



Title	3次元壁面噴流による断熱壁面上の温度効果についての研究 第2報:2個の正方形噴口を持つ場合
Author(s)	長田, 孝志; 親川, 兼勇
Citation	琉球大学理工学部紀要. 工学篇 = Bulletin of Science & Engineering Division, University of the Ryukyus. Engineering(5): 17-28
Issue Date	1972-03
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/24034
Rights	

3次元壁面噴流による断熱壁面上の
温度効果についての研究

第2報：2個の正方形噴口を持つ場合[†]

長 田 孝 志* 親 川 兼 勇*

An Experimental Investigation of Temperature Effectiveness
of an Adiabatic Flat Plate Covered by a Three-Dimensional
Wall Jet Flow.

2nd Report: Wall Jet Flow Issuing from Binary Square Nozzle

Takashi NAGATA and Kenyu OYAKAWA

Summary

In the previous report, Experimental results of the jet development and the temperature effectiveness on the adiabatic flat surface in the three-dimensional wall jet flow are discussed. This paper deals with a continuous experimental study in which the flow and the temperature fields on the adiabatic flat surface in the three-dimensional, incompressible, turbulent wall jet flow issuing from two square nozzles are discussed.

Maximum velocity decays and growths of half-velocity widths on both central lines of the nozzle and the flow, growth of equi-velocity lines, and distribution of the temperature effectiveness are reported with varying the central distance of the nozzles, the injection velocity and the temperature of the injection jet. The flow fields of such jets are found to be characterized by two distinct regions; One shows two peaks flow and the other shows one peak flow which is observed at far downstream. The flow patterns as well as the temperature distribution differ at both regions. Transition points between these two situations are much depending on the central distance of the nozzles, but less on the initial velocity.

Flow visualization, with using oil-film technique, has been tried to observe and grasp the induced flow situation (or entrainment of surrounding fluid) along the wall, and reasonable explanation for the velocity defects in the neighbourhood of the potential core regions could be obtained by its photographs.

[†]受付：1971年9月30日

* 琉球大学理工学部機械工学科

1 緒 言

前報告¹⁾において、1個の矩形噴口から噴出し隣接する平行平板に沿って接線方向に拡散する流れの場と加熱空気を噴出した場合の断熱壁面上の温度効果について、噴口縦横比、噴口速度および噴出気流温度を変化させその実験結果について考察を行って来たが、本研究はその継続問題として2個の同一寸法の正方形ノズルから噴出し隣接平板に沿って接線方向に拡がる流れの場と加熱空気を噴出した場合の断熱平板上の温度効果について実験的に調べることを試みた。

このような流れの現実的な問題は、加熱表面の冷却やその逆の場合のガラス面等の霜除去、氷結防止あるいは製糸、染色工場等における連続乾燥過程等に見られる。とくに高温ガスから物体壁面を保護する手法としての Film Cooling の立場においても、構造物の耐久性の観点から2次元的な吹出しよりむしろ短いスリットや小孔列からの吹出しが望まれ、このような3次元的に形成される壁面噴流の解明は Film Cooling 技術に大きく貢献するものである。^{2), 4)}

2個のノズルから噴出する3次元乱流噴流の研究に³⁾関し岡本等は、オフセットした平板に平行に置かれた円形ノズルから出る噴流の平板への偏向現象すなわちコアング効果に着目して行い、オフセット距離を変化させることにより平板上の静圧分布、噴流の拡がり、最大速度の減衰および最大速度の点における静圧変化等を実験的に研究している。また E.R.G.Eckert 等⁴⁾は不連続吹出しによる Film Cooling 効果の研究で円形噴口の孔列(ピッチ:30, D:直径)より3次元的に形成される気膜層の断熱特性を点熱源モデルの重ね合せ

として吹出し比を変化させ解明しているが、主流が静止状態における気膜層の挙動については触れていない。この様に2個のノズルから出る乱流壁面噴流については殆んど研究されていない現状である。

そこで著者等は2個の矩形ノズルから出る3次元非圧縮性乱流壁面噴流について、噴口縦横比を固定して噴口の中心間隔、噴口速度、噴出気流温度を変化させ、流れの場と断熱壁面上の温度効果の分布について実験的研究を行った。

記 号

- L : 噴口中心間隔 (mm)
- ν : 動粘性係数 (m²/s)
- C_D : 定圧比熱
- Z : 流れに対して横垂直方向を示し, +, - の符号は流れの下流から上流に向かって右側が+, 左側が一である。その他の記号および添字は第一報に準ずる。

2 実験装置および実験範囲

送風機、風胴、絞り部までの実験装置は前報の実験に使用したものをそのまま使用し、絞り部に対しては2個の噴流の流量調整のため中央部に平板(6mm厚さ)で作られた回転翼を設け、絞り部出口には圧力監視用静圧孔(0.80mmφ)を設けマンメータで大気圧との差でチェックできるようにした。

ノズルは強化合成樹脂(FRP)を硬化させて製作したFRPノズル(Fig.1)と鋼板で作られた小型ノズル(Fig.1)の両者を使用し、各々のノズルの平行部には静圧孔(小型ノズルには0.32mmφ, FRPノズルには0.80mmφ)を設けてある。

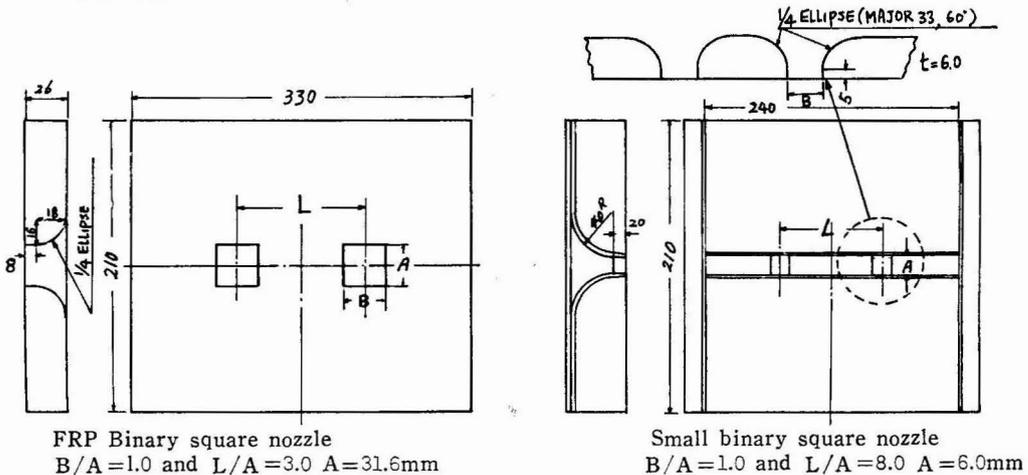


Fig. 1 Schematic drawings of two binary nozzles

Table 1 Location of the thermocouples mounted on the adiabatic flat plate (UNIT:mm)

Z方向の位置 x方向の位置	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
A = 5mm	23																								
B = 10mm	23																								
C = 15mm	23																								
D = 25mm	48	43	38	33	28	23	18	13	8	3	-2	-7	-12	-17	-23	-28	-33	-38	-43	-48					
E = 35mm	23																								
F = 50mm	23																								
G = 70mm	23																								
H = 90mm	68	58	48	43	38	33	28	23	18	13	8	3	-2	-7	-12	-17	-23	-28	-33	-38	-43	-48	-58	-68	
I = 110mm	23	0																							
J = 140mm	83	73	63	53	48	43	38	33	28	23	18	10	5	0	-5	-10	-15	-23	-28						
K = 170mm	23	0																							
L = 200mm	93	83	73	63	53	43	33	23	18	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80			
M = 240mm	23	0																							
N = 300mm	113	103	93	83	73	63	53	43	33	23	13	3	0	-7	-17										
O = 360mm	23																								
P = 420mm	138	123	108	93	78	63	48	33	23	13	3	0	-7	-17											
Q = 520mm	153	138	123	108	93	78	63	48	33	23	13	3	0	-7	-17										
R = 620mm	23	0																							
S = 720mm	23	0																							
T = 820mm	0																								

気流の加熱は熱風発生機を遠心送風機の吸入口に連結した。断熱平板の構造は測定平板として1010×550のベークライト板 (t = 15mm) を使用し、断熱箱は高さ150mmでガラス繊維、おがくずを入れてある。壁面温度の測定は予め検定されたcu-con 熱電対 (0.32mm φ線径) を表 I に示す位置に合計147個埋め込み、切替スイッチをへて高感度 Microvoltmeter で測定された。流れの場の測定は注射針を矩形にかしめて作られた全圧管 (開口部0.30×0.80, 0.40×1.0) 2個を使い、静圧管は直径1.40mmの注射針にL/D = 8.0の位置に0.32mmの静圧孔を2個あけて使用した。

実験範囲として噴口の縦横比B/A = 1.0に固定し、噴口中心間隔 L/A = 3.0, 8.0の2種類について噴口速度と噴口気流温度を小型ノズルの場合 (A = B = 6.0, L/A = 3.0), U_j = 17.5~56m/s まで5段

階, T_j = 45°C ~ 117°C までの5段階に変化させ、F R P ノズル (A = B = 31.6, L/A = 3.0) の場合は U_j = 55.7だけについて行った。

3 流れの場

3-1 噴流中心線上および噴口中心線上の速度分布

流れの場は1個の矩形噴口を持つ壁面噴流と同様に噴口出口における速度の矩形波分布の確認と2個の噴口速度が同じになるように充分チェックした後に測定を行った。

流れの機構は本質的には1個の噴口の場合と同じで、各々の噴口から噴出した噴流は先づ独自にポテンシャルコア領域を形成し、後方にくにしたがって周囲の静止空気を誘引しつつ拡散を行うことは想定出来

る。したがってポテンシャルコア領域における静止空気との摩擦作用が非常に大きいことを考慮した場合、その隣接した付近では複雑な誘引流れが存在し速度分布に欠陥を生じせしめることは前報において指摘した

ことである。この事実を考慮して噴口中心線 ($Z = 23\text{mm}$ および 44.8mm)上の x の各位置において y 方向速度分布を測ると同時に y の値の数点において Z 方向へのトラバースも行った。測定結果はFig. 2, 3,

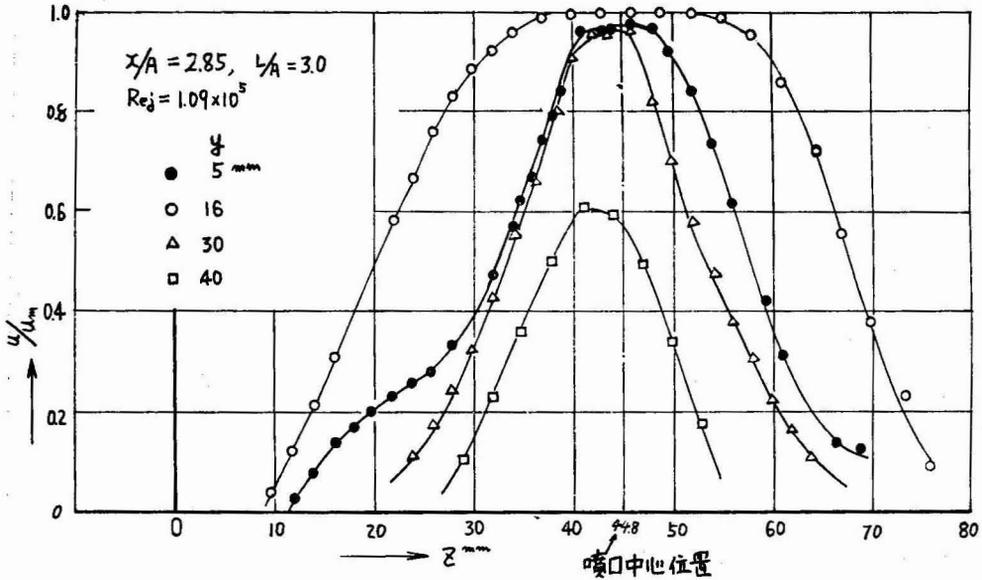


Fig. 2 Velocity distribution in Z-Y plane

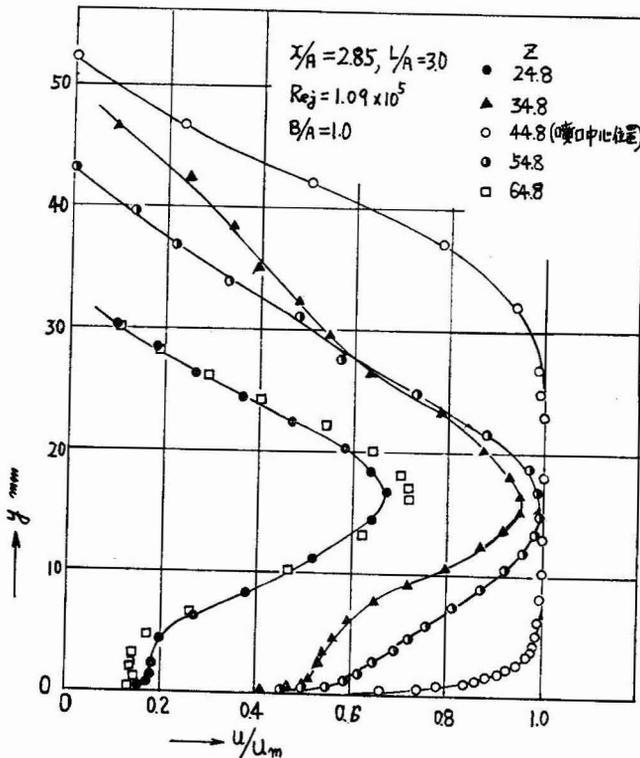


Fig. 3 Velocity distribution in Z-Y plane

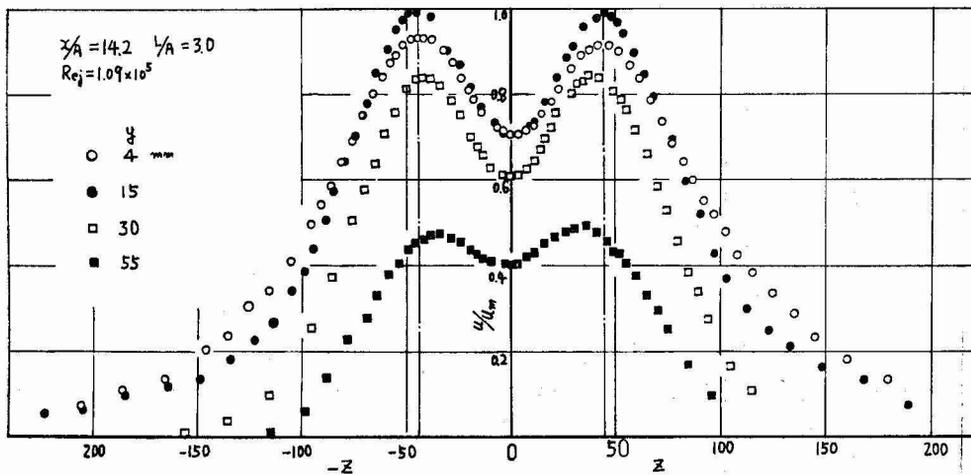


Fig. 4 Velocity distribution in Z-Y plane, and confirmation of the flow symmetry

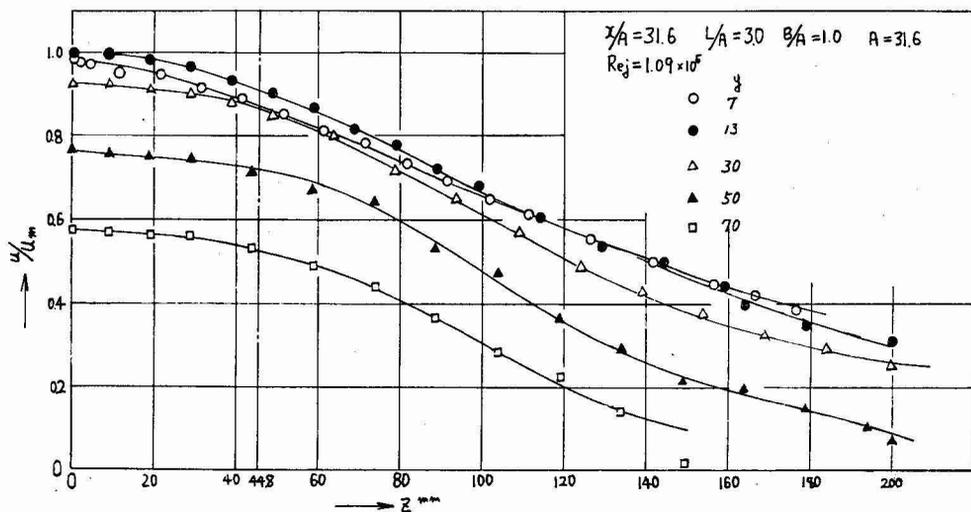


Fig. 5 Velocity distribution in Z-Y plane

4, 5 に示され、ポテンシャルコア領域の Z 方向速度分布を示す Fig. 2 からわかるように 2 噴流の中間部において明らかに速度欠陥が生じている。さらに同じ断面内において Z の異なる位置における ψ 方向速度分布は Fig. 3 に示される様に噴口中心からずれるにしたがって対称的に速度欠陥を生じている。Fig. 4 に示す位置では 2 噴流の中間部の空気は次第に加速されてきて相当な速さに達し噴流中心線 ($Z=0$) を境いにして

2 ピーク型の対称形分布を示している。この速度分布に対してとくに注目すべきことは、最大速度の位置 ($y=15\text{mm}$ で) 2 個のピーク点が噴口中心線からずれていないことである。この事実は 2 個の噴流は互いに直進し中心軸は偏向しないことを示すものである。一方 Fig. 5 は充分後方における速度分布で 1 個の矩形噴口を持つ壁面噴流の速度形態とはほぼ一致している。

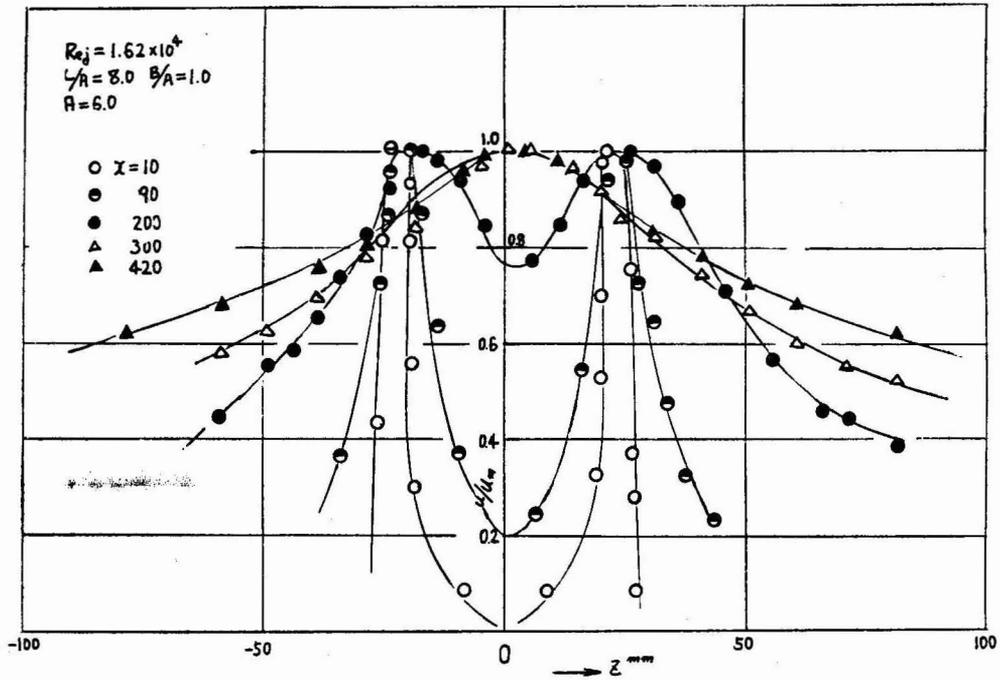


Fig. 6 Z directional velocity profiles at the point of maximum velocity

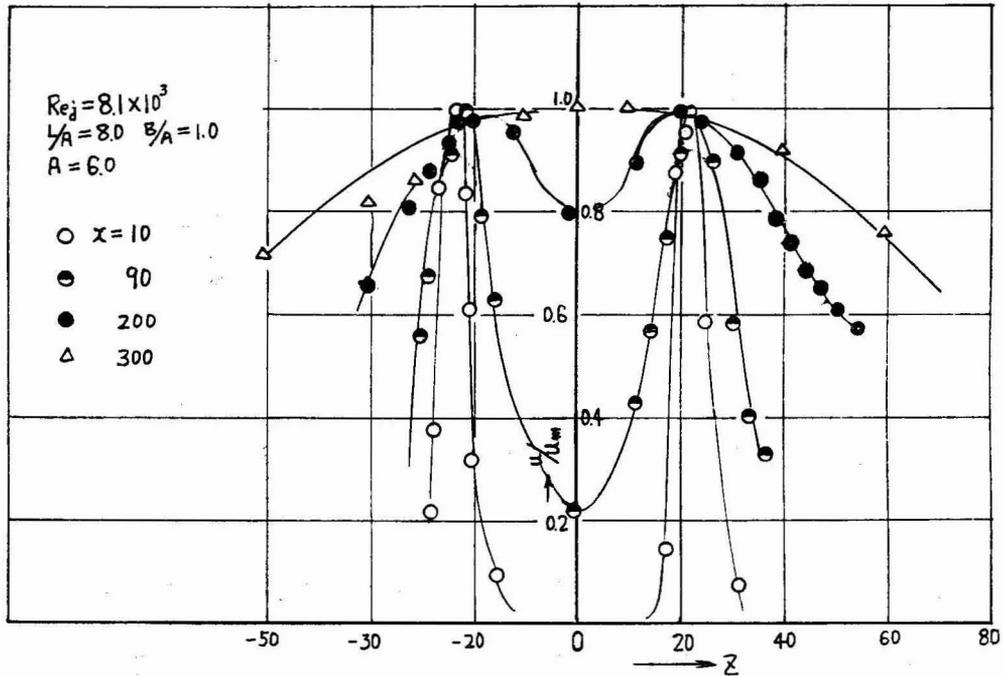


Fig. 7 Z directional velocity profiles at the point of maximum velocity

Fig. 6, 7は実験条件を変えた場合における最大速度の位置でZ方向にトラバースした結果である。両者共に $x=200$ ($x/A=33$) までは2ピーク型の流れを示し、 $x=300$ ($x/A=50$) 以後では1ピーク型に移

っている。これらの速度分布においても2個のピーク間隔はそのまま保たれ、流れが偏向していないことは前述のとおりである。

Fig. 8, 9は各々実験条件を変えた場合の噴口中心

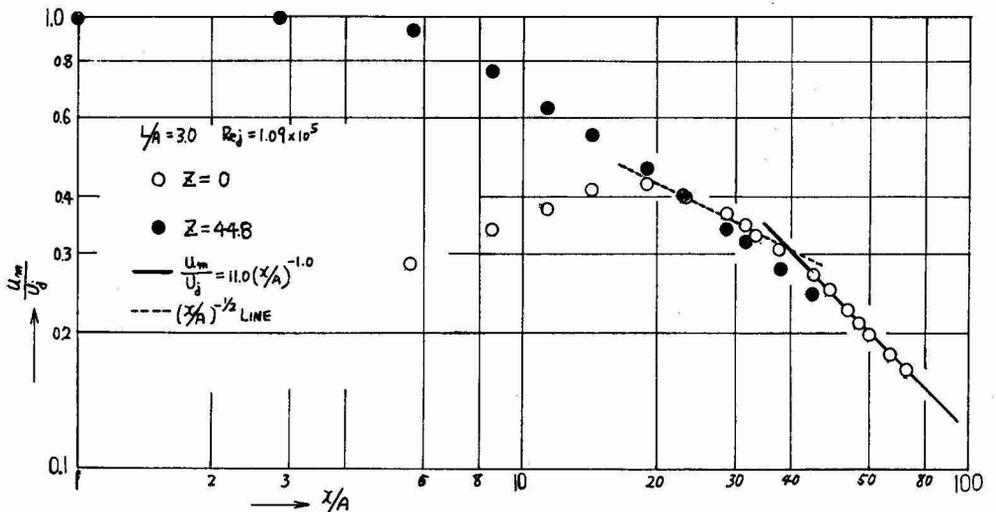


Fig. 8 Maximum velocity decay for $L/A=3.0$

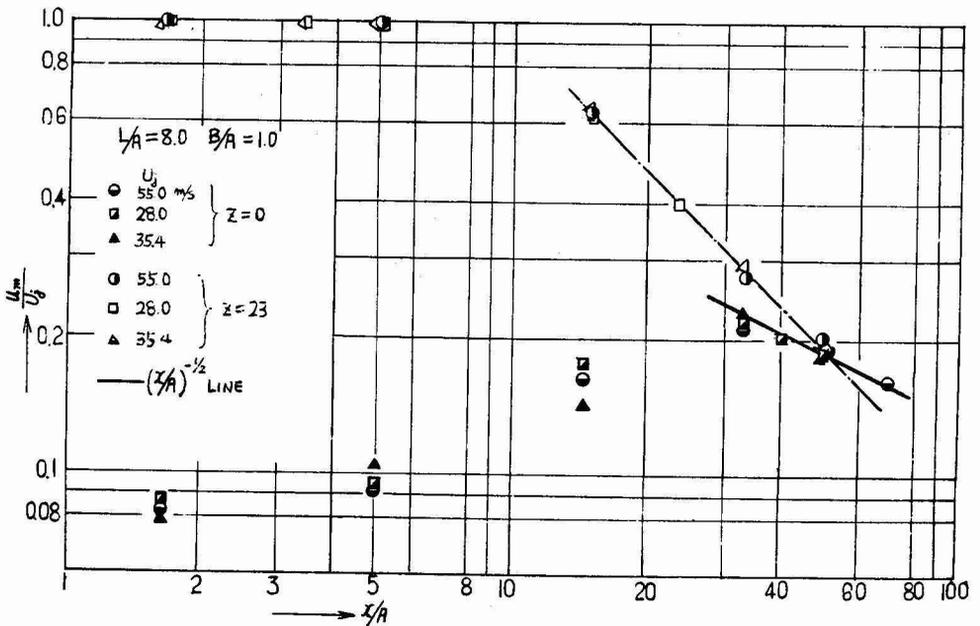


Fig. 9 Maximum velocity decay for $L/A=8.0$

線上および噴流中心線上における最大速度の変化の様子を示す。噴流中心線上における最大速度は流れ方向へ次第に発達し、噴口中心線上における最大速度は減衰してくる。この両者が一致した近傍においては2噴口の中心間隔ではほぼ2次元壁面噴流の形態が成立し、その速度減衰が $(x/A)^{-1/2}$ に比例する区間が存在している。そののちの速度減衰はFig. 8で示される様に1個の矩形噴流の場合と同様に $(x/A)^{-1.0}$ に比例している。

3-2 噴流の成長

Fig.10はFig. 8に示すものと同一の実験条件で噴流の y 方向半値幅の発達状況を示したものである。噴流中心線上および噴口中心線における各々の $y^{0.5}$ の発達曲線の交点はほぼ $x/A=23$ であり、Fig. 8から確認された位置と一致している。1個のピークを持つ噴流形態に移行したのち、半値幅の成長は $(x/A)^{1.0}$ に比例し前報における結果と相違を示している。

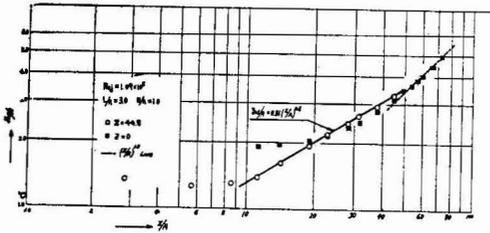


Fig. 10 Growth of the half-velocity width

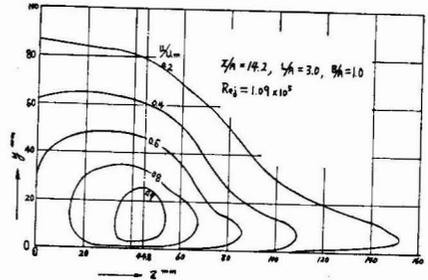


Fig. 12 Equi-velocity lines in Z-Y plane at X/A=14.2

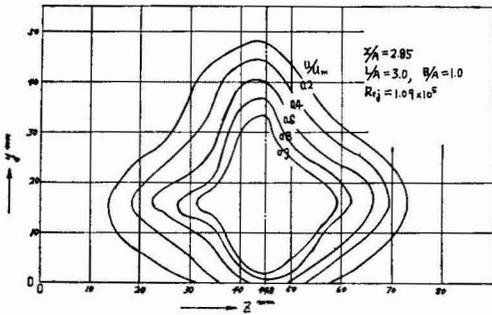


Fig. 11 Equi-velocity lines in Z-Y plane at X/A=2.85

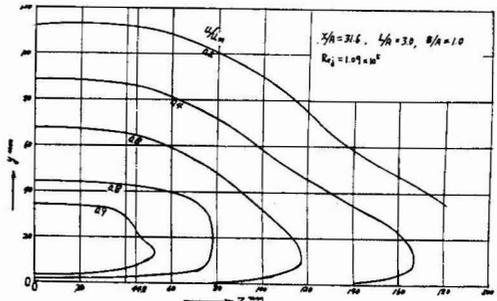


Fig. 13 Equi-velocity lines in Z-Y plane at X/A=31.6

Fig. 11, 12, 13は $L/A=3.0$, $Re_j=1.09 \times 10^5$ のもとにおける等速度線の x 方向への変化を示している。前項においても考察したように Fig. 11 においてポテンシャルコアの両横において凸状を示すのは速度分布の欠陥に起因するものである。Fig. 12, 13 において

コアンダ効果によって Z 軸方向へ急速に広がる傾向が見られる

4 温度効果の分布

$\eta = (T_w - T_\infty) / (T_j - T_\infty)$ で定義される温度効果 (Temperature Effectiveness) は断熱壁面の表面温度、噴出気流温度を直接測定することによりその分布を知ることができ、Fig. 14, 15は噴流中心線上

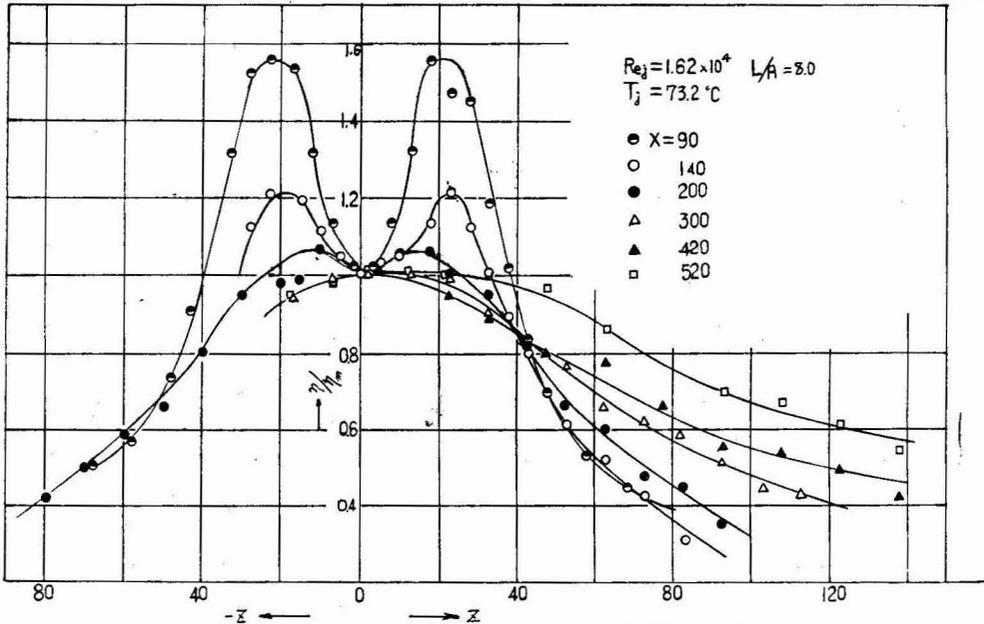


Fig. 14 Distribution of effectiveness in the Z direction

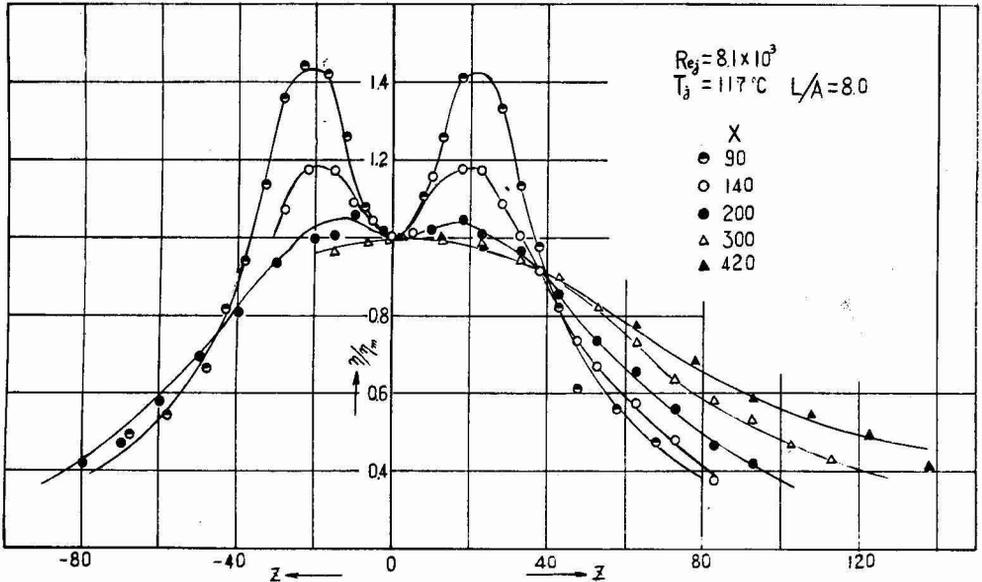


Fig. 15 Distribution of effectiveness in the Z direction

における η_m で無次元した Z 方向の冷却効果（温度効果）の分布を示す。速度分布と同様に $x=200$ ($x/A \div 33$) までは 2 ピーク型を示し $x=300$ ($x/A=50$) 以後では 1 ピーク型に移行している。また 2 個のピーク間隔がほぼ噴口中心間隔と等しく保たれていることも流れの場と一致している。

従来、温度効果は次元解析によると

$$\eta = f \left\{ G, \frac{T_\infty}{T_j - T_\infty}, \frac{\nu}{U_j A}, \frac{x}{A}, \frac{Z}{B}, \frac{\mu_j C_p}{K}, \frac{d\nu}{dT}(T_j - T_\infty), \frac{d\nu}{dT}(T_j - T_\infty)} \right\}$$

の様なパラメータを使って評価される。ここで G は噴口形状に関する係数で、 $\mu_j C_p / K$ はプラントル数である。したがってこれらの無次元数を有効に取ることにより冷却効果を一義的に評価できることを意味している。Fig.16 は噴流中心線上における η_m の分布を $(x/A) Re_j^{-1/3}$ で評価した結果であり $(x/A) Re_j^{-1/3} \div 2.5$ ($x/A = 40 \sim 50$) の領域で η_m は $(x/A)^{-1.0}$ に比例している。 $L/A = 8.0$ の実験条件下では速度減衰のデータが $x/A \geq 50$ で充分得られていないので直接関係づけることはできないが $L/A = 3.0$ の実験条件下では $(x/A)^{-1.0}$ で減衰していることが確認されていることから η の減衰と u_m / U_j の減衰は一致するものと推測される。

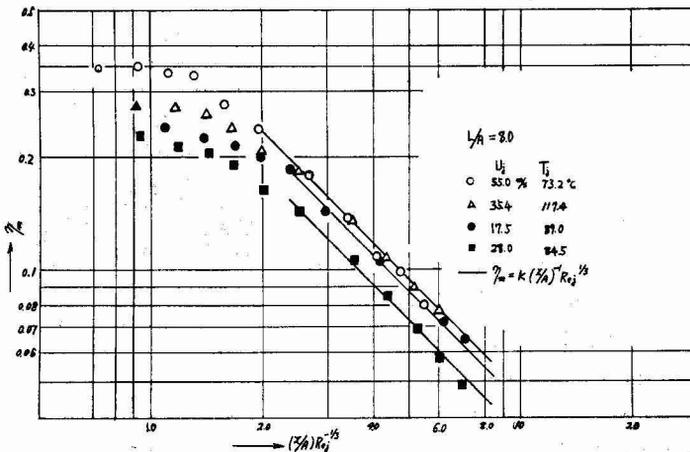


Fig. 16 Decay of effectiveness along the center line of the flow

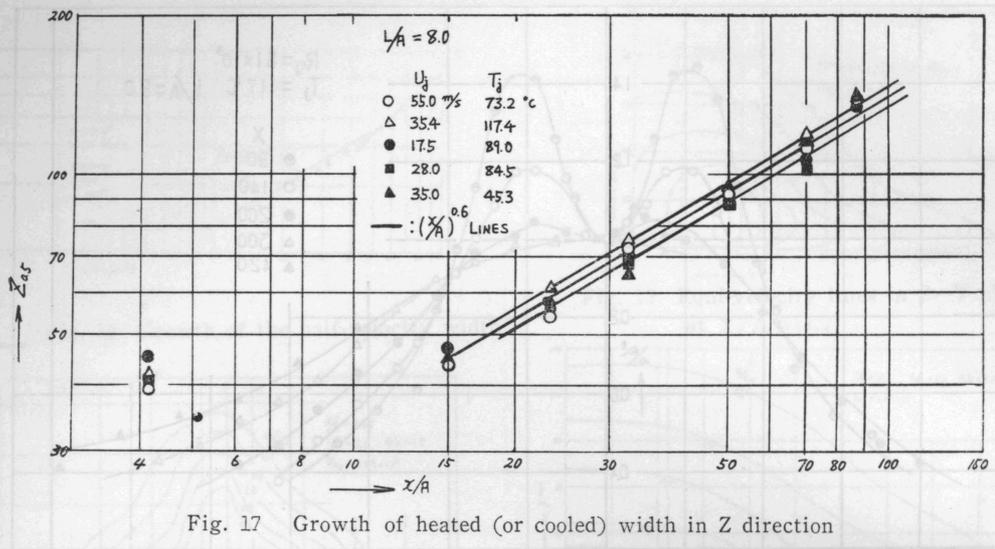


Fig. 17 Growth of heated (or cooled) width in Z direction

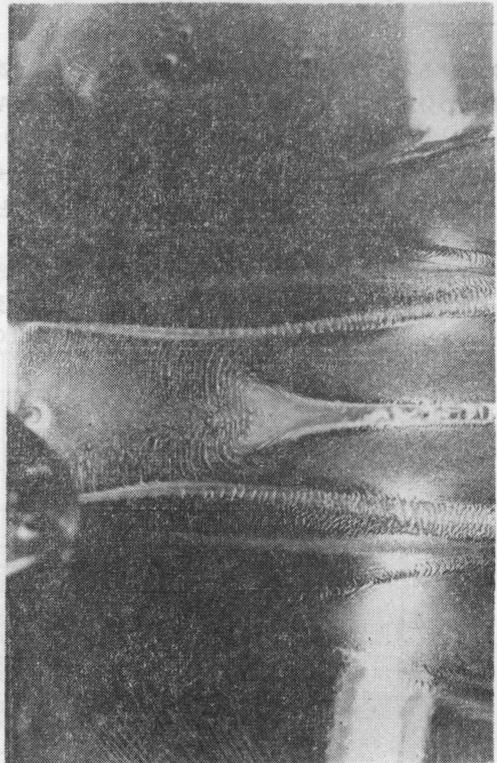
一方、加熱影響部の距離 $Z_{0.5}$ の分布は Fig. 17 に示すように $x/A \geq 15$ の区間で $(x/A)^{0.6}$ に比例しているが η_m の減衰と同様に Re_j , $T_\infty / (T_j - T_\infty)$, μ_j , C_p / K 等の無次元パラメータを導入して再整理が要される。

5 流れの可視化

ノズルから噴出した壁面噴流のポテンシャルコア領域に隣接する部分では速度勾配が急激でありその結果、静止空気との摩擦作用は非常に激しく周囲空気の誘引は活発である。

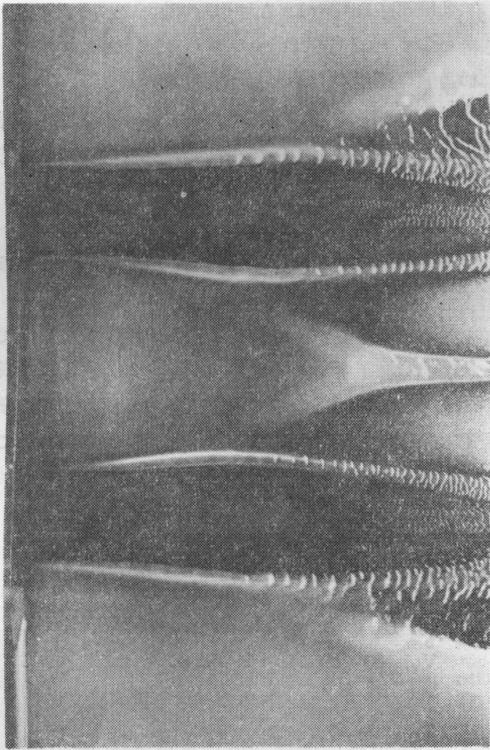
噴流上部からの誘引は自由に行えるが下面は固体壁面によって誘引が阻止されて負圧領域を形成する。そのことは速度分布の欠陥として現われているのであるが、噴口出口近傍における誘引流れを観察するため油⁵⁾膜法による可視化を行った。

可視化に使用した薬品は二酸化チタン、オレイン酸、流動パラフィン、ディーゼル油、菜種油で、その具体的な配合方法は二酸化チタン 25~30g にオレイン酸、流動パラフィンを等量ずつ加え 450cc とし、さらにディーゼル油 450cc 添加、900cc の混合液を作り充分攪拌した後安置して上澄液を 50cc くり出しこれに 150cc のディーゼル油を加え、充分攪拌し自濁液を平板（黒色）に塗付して行った。しかしながらこの混合方法は流れの速度の大きさ、流量にも左右され、かなり微妙なものであり、いつでもこの混合法が有効と言う訳ではない。

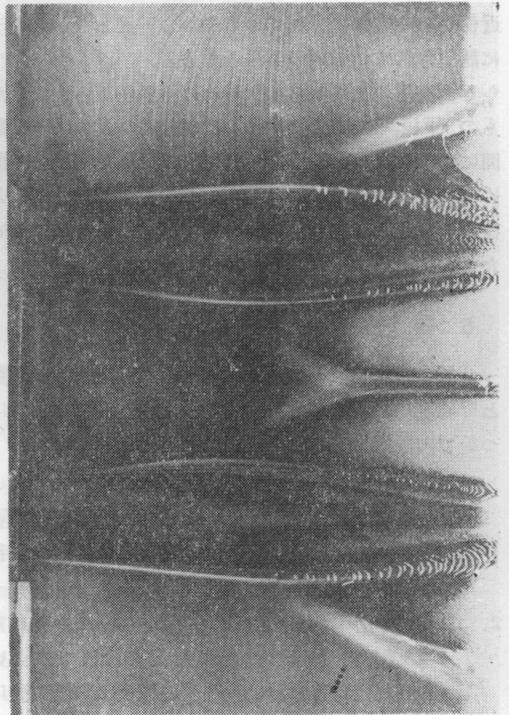


Picture 1 Flow visualization near the nozzle exit $A=B=31.6$, $L/A=3.0$ and $Re_j=1.09 \times 10^5$

写真撮影の結果は写真 1, 2, 3 に示す。2 噴流の外側における誘引流れは写真 1, 3 に見られる様に x 軸（または平板）に対して相当な傾きを持っており、ポテンシャルコア近傍における誘引作用が活発である



Picture 2 Flow visualization near the nozzle exit $A=B=31.6$, $L/A=3.0$ and $Re_j=1.09 \times 10^5$



Picture 3 Flow visualization near the nozzle exit $A=B=31.6$, $L/A=3.0$ and $Re_j=1.09 \times 10^5$

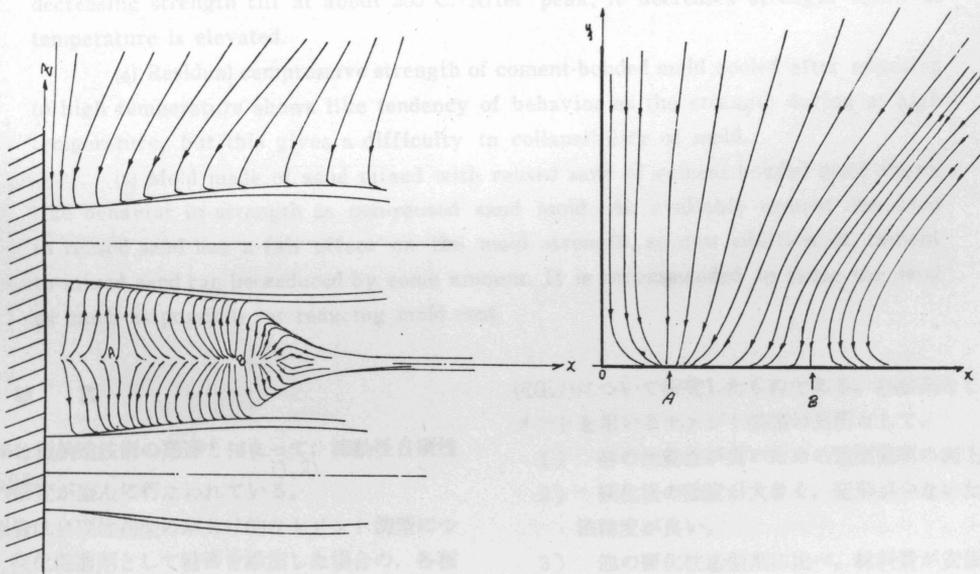


Fig. 13 Schematic drawing of the flow based on the flow visualization photograph

ことがわかる。また2噴流の中間部においては x 軸上近傍から2方向に分れてゆるやかに逆流しながら噴流に誘引されている様子が見られる。

写真撮影の結果から誘引流れの挙動をデッサンしたものがFig.18である。Fig.18の右側の図は $x-\eta$ 断面における流れの様態を示したものであるがこの断面においては油膜法による可視化ができず、糸くずおよび煙の動きを観察し、写真撮影の結果と総合して描いたものである。

6 結 論

2個の矩形噴口を持つ非圧縮乱流壁面噴流の挙動とその流れの場における断熱平板上の表面温度効果について実験的研究を行い次の結果を得た。

1. 2個の矩形噴口を持つ乱流壁面噴流において2ピーク型から1ピーク型流れへの移行は噴口中心間隔 L/A に左右され、噴口速度の影響を余り受けず各々の噴流中心軸は偏向しない。
2. 2噴口中心間隔 $L/A=3.0$ の時、 $x/A=23$ まで2ピーク型流れを示し、それ以後の流れでは1ピーク型流れに移行し、最大速度の減衰は1個の噴口を持つ場合と同様に $(x/A)^{-1.0}$ に比例し

$$\frac{u_m}{U_j} = 11.0 (x/A)^{-1.0}$$

で評価し得る。またその領域における η 方向半値幅の成長は $(A/X)^{1.0}$ に比例する。

3. 2噴口中心間隔 $L/A=8.0$ の時、2ピーク型流れから1ピーク型流れへの移行は $x/A=50$ で行われ、噴口速度の影響を余り受けない。
4. ポテンシャルコア近傍において各々の噴流の両横壁近くで強い誘引流れが存在し、速度分布に欠陥を生じしめる。
5. 噴流中心線上の温度効果 η_m の減衰は $(x/A) Re_j^{-1/3}=2.5 (x/A \div 40 \sim 50)$ 以後の領域でほぼ $(x/A)^{-1}$ に比例する。

最後に、本実験を進めるに当たり、装置製作の面で本学部機械工学科実習室の当間進一氏、真喜志清氏に協力していただき厚く謝意を表する。なおこの研究は琉球大学研究助成費の援助により行なわれたこと附記する。

参 考 文 献

- 1) 長田孝志 他, 本論文集掲載
- 2) J. H. Chin, et al, Trans. ASME, Ser. C, Vol. 83 (1961) PP 281~286
- 3) 岡本哲史 他, 日本機械学会講演論文集 No. 700-7 (1970) PP 143~146
- 4) E. R. G. Eckert, 機械の研究, Vol 23, No. 4 (1971) PP 671~674
- 5) 浅沼強, 日本機械学会誌, Vol.72, No.609 (1969) PP 1370~1377