

532.525

二次元平行噴流の干渉*

(第3報、平行3噴流のノズル壁近傍における流れの形態)

田中栄一**, 中田修一***

1. 緒言

多くの噴流が平行に流出する場合、噴流間で相互干渉することはすでに知られている。しかるに平行な二次元噴流によって作られる流れについての詳細な研究は比較的少なく、2噴流を取扱った前報告⁽¹⁾⁽²⁾ならびに D. R. Miller⁽³⁾のものと、S. Corrsin⁽⁴⁾による7本の噴流を取扱った実験があるのみで、3本の平行な噴流の干渉にかんする研究はほとんどなされていない。

一方、同軸におかれた柱状と環状の噴流の干渉にかんする実験⁽⁵⁾がなされている。これは二次元3噴流の流れの場に類似しているので、貴重な参考資料とはなるが、軸対称のため、二次元3噴流の干渉による流れの場へは直接対応できない。

平行3噴流による流れのうち、外側の2噴流に注目すれば、前報で述べた場合のように、2噴流は互いに引き合い下流にて合流するにいたり、その間の噴流にはさまれた領域では逆流が生じている。したがって3噴流における中央噴流は、この逆流域中に流出することになる。それゆえ、3噴流の流れの場は両側噴流と中央噴流との速度比によって大きく影響されるとともに、ある特定の速度比で、流れは非常に不安定となることも予想される。

本研究はノズル幅およびそれらの間の間隔が等しい3本の平行二次元噴流について、中央噴流と両側噴流の速度比を広範囲に変化させ、それらの合流までの干渉域における流れの形状と特性などへおよぼす速度比の影響について実験的にしらべたもので、速度、乱れ、静圧分布測定のほか、油膜法可視化による流れの形の分類をも含むものである。

記号(図1参照)

 a : ノズル幅 b : 噴流の半値幅(y 方向速度分布において u/U) $=0.5$ の点間距離の半分) D_0 : ノズル中心間距離 x : ノズル面に直角な流れ方向距離 y : x に直角な距離 x_s : 自由よどみ点位置の x 座標 u : x 方向時間平均速度 u' : x 方向速度の乱れ成分二乗平均平方値 U : 単噴流における u の y 方向分布の最高値 U_0 : ノズル流出速度 U_{0c} : 中央ノズル流出速度 U_{0s} : 両側ノズル流出速度 $R_{ec} = U_{0c}a/\nu$ $R_{es} = U_{0s}a/\nu$ h_c : 中央噴流用風胴内総圧 h_s : 側噴流用風胴内総圧 J : 側噴流ノズル流出運動量 $= \rho U_{0s}^2 a$ J_1 : 2噴流合流点における後方への運動量 J_2 : 2噴流合流点における逆流運動量 p : 大気圧基準静圧 λ : ノズル流出速度比 $= U_{0s}/U_{0c}$ ν : 空気の動粘性係数 ρ : 空気の密度

$$\phi = \int_0^y u dy / \frac{a}{2} U_{0c}$$

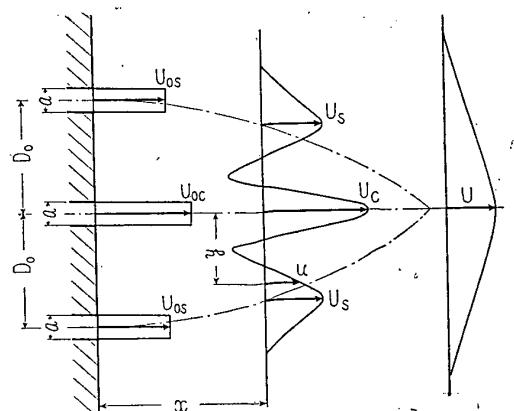


図1 記号

* 昭和46年11月12日 東海支部創立20周年記念講演会において講演、原稿受付 昭和48年8月3日。

** 正員、岐阜大学工学部(各務原市那加門前町)。

*** 正員、日立造船会社。

2. 実験装置

2・1 風洞、ノズルと測定部 実験に用いた風洞装置の全体図を図2に示す。二次元平行3噴流の実験においては、中央噴流と両側噴流の速度をそれぞれ独立して変化させる必要がある。このためノズル⑩の上流部分をそれぞれ $200 \times 110\text{ mm}$ の長方形断面をもつ3本の平行な風路⑨に分割し、中央噴流の流出速度 U_{0c} と両側噴流の流出速度 U_{0s} の比 $\lambda (=U_{0s}/U_{0c})$ の変化は中央および両側噴流用風路③④のそれぞれにつながれた2台の独立した遠心送風機①②の回転数を調節することによりおこなった。3本の風路⑨の先端に取付けたノズルの形を図3に示す。一方測定部⑪には前報告の場合と同じく二次流れを防止する目的で上下2枚の側板をおいた。

3噴流の干渉の実験においては、それぞれの噴流を単独で流出させた時、各噴流が同じ特性をもつことが必要である。その検定のため、それぞれの噴流について、噴流の半値幅 b/a 、最高速度減衰 $(U_0/U)^2$ 、速度分布 u/U および乱れ分布 u'/U を測定した結果を図4(a), (b)に示す。図に示すように中央および左右両側噴流の性質はきわめてよく一致し、しかも従来の単噴流の性質ともよく合っていることが示された。

2・2 速度、圧力および流れの方向の測定 3噴流の干渉域における流れは非常に複雑である。このため速度、圧力分布測定のほか流れの方向も知る必要がある。この目的のために従来、レイノルズ応力の測定に使用されているX形熱線風速計を平均風速の直角方向の2方向成分にも使用できるように改良を加え、こ

れを用いることにより流れの方向を求ることを試みた。そのほか、普通の熱線風速計とそのトラバース装置および圧力測定法は第1報⁽¹⁾と同じである。

2・3 流れの可視化 3噴流の流れの場を全体として理解し、かつ流れのパターンの詳細な変化を知る目的のために、油と二酸化チタンの混合物を平板の両面に塗布し、これを2枚の二次元保持側板の間にそう入し、そこにできた油膜の模様によって、流れを可視化する方法を試みた。

3. 実験結果と考察

前報⁽¹⁾において、二次元平行2噴流によって作られる流れは、噴流間隔とノズル幅との比 D_0/a によって変化し、 D_0/a が16以上の場合、合流までの形は D_0/a に比例して相似であることが示された。本実験は2噴流によって作られた逆流域へ中央噴流が流出した場合について行うので、ここでは両側噴流のノズル間隔の広い場合($D_0/a=22$)について、流れの速度比 λ による影響を主としてしらべることにした。

3・1 風洞内総圧比とノズル流出速度比 噴流間の相互干渉がなく、レイノルズ数の十分に大きい自由噴流では、ノズル流出速度 U_0 は流出前の風洞内総圧の平方根 \sqrt{h} のみに比例する。しかるに、3噴流によ

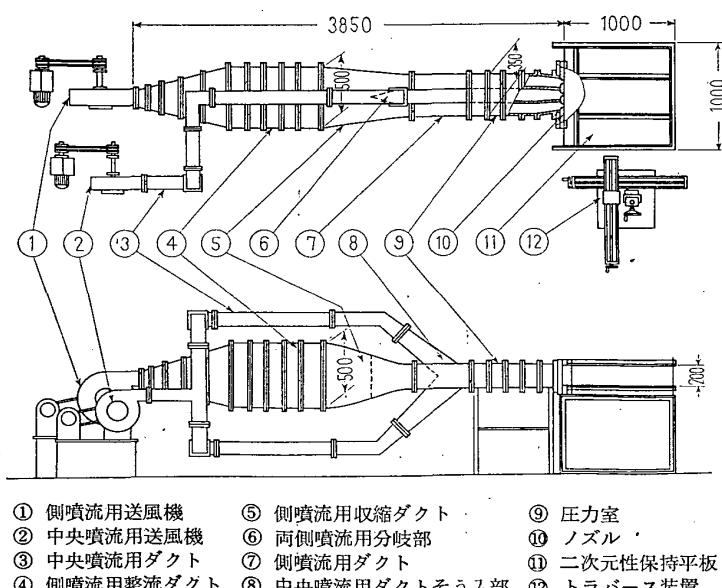


図2 装置

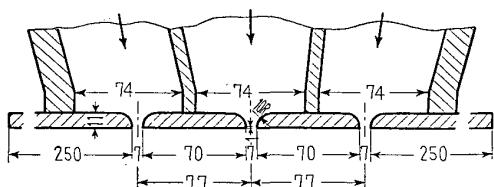
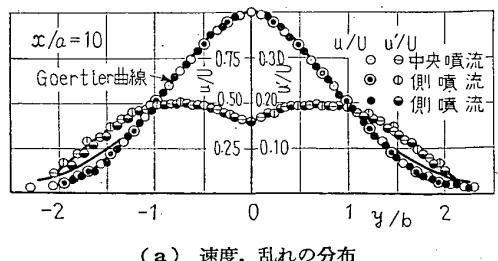


図3 ノズル



(a) 速度、乱れの分布

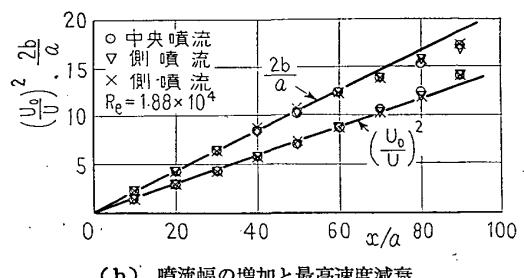


図4 各噴流の特性

る相互干渉のある場合には、風胴内総圧比のみにより速度比 λ は求められない。このため風胴内総圧比の平

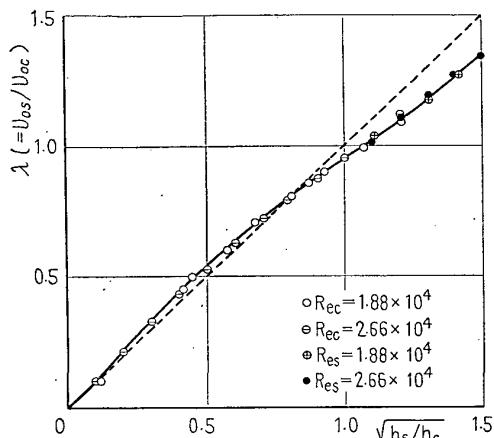
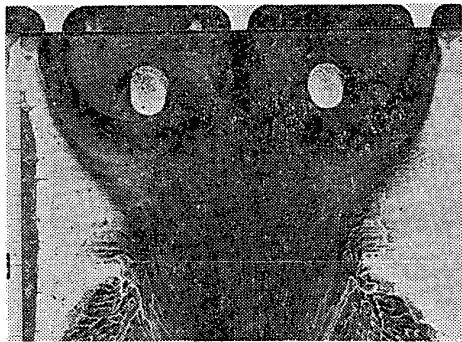


図 5 流出速度比 λ と風胴内総圧比

方根 $\sqrt{h_s/h_c}$ とノズル出口における流出速度比 $\lambda = U_{0s}/U_{0c}$ との関係を求めた。この結果を図 5 に示す。

図において点線は相互干渉のない $\sqrt{h_s/h_c} = \lambda$ の場合を意味している。しかるに実験点は $\sqrt{h_s/h_c}$ が 0.8 附近において両者は一致するが、 $\sqrt{h_s/h_c}$ が 0.8 以下のとき λ は $\sqrt{h_s/h_c}$ より大となり、中央噴流が両側噴流を強く誘引加速し、一方 0.8 以上においては逆に λ は点線の値よりも小となり、強い側噴流による流れの場によって中央噴流が吸い出されることを明らかにしている。

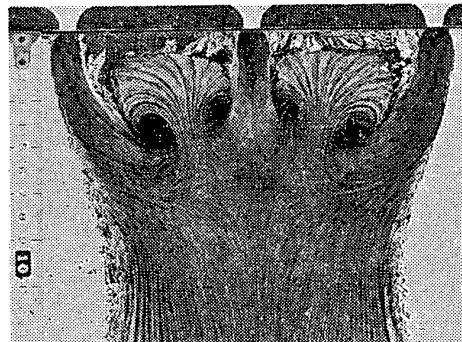
3・2 可視化による流れの形の分類 速度比 λ の変化にともなう流形の変化を多数の速度分布の測定により求めることは困難である。このため油膜法により流れの形の速度比 λ および流出レイノルズ数 $U_{0s}a/\nu$ による影響を詳細にしらべた。一般に噴流の干涉により多くの圧力起伏が生じた流れでは、油膜平板上の模



(a) $\lambda=0.602$



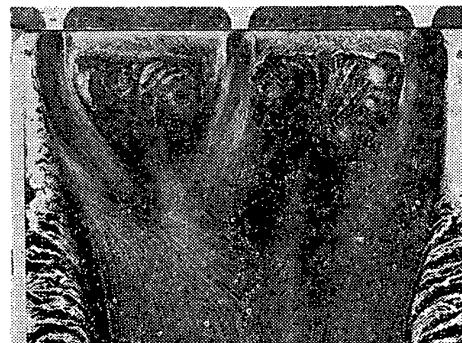
(c-2) $\lambda=1.12$



(b) $\lambda=0.865$



(d) $\lambda=1.28$



(c-1) $\lambda=1.12$



(e) 2噴流

図 6 可視化写真

様と実際の流れとの関係をあらかじめ調べておく必要がある。この点の検討の結果については後の流線および等圧線図との比較において説明するが、ここでは流れの形の区別の資料として可視化の結果を使用した。

図6は $\lambda=0.602, 0.865, 1.12, 1.28$ と2噴流の各々の場合についての可視化模様写真の例を示す。写真に示すように、中央噴流の強い $\lambda=0.602$ においては、両側噴流が中央噴流に誘引され合流している。しかし両側噴流速度が次第に大きくなり、 $\lambda=0.865$ となると、中央噴流は両側に吸収される形となっていく。さらに側噴流が相対的に強い $\lambda=1.28$ およびこれ以上の速度比においては、中央噴流が最初に片側の側噴流と合流し、この合流した流れが残りの側噴流と合流するため、非対称な流形を示すとともに、干渉域は対称な場合に比較して下流方向へより長くなっている。

一方、対称流形から非対称流形へ移る $\lambda=1.10 \sim 1.20$ 付近では、流れが交互に振動し非常に不安定となるとともに、大きな騒音を発生し、可視化流形は図6(c)に示すように不鮮明となる。さらに $\lambda=\infty$ 、すなわち図6(e)の両側2噴流のみによる結果は前報⁽¹⁾の平行2噴流の実験結果の性質とよく一致する。以上の結果より流形を区別すれば、3噴流による流れは、中央噴流と側噴流との速度比 λ により図7に示すような3種の流形A、BおよびCに分類できることがわかる。図8はこれらの流形の速度比 λ およびノズル流出レイノルズ数による変化を示す。図によれば、 $R_{es} < 10^4$ において若干レイノルズ数による影響があるが、それ以上のレイノルズ数の範囲ではA流形とB流形との境界はレイノルズ数に無関係に $\lambda=0.71 \sim 0.72$ となる。図中の直線 $\lambda=0.707$ は両側と中央噴流のノズル流出運動量の等しい場合、すなわち $2U_{os}^2 = U_{oc}^2$ における速度比の場合を示す。この直線がA、B両流形の境界線をなしていることは、流れの形が中央噴流と側噴流のもつ運動量の比により支配され、これら両流形は $\lambda=0.707$ を用いて近似的に区別されることを示している。

つぎに非対称なC流形では、両側噴流が中央噴流に比較して強くなり、流れは両側2噴流に強く支配さ

れるようになる。平行2噴流の場合、その合流点より上流の噴流に囲まれた領域では強い逆流域が存在することはすでに述べたおりであるが、C流形では、この逆流と中央噴流とが対向する流れとなるため[図6(c)～(e)参照]両運動量の比が流れを左右すると考えられる。いま、この逆流運動量を2噴流の実験結果より求めるため、本実験の両側噴流の距離 $D_0/a = 22$ を第2報⁽²⁾図19に入れて、(後方への運動量)/(側噴流運動量) = J_1/J を求めるとき、その値は1.25となる。一方、逆流運動量を J_2 とすれば、 $J_1 + J_2 = 2J$ であるから $J_2/J = 0.75$ が求まる。いま、この値が中央噴流の流出運動量 $\rho a U_{oc}^2 / J$ に等しい場合、すなわち $U_{oc}^2 / U_{os}^2 = 0.75$ にとれば、 $\lambda = U_{os} / U_{oc} = 1.15$ をうる。すなわち、この λ の値において流れは非常に不安定となるとともに、この点を境として流形が変化することが予想される。図8のB流形とC流形の境界として上の速度比 $\lambda=1.15$ を用いるとき図に示すように実験結果もこの予測とよく一致している。

3.3 干渉域の長さ 平行2噴流の場合と同様に、合流するまでの領域の大きさとしては、3噴流の場合も1個のノズルより流出した流体が他のノズルより流出した流体と最初に出会い、各速度成分が零となる自由よどみ点のノズル壁面よりの距離 x_s をとることが考えられる。この座標 x_s を2噴流の場合のように測定結果より求めるのは困難であるので、可視化写真に現れた噴流間の逆流開始点を自由よどみ点と考え、この点の座標 x_s と速度比 λ との関係を図9に示す。3噴流の場合、図6の写真に見るように、2噴流の場合とは異なり2個のよどみ点がみられるが、 $\lambda < 1.15$ にて流れは x 軸に対称となるため、二つの点のノズル面よりの距離 x_s はほとんど等しく、その値は λ とともに

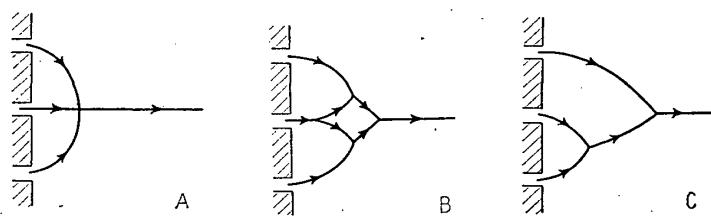


図7 3噴流干渉流形モデル

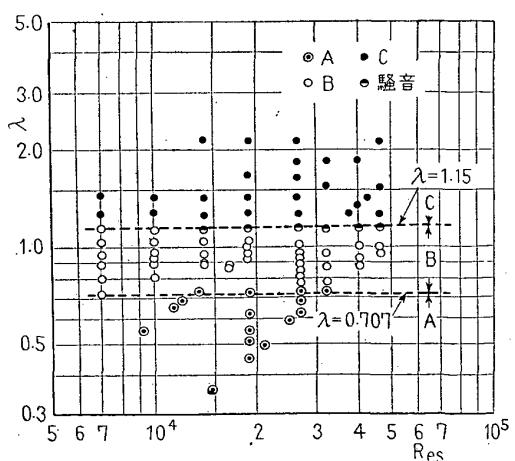


図8 流形と速度比 λ およびレイノルズ数 R_{es} との関係

に増加する傾向となる。しかるに、 $\lambda \geq 1.15$ にて流形は非対称となり、中央噴流の側噴流への付着側の点と、下流における両側噴流の合流点との二つの異なる点に自由よどみ点ができる。図9の $\lambda \geq 1.15$ における二つの x_s はこのことを示し、3噴流が完全に合流するまでの距離は A 流形および B 流形のおよそ2倍の距離を必要としている。

一方平行2噴流の合流の場合⁽¹⁾、その合流点の座標は $x_s/D_0 = 1.33$ となるが、3噴流でかつ両側噴流が強い流形 C($\lambda \geq 1.15$) の合流点の座標 x_s/D_0 の値は最小が $1.35(\lambda=1.15)$ で $\lambda > 1.15$ では2噴流にくらべて非常に大きくなる。これは両側2噴流の誘引によって生ずる負圧を中央噴流がおぎなうため、噴流間の負圧が小さくなり、この結果、噴流の曲率半径が増加するためである。

3・4 速度、乱れ、静圧の分布 図10(a)～(c) は速度比 $\lambda = 0.602$ (A 流形), $\lambda = 0.865$ (B 流形), および $\lambda = 1.28$ (C 流形) の各々の場合について、 x/a の各断面について求めた速度 u/U_0 , 乱れ $(u'/U_0)^2$, および静圧 $p/(1/2)\rho U_0^2$ の y/a 方向の分布を示す。ここで U_0 は中央および両側ノズル流出速度のうち、大きいほうの値を示し、 $\lambda = 0.602, 0.865$ の場合は中央速度 U_{0c} を、 $\lambda = 1.28$ の場合は側噴流の速度 U_{0s} をとる。なお、ここに示す3種類の速度比は可視化写真、図6(a), (b) および (d) に対応している。速度分布形の図10(上)において、(a)～(c) いずれの場合にも噴流間に逆流が存在するが、各分布形は異なっている。すなわち $\lambda = 0.602$ の場合、中央噴流は両側噴流を急激に誘引し、 $x/a = 10 \sim 12$ にて合流し単噴流形分布となっており、 $\lambda = 0.865$ では中央噴流が両側噴流に誘引され、両側へ急に広がるため、中央噴流速度は急速に減衰し、 $x/a = 12$ にて合流したときには、中央が平たん

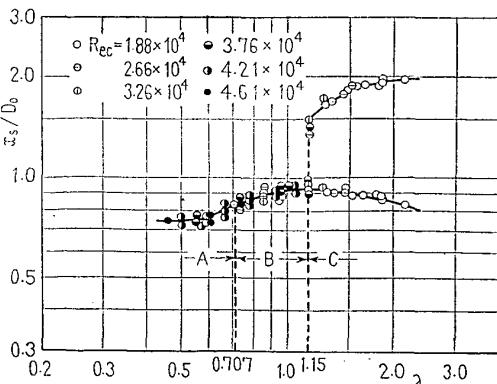


図9 自由よどみ点位置と速度比 λ との関係

な分布形となっている。

一方 $\lambda = 1.28$ の場合は、中央噴流は急速に左側噴流に近づき、 $x/a = 14$ にて付着合流する。この非対称2噴流はさらに $x/a = 24$ 附近にて合流するが、この場合の分布は $\lambda = 0.865$ の場合と同様に平たん部を有している。

つぎに図10(中)の乱れ分布形については、 $\lambda = 0.602$ および 0.865 の場合、中央の噴流は単噴流のごとく両側に極大をもつ左右対称形であるが、両側の噴流は中央へわん曲するため、外側にのみ山をもつ形となっている。しかし $\lambda = 1.28$ の場合は中央噴流もわん曲するので、そこでは一つ山しかない。また乱れの大きさのうち、中央噴流における乱れの最高値は $\lambda = 0.865$ の場合とくに大きく $(u'/U_0)^2 = 0.08$ 以上の値を示している。これは中央噴流が両側噴流に強く誘引をうけた広がり流れを生ずることによるからである。一方、側噴流の乱れ最高値を側噴流速度 U_{0s} で割った値は $\lambda = 0.602, 0.865, 1.28$ において、それぞれ $(u'/U_{0s})^2 = 0.050, 0.053, 0.045$ となり、どの流形においても2噴流の場合とほとんど等しくなって

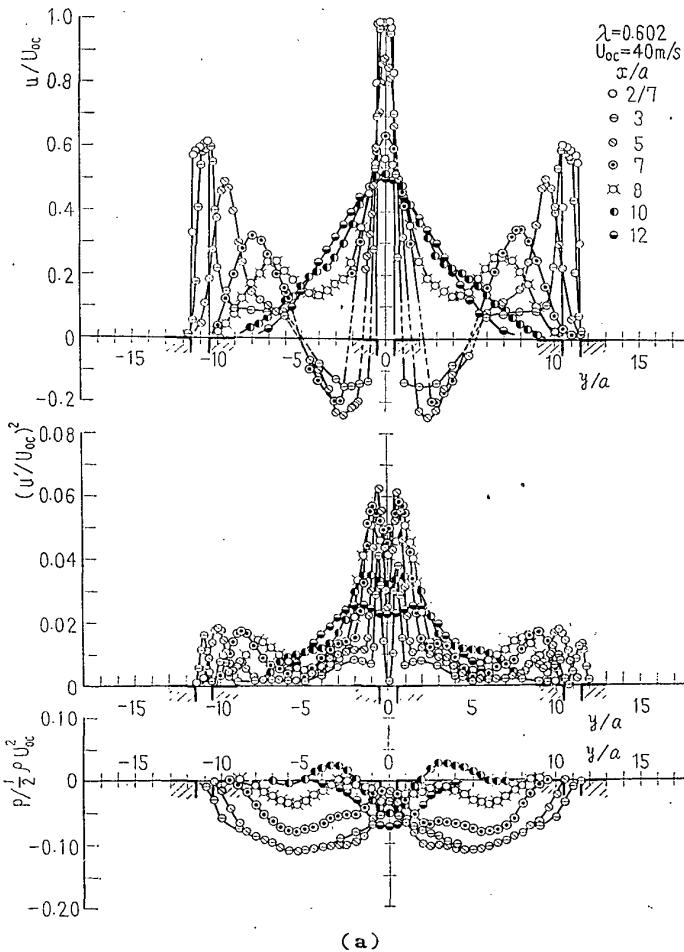


図10 速度、乱れ、静圧の y 方向分布(その1)

いる。

つぎに、図10(下)の静圧分布によれば、いずれの分布も噴流間には負圧を生じておらず、一方、噴流の合流点付近では大気圧以上となっている。しかし $\lambda=1.28$ では圧力分布も非対称となり、大気圧以上の最高圧力は $x/a=12$ と $x/a=20$ 付近の2点で示す。

3・5 流線と等圧線図による油膜法の検定 前述のように、流れの形を油膜法によって求めたが、この方法は流れの形を知る上に、きわめて有利であるが、定量的な測定ではないので、これを速度分布の測定結果

より求めた流線と比較しておくことが必要である。すなわち図6(a), (b)および(d)の可視化写真と流れの性質とを比較対応させるために、それぞれの速度分布図10より流線を求め、それらの結果およびX形熱線プローブによって得た流れの方向を図11(a)～(c)に示す。図中に示されている流線は中央噴流の中心を基準にとり、その速度分布形を式積分して求めたもので、各流線の値は

$$\psi = \int_0^y u dy / \frac{a}{2} U_{cs}$$

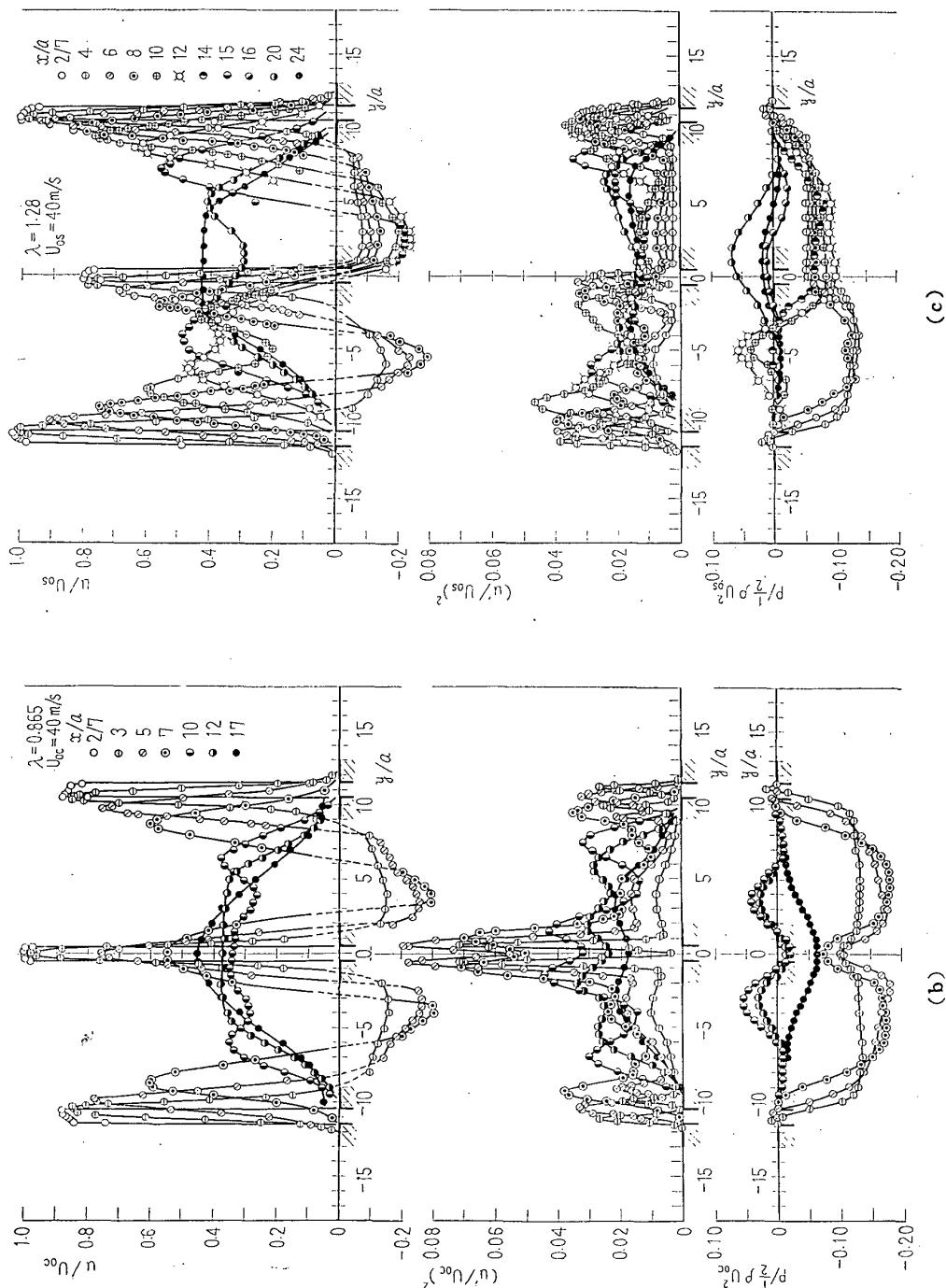
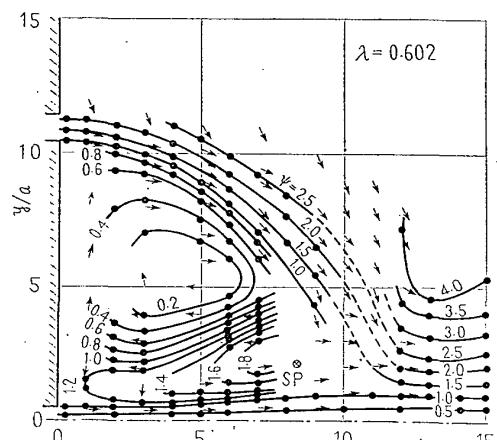


図10 速度、乱れ、静圧、静圧分布(その2)

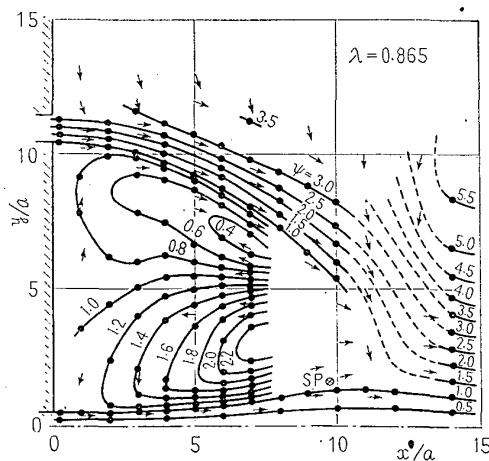
を示している。

ただし、自由よどみ点付近の流線を示すことができ

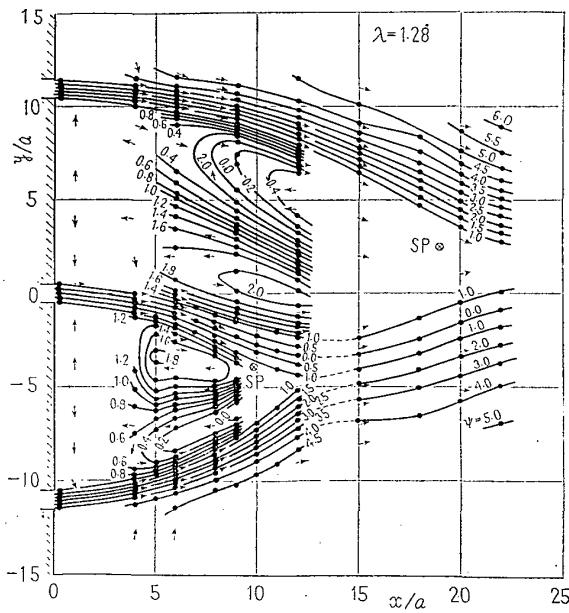
ない。これは、この付近の速度が非常に小さく、しかも向きが大きく変動するので、それらの正確な測定が



(a)

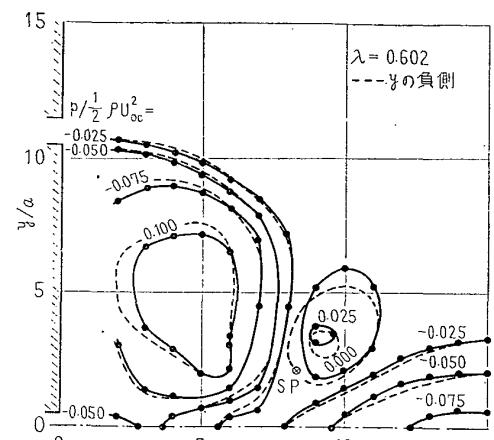


(b)

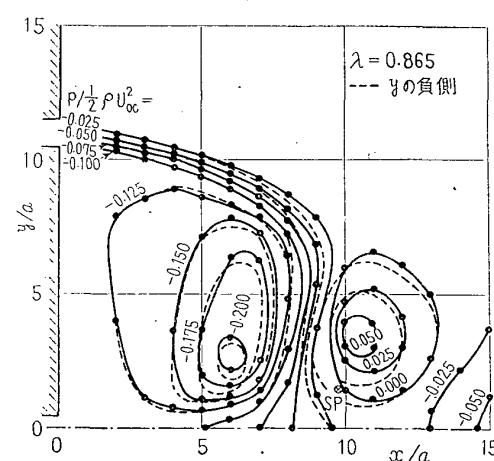


(c)

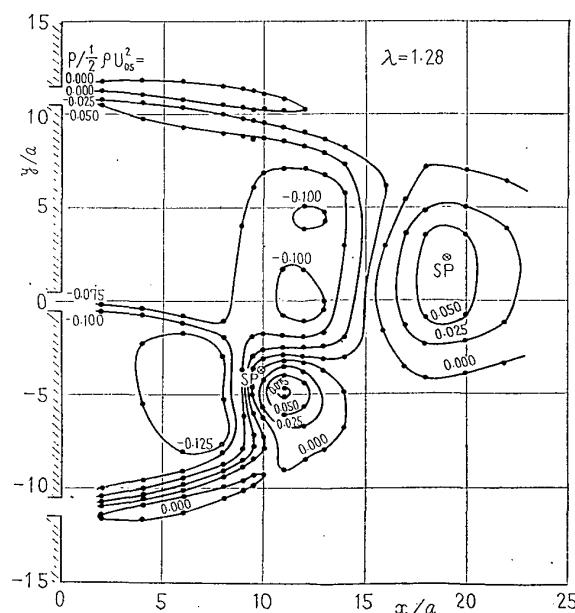
図 11 流 線



(a)



(b)



(c)

図 12 等圧線図

できないためである。なお図中の SP 印 \otimes は可視化写真にみられる自由よどみ点位置を示す。図 11(a)～(c) をそれぞれ図 6(a), (b), (d) と比較させてみると、流れの形はきわめてよく一致している。したがって可視化写真が流れの形を知る上にきわめて有効であることがわかる。

しかし、これらをより詳細に比較すると、写真では噴流の流線が循環の中心に巻きこんでいること、中央噴流の両側にある循環の中心位置がやや上流に移動していることに差異がみられる。この差異は油膜平板を流れの中へそう入した時、平板上に生ずる境界層における圧力の影響であると考えられる。この圧力の影響をたしかめるため、圧力分布の図 10(下)より等圧線図を求めるとき、図 12(a)～(c) となる。この図 12 と可視化写真の図 6 と比較すると、写真の巻き込み中心と圧力の最低点はきわめてよく一致している。このことは、圧力最低点の圧力が $p/(1/2)\rho U_0^2 = -0.1 \sim -0.2$ とかなり低く、さらにその下流側に合流による高圧部があり、このため油膜平板の境界層内で圧力の低い場所への流れが生じるため、写真の巻き込みの中心が圧力中心位置に合うこと、さらに写真の噴流の流線が圧力最低点に巻き込んでいるのも同様の理由によるものである。したがって、油膜平板上の流線は圧力の影響をうけるため、実際の流線とはやや異なることがわかる。

4. 結論

(1) 二次元平行 3 噴流が合流するまでの流れの形はノズル流出速度比 $\lambda = U_{0s}/U_{0c}$ により変化し、その

形は次に示す 3 種類の流形に分類できる。

A 流形 ($\lambda < 0.707$)、中央噴流の運動量が大きく、両側噴流を誘引、吸収する形。

B 流形 ($0.707 < \lambda < 1.15$)、中央噴流の運動量が両側噴流より小さく、両側噴流が中央噴流を誘引する形。

C 流形 ($\lambda > 1.15$)、中央噴流の運動量がさらに弱まり、このため、最初一方の側噴流に中央噴流が付着し、さらに下流にて、この合流した噴流が残りの側噴流と合流する形。

(2) 速度比 $\lambda = 1.15$ 近傍にて、流れは非常に不安定となり騒音を発生する。これは両側 2 噴流間に生ずる逆流と中央噴流のもつ運動量が、この速度比にて等しくなり、これらが対向する流れとなるためである。

(3) 平行 3 噴流の油膜法による流れの可視化流形は圧力分布の影響をうけるが、定性的には流線の形と一致する。

最後に本研究を行うにあたり終始懇切なご指導をいただきました名古屋大学 古屋善正教授と種々ご助言いただきました名古屋大学 村上光清教授に厚くお礼申し上げます。

文 献

- (1) 田中, 機論, 35-274 (昭 44-6), 1257.
- (2) 田中, 機論, 39-327 (昭 48-11), 3386.
- (3) Miller, D.R. and Comings, E.W., *J. Fluid Mech.*, 7-2 (1960-2), 237.
- (4) Corrsin, S., *NACA Wartime Rep.*, W-90 (1944-11).
- (5) Chigier, N.A. and Beér, J.M., *Trans. ASME*, Ser. D, 86-4 (1964-12), 797.

討 論

[質問] 多賀正夫 (大阪府立工業高等専門学校)

(1) 噴出口での速度分布は一様でないが、この場合 U_{0s} の値はどのようにして定めたか。また λ が非常に大きい場合には、 U_{0s} の値は左右でかなり異なるのではないか。

(2) 結論に示されている λ の数値に関しては、 $D_0/a = 11$ 以外には適用できないと思われるが、 D_0/a によってどの程度の差異が生じるものと推定されるか。

[回答] (1) 側噴流流出速度 U_{0s} は速度分布形の平均値として算出した。 U_{0s} の左右の違いは流れが最も不安定となる $\lambda = 1.2$ 付近において最も大きく、その差は 5% あまり大きくなかった。

(2) 本実験は 3 本のノズル幅 a が等しく、それらの間隔 $D_0/a = 11$ の場合についての実験なので厳密な意味ではご指摘のとおりである。しかし本報告には示さなかったが、 $D_0/a = 8$ および 12 についてこの点を検討したところ同様な結果をえている。したがって D_0/a があまり大きく異ならなければ、ほぼ同じ結果がえられると考えられる。

[質問] 八田圭爾 (京都工芸繊維大学工芸学部)

(1) λ の値が約 0.7 から 1.1 の間で図 5 の曲線のこう配が他の部分より小さいのは、流形の変化と対応するものか。

(2) 図 10, 11 の速度分布と流線の対応において、たとえば (b) の場合 $x/a = 7$ に対しては u の正負

と ψ の値の増減との対応が容易にわかるが、 $x/a=10$ においては両者の対応はどのように考えたらよいのか ($\psi=1.0$ の点が二つあるが、図 10 によるとその間で $u<0$ となっていない)。

(3) 図 11において、図示された流れの方向が流線の接線の方向と必ずしも一致していない。測定の困難のためと思われるが、両者の関係についてご見解を伺いたい。

〔回答〕 (1) ご指摘のように図 5 の $\lambda=0.7$ より 1.1 までの領域は一つの流形 B の範囲に対応している。 λ の値と流形の変化との関係については図 8 と 9 に示すようになる。

(2) ご指摘のように図 11(b) の位置 $x/a=10$ 付近に流線がなく逆流の様子がわかりにくいのであるが、これは、これに対応する可視化写真 [図 6(b)] と比較すると明らかなように、この付近は自由よどみ領域となっており、流速はきわめておそく、かつ側噴

流流跡は y 軸にほぼ平行となっている。それゆえこの付近の流れの測定は非常に困難である。このため熱線風速計による測定結果図 10 の $x/a=10$ における u/U_{∞} が噴流間で零または負とならなくて正の値を示している。したがって図 11(b)において側噴流の流線 $\psi=1$ と中央噴流の $\psi=1$ を結ぶ流線を示すことができなかつたので、ご指摘のような矛盾する点を生じた。

(3) 上述のように循環領域内における u の正確な測定がかなり困難である。このため速度 u の y 方向分布を積分して求めた流線と X 形プローブにより流れの方向を直接求めた(図中の矢印)との間に違いを示している。それゆえ流れの方向については X 形プローブによる方法が正確である。しかし自由よどみ点近くの流れはいずれの方法によっても正確な測定が困難である。