

UDC 536.46:
621.45.034

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-369

高負荷燃焼器の空気孔からの流れについて(III)

相 波 哲 朗 ・ 中 野 篤 治

1974 年 6 月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

高負荷燃焼器の空気孔からの流れについて(Ⅲ) *

相 波 哲 朗**
中 野 篤 治**

Investigation of Air Stream from Combustor-Liner Air Entry Holes (III)

By Tetsuro AIBA and Tokuji NAKANO

ABSTRACT

Investigation of the jets flowing from air entry holes of the combustor liner of a gas turbine was carried out following the previous experiments using simplified models. Cold air was supplied through the air entry holes normally into the primary hot-gas flows. The mass flow of the primary hot-gas and issuing jets were measured, and the behavior of the air-jets was studied by the measurement of the temperature distribution of the gas mixture.

The air-jets flowing from three circular air entry holes being parallel to the primary flow, single streamwise-long holes and two opposing circular holes were studied. The effects of jet and gas stream velocities and of gas temperature, together with these different configurations, were investigated. The discharge coefficient, the maximum penetration of the jets, the jet flow path, the mixing of the jets, and temperature distribution across the jets were investigated. Empirical expressions which describe the characteristics of the jets under the conditions of the experiments were formulated. The experimental results were compared with the results given by a standard circular hole and their characteristics were discussed.

1. まえがき

航空用ガスタービン燃焼器の作動条件は次第に高温、高圧化し、燃焼負荷率も高い値になっている。高負荷燃焼を行なわせる際、燃焼器内の流れは燃焼効率、火炎の安定範囲、燃焼器出口温度分布などに大きな影響を与える。また、近年問題になっている排ガスに関連しても流れの正確な情報が必要になっている。排ガス中の有害成分、 CO 、 NO_x 等は燃焼器内の流れの組成分布、温度分布と共に流体塊の流れの経路と滞留時間に関係する。燃焼器内の流れは主に燃焼器ライナ、スワラおよびライナ空気孔各々の形状によって決まる。本報告はライナに設けられる空気孔からの流れの流れ模様、貫通性、混合性等を実験から求めた結果を示す。

今回は前報¹⁾²⁾に引続いて実際に近い条件の空気孔模型で補足的な実験を行なった結果を示す。空気孔の種類は円形孔をテストセクション下面に三個配置した直列三孔、下面に一個のみの長孔、および、上下両面に円形孔を各一個対置させたものの三種類である。直列三孔は前報の円形単一孔と二孔の実験に引続いて行なったものであり、長孔は希釈空気孔によく用いられる形状を対象にした。対向形円形孔は実際の円環形燃焼器で内側および外側ライナの空気孔が向かいあっている例が多いので対象にとりあげた。実験では主流を加熱し、テストセクションに設置した空気孔から主流に直交させて常温の空気を流した。直交噴流の貫通性、混合性等は流れの場の温度分布の測定から求めた。ガスタービン燃焼器では数多くの空気孔がライナに配置されており、本実験の複数孔や長孔からの流れの測定は従来の殆んど単一円形孔や主

* 昭和49年3月9日 受付

** 原動機部

主流路高さの高い条件に限られた測定に比べ、より実際に近い条件で行なわれている。今回の測定は複数孔からの噴流の合体、長孔からの噴流の断面の変化、各噴流の貫通性、混合性等に関して、従来の結果とは異なるいくつかの特徴ある結果を与えた。

本文中単一円形孔に対する結果の補足として、前報以降に整理した噴流中心の経路、および、他の実験との比較検討も示してある。

2. 実験装置および方法

実験装置には当所原動機部の缶形燃焼器試験設備を用いた。図 1 にこの設備の系統図を示す。この設備で使える空気量は $0 \sim 1.25 \text{ kg/s}$ であり、冷却器出口の空気温度は $20 \sim 40^\circ\text{C}$ である。予熱燃焼器は主流温度を最高 600°C まで加熱することができる。予熱燃焼器の燃料には JP-4 を用いた。整流器の内径は 600 mm で測定部では $130 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ の正方形流路に絞っている。測定部の出口は大気開放状態で、測定部の全長は 520 mm である。測定部上下両面に円形空気孔を各一個取付けた対向形空気孔の状態を図 2 に示す。直列三孔および長孔の場合は測定部上面にあけた小孔から、対向形空気孔の場合は下流側からそれぞれ熱電対を挿入して流れの場の温度分布を測定した。図 3 に示す位置で各部の圧力測定や温度測定を行なった。

直列三孔は図 4 に示す円形空気孔を測定部下面に三個主流方向に沿って設置したもので、空気孔間の間隔 l を $25, 50 \text{ mm}$ の二種類設け、各模型に対し前報との関連から No. 9, 10 の番号を付した。

単一長孔の形状は図 5 に示すもので、出口側に案内筒を持ち、主流の上流側に面する部分では実際の燃焼器で使われる例に合わせて案内筒の一部を切断してある。これは案内筒の切断した部分が燃焼器内の高温ガスによって焼損し、原形から大幅に変形した経験に基いている。案内筒の高さ $H = 5, 10, 15 \text{ mm}$ の三種類に対して実験を行ない、各模型に No. 11, 12, 13 の番号を付した。

対向形円形二孔は図 4 に示す円形孔を図 2 のように測定部上下に対置させたものである。この円形空気孔は前報で示した単一孔 No. 1 と同形である。対向した空気孔の場合、片面だけに空気孔があるのとは異なり、空気孔からの噴流は流速の速いときお互に衝突する。この模型は一種類のみで No. 14 の番号を付した。

空気孔模型の例を図 6 に、対向形円形二孔の測定部と熱電対移動装置の外観を図 7 に示す。

実験では主流の温度と速度および噴流の速度を変えて流れ場の温度測定を行なった。温度測定は素線径 0.3 mm 、先端露出のクロメル-アルメル熱電対で行ない、ふく射の補正は行なわなかった。起電力の測定は横河電機製 PRO-12 型 X-Y レコーダによった。主流の温度と速度は噴流を流さない状態で熱電対および全圧管による測定から求めた。噴流の速度は空気孔の入口側と出口側の圧力差に基いて求め、噴流流量は別途設けたオリフィスによって求めた。

3. 実験結果および考察

実験結果は空気孔の流量係数、流れ模様、噴流の貫通度、等温線の形、混合度に関して整理した。各空気孔の

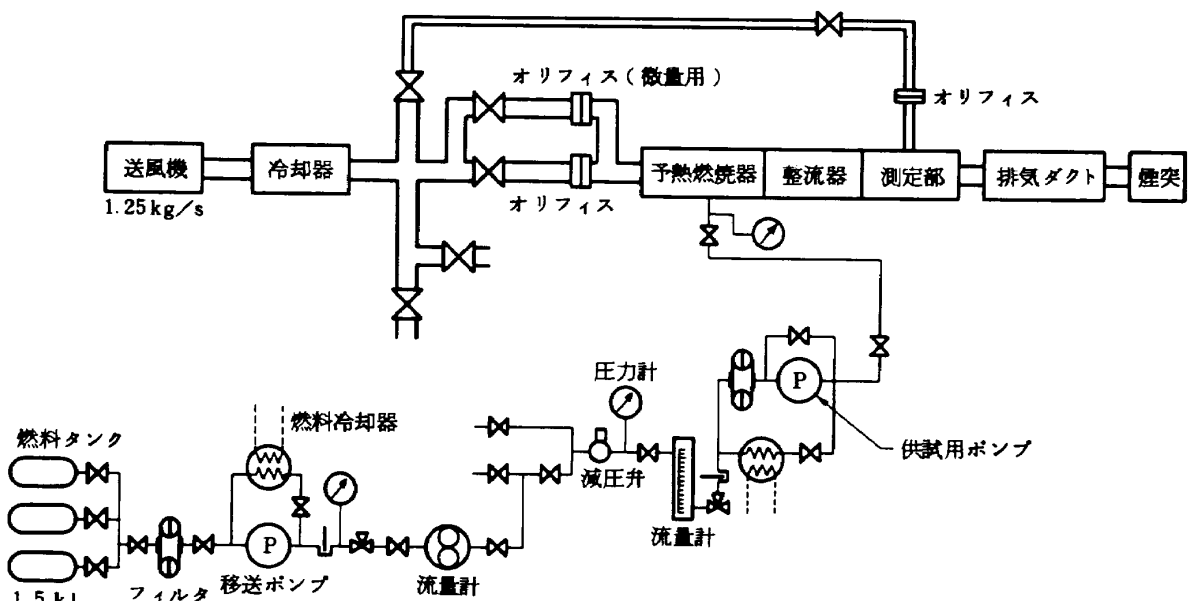


図 1 試験設備系統図

結果に対し、実験式を求め、あるいは、単一円形孔 No. 1 の結果との比較を行ない検討した。

3.1 空気孔の流量係数

各空気孔模型の流量係数 C を空気孔前後の差圧 ($P_3 - P_4$) とオリフィスで測定した噴流の重量流量 G_j から次式により求めた。

$$C_i = \frac{G_{j,i}}{\epsilon_i A_a \sqrt{2g(P_{3,i} - P_{4,i}) \gamma_{3,i}}} \quad (1)$$

($i = \text{I, II, III}$)

ここで

A_a : 空気孔の断面積

g : 重力の加速度

γ_3 : 空気孔入口における空気の比重量

ϵ : 空気孔を通過する空気の膨脹に関する修正係数

P_4 の測定は空気孔の中心から主流に垂直に 15mm 離れた位置で測定部壁面に静圧孔を設けて行なった。

直列三孔 No. 9 の流量係数を図 8 に示す。測定は各空気孔に等しい流量を流して行なった。直列三孔の流量係数は運動量比の低いところで同一運動量比に対して最上流側第 I 孔が最も低い値を示し、中間の第 II 孔が 1.0 に近い値で、最下流側第 III 孔は I, II 孔の中間の値を示している。これは第 I 孔が主流の影響を直接受け、第 II 孔は殆んど受けず、第 III 孔は少し受けるためと推定される。

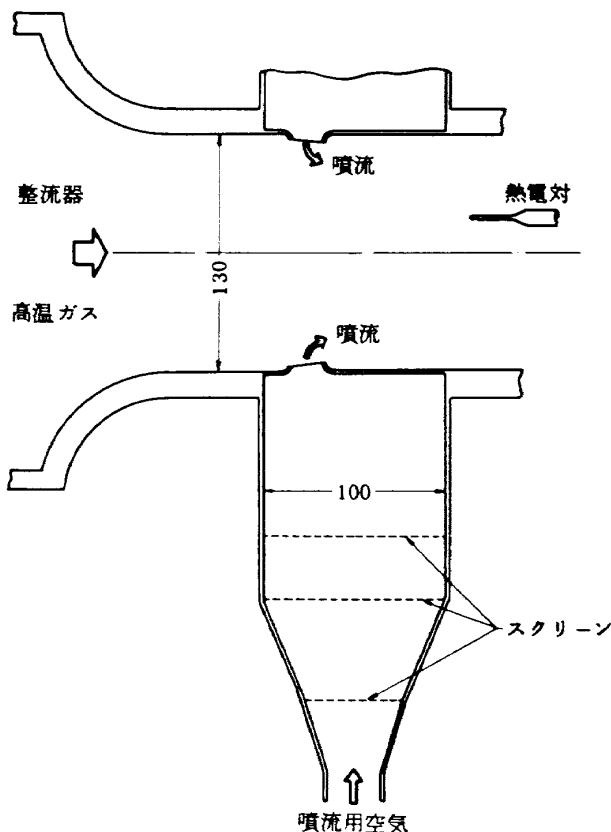


図 2 対向形円形二孔の測定部

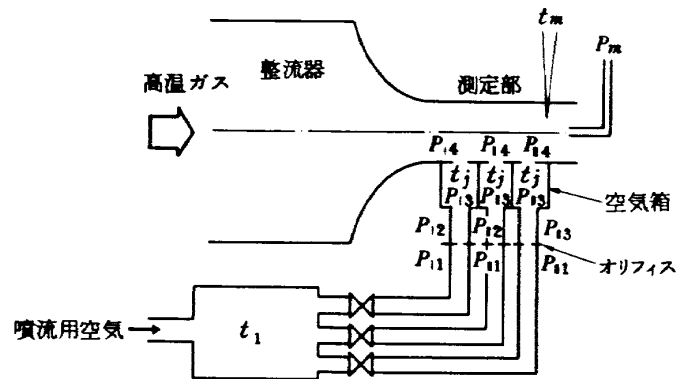


図 3 圧力と温度の測定位置

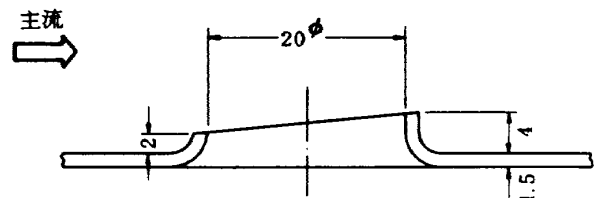


図 4 空気孔の形状

(単一円形孔 No. 1
直列三孔 No. 9, 10
対向形二孔 No. 14)

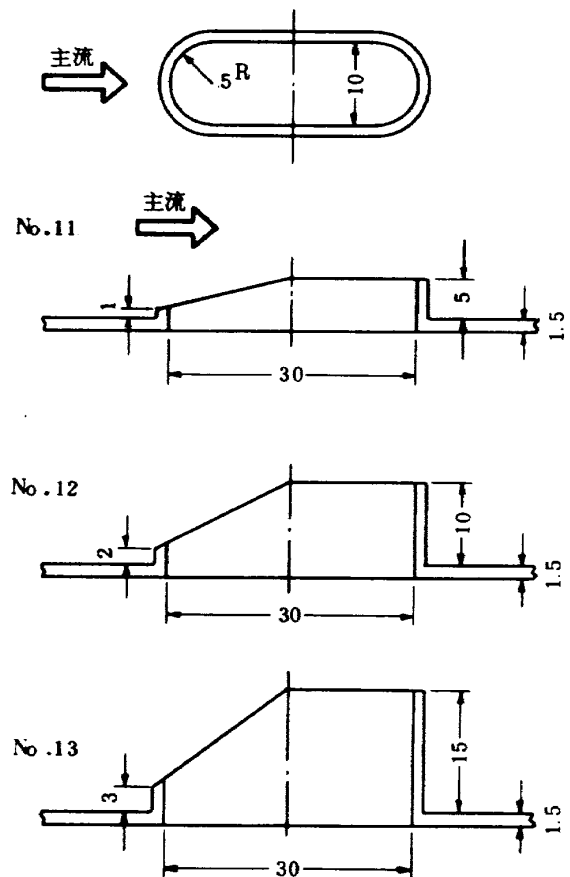
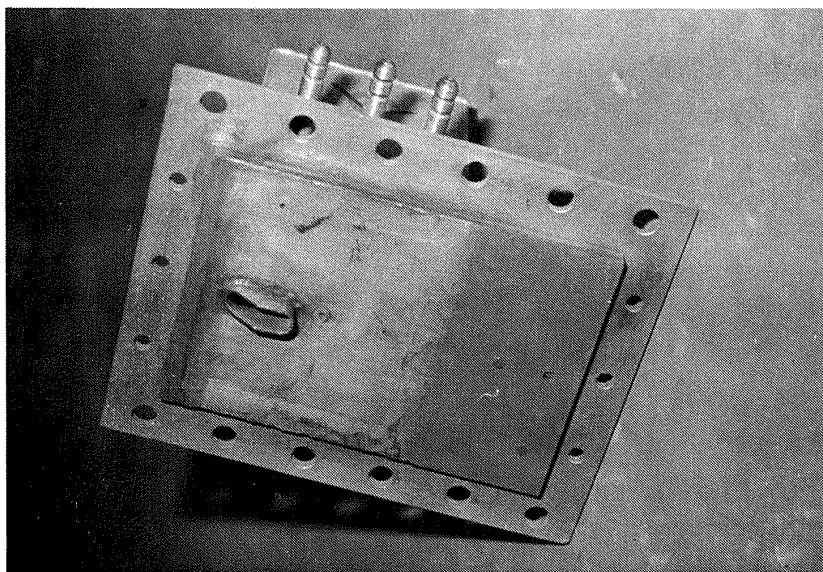
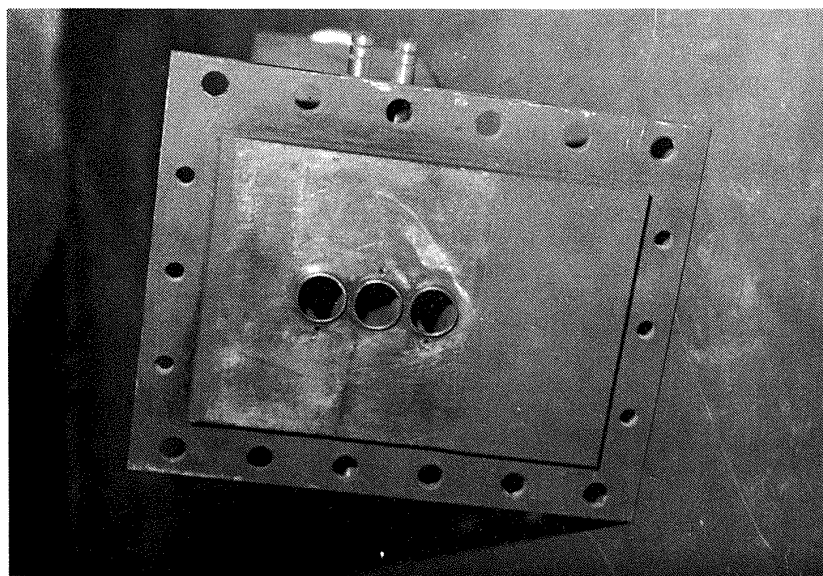


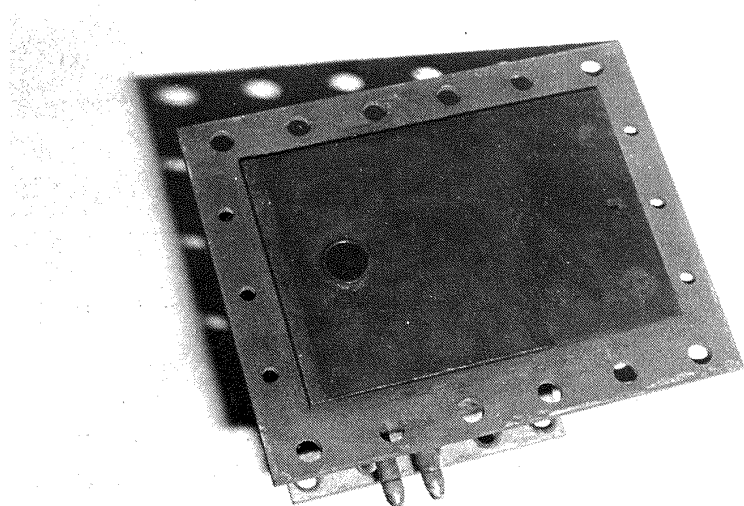
図 5 長孔模型



(c) 長孔No. 13



(b) 直列三孔No. 9



(a) 単一円形孔No. 1

図 6 空気孔模型

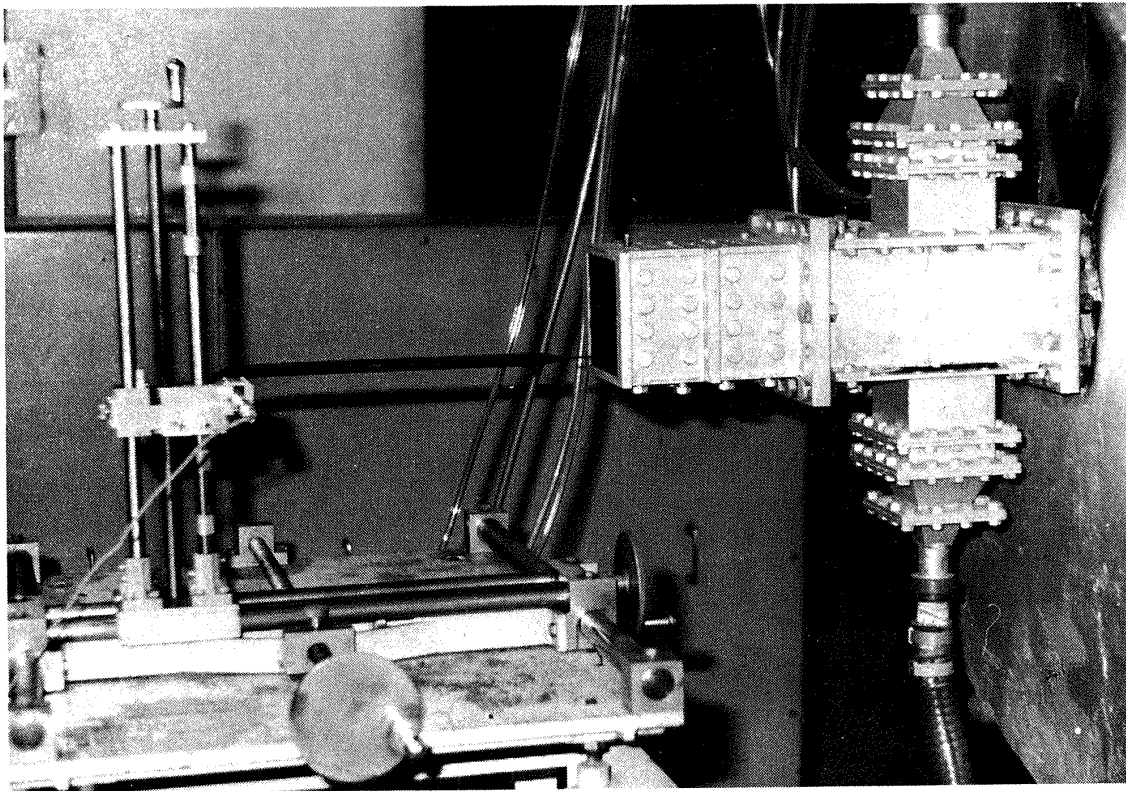


図7 測定部外観(対向形二孔)

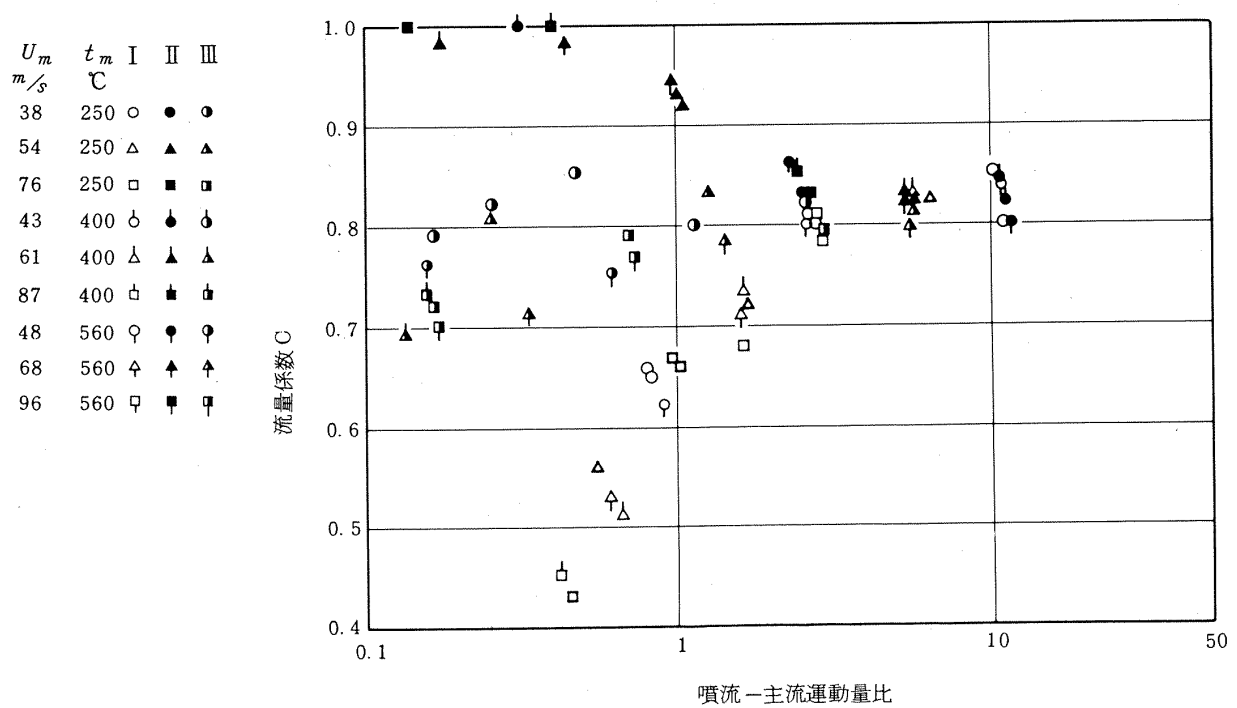


図8 直列三孔No. 9の流量係数

運動量比の低いところで第 I 孔の流量係数は単一孔 No. 1 の流量係数より低い値を示している。これは噴流全体の流量が多いことによる主流の加速の増大、および、第 II, III 孔からの噴流の存在により、第 I 孔からの噴流が主流に直接当たる程度が増加するためと思われる。空気孔間の間隔を長くした直列三孔 No. 10 では全体に単一空気孔 No. 1 の値に近づく傾向が認められた。

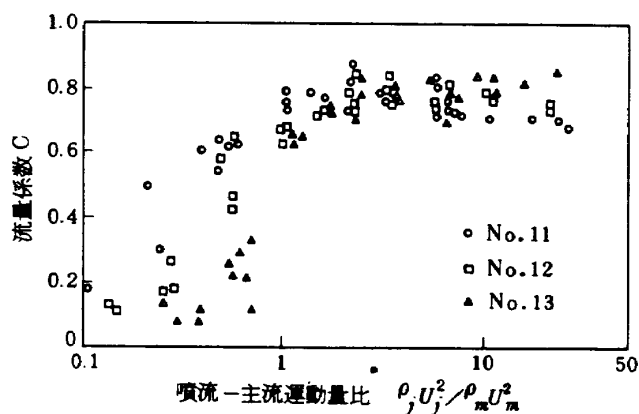


図 9 長孔の流量係数

長孔 No. 11, 12, 13 の流量係数を図 9 に示す。流量係数の運動量比による変化は単一円形孔 No. 1 の結果と似た傾向を示している。案内筒の高さの違いによる比較を行なうと、運動量比の小さいとき案内筒の低い No. 11 の流量係数が最も大きく、案内筒が高くなると流量係数が低下することを示している。これは主流の影響の大きい領域であり、案内筒によって主流の一部が加速され、その程度が案内筒の高い程大きいためと思われる。あるいは、別な観点から考えると案内筒が高い程主流の動圧をまともに受けとめることになり、噴流が案内筒の下流側の面に押しつけられた形になって流出しにくいためと推定される。運動量比の大きいところでは、逆に案内筒の高さが低いと流量係数も低くなる傾向にある。これは、主流の影響が弱く、噴流自体の流れで流量係数が決るとき、案内筒が低いとオリフィスを流れる流れに近く、案内筒が高いと管入口の流れに近い状態になるためと思われる。

対向形円形二孔の流量係数を図 10 に示す。測定に際しては上下の空気孔に等しい空気量を流したが、空気孔前後の圧力が少し異なり流量係数や運動量比にその影響が示されている。この上下空気孔の差異には特別な傾向は認められず、データ全体のばらつきの範囲内にある。流量係数の運動量比による変化は単一円形孔 No. 1 の場合と同様な傾向を示しているが、運動量比の値の小さいところで単一孔より低い値を示した。これは測定部の流

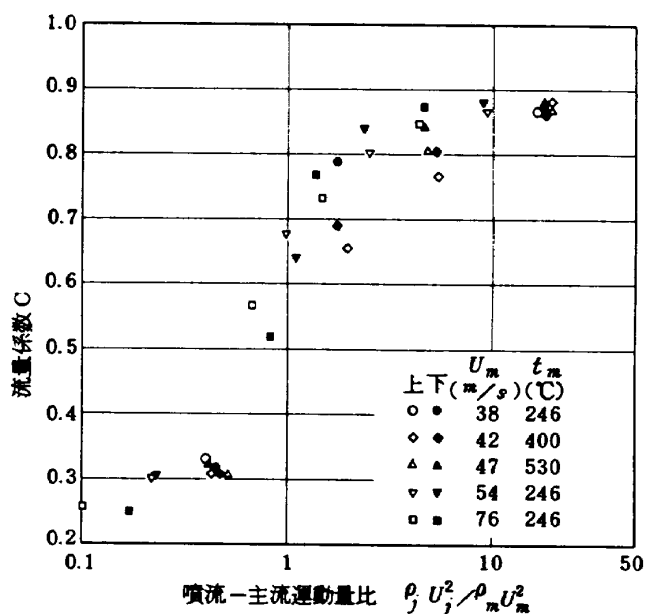


図 10 対向形円形二孔の流量係数

路断面が限定されているため、運動量比が一定でも二孔の方が全体の噴流流量が多くなり主流を加速する程度が増加するためと推定される。

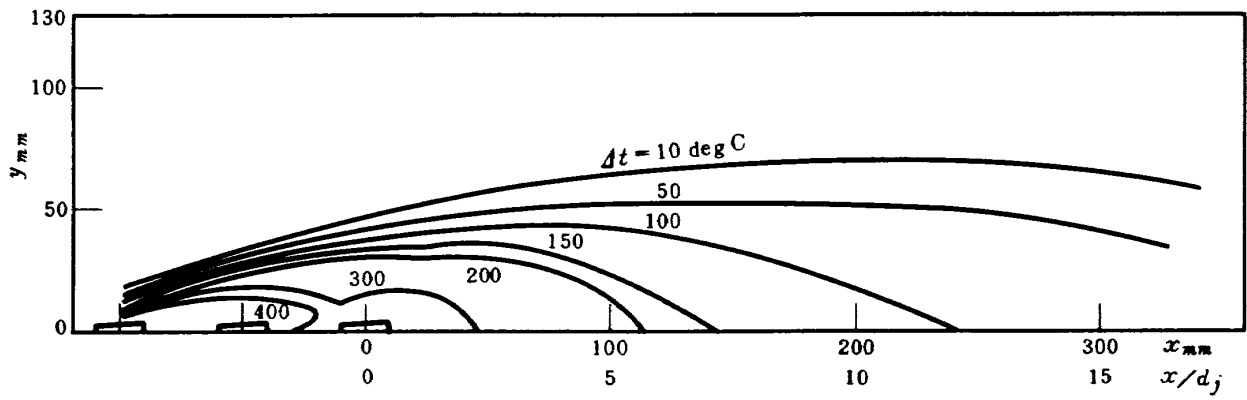
3.2 噴流の流れ模様

噴流の流れ模様は熱電対で測定した温度分布から等温線の形で示してある。噴流の貫通度、経路、混合度も等温線に基いて前報と同様に求めた。

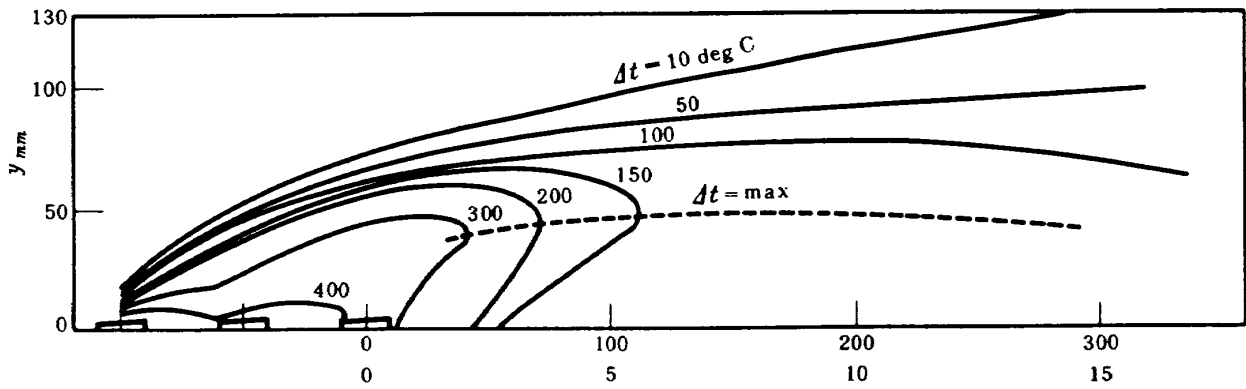
3.2.1 流れ模様

主流の温度 t_m と噴流の各部温度 t_j との差 $\Delta t = t_m - t_j$ の等しい点を結んだ等温線から噴流の流れ模様を得た。図 11～図 13 に主流に沿った断面内の流れ模様を示す。図 11 に示す直列三孔 No. 10 の流れ模様は、上流側では個々の空気孔からの流れを示す複雑なものであり、下流側では各噴流が合体して単一円形孔からの流れに似た形になることを示している。図 12 の長孔からの流れ模様は単一円形孔の流れ模様と同様な形であり、同図では噴流速度の増加と共に噴流の貫通性の増加する様子が示されている。図 13 の対向形円形二孔の流れ模様は噴流の流速の増加に伴ない二噴流が干渉し、単一円形孔からの流れと異なった様子になることを示している。噴流速度の最も速い図 13(d) の下流側では破線で示された断面内の最低温度の位置が流路の中央に形成されている。

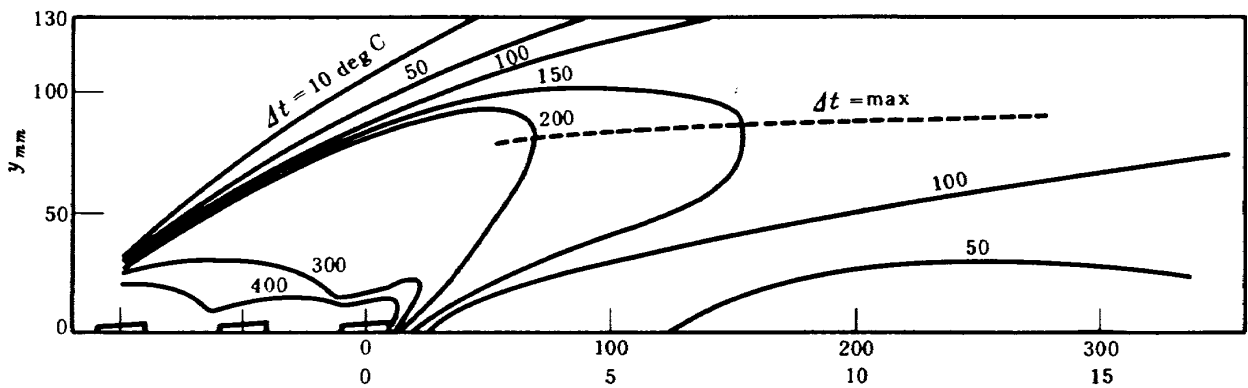
主流に垂直な断面における流れ模様を図 14 と図 15 に示す。図 14 の等温線の形は噴流速度が遅いときには円形空気孔の結果²⁾とほとんど変わらない。噴流速度の速いところでは等温線の横方向の広がり円形空気孔の場合より狭かった。また、円形空気孔では $x = 140\text{mm}$ の断面までは最低温度の部分が対になって 2 箇所形成され



a) $U_{j1} = 30.6 \text{ m/s}$ $U_{jII} = 20.4 \text{ m/s}$ $U_{jIII} = 24.2 \text{ m/s}$ $t_{jo} = 27^\circ \text{C}$



b) $U_{j1} = 50.5 \text{ m/s}$ $U_{jII} = 44.4 \text{ m/s}$ $U_{jIII} = 48.0 \text{ m/s}$ $t_{jo} = 29^\circ \text{C}$



c) $U_{j1} = 93.9 \text{ m/s}$ $U_{jII} = 90.9 \text{ m/s}$ $U_{jIII} = 95.1 \text{ m/s}$ $t_{jo} = 29^\circ \text{C}$

図 11 直列三孔 No. 10 の温度分布 $U_m = 67.9 \text{ m/s}$ $t_m = 556^\circ \text{C}$

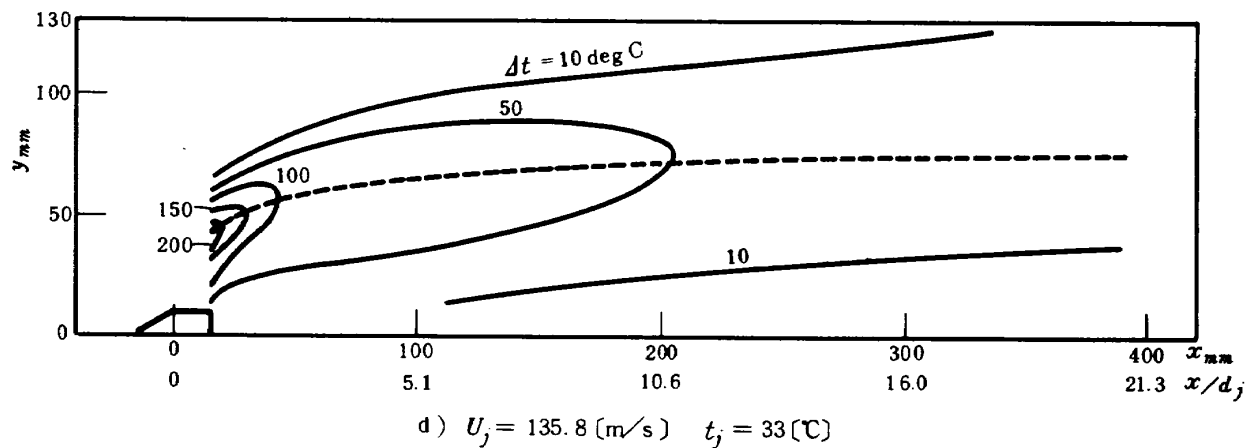
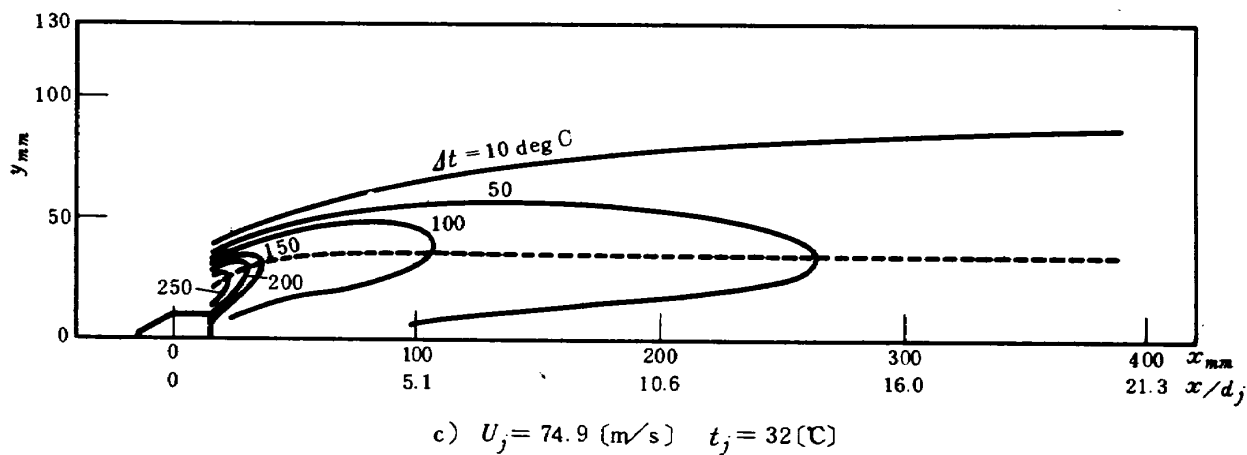
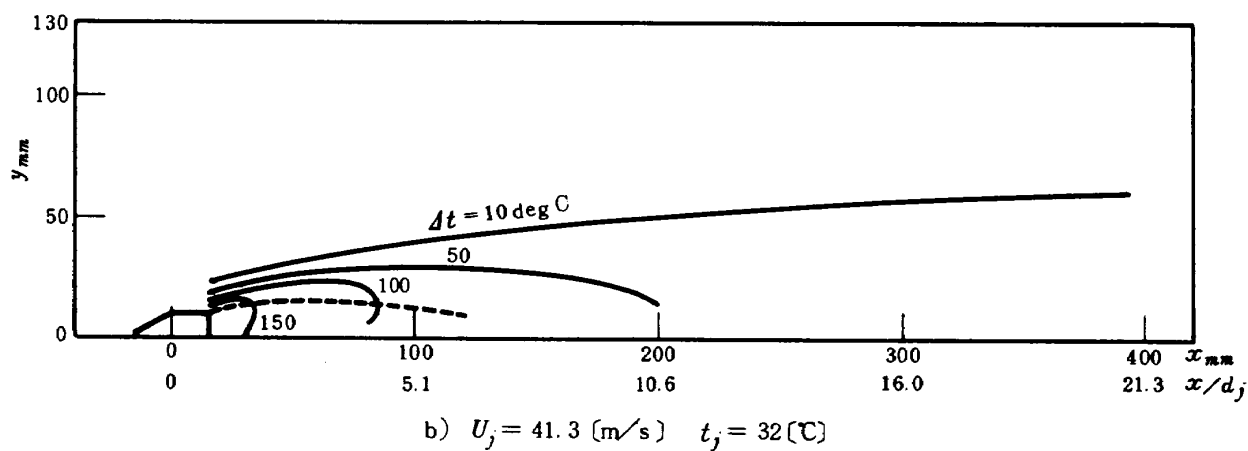
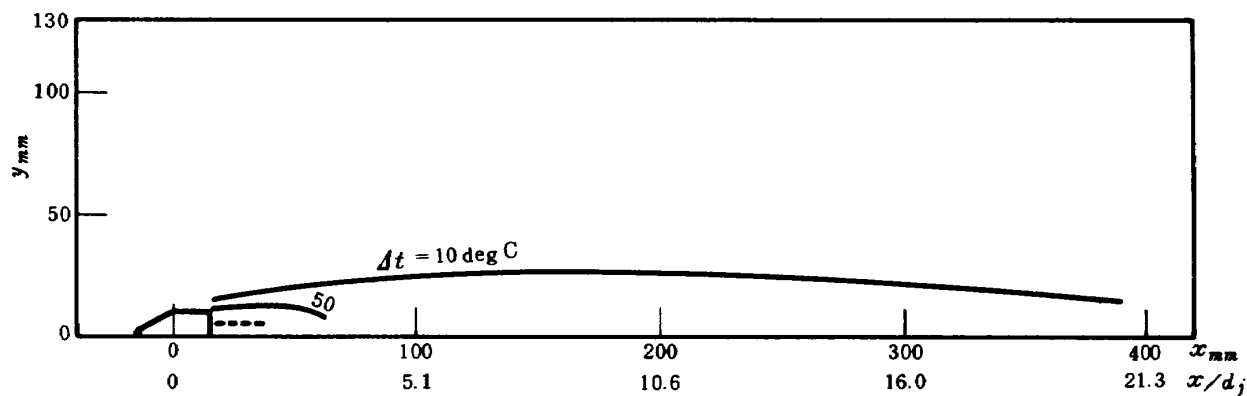


図 12 長孔の温度分布 No. 12 $U_m = 60.3 \text{ [m/s]} \quad t_m = 390.3 \text{ [}^\circ\text{C]}$

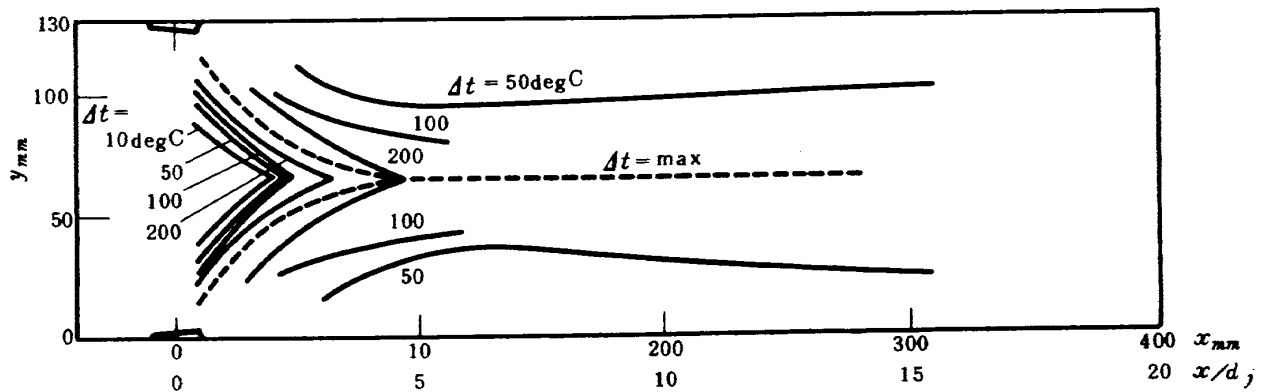
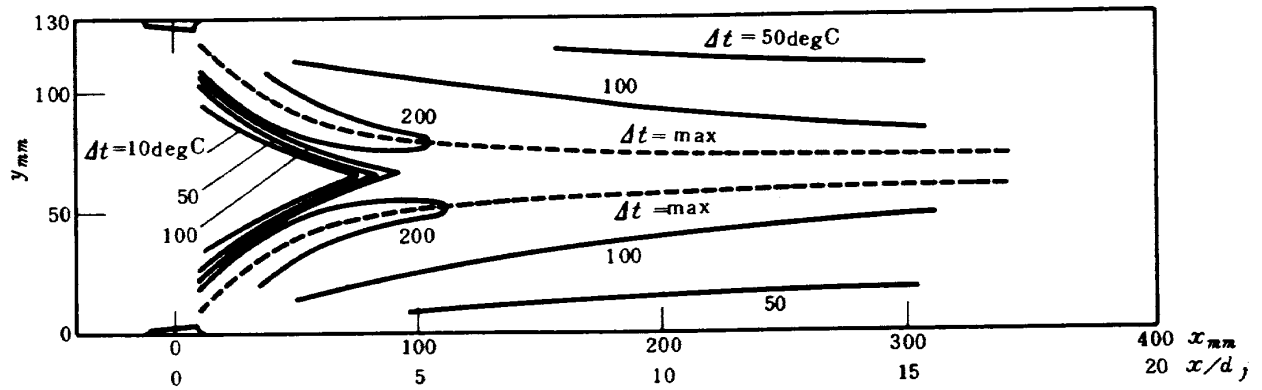
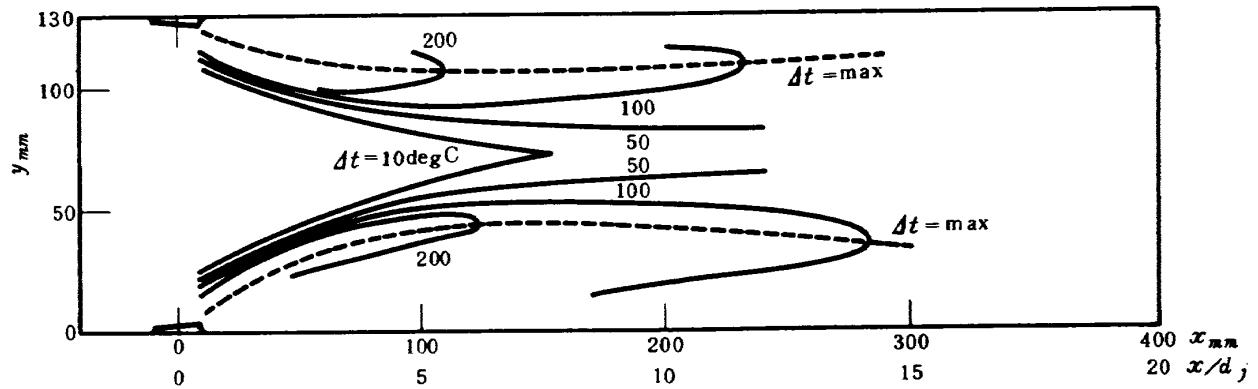
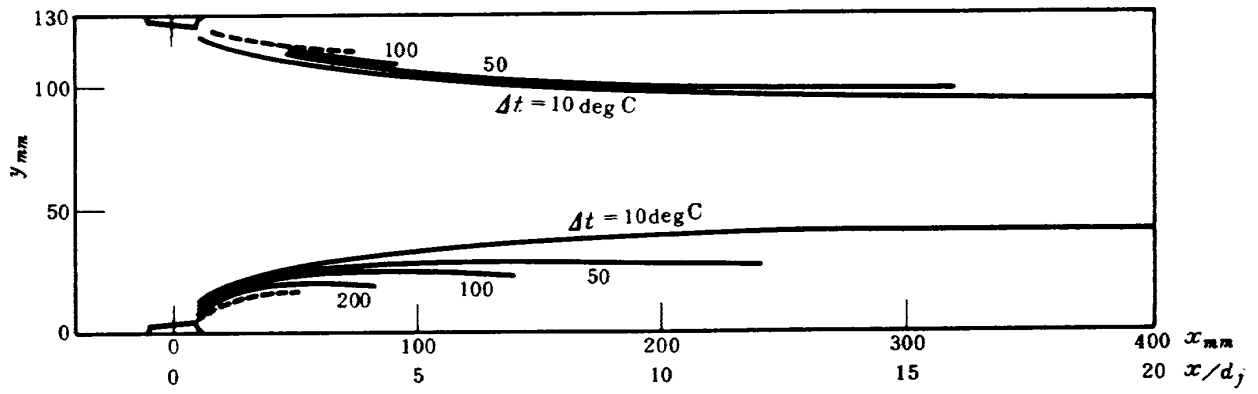


図 13 対向形円形二孔の温度分布 $U_m = 47.2 \text{ (m/s)}$ $t_m = 532 \text{ (}^\circ\text{C)}$

るのが観察されたが、長孔では各断面で噴流の中心軸を形成する部分に1箇所であった。これらは、噴流速度の遅いところでは噴流が後流側の案内筒の面に押されるため双方の空気孔間で噴流の断面形状に大きな差異がなく、噴流速度の速いところでは空気孔形状に近い形の噴流が流出し、差異が生じたためと思われる。

図15の対向形円形二孔の測定結果は噴流速度の遅いところでは個々の噴流が単一円形孔からの噴流と同様な断面模様を持つことを示すが、高速では双方の間に合体が起っていることを示している。図15-2(c)では合体により流路中央部に低温領域が1個形成されることを示し、図15-2(d)はさらに噴流速度の速いところで上下の馬蹄形の断面形状を持つ噴流が合体して左右に一对の低温部を形成することを示している。他の条件で行なった観察では左右に一对の低温部を形成する途中で各噴流の持つ一对の低温部がそのまま示され、計4個の低温部が存在する場合も認められた。噴流速度がさらに速くなると全体的な傾向として左右に温度が平均化され、上下では流路中心の温度が低く噴流孔下流の壁面近くで高温

になっていることが示された。これは噴流が正面衝突に近い形で衝突して横方向に広がり、噴流孔のある壁面近くでは主流が噴流のまわりを廻り込んで多く流れるためと思われる。

3.2.2 貫通度

ここで用いた貫通度は温度差 Δt が一定の等温線あるいは噴流の最低温度の点を結んだ線の y 方向の最大到達距離 Y と空気孔の径 d_j 、あるいは長孔では代表径 d_j との比 Y/d_j 、または、案内筒の高さ H を考慮した $(Y-H)/d_j$ で表わされるものである。

直列三孔からの噴流の貫通度を求め整理した結果を図16に示す。 Y の値は壁面からとり、単一円形孔と同様な形で実験式(2)により整理した。得られた ℓ, m, β の値を表1に示す。

$$\frac{Y}{d_j} = \ell \left(\frac{\sum \rho_j U_j}{\rho_m U_m} - m \right)^\beta \quad (2)$$

ここで ρ ; 密度, U ; 速度, ℓ, m, β ; 定数

添字 j ; 噴流, m ; 主流

直列三孔 No. 9 の結果を単一円形孔の結果と比較して図

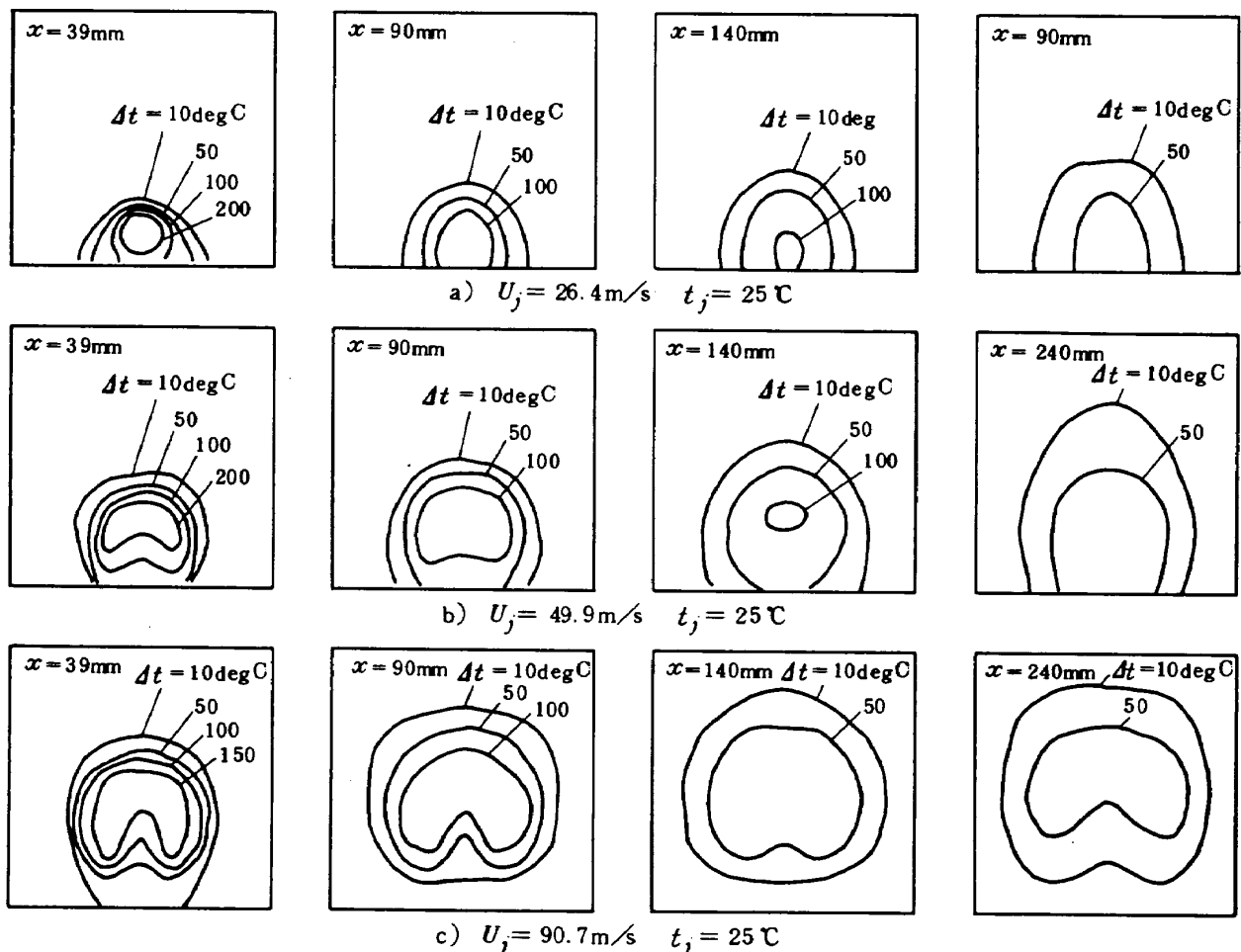
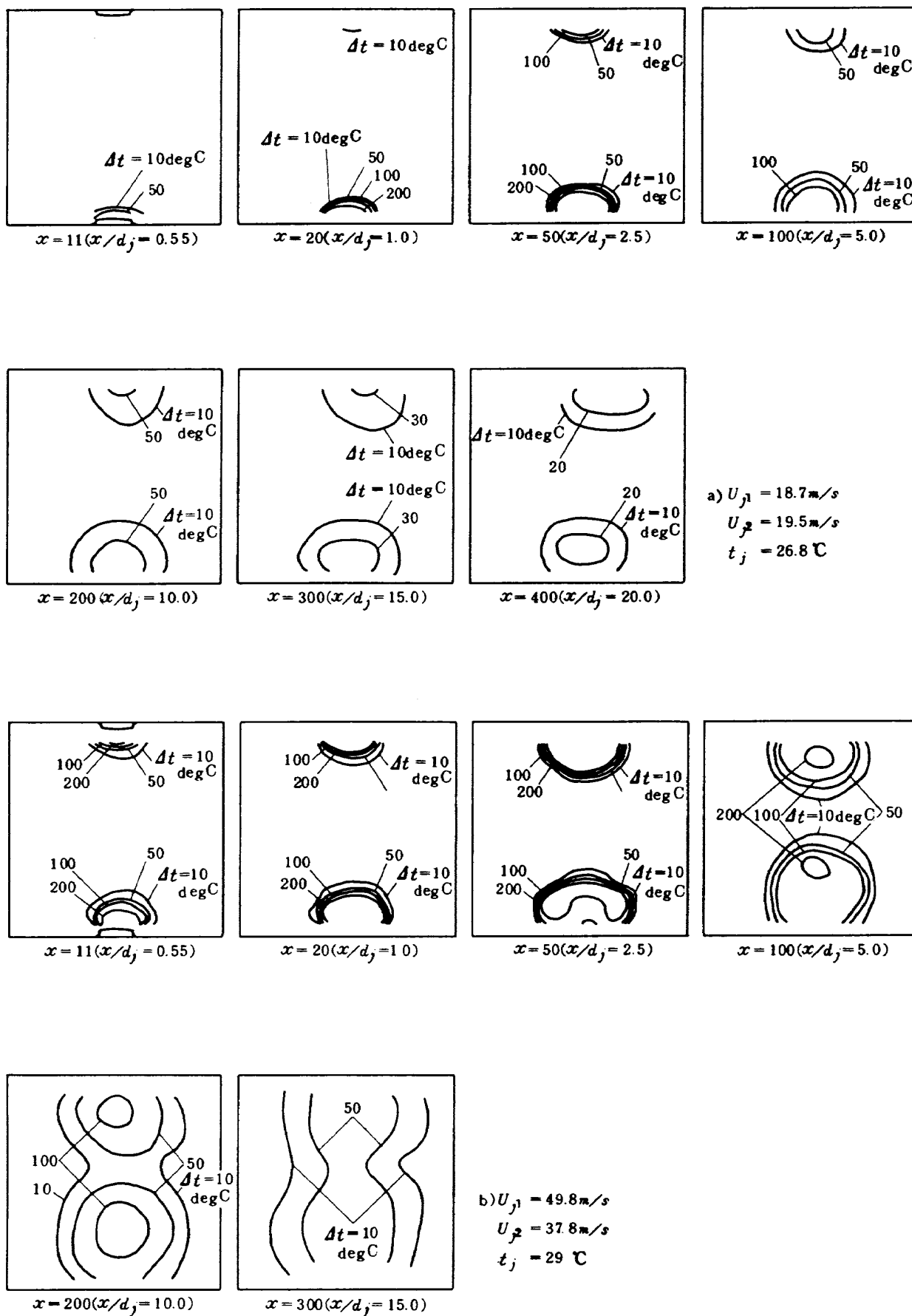


図14 温度分布長孔No. 12 $U_m = 48 \text{ m/s}$ $t_m = 550^\circ \text{C}$

図 15-1 対向形円形二孔の温度分布 $U_m = 47.2 \text{ m/s}$ $t_m = 532 \text{ }^\circ\text{C}$

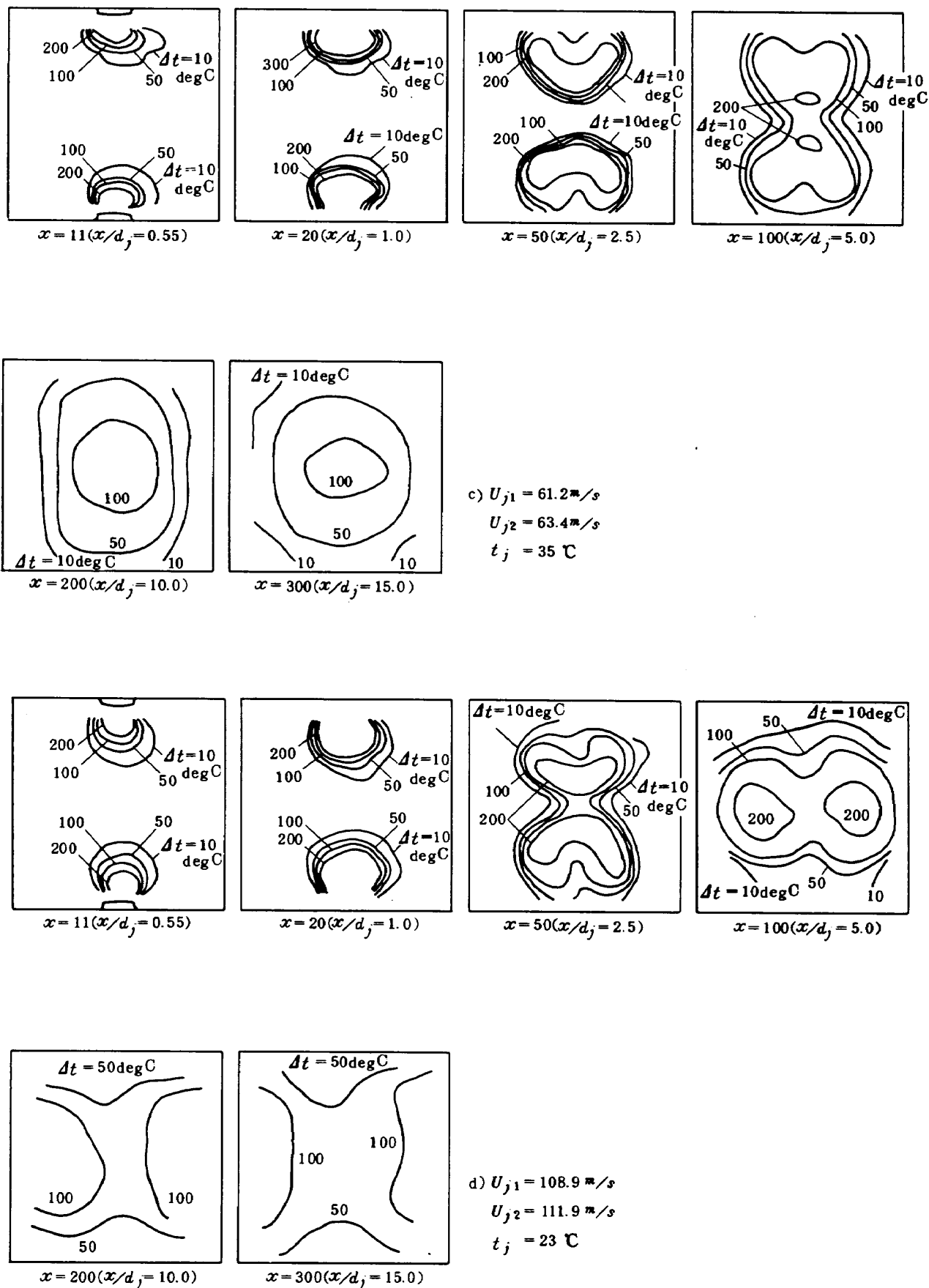


図 15-2 対向形円形二孔の温度分布 $U_m = 47.2 \text{ m/s}$ $t_m = 532^\circ\text{C}$

17に示す。図の推定値は単一円形孔の実験式を用い質量流速比の値として直列三孔全体から得られる値を代入して求めたものである。直列二孔ではこの方法による推定値と実測値が一致したが²⁾、図17の比較では推定値より実測値の低くなることが示されている。直列二孔の場合二孔からの噴流が合体して一個の空気孔から二個の空気孔分の流量を流したと同様な流れを示したのに対し、三孔では空気孔間全体の距離が長くなり合体の程度が低下したためと推定される。空気孔間隔が長い模型No.10の結果も図17と同様な傾向を示し、 Y の値の小さいとき合体の効果が小さいため実測値が推定値より小さくなる傾向が一層強調された。

長孔模型で測定した $\Delta t=10\text{deg C}$ の結果を図18に、 $\Delta t=\text{max}$ の結果を図19に示す。長孔の d_j の値は円形空気孔の結果と比較するために長孔の開口面積と等しい面積を持つ円の直径で表わした。実験の長孔では $d_j =$

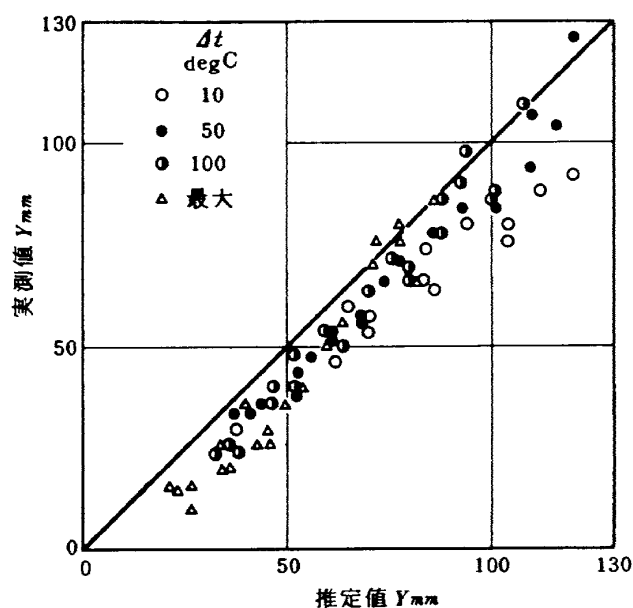


図17 直列三孔No. 9 最大貫通距離の推定値と実測値の相関

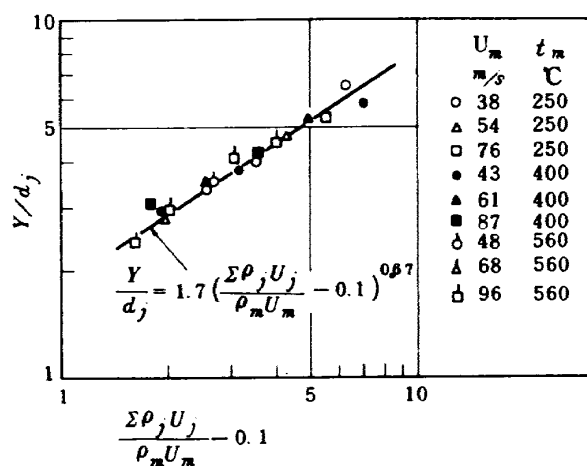


図16 直列三孔No. 9 貫通度 ($\Delta t=10\text{deg C}$)

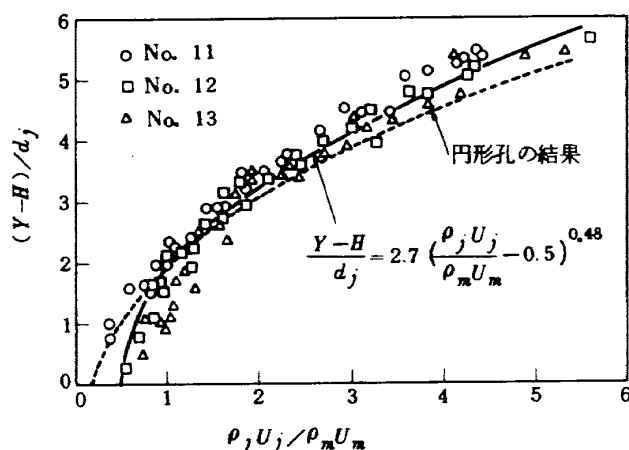


図18 長孔貫通度 ($\Delta t=10\text{deg C}$)

表1 ℓ, m, β の値

空気孔の種類	番号No.	空気孔間隔L,mm	Δt degC	ℓ	m	β
直列三孔	9	25	10	1.7	0.1	0.67
			50	1.2	0.25	0.72
			100	1.0	0.5	0.73
			max	0.6	0.8	1.0
	10	50	10	1.7	0.1	0.67
			50	0.8	0.25	1.0
			100	0.7	0.5	0.93
			max	0.5	0.8	0.8
長孔	11, 12, 13	—	10	2.7	0.5	0.48
			max	1.0	1.0	0.93

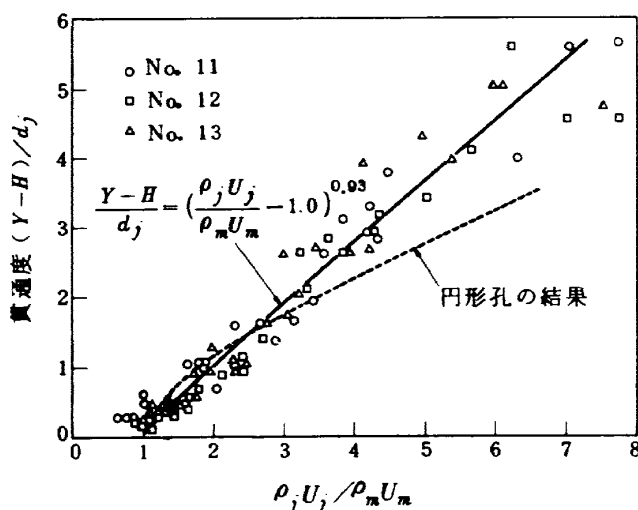


図19 長孔貫通度 ($\Delta t=\text{max}$)

18.8mmである。整理に際しては式(2)と同様な形で案内筒の高さ H を考慮した次式を用いた。

$$\frac{Y-H}{d_j} = \ell \left[\left(\frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} \right) - m \right]^\beta \quad (3)$$

整理した結果は、 $\Delta t = 10 \text{ deg C}$ に対しては案内筒の高さの低いNo.11で僅かに大きな貫通度を与え、 $\Delta t = \max$ に対してはかなりのばらつきを示すが、長孔模型No.11, 12, 13の結果が式(3)の同一な定数 ℓ, m, β でまとめられた。 ℓ, m, β の値を図中および表1に示す。結果は案内筒の高さが直接貫通度の増減に効くことを示しているが、案内筒の高さが測定部流路の高さに近くなると流路高さの影響が生じてこのように単純な整理は行なえぬものと推定される。円形空気孔と比較すると質量流束比 $\rho_j U_j / \rho_m U_m$ の値が大きいとき図18, 19に示すように長孔の方が大きな貫通度を持つ。

対向形円形二孔からの噴流の貫通度を単一円形孔の結果と共に図20に示す。図20は噴流と主流の質量流束

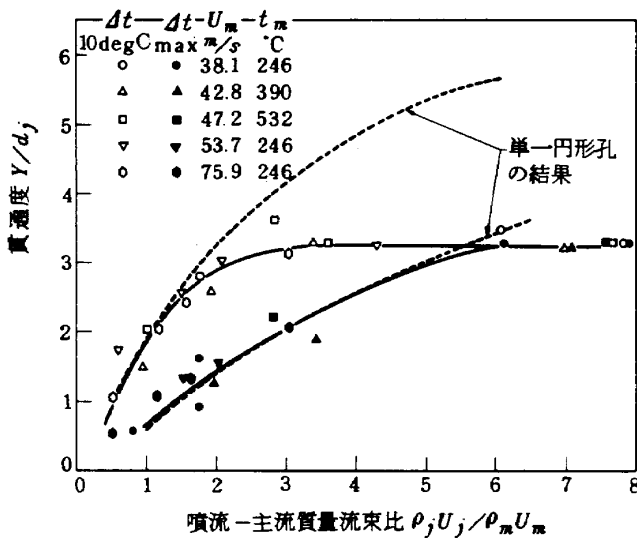


図20 対向形二孔下側空気孔からの噴流の貫通度

比 $\rho_j U_j / \rho_m U_m$ の大きいところで二噴流が衝突し、貫通度の値として流路の中心を示す $Y/d_j = 3.25$ 付近になることを示している。図は下側空気孔に対するものであるが上側空気孔に対しても同様な結果が得られた。単一円形孔の結果と比較すると $\Delta t = 10 \text{ deg C}$ と $\Delta t = \max$ の双方とも質量流束比の小さいとき貫通度がほぼ一致し、比の値が大きくなると衝突により対向形二孔の貫通度は低くなっている。衝突の影響は噴流の外周を示す $\Delta t = 10 \text{ deg C}$ の等温線に対して大きく、 $\Delta t = \max$ に対する値より小さい質量流束比で差異が生じている。

3.2.3 噴流の経路

噴流の経路を示すものとして主流に沿って空気孔中心

を通る断面内の等温線および噴流の中心に相当する $\Delta t = \max$ の点を結んだ線を取りあげ、その変化を調べた。

直列三孔からの噴流の $\Delta t = 10 \text{ deg C}$ の等温線に対する結果を図21に示す。示したデータの範囲は第三孔の中心を x の原点として $x/d_j = 1.5 \sim 15$ の間でかつ等温線が主流に平行になる以前の区間である。図中の実線は単一円形孔で得た実験式に三孔分の質量流束比を代入して第三孔の中心を x の原点にとり計算した値である。直列二孔の結果が同様な計算値と良く合ったのに比べ、直列三孔の測定結果は噴流の貫通性が図21の横軸の値の小さいところで大きく、横軸の値の大きいところでは逆に小さくなることを示した。この違いは x 方向の各測定位置ごとデータを整理して検討した結果、図22のような傾向に基くことが分った。この傾向は温度差 Δt が大きくなった場合、および空気孔間隔のより長い模型No.10の場合にも示された。下流側で直列三孔からの測定値が計算値より低いのは噴流の合体の程度が低く、第三孔から三孔全体の空気量を流したと仮定して計算した場合より貫通性が低下しているためと思われる。

長孔からの噴流の経路を示すものとして、 $\Delta t = 10 \text{ deg C}$ の等温線と噴流の中心に相当する $\Delta t = \max$ の点を結んだ線を取りあげた。測定値は前者と後者に対して各々 $x/d_j = 4 \sim 10$ と $1.4 \sim 10$ の間でかつ双方の線が主流に平行になる以前のものである。 $\Delta t = 10 \text{ deg C}$ の等温線に対しては質量流束比を用いて整理した円形孔の結果に準じて

$$\left(\frac{y-H}{d_j} \right)^{1.32} = 0.7 \frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} \left(\frac{x}{d_j} \right)^{1/2} \quad (4)$$

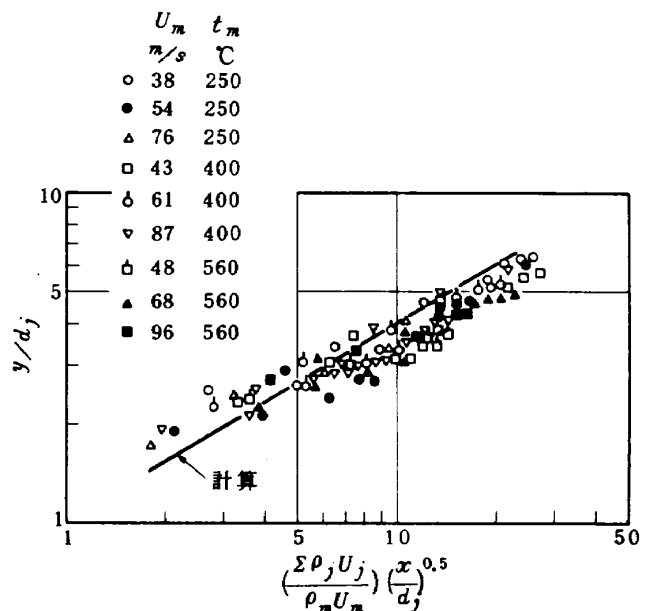
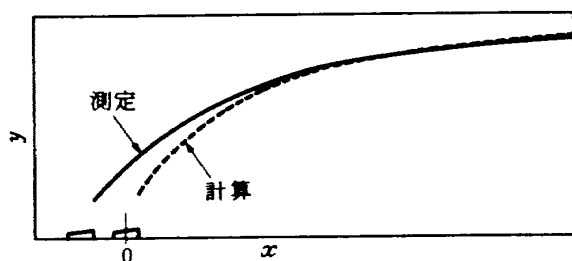


図21 噴流の経路 (直列三孔No. 9, $\Delta t = 10 \text{ deg C}$)

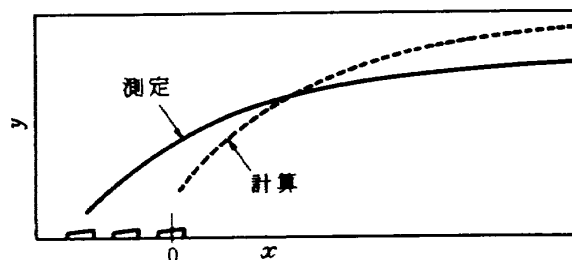
の形で図 23 のように整理できた。 $\Delta t = \max$ の点を結んだ線に対しては質量流束比による整理は大きなばらつきを示し、式(4)の質量流束比の代りに運動量比を用いた次式の方が図 24 に示すようにまとまった形になった。

$$\left(\frac{y-H}{d_j}\right)^{1.7} = 0.24 \frac{\rho_j U_j^2}{\rho_m U_m^2} \left(\frac{x}{d_j}\right)^{1/2} \quad (5)$$

データの整理法として質量流束比と運動量比のいずれを選ぶかは、原則的にどちらの要素が支配的因子になっているかによるであろう。噴流の貫通度や経路は噴流と主流双方の運動量比に支配されると考えるのが基本的な

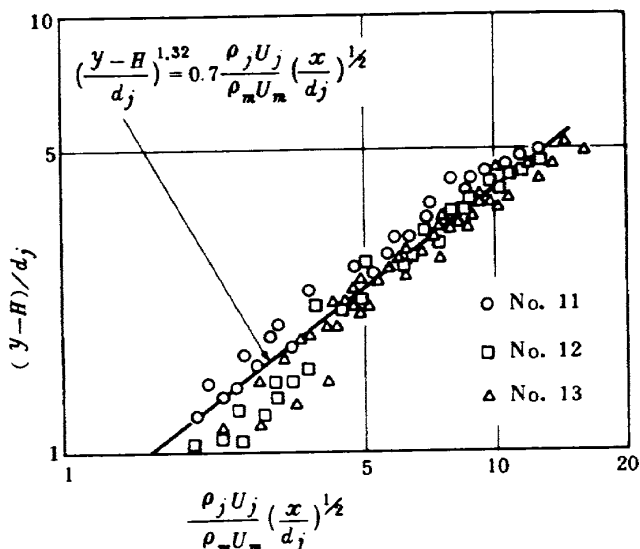


a) 直列二孔

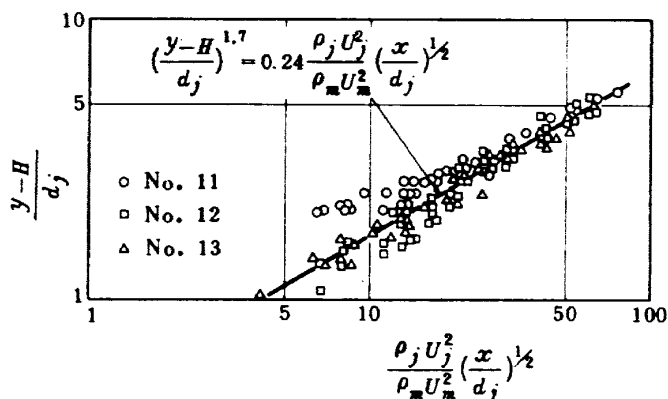


b) 直列三孔

図 22 噴流の経路

図 23 噴流の経路 (長孔, $\Delta t = 10 \text{ deg C}$)

$$1 < \frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} < 5.7, \quad 4 < \frac{x}{d_j} < 10$$

図 24 噴流の経路 (長孔, $\Delta t = \max$)

$$3.3 < \frac{\rho_j U_j^2}{\rho_m U_m^2} < 26, \quad 1.4 < \frac{x}{d_j} < 10$$

態度と思われる。 $\Delta t = 10 \text{ deg C}$ の等温線で質量流束比による方がデータの整理でよりまとまった形を与えた理由として、流路高さの影響と共に噴流の断面形状の変化が考えられる。断面形状は空気孔直後で空気孔の形状に従った形を持ち、次第に主流を巻き込みながら主流によってつぶされた形になっている。この断面の変化は主流に対する噴流の抗力係数の増加をもたらし、噴流は曲げられやすくなる。その結果、断面形状が一定として運動量比から求められる経路より噴流の貫通性は低下する方向にある。この貫通性の低下は噴流外周が大きくなることが予想され、上流に面した噴流外周を示す $\Delta t = 10 \text{ deg C}$ の等温線で質量流束比の方がまとまった形でデータを整理できたものと思われる。噴流中心部では噴流外周部より貫通性が保持されやすいため、 $\Delta t = \max$ を結んだ線が $1.4 < x/d_j < 10$ の間で運動量比により整理できたものと思われる。

対向形円形二孔の下側空気孔からの噴流に対するデータを整理して図 25 と図 26 に示す。図 25 は $\Delta t = 10 \text{ deg C}$ の等温線に対するものでデータのばらつきはかなりの

$$\left(\frac{y}{d_j}\right)^{1.6} = 0.71 \frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} \left(\frac{x}{d_j}\right)^{1/2} \quad (6)$$

の実験式で表わされる。この結果と図中に破線で示されている単一孔の値と比較すると対向噴流の方が貫通性が低くなっている。図 26 の $\Delta t = \max$ に対する結果は大きくばらついているが、単一孔の結果とほぼ等しい貫通性を示すデータが全体の半分程度ある。噴流速度の最も速い条件では対向噴流の貫通性の低下がはっきりしているので、その他の条件では噴流相互の干渉が $\Delta t = 10 \text{ deg C}$ の噴流外周部より低くなっていることを示す。

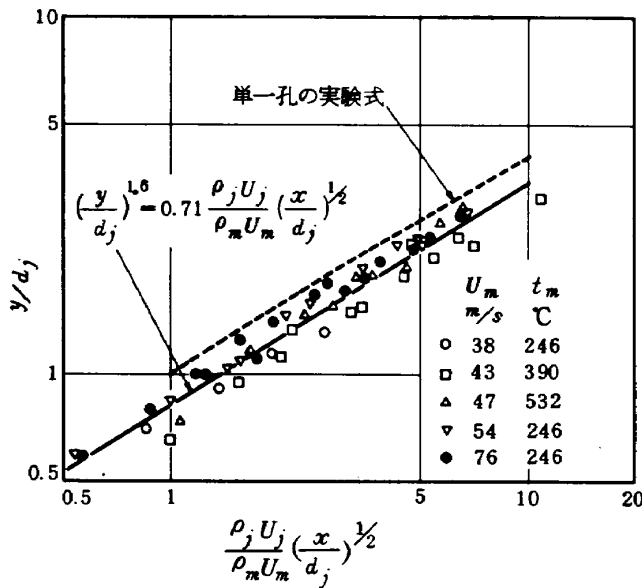


図 25 噴流の経路 (対向形円孔二孔
下側空気孔, $\Delta t = 10 \text{ deg C}$)

$$0.5 < \frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} < 4.5, \quad 1.0 \leq \frac{x}{d_j} \leq 10$$

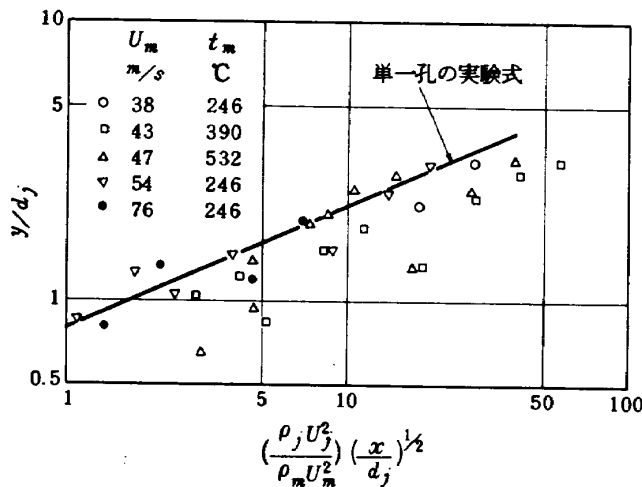


図 26 噴流の経路 (対向形円形二孔, 下側空気孔
 $\Delta t = \max$)

$$1.0 < \frac{\rho_j U_j^2}{\rho_m U_m^2} < 19, \quad 1.0 \leq \frac{x}{d_j} \leq 10$$

3.2.4 混合度

噴流が主流と混合し, 温度が均一になる程度を以下の式(7)で定義される混合度 R_t で表わし, その変化の様子を調べた。

$$R_t = \frac{t_{\min} - t_j}{t_o - t_j} \quad (7)$$

ここで, t_{\min} : 空気孔下流の各断面における最低温度
 t_j : 噴流の空気箱中の温度, t_o : 主流と噴流とが完全に混合したときの温度。

混合度は質量流束比によって図 27 のように変化し, 主流と噴流の速度の等しい付近で最低値を示す。また図 28 に示すように空気孔付近では噴流と主流との角度および温度差が大きいため急激な混合が行なわれ, 下流側では角度と温度差が小さいため混合がゆるやかになる。これらの傾向は単一円形孔の結果と同様である。

混合度の質量流束比 $\rho_j U_j / \rho_m U_m$ と距離 x/d_j による変化を図 29, 30, 31 で示されるように整理して, 以下に示す形の実験式を得た。

$$R_t = \log \left\{ \left(\frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} \right)^a \left(\frac{x}{d_j} \right)^q \right\} + b \quad (8)$$

式(8)の定数 a, q, b と適用範囲を表 2 に示す。実験式の形は単一円形孔で簡単な次元解析を行なって求めたものと同様である。

得られた実験式に基づいて各空気孔の混合度の流れ方向の変化を比較したのが図 32 である。比較の際の質量流束比は $\rho_j U_j / \rho_m U_m = 3$ にとった。直列三孔の実験式の適用範囲はこの値より大きいので三孔の各空気孔あたりの平均質量流束比が等しくなる $\Sigma \rho_j U_j / \rho_m U_m = 9$ の条件で比較した。図は全体的に単一孔どうしの混合度が似た値になることを示しており, 比較の条件の異なる直列三孔の値は低くなっている。質量流束比による混合度の変化は式(8)の a の値が大きい程顕著であり, 実験では単一円形孔と直列三孔が相当する。

3.2.5 噴流内の温度分布形

噴流内の温度分布形を前報と同様に図 33 に示す表示から求めた。直列三孔 No. 9 と長孔 No. 13 に対する温度分布形を図 34 と図 35 に示す。両図は相似性のある分布形を示し,

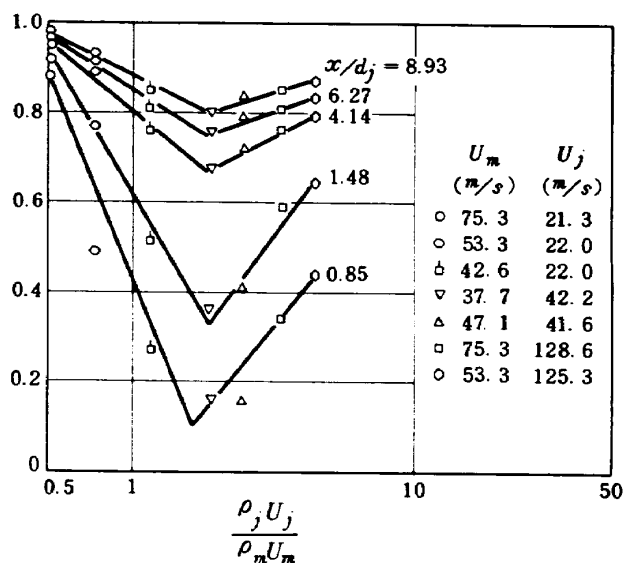


図 27 混合度—質量流束比 ($T_j / T_m \doteq 0.52$)

No. 12 $H = 10 \text{ mm}$

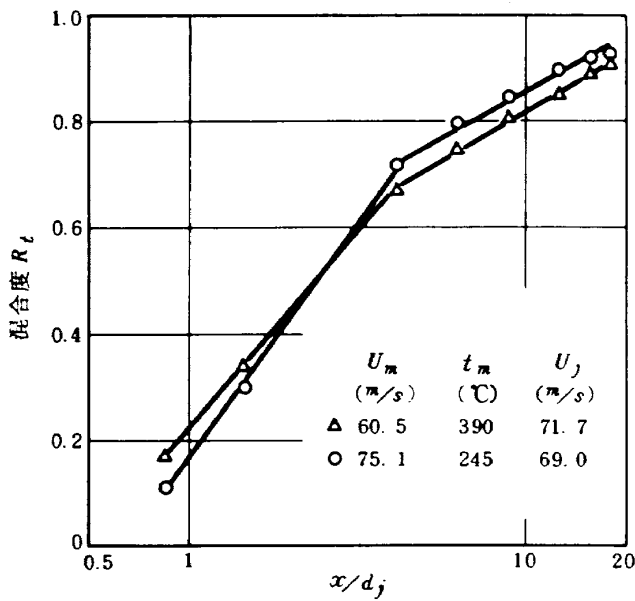
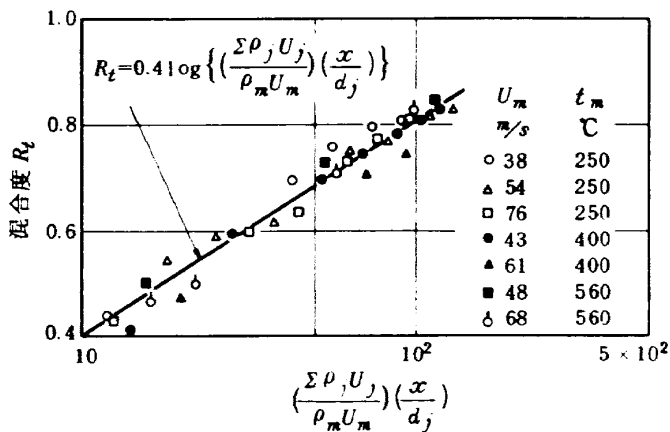
図 28 流路方向の混合度変化 No. 13 $H = 15\text{mm}$ 

図 29 混合度 (直列三孔 No. 10)

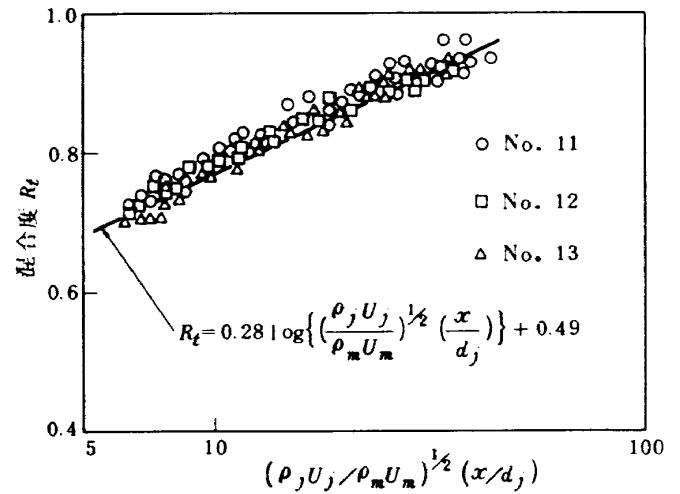
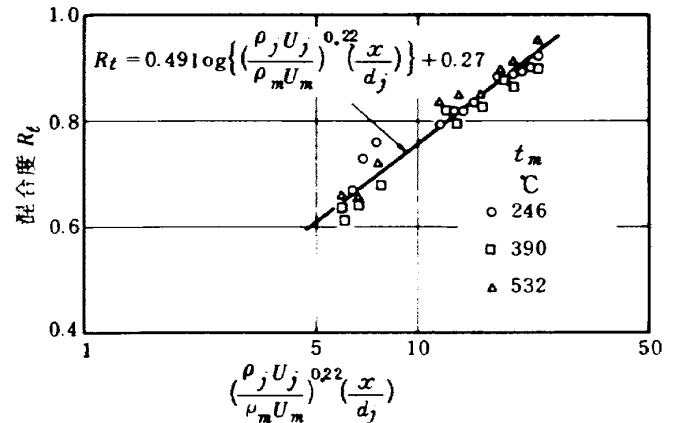
図 30 長孔の混合度 $2 < \frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} < 5.2$, $4 < \frac{x}{d_j} < 21$ 

図 31 混合度 (対向形円形二孔)

$$2 < \frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} < 8, \quad 5 \leq \frac{x}{d_j} \leq 20$$

表 2 a, q, b の値

名 称	模 型 番 号	a	q	b	適 用 範 囲
単一円形孔	1	0.25	0.48	0.35	$2 < \frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} < 6$, $6 \leq \frac{x}{d_j} \leq 20$
直 列 三 孔	9	-0.50	0.50	0.7	$6 < \frac{\sum \rho_j U_j}{\rho_m U_m} < 10$, $2 \leq \frac{x}{d_j} \leq 15$
	10	0.40	0.40	0	
長 孔	11 12 13	0.14	0.28	0.49	$2 < \frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} < 5.2$, $4 < \frac{x}{d_j} < 21$
対 向 形 円 形 二 孔	14	0.11	0.49	0.27	$2 < \frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} < 8$, $5 \leq \frac{x}{d_j} \leq 20$

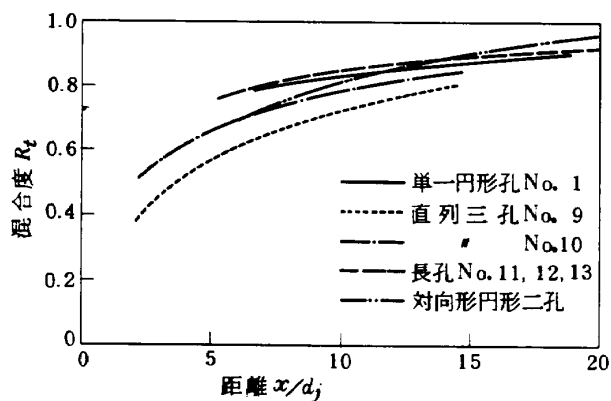


図 32 混合度の比較

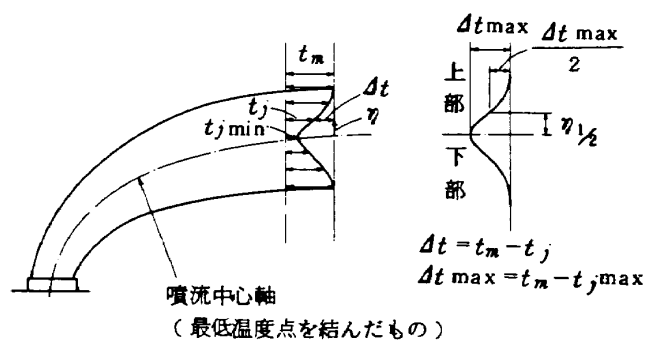
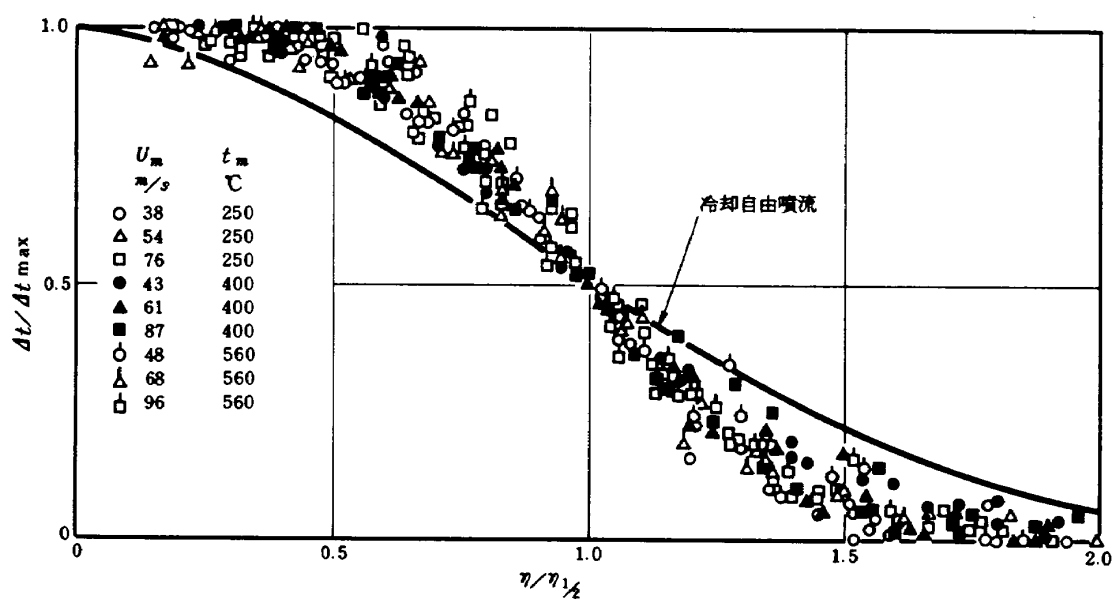
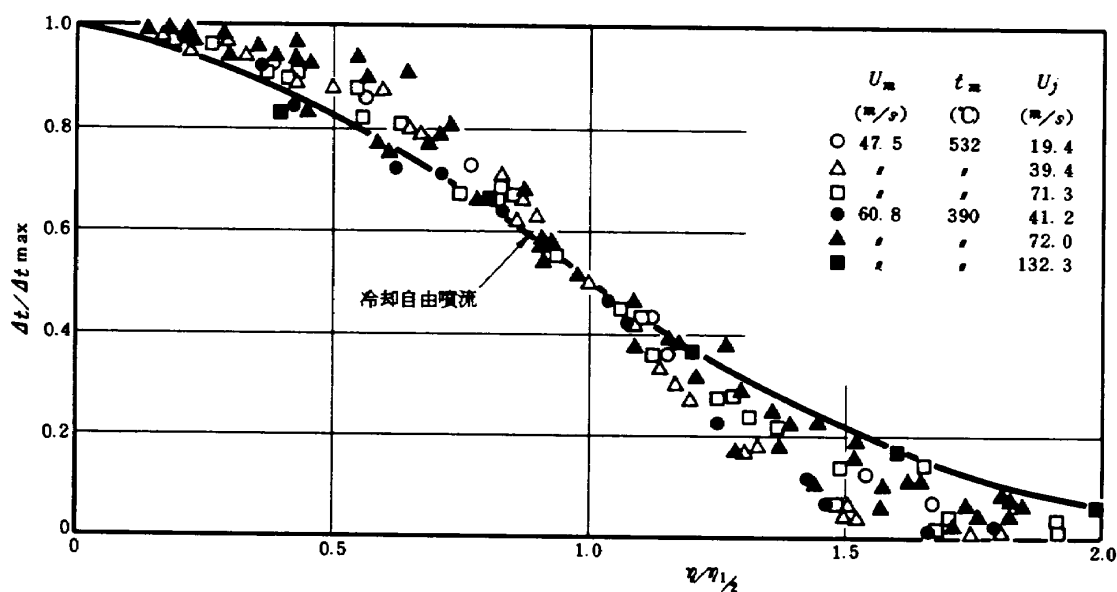


図 33 温度分布形の求め方

図 34 噴流中心軸の上側温度分布形 (直列三孔 No. 9, $4 < \frac{x}{d_j} < 15$)図 35 噴流中心軸の上側温度分布形 (長孔 No. 13, $4 < \frac{x}{d_j} < 21$)

図中の冷却自由噴流に対する分布形³⁾に比べて噴流中心部の低温の領域が広く周辺部で急激な温度変化のあることを示している。この傾向は前報の単一円形孔と直列二孔でも示されている。図34と図35のデータは測定部下側壁面から流出した噴流の噴流中心より上側の分布を示している。上側は噴流外周部が主流の影響を直接受ける位置であり、流れ模様で示したような噴流断面の変化が関連しているものと思われる。

4. 単一円形孔の結果の補足

前報で示した単一円形孔からの噴流の経路には $\Delta t = \max$ に対する結果が示してなかったのでその後整理した結果を示す。さらに、他の研究で得られた結果との比較も行なったのでその様子を示す。

単一円形孔No.1とNo.2のデータを整理して各々図36と図37に示す。空気孔No.1は図4に示した形状で、入口に丸味があり直径は20mmである。空気孔No.2は入口に丸味がなく直径20mmである。 $\Delta t = \max$ を結ぶ線に対しては図36と図37に示すように運動量比を用いて整

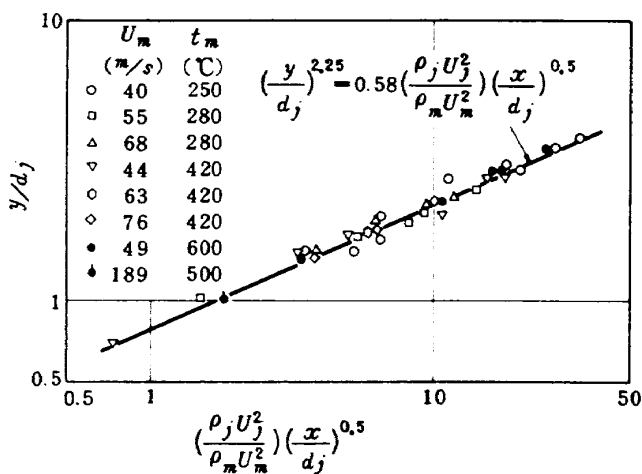


図36 噴流の経路 (単一円形孔No. 1, $\Delta t = \max$)

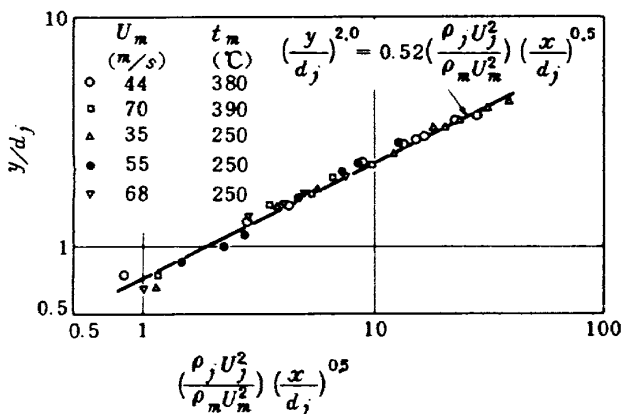


図37 噴流の経路 (単一円形孔No. 2, $\Delta t = \max$)

理できた。得られた実験は

No. 1

$$\left(\frac{y}{d_j}\right)^{2.25} = 0.58 \left(\frac{\rho_j U_j^2}{\rho_m U_m^2}\right) \left(\frac{x}{d_j}\right)^{1/2} \quad 0.24 < \frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} < 6 \quad (9)$$

No. 2

$$\left(\frac{y}{d_j}\right)^{2.0} = 0.52 \left(\frac{\rho_j U_j^2}{\rho_m U_m^2}\right) \left(\frac{x}{d_j}\right)^{1/2} \quad 0.6 < \frac{\rho_j U_j}{\rho_m U_m} < 6 \quad (10)$$

x/d_j の範囲は0.7~8.5で、かつ、空気孔中心を通る断面上で $\Delta t = \max$ を結んだ線が主流に平行になる以前である。噴流の最低温度は噴流に垂直な断面内に一対になって存在して空気孔中心を通る断面内にない場合もあるが、流れの場が複雑なため上記のようにとった。データが質量流束比より運動量比でまとまった形に整理できたのは、長孔の整理で検討したのと同様に、噴流の慣性が中心部で保たれ、噴流断面の変形の影響を直接受けなかったためと推定される。

単一円形孔からの直交噴流の経路の測定は従来からいろいろ行なわれている。示されている結果のいくつかを本実験で得た結果と比較して図38に示す。図示の比較では横軸を $(\rho_j U_j / \rho_m U_m)(x/d_j)^{1/2}$ の形にとり、いろいろな形で整理されている結果を図中に示した条件のもとで再整理してある。本実験で得た結果は他の測定に比較して大幅に低い貫通性を示している。この理由は表3に示すように本実験における測定部の流路高さ h/d_j が他の実験装置より極めて低く、壁面の影響を受けた流れと

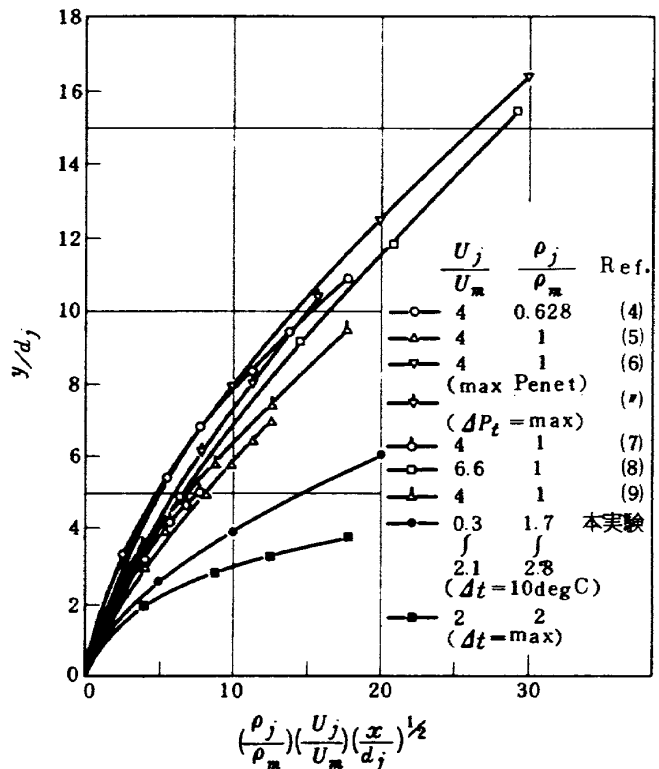


図38 噴流の経路

表3 主流に垂直な単一円形孔からの噴流の混合実験

研究者 (年)	実験方法	速度比の範囲 U_j/U_m	噴流孔径 d_j (mm)	流路高さ と噴流 孔径の比 h/d_j	文献
CALLAGHAN, RUGGERI, BOWDEN (1948 ~ 52)	加熱噴流→常温主流 温度測定により貫通度を求める ($\Delta t = 1^\circ\text{F}$)	2 ~ 10	6.4 9.5 12.7 15.9	79.4 53.5 40 32	4 10 11
JORDINSON (1956)	風洞で全圧分布を測定 ($\Delta P_t = \max$)	4 ~ 8	12.7 25.4	120 60	5
GORDIER (1956)	全圧分布 ($\Delta P_t = \max$) water tunnel で染色法を使用 (最大貫通)	4 ~ 8	9.5 12.7	48 36	6
KEFFER, BAINE (1963)	熱線風速計で速度分布 ($\Delta U = \max$)	2 ~ 10	9.5	246.5	7
PATRICK (1967)	風洞内の密度と速度 ($\Delta P_t = \max$)	6.6 ~	3.3 6.5 8.0 10.0	1,663 845 686 549	8
遠藤, 中村 (1970)	風洞内の全圧分布 ($\Delta P_t = \max$)	2.4 ~ 7.9	20	26	9
本実験	常温噴流→加熱主流 温度測定により貫通度を求める ($\Delta t = 10^\circ\text{C}$, 最大)	0.14 ~ 2.9	20	6.5	

なり、噴流の存在による主流の加速の程度も大きくなったためと推定される。本実験の流路高さと空気孔の大きさは実際の燃焼器の条件に近いものであり、燃焼器を対象に考える場合流路高さの影響も考慮する必要のあることを示している。

なお、岡本、八木田¹²⁾は空気孔のある側のみ壁面があり他の三側面を開放にした測定部で等温流で実験を行ない、他のいくつかの研究との比較も行っている。その比較は横軸を x/d_j にとっており、三側面開放の噴流の経路が $U_j/U_m = 4$ のとき他の実験結果と合っていて、 $U_j/U_m = 8$ で壁の影響が大きくなると思われる条件では他の実験より幾分貫通性の大きくなることを示している。

5. むすび

本報告では空気孔からの流れについての一連の実験のうち、直列三孔、長孔、対向形円形二孔の結果を示した。単一円形孔についても前報以降に整理した結果を示した。以上の実験結果をまとめてつぎのような結論が得られた。

(1) 空気孔の流量係数を噴流と主流の運動量比の関数として図示した。運動量比が大きくなると流量係数は 0.8 ~ 0.9 の間の値に漸近的に達し、運動量比の小さいときには空気孔の配置、案内筒の高さにより異なる値をとる。

(2) 直列三孔、長孔、対向形円形二孔の流れ模様を図示し、合体の様子や空気孔の形状に基く差異を示した。

(3) 噴流の最大到達距離に基く貫通度の実験式を直列三孔と長孔に対して得た。対向形円形二孔では噴流速度が速いとき噴流どうしが衝突して流路中央部に低温部を形成し、単一円形孔より貫通度が低くなる。

(4) 噴流の経路を噴流外周の $\Delta t = 10^\circ\text{C}$ の等温線および噴流中心の $\Delta t = \max$ を結ぶ線から求め、実験式を示すと共に単一円形孔の結果と比較検討した。

(5) 噴流と主流の全体的な混合の程度を示す混合度を温度測定から求め、その実験式を各空気孔に対して示した。

(6) 噴流内の温度分布形は相似性を示し、自由冷却噴

流より噴流中心部で低温の領域が広いことを示した。

(7) 単一円形孔の噴流中心 $\Delta t = \max$ の経路に対する実験式を示した。噴流の経路を他の実験と比較した結果は、実験結果を燃焼器に適用する際に流路高さの影響も考慮する必要があることを示した。

本実験を行なうのに際し、当時東海大学学生栗田耕次、永原芳夫、朝野俊克、野上高義、石崎博文の諸君の協力があった。ここに記して感謝の意を表します。

文 献

- 1) 鈴木邦男, 相波哲朗; 高負荷燃焼器の空気孔からの流れについて(I), 航空宇宙技術研究所資料 TM-116 (1967)
- 2) 相波哲朗, 井上真幸; 高負荷燃焼器の空気孔からの流れについて(Ⅱ), 航空宇宙技術研究所報告 TR-227 (1970)
- 3) M.S. Uberoi and L.C. Garby; Effect of Density Gradients on an Air Jet, Physics of Fluids (1967) pp. S200-S202.
- 4) E.E. Callaghan and R.S. Ruggeri; Investigation of the penetration of an Air Jet Directed Perpendicularly to an Air Stream, NACA TN 1615 (1948)
- 5) R. Jordinson; Flow in a Jet Directed Normal to the Wind, Min. of Av. A.R.C. R. and M. No. 3074 (1956)
- 6) R.L. Gordier; Studies on Fluid Jets Discharging Normally into Moving Liquid, St. Anthony Falls Hydraulic Lab. Univ. of Minnesota, Tech. Paper No. 28 (Series B) (1959)
- 7) J.F. Keffer and W.D. Baines; The Round Turbulent Jet in a Cross Wind, J. Fluid Mech. (1963) pp. 481-497
- 8) M.A. Patrick; Experimental Investigation of Mixing and Flow in a Round Turbulent Jet Injected Perpendicularly into a Main Stream, J. Institute of Fuel (1967) pp. 425-432
- 9) 遠藤浩, 中村正義; 横風中の3次元乱流ジェットの湾曲と発達, 航空宇宙技術研究所報告 TR-216 (1970)
- 10) R.S. Ruggeri, E.E. Callaghan and D.T. Bowden; Penetration of Air Jets Issuing from Circular, Square and Elliptical Orifices Directed Perpendicularly to an Air Stream, NACA TN 2019 (1950)
- 11) E.E. Callaghan and R.S. Ruggeri; A General Correlation of Temperature Profiles of a Heated Air Jet Directed Perpendicularly to an Air Stream, NACA TN 2466 (1951)
- 12) T. Okamoto and M. Yagita; The Effects of the Exit Velocity Profiles on the Flow of a Circular Jet Exhausting Normal to the Free Stream, Bulletin of the Tokyo Institute of Technology, No. 114 (1973)

航空宇宙技術研究所報告 369号

昭和49年6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 有限会社 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
