へ温度が降下し、試験片全長100mmで55℃程度の温度差がある。主流温度が殆んどこの区間で変化しないのに対して試験片の温度がこのように変化するのは、主流から試験片への局所熱伝達率の主流方向の変化と試験片から周囲へのふく射伝熱との関係によるものと推定される。この点については後に再び検討する。図7は画面上下でも幾分温度変化を示し、試験片の四隅で固定片を通しての熱損失に基くと思われる低温部も示している。図8と9は試験片上に水塊のある場合で低温部に水塊が存在している。水塊の位置が右や左にあるのは主流の流速が異なり、落下水滴の壁面到達位置が異なっているためである。図9は写真撮影の露出時間を20秒と長くしてサーモカメラ表示部で4回画面の掃引を行なったときの結果を示す。低温部上流側の温度分布が時間と共に液滴の供給と蒸発の関係で幾分変動しているが、全体的には殆んど変化はない。

図8、9および同一実験条件で撮影した数枚の写真から得た等温線図と目視による水塊のおよその大きさと位置を図10、11に示す。等温線を求める際試験片表面のふく射率を1.0とし、撮像部の前部に取りつけた防塵フ

フィルタの補正を行なったが、水の存在によるふく射率の変化は補正してない。水の存在によりふく射率が 1.0 よりかなり下がることが考えられ、この点の定量的な補正が現時点では行なえぬため、得られた結果の低温部の温度は低く示されている可能性がある。試験片表面のふく射率に関しては 0.98、温度の測定精度は 100℃ レンジで  $\pm 1^\circ\text{C}$  以内との検定結果<sup>1)</sup>が同種の赤外線温度計を利用

した計測で示されている。本実験では温度の測定レンジが上がっていることと、採用したふく射率 1.0 に関して検定を行っていないため、図 10, 11 の値は数℃程度の誤差を含んでいることが考えられる。

測定した壁面の温度分布に対して平板のブール沸騰の領域と過熱度の関係をそのまま適用すると、水塊と試験片間の伝熱は水塊中心部の壁面温度の低いところでは自

表2 実験条件

実験番号	主流速度 $U_m$ (m/s)	主流温度 $t_m$ (°C)	水滴供給量 $q$ (cc/min)	水滴供給頻度 $n$ (1/min)	水塊サイズ 長径×短径 (mm)
No. 1	7.1	268	0.75	10	40 × 20
No. 2	12.6	283	0.75	13	40 × 25
No. 3	12.9	334	0.6	16.5	40 × 10
No. 4	9.2	321	0.95	15	30 × 30

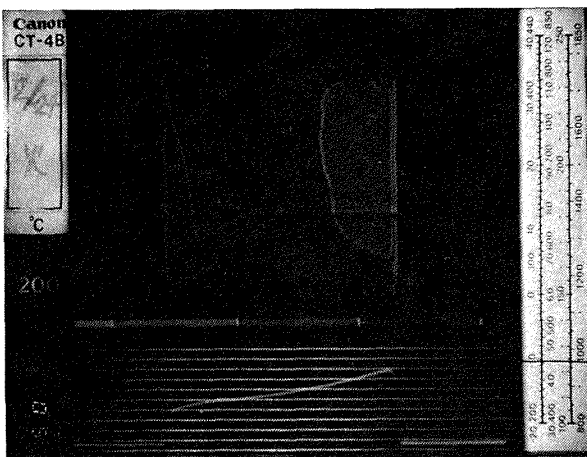


図7 サーモカメラによる等温線像  
水塊なし,  $U_m = 9.2$  m/s,  $t_m = 321^\circ\text{C}$

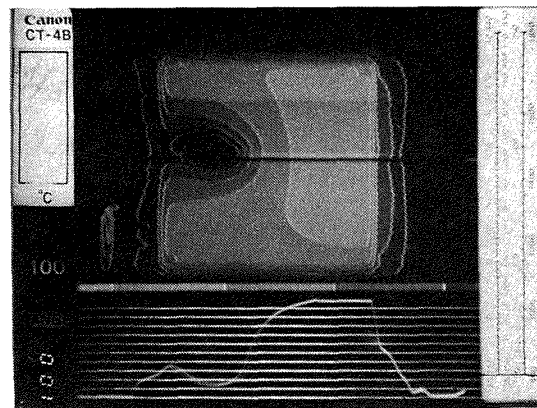


図9 サーモカメラによる等温線像  
Run No. 2  $U_m = 12.6$  m/s,  $t_m = 283^\circ\text{C}$   
蒸発量 45 g/h

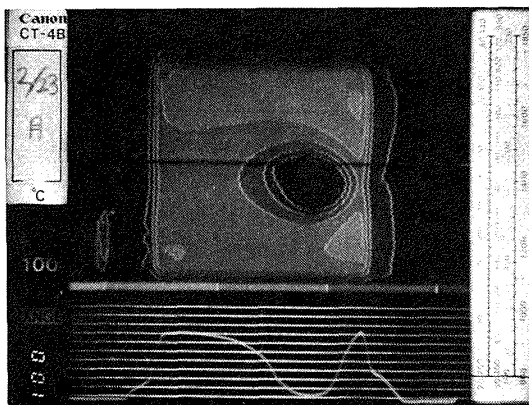


図8 サーモカメラによる等温線像  
Run No. 1,  $U_m = 7.1$  m/s,  $t_m = 268^\circ\text{C}$   
蒸発量 45 g/h

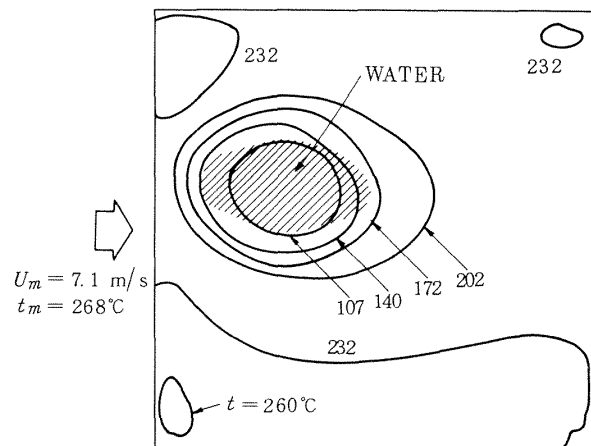


図10 サーモカメラで測定した等温線  
(Run No. 1, 蒸発量 45 g/h)

然対流で、周囲では核沸騰から膜沸騰に達している。実験では水塊周辺部に白い泡が発生して不規則な状態となること、水塊中心部は透明であることが観察された。

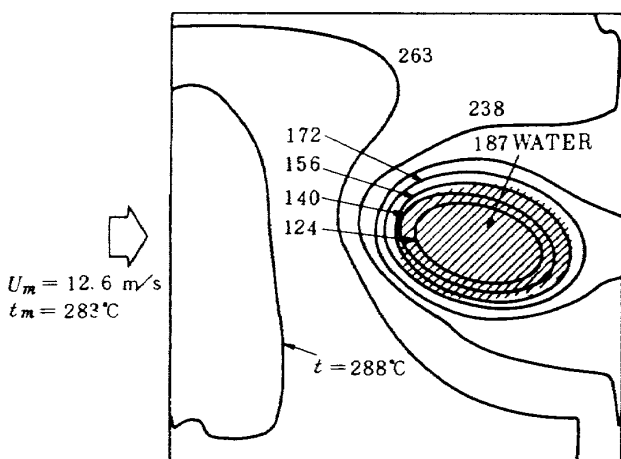


図 11 サーモカメラで測定した等温線  
(Run No. 2, 蒸発量 45 g/h)

#### 4. 有限要素法による試験片温度分布と水の蒸発量の計算

有限要素法によって試験片の温度分布を求めると共に温度分布に基いて水塊に伝わる熱量から蒸発量を求めた。有限要素法により温度分布を求める方法は変分原理を利用して熱伝導方程式を数値的に解く方法であり、具体的には与えられた熱伝導方程式および境界条件をオイラーの方程式としてもつ汎関数を見出し、その停留条件をマトリックス方程式に変換して未知温度を求めようとするものである。

温度分布の計算では試験片の広さに比べて板厚が薄いことから定常二次元で扱えるものと仮定すると、試験片の単位容積に対して主流からの加熱、水塊による冷却、および、周囲へのふく射を考えて次の熱伝導方程式が得られる。

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q_c - Q_R = 0 \quad (1)$$

境界条件

$$\begin{cases} \text{固定境界} & T = T_r \\ \text{自由境界} & -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_r + \alpha_r (T_m - T)_r \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{ここで } Q_c = \frac{\alpha_g (T_m - T)}{l} - \frac{\alpha_c (T - T_c)}{l} \quad (3)$$

$$Q_R = \frac{B\sigma (T^4 - T_a^4)}{l} \quad (4)$$

$B$  : ふく射率と形態係数から決まる係数,  $l$  : 試験片の

厚さ,  $n$  : 境界の法線方向 (外向きを正),  $Q_c$  : 対流による伝熱量,  $Q_R$  : ふく射による伝熱量,  $q_r$  : 境界の熱流束,  $T, T_a, T_c, T_m$  : 試験片, 室内, 水塊, 主流の絶対温度,  $\alpha_c, \alpha_g$  : 水塊, 主流と試験片表面との間の熱伝達率,  $\alpha_r$  : 境界の熱伝達率,  $\lambda$  : 試験片の熱伝導率,  $\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数

添字  $m$  : 主流,  $r$  : 境界

式(1), (2)の汎関数表示を行なうと次式が得られる。

$$\begin{aligned} J = & \iint \frac{\lambda}{2} \left\{ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right\} dx dy \\ & - \iint \frac{1}{2} (fT^2 - 2gT) dx dy - \iint \frac{h}{5} (T^5 - 5T_a^4 T) dx dy \\ & + \int_{\Gamma_q} q_r T ds + \int_{\Gamma_a} \frac{1}{2} (\alpha_r T^2 - 2\alpha_r T_m T) ds \quad (5) \end{aligned}$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} f &= (\alpha_c + \alpha_g) / l \\ g &= (\alpha_c T_c + \alpha_g T_m) / l \\ h &= B\sigma / l \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(5)の第4, 5項は境界条件から得られ、境界に沿う線積分である。式(5)の停留条件は着目する点の温度  $T_i$  に関して

$$\frac{\partial J}{\partial T_i} = 0 \quad (7)$$

で表わされる。

対象とする試験片を正方形領域で代表し図12に示すように自動要素分割により三角要素に分割した。分割した要素から一つの三角要素をとり出し、その節点の温度を図13のように  $T_i, T_j, T_m$  とし、要素内の温度  $T$  が座標  $x, y$  の一次式で表わされるものと仮定するとその要素内の温度は次式で表わされる。

$$T = \sum N_k T_k \quad (8)$$

$$(k = i, j, m)$$

ただし,  $N_k$  は  $x, y$  の関数である。 $N_k$  の具体的な表示は文献(2)等に記述されているのでここでは省略する。図13の三角要素  $e$  の各節点における微分

$$\left\{ \frac{\partial J}{\partial T} \right\}^e = \begin{Bmatrix} \partial J^e / \partial T_i \\ \partial J^e / \partial T_j \\ \partial J^e / \partial T_m \end{Bmatrix} \quad (9)$$

は式(5)の積分を三角形要素内で行なうことにより得られ、 $T_i, T_j, T_m$  に関する連立方程式となる。<sup>2)</sup>これらの手続きを全ての要素について行なうと、与えられた領域内の未知の全節点温度を変数とする連立方程式が得られる。

その際節点温度に関する式(7)の条件から、節点  $i$  を例にとれば

$$\sum \frac{\partial T^e}{\partial T_i} = 0 \quad (10)$$

の要領で全体が関連づけられる。ただし、式(10)の総和は考えている節点に頂点をもつすべての要素についてとるものとする。また、式(5)の第4, 5項は境界に面する要素についてのみ考慮する。

各節点の温度はこのように得られた方程式を解けば求められるが、ふく射のない場合の通常の未知温度に関する線形方程式と異なり式(5)の第3項には未知温度の5次の項が含まれるので、この項から得られる多項式は4次式となり通常の線形マトリックス法では解けない。したがって本報ではまず式(5)第3項を無視し、他の項から得られるマトリックス方程式を解いて未知温度を求め、求めた温度から第3項を計算して、その値を方程式の定数

項として処理し再度マトリックス方程式を解く、いわゆる繰り返し法を採用した。ちなみに計算に要した繰り返し回数は未知温度の収束精度 0.1 % の条件で 6 ~ 7 回であった。

実際の数値計算では実験条件を考慮した要素分割を行なうと共に実験に基いた各種データを与えた。分割した要素のサイズは図12に示すように、水塊が存在し、温度分布が急激に変化する中央部分で小さくしてある。データとして各分割要素の重心位置に熱伝達率  $\alpha_g$ ,  $\alpha_c$ , 主流温度  $T_m$ , 水温  $T_c$  を与え試験片周囲の境界条件を図14のように与えた。境界条件としては試験片前縁温度を主流温度と等しくとり、両側縁で断熱とし、後縁ではちょうど適した式が見出せなかったため、板厚と等しい直径の円柱の平均熱伝達率をそのまま使った。試験片上下面では主流から試験片への熱伝達率  $\alpha_g$  として次の平板に対する式<sup>3)4)</sup>を適用した。

$$\alpha_g = 0.332 \frac{\lambda_a}{x} P_r^{1/3} \left( \frac{U_m x}{\nu} \right)^{1/2} \quad (11)$$

ここで、 $P_r$ ; プラントル数,  $U_m$ ; 主流速度,  $x$ ; 前縁からの距離,  $\lambda_a$ ; 空気の熱伝導率,  $\nu$ ; 動粘性係数, 水塊と試験片間の熱伝達率  $\alpha_c$  に関してはサーモカメラによる温度測定例を参考にして水塊部の試験片温度分布を仮定し、水と沸点との温度差(過熱度)の小さい場合には自然対流、大きい場合には核沸騰および膜沸騰熱伝達を仮定した。実験の水塊の場合、中心部の自然対流熱伝達率  $\alpha_c$  はグラフ<sup>5)</sup>から求められ、 $\alpha_c$  に対する水の厚さの影響は比較的少なく、過熱度による値の変化も少ないので  $\alpha_c = 600 \text{ kcal/m}^2 \text{hk}$  で一定とした。核沸騰や膜沸騰を仮定した水塊周辺部に関しては、蒸気の発生により水塊表面や外周境界が複雑に変形し、発生した蒸気が水中を通過しないで外部に放出される点で通常の沸騰熱伝達

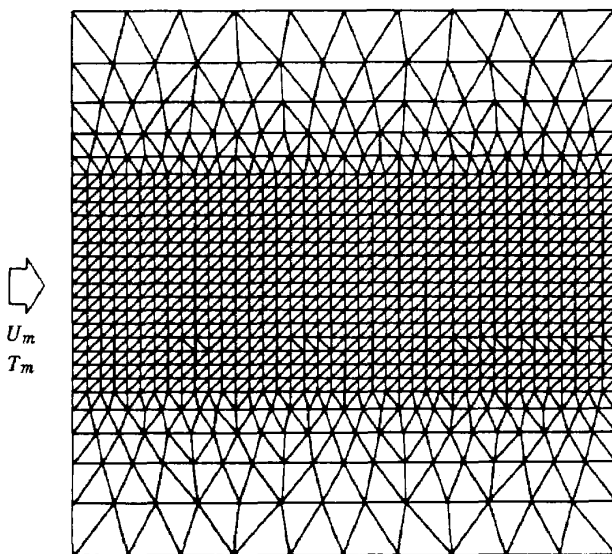


図12 要素分割(要素数1716, 節点数895)

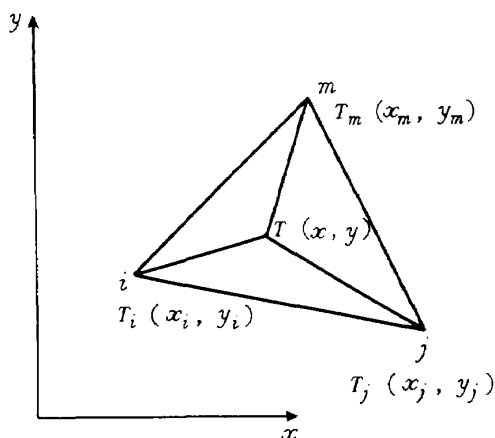


図13 三角要素  $e$

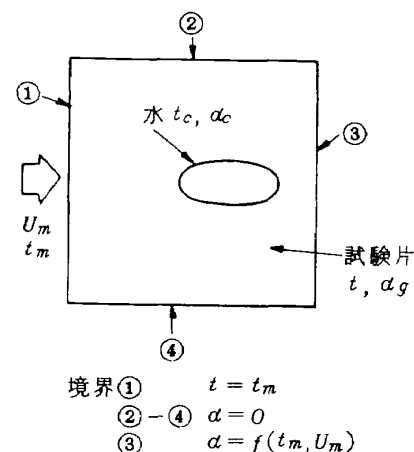


図14 境界条件

率で扱うのは問題がある。<sup>6)</sup>しかし、現象にちょうど対応する熱伝達率の式を見出せぬためブール沸騰に対する次式に基いて熱伝達率を与えた。<sup>7)8)</sup>

核沸騰に対する西川・山懸の式

$$q = A_0^3 f_p^2 f_t^2 \left[ \frac{1}{P_0 M^2} \cdot \frac{\lambda_l^2 C_{pl} r_l^2}{\sigma_t L r_v} \right] \Delta T_{\text{sat}}^3 \quad (12)$$

バーンアウト熱流束に対する Rohsenow-Griffith の式

$$q_{\text{BO}} = L r_v 43 \left[ \frac{r_l - r_v}{r_v} \right]^{0.6} \quad (13)$$

膜沸騰熱流束に対する Bromley の式

$$q = 0.425 \frac{\lambda_v}{L_a} \left[ \frac{r_v (r_l - r_v) L L_a^3 \Delta T_{\text{sat}}^3}{\eta_v \lambda_v} \right]^{1/4} \quad (14)$$

膜沸騰の極小熱流束に対する Berenson の式

$$q_{\text{min}} = 0.09 L r_v \left[ \sigma_t g^2 (r_l - r_v) / (r_l + r_v)^2 \right]^{1/4} \quad (15)$$

ここで、 $A_0$ ；定数（ $\div 80$ ）， $C_p$ ；定圧比熱（kcal/kgk）， $f_p$ ； $p/p_a$ ， $f_t$ ；起ほう度（ $\div 1$ ）， $g$ ；重力の加速度， $L$ ；蒸発の潜熱（kcal/kg）， $L_a = \{\sigma_t / (r_l - r_v)\}^{1/2}$ ， $M$ ；定数（ $900 \text{ m}^{-1}$ ）， $p$ ；問題にしている沸騰系の圧力， $p_a$ ；大気圧， $p_0$ ；定数（ $= 1.699 \text{ kcal/h}$ ）， $q$ ；熱流束（kcal/m<sup>2</sup>h）， $r$ ；比重（kg/m<sup>3</sup>）， $\Delta T_{\text{sat}}$ ；過熱度（K）， $\eta$ ；粘性係数（kg・h/m<sup>2</sup>）， $\lambda$ ；熱伝導率（kcal/mhk）， $\sigma_t$ ；液体の表面張力（kg/m），  
添字 BO；極大熱負荷点（バーンアウト点）， $l$ ；液体， $v$ ；蒸気

これらの式で与えられる熱流束と過熱度の関係は図15のようになり、熱伝達率を過熱度に基いて求めると図16に示す値になる。

サーモカメラによる測定データに基いて得た水塊部の試験片温度分布を表わす関数形は、Run No. 1, 2, 4 では楕円や円の径の3乗に比例し、No.3 は径に1次的に比例する形となった。この関数形で得た水塊の中心を通る主流方向の温度分布を Run No. 1 と No. 2 に対して図17に示す。この温度分布に対して図16から与えられる水塊と壁面間の熱伝達率を図18に示す。水温の与え方は沸騰伝熱の部分には水のサブクーリングの影響が少ないため大気圧の沸点をそのまま、自然対流の部分には水の温度測定を行っていないため壁面温度分布、蒸発の進行具合を参考にして95℃とした。壁面から水塊への伝熱量の計算における水温の影響は自然対流の伝熱量のみに関係し、この量が沸騰熱伝達量より桁違いに少ないため殆んど問題とならない。

計算によって得られた温度分布形を等温線プログラム

を用いて電算機に画かせた結果を図19～21に示す。図示の分布は最低温度の位置と主流方向に伸びた分布、最高温度と最低温度のオーダ、温度勾配の急な位置の大きさ等の点で実験結果に近い。計算結果は中心線から両側に線対称に近い分布形であるが、実験では水塊の位置の中心線からのずれや変形、主流の温度分布等による影響があり、細部に関しては差異がある。図19-a, b は式(1)のふく射の項  $Q_R$  を考慮した場合としない場合の等温

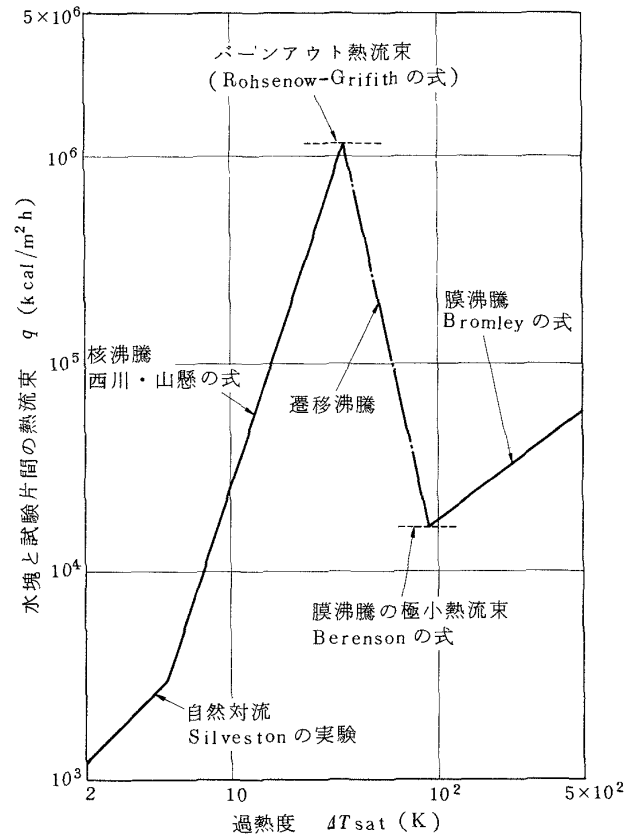


図15 水塊と試験片間の熱流束

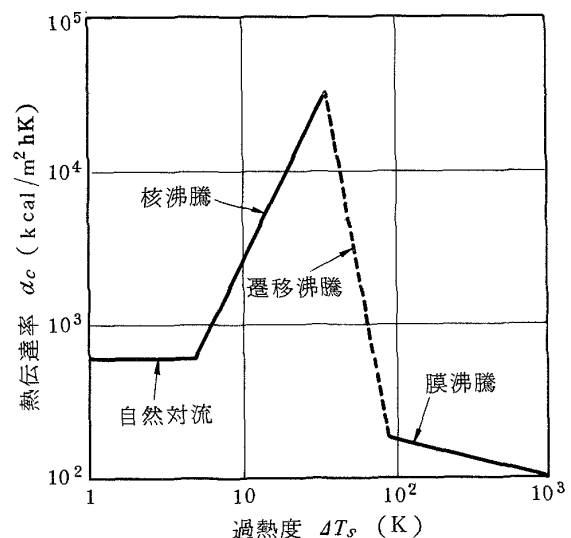


図16 水と壁面間の熱伝達率



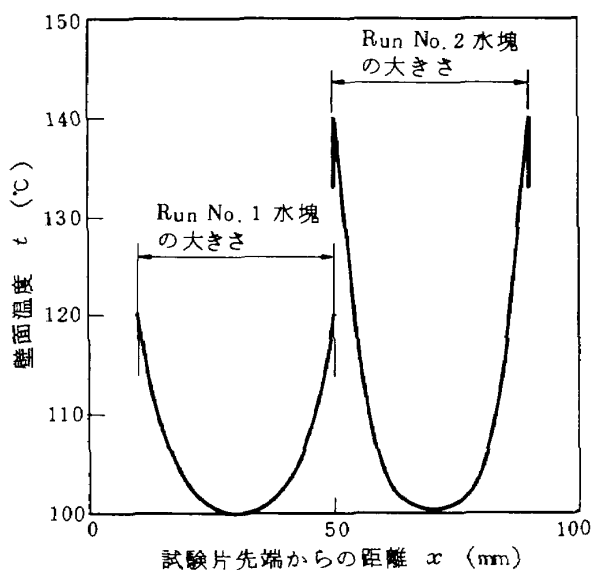


図 17 水塊と壁面間の熱伝達率を求める際に仮定した壁面の温度分布

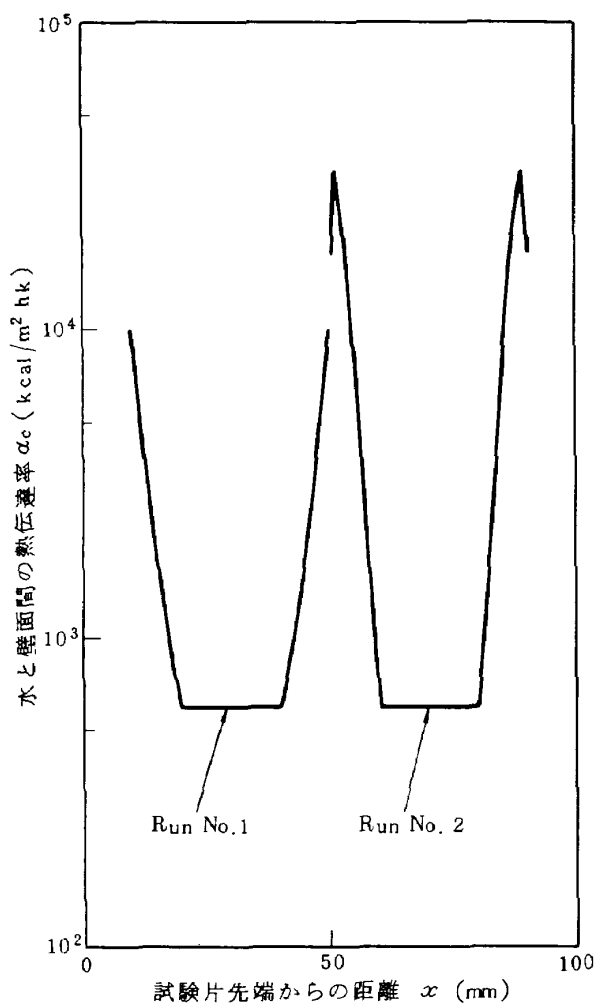


図 18 計算上与えた熱伝達率

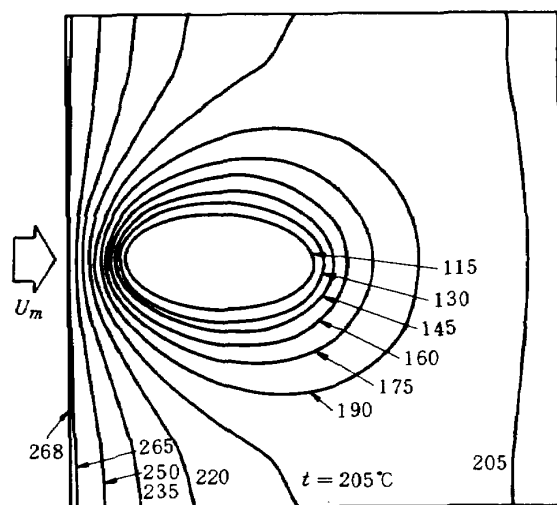


図 19-a 計算で求めた等温線 (Run No. 1)  
ふく射……あり

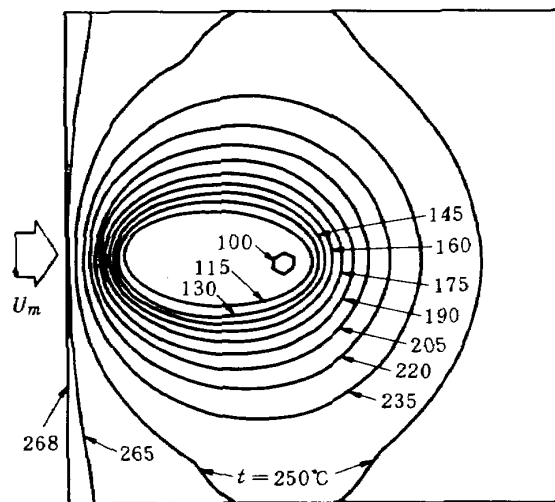


図 19-b 計算で求めた等温線 (Run No. 1)  
ふく射……なし

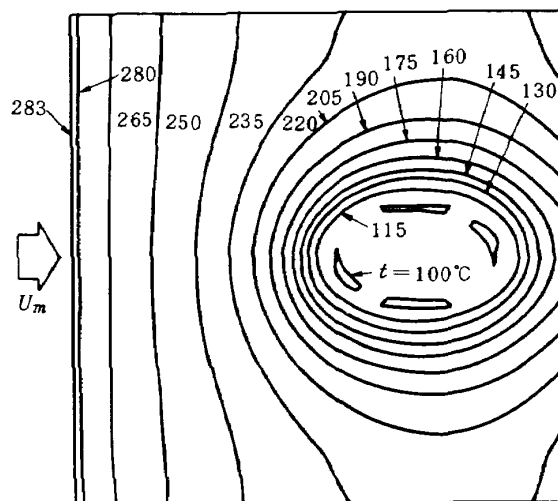


図 20 計算で求めた等温線 (Run No. 2)

線を示す。ふく射を考慮すると下流側の温度が全般的に下がるため閉じた等温線の外側の部分が下流側でふくれた形状になるが、ふく射を考慮しないと円形に近い形になっている。図 20、21 の等温線はふく射を考慮した結果である。図 19～21 の上下の境界線は試験片の両側縁に対応し計算上断熱としてあるが、この線に達する位置で等温線は垂直になっていない。断熱の条件からは垂直になる必要があるが、計算上要素分割をこの境界線付近で粗くしたために起こった問題であり、試験片中心部に重点を置いている今回の結果に対する影響は少ない。図 20 で最低温度 100℃ の部分が 4 カ所あるのも与えた計算条件からは考えられない形であるが、計算の精度と等温線プログラムの関係から生じた電算機特有の問題と思われる。

水塊の中心を通る主流方向の断面についてその測定温度と計算温度を比較したのが図 22 である。温度変化の傾向は一致しているが、一般的に計算値の最低温度が水の沸点である 100℃ に近いのに対し、測定値はかなりの差を持つ。計算の際、単純に水と壁面間の熱伝達率  $\alpha_c$  を本計算の 7 割程度まで下けても最低温度の上昇が Run No. 1 で 5℃、No. 2, 3, 4 では 1℃ 程度で、全体的な温度分布の変化はなく水への計算上の伝熱量は僅かに減った。最低温度が実験で水の沸点より 10～30℃ 高くなった結果に対しては今回の熱伝達率の与え方では説明できず、今後の問題である。図 22 には水塊のない場合の温度分布も示してある。主流速度と温度は Run No. 2 と等しい  $U_m = 12.6 \text{ m/s}$ 、 $t_m = 283^\circ\text{C}$  である。静止した気体中と異なり試験片は下流側に向って温度低下を示す。この温度低下は主流から試験片への熱伝達率が式(4)のように主流方向の距離  $x$  の関数となり次第に低下することと、試験片表面から室内へのふく射伝熱との関係による。これらを考慮した計算値はほぼ実験値と一致する傾向を示すが、試験片後縁における傾向が合わないのは与えた熱伝達率が大き過ぎたためと思われる。ふく射の計算では簡単化のため試験片下面と流路壁間の正味の伝熱量がないものとし、上面では室内の天井や側壁への熱損失があるものとし、形態係数、ふく射率から式(2)の  $B$  の値を、 $1/5.9$  としてその量を求めた。

試験片上の水塊の蒸発量は実験では準定常状態にあるので供給水量をメスシリンダとストップウォッチで測定したもので表わし、計算では得られた試験片の温度分布に基いた水塊と試験片間の伝熱、および、水塊表面と主流間の伝熱量から求めた。水塊表面と主流間に対しては簡単に扱うため平板の熱伝達率を適用した。得られた結果を図 23 に示す。結果は計算値が少し低目であるが測定

値に近いこと、壁と水塊間の伝熱量による蒸発量が必要な割合を占めること、主流と水塊間の伝熱量の割合は試験片上の水塊の主流方向の位置によることなどを示している。計算値の低いことの原因として正確な表面や熱伝達率を与えていくことの他に、水塊が外周部で乱れた境界を与えているのを考慮していない点や、水塊の存在により境界層の厚さが薄くなり熱伝達率が上昇する問題、主流と水塊間の伝熱に対し水温を 95℃ または 100℃ として壁面と水塊間の伝熱計算と等しく高温にしたことが考え

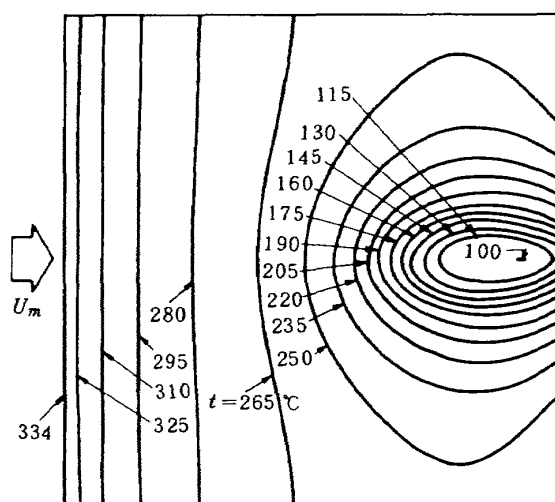


図 21 計算で求めた等温線 (Run No. 3)

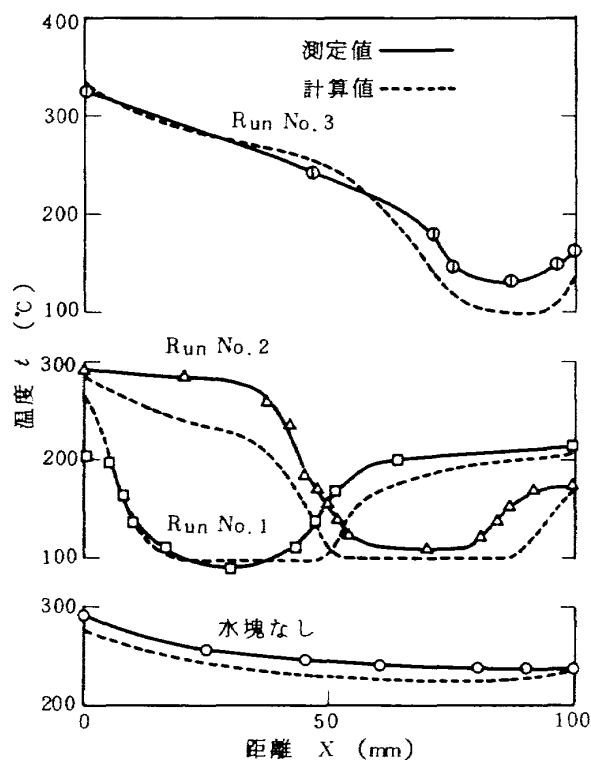


図 22 水塊中心断面の主流方向の温度変化

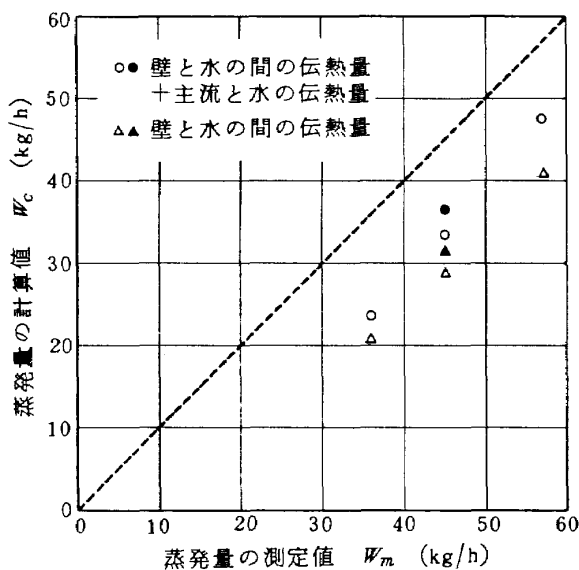


図 23 水の蒸発量の測定値と計算値の比較

られる。最後の点に関しては主流が存在することにより水塊表面からの物質移動量が大きくなるため、供給熱量と蒸気圧との関係で水塊の表面温度が水の沸点よりかなり低下することも考えられる。しかし、今回は水温の測定を行っておらず、水温が表面の熱伝達率と内部の熱伝導や自然対流の関数となり分布を持つことが予想されるので、詳細については今後の検討が必要である。

以上示したように温度分布と蒸発量の計算結果が測定した結果と近いことから、計算において仮定した熱伝達の過程は大筋で現象に近いものと思われる。より正確な計算を行なうには水塊の形状、寸法、温度、熱伝達率等のデータの精度をどの程度高くできるかが鍵となる。

## 5. むすび

本研究ではガスタービン燃焼器の壁面や燃料蒸発管の壁面における燃料の蒸発と壁面温度の問題を解明する目的で、その第一段階として加熱空気流中におかれた金属壁面上の水塊の蒸発と壁面温度を実験と計算により求めた。蒸発量の測定は準定常状態に保った試験片上の水塊に供給する水量から行ない、壁面温度分布の測定は赤外線映像装置（サーモカメラ）により行なった。試験片の温度分布と蒸発量の計算は有限要素法によるもので、実験条件に基づいて境界条件、熱伝達率等を与えて結果を図

で表示した。行なった実験と計算から次のことが示された。

1. 水塊の存在する壁面の温度分布の測定に赤外線映像装置は有力なデータを与えた。
2. 有限要素法によって計算した壁面温度分布は実験で求めた温度分布と傾向の一致を示し、値も近いものが得られた。
3. 実験と計算による試験片上の水の蒸発量は近い値を示した。
4. 温度分布と蒸発量の実験と計算による結果が近い値を示したことにより、計算上で仮定した伝熱のパターンは大筋で現象に近いものと思われる。

今回の報告では現象の観察および計算による現象のモデル化が中心になった。今後の実験では定量的な蒸発データの採取、微小液滴や非定常過程の問題、水の存在する際の壁面のふく射率、主流の温度分布の偏り、壁温と水温の熱電対による測定、液滴形状、寸法の正確な測定などの測定上の問題の解決等が課題である。

最後に原動機部高原室長からサーモカメラ使用に関する御協力を頂き、計算センター磯部主任研究官から自動要素分割および等温線図の作製に関する御協力を頂いたことを記し感謝の意を表します。

## 文 献

- 1) 長島義悟、塩田祐次、坪井俊雄；赤外線カメラによる冷却動翼の表面温度分布、日本ガスタービン学会講演論文集（'76-4 第4回定期講演会）pp. 97-99
- 2) O.C. ツィエンキーヴィッツ、Y.K. チューン、（吉識雅夫監訳）；マトリックス有限要素法（昭和45）pp. 162-184、培風館
- 3) 甲藤好郎；伝熱概論（昭和39）p. 65、養賢堂
- 4) 伝熱工学資料、改訂第2版（昭和41）pp. 14-18、日本機械学会
- 5) 文献3）pp. 172-174
- 6) 戸田三郎；ミスト冷却の熱伝達、伝熱工学の進展3（昭和51）pp. 234-235、養賢堂
- 7) 沸騰熱伝達（昭和40）、日本機械学会
- 8) 文献4）pp. 53-59

---

## 航空宇宙技術研究所報告504号

昭和52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)

---