



Title	乱流自由混合域における傾斜平板の流体力学的特性
Author(s)	有江, 幹男; Arie, M.; 木谷, 勝 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 94, 11-20
Issue Date	1979-06-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41557
Type	departmental bulletin paper
File Information	94_11-20.pdf



乱流自由混合域における傾斜平板の流体力学的特性

有江幹男* 木谷 勝* 田村尚敬* 古川雅夫**
(昭和53年12月28日受理)

Aerodynamic Characteristics of Inclined Flat Plates Immersed in a Turbulent Free Mixing Layer

M. ARIE, M. KIYA, H. TAMURA and M. FURUKAWA
(Received December 28, 1978)

Abstract

Pressure distributions along the surface of inclined flat plates immersed in a turbulent plane mixing layer, which resulted from the mixing of a uniform flow with the same fluid at rest, were measured in order to clarify the time-averaged aerodynamic forces acting on the plates together with the flow pattern around them. The Reynolds number based on the height h of the plate and the main-stream velocity U outside the mixing layer was in the range $(3.31 \sim 5.71) \times 10^4$. The stagnation-pressure coefficient and the normal force coefficient were found to be well correlated with a parameter h/δ , where δ is the width of the mixing layer, for assigned values of the angle of attack and the ratio u_c/U , u_c being the velocity of the otherwise undisturbed mixing layer.

1. 緒 言

近接して存在する高層建造物、海洋構造物、熱交換器内の管群などの複数物体周辺の流れ、とくに物体間の流体力学的相互干渉が問題となる例は多数見受けられる。この場合、上流側物体の後流中に存在する下流側物体の流力特性は後流中の非一様変動流れの影響を受け一様流における流力特性とは大きく異なる。従来からこの分野に関する研究は多数報告されているが、Zdravkovich¹⁾による総括からも明らかなように、物体形状としては同一直径の円柱が採用されていることが多い。これに対し、建築構造物に多く見受けられる矩形物体についての研究は比較的少なく、代表的なものとして小林²⁾、Reinholdら³⁾によるものをあげうる程度である。本研究は下流側物体に作用する流体力を明らかとするために、上流側物体から放出されるはく離せん断層と類似の特性をもつ乱流自由混合域の内部における二次元傾斜平板の流力特性を実験的に求めたものである。したがって本実験結果は、上流側物体に比較して十分小さな下流側傾斜平板あるいは高さに比較して幅の小さな矩形柱について適用することができる。

2. 主 な 記 号

$$C_p \quad ; \quad \text{圧力係数} = (p - p_0) / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 \right)$$

* 機械工学科流体力学第一講座

** 株式会社日立製作所

$C_{p \max}$; 最大圧力係数

C_m ; 平板中心回りのモーメント係数 $= M / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 h^3 \right)$

C_n ; 法線力係数 $= N / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 h \right)$

h ; 平板の高さ (図 1)

L_x ; 混合域内の乱れの積分スケール

M ; 平板中心回りのモーメント

N ; 法線力

p ; 平板表面の静圧

p_0 ; 混合域の外部における圧力

Re ; レイノルズ数 $= Uh/\nu$

s ; 混合域の低速側平板先端からの距離 (図 1)

S_{st} ; 平板の低速側先端からよどみ点までの距離 (図 7)

u_c ; 平板の中心に対応する混合域の x 方向の平均速度 (図 1)

U ; 自由噴流のポテンシャル・コア内の x 方向の平均速度 (図 1)

x, y ; 風路出口端を原点とする直角座標 (図 1)

α ; 平板の傾斜角度 (図 1)

δ ; 傾斜平板設置位置における混合域の幅 (速度が $\frac{1}{4}U$ から $\frac{3}{4}U$ まで増加する間の y 方向の距離 図 1 参照)

η ; 無次元数 $= (y - y_{1/2}) / (x - x_c)$

ν ; 流体の動粘性係数

ρ ; 流体の密度

3. パラメータ

図 1 を参照しつつ、混合域内に存在する傾斜平板の流体力学的特性を規定するパラメータについて考察する。平板の幾何学的形状を規定するパラメータとして、平板の高さ h および傾斜角 α があげられる。また、流体の物性値としては、密度 ρ および動粘性係数 ν をとればよい。

混合域における流れは、その両側における二つの主流速度差に依存する。ここでは、高速側主流の速度を U 、低速側の速度を 0 とする。混合域における時間平均速度および乱れの分布は、下流方向の各位置で相似性をもつから、混合域の長さのスケールとして、適当に定義した幅 δ を採用することができる。なお、混合域における乱れの特性は、主流部分に含まれる乱れの強さおよびスケールにも依存するが、ここではこの効果を無視するものとする。

混合域の幅に対する平板の相対的大きさは h/δ によって表示される。これは、平板の高さの範囲にわたる混合域内の速度変化の大きさを表わす無次元パラメータと解釈できる。さらに、混合域の内部における平板の位置は、その中心に対応する混合域の速度 u_c と主流速度 U との比 u_c/U によって規定することができる。以上の考察により、混合域の内部に存在する傾斜平板の流体力学的特性は、 α 、 h/δ 、 u_c/U およびレイノルズ数 Uh/ν の四つの無次元パラメータによって表示しうるものと期待される。たとえば、平板表面におけるよどみ点圧力 p_{\max} は

$$(p_{\max} - p_0) / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 \right) = f \left(\alpha, \frac{h}{\delta}, \frac{u_c}{U}, \frac{Uh}{\nu} \right)$$

の形に表示することができる。ここに、 p_0 は混合域の外部における圧力である。

4. 実験装置および方法

実験には、 $340\text{ mm} \times 280\text{ mm}$ の矩形断面をもつ長さ 1 m の風路より放出される自由噴流と周囲の静止空気との間に形成される乱流自由混合域を採用した。供試平板のスパン方向の長さは 110 mm で高さを 30 mm および 50 mm の二種類に変化させた。各平板の先端は図1に示すように下流側に 30° の角度で削りである。また、平板のスパン方向における流れの二次元性を確保するために $500\text{ mm} \times 700\text{ mm}$ の2枚の端板を 110 mm の間隔で取り付けた。平板表面の圧力分布は、表面に適当な間隔で設けられた静圧孔からの圧力をベッツ型マノメータおよび精密微圧計に導き、大気圧との差圧として測定してある。

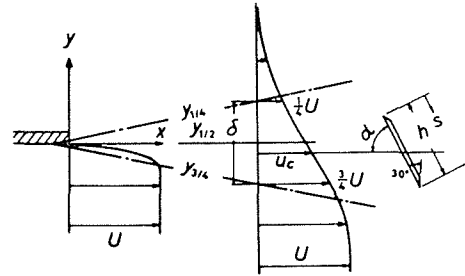


Fig. 1 Flow configuration and definition of symbols.

実験は風路出口近傍に形成されるポテンシャル・コア内の流速 U (図1参照) を 16.0 m/sec の一定値に保持して行ない、平板の傾斜角 α を $30^\circ \sim 150^\circ$ の範囲内で 15° 間隔に9通りに変化させた。乱流自由混合域における平板の中心は $u_c/U = 0.75, 0.5$ および 0.25 となる位置とし、それぞれの u_c/U の値について h/δ の値を $0.38 \sim 2.16$ の範囲内で変化させてある。平板の高さおよびポテンシャル・コア内の流速を用いて定義したレイノルズ数は $(3.31 \sim 5.71) \times 10^4$ の範囲内にある。なお、平板表面からの流れのはくり点(平板の両端)は固定されているので、流力特性におよぼすレイノルズ数の効果はほぼ無視することができる。

5. 実験結果および考察

5.1 乱流自由混合域の特性

乱流自由混合域内の平均速度および主流方向の乱れの強さ $(u'^2)^{1/2}$ の分布に対する測定結果を

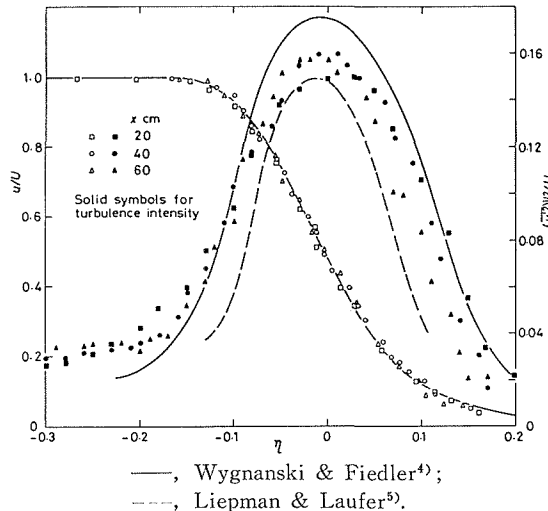


Fig. 2 Similarity of longitudinal mean velocity and turbulence intensity in the mixing layer.

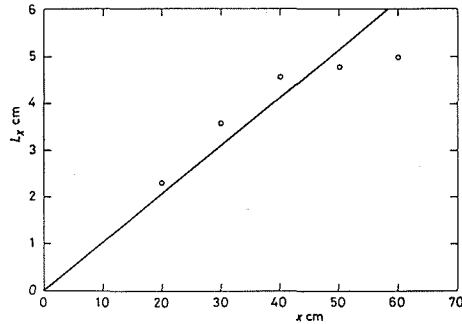
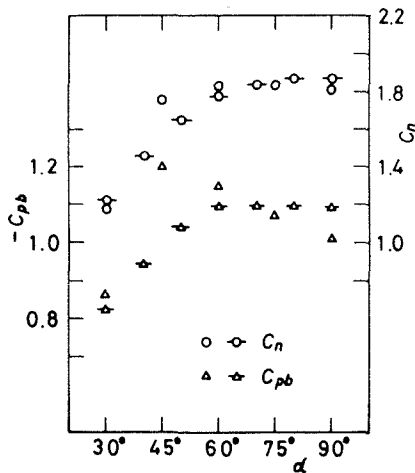


Fig. 3 Longitudinal length scale of turbulence in the mixing layer. ○, present measurement; —, Wygnanski & Fiedler⁴⁾.

図2に示してある。同図の横軸 η は平均速度が $\frac{1}{2}U$ となる位置の y 座標 $y_{1/2}$ (図1参照) および仮想原点 x_0 を用いて $\eta = (y - y_{1/2}) / (x - x_0)$ によって定義される無次元数である。供試平板の設置を予定している風路出口端より 20~60 cm の範囲では、平均速度および乱れの強さの分布は相似形を保っており、Wyganski & Fiedler⁴⁾ および Liepman & Laufer⁵⁾ の測定結果ともよく一致している。なお、図3には $y = y_{1/2}$ の位置で測定された乱れの積分スケール L_x の主流方向への変化を示してある。

5.2 一様流中にある傾斜平板の流力特性

傾斜平板に作用する流体力の測定精度を調べるために、風路出口端より 20 cm 下流におけるポテンシャル・コア内での傾斜平板表面の圧力分布を求めた。図4は各傾斜角における背圧係数 C_{pb} および法線力係数 C_n に対する本実験結果を Fage & Johansen⁶⁾ の結果と比較したものである。なお、Fage & Johansen の測定値については Maskell⁷⁾ による風洞壁の干渉効果の補正をほどこしてある。傾斜角が 45° の場合の比較の大きな差違を除けば、本実験結果は Fage &



○, △, present measurement; -○-, -△-, Fage & Johansen⁶⁾.

Fig. 4 Normal-force coefficient C_n and back-pressure coefficient C_{pb} as functions of angle of attack α .

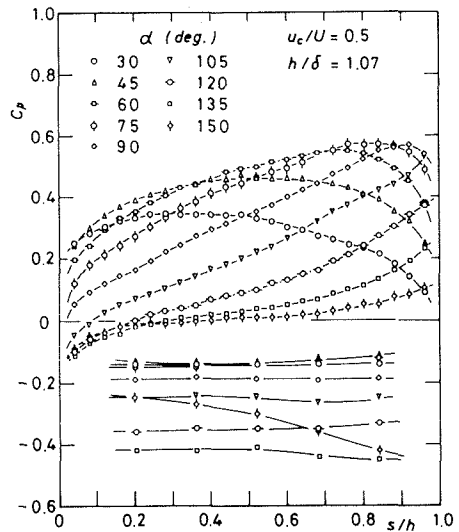


Fig. 5 Pressure distributions on the surface of inclined flat plates placed in turbulent plane mixing layer.

Johansen の測定値と数%程度の誤差内で一致している。このことより、乱流自由混合域の中におかれた傾斜平板の圧力分布および流体力についてもこれと同程度の精度が得られているものと期待できる。

5.3 混合域内にある傾斜平板の流体力特性

5.3.1 平板表面の圧力分布

平板表面の圧力分布の代表例として、 $u_c/U=0.5$, $h/\delta=1.07$ の場合の結果を、傾斜角 α をパラメタとして図5に示してある。この図より明らかなように、混合域の中にある傾斜平板表面の

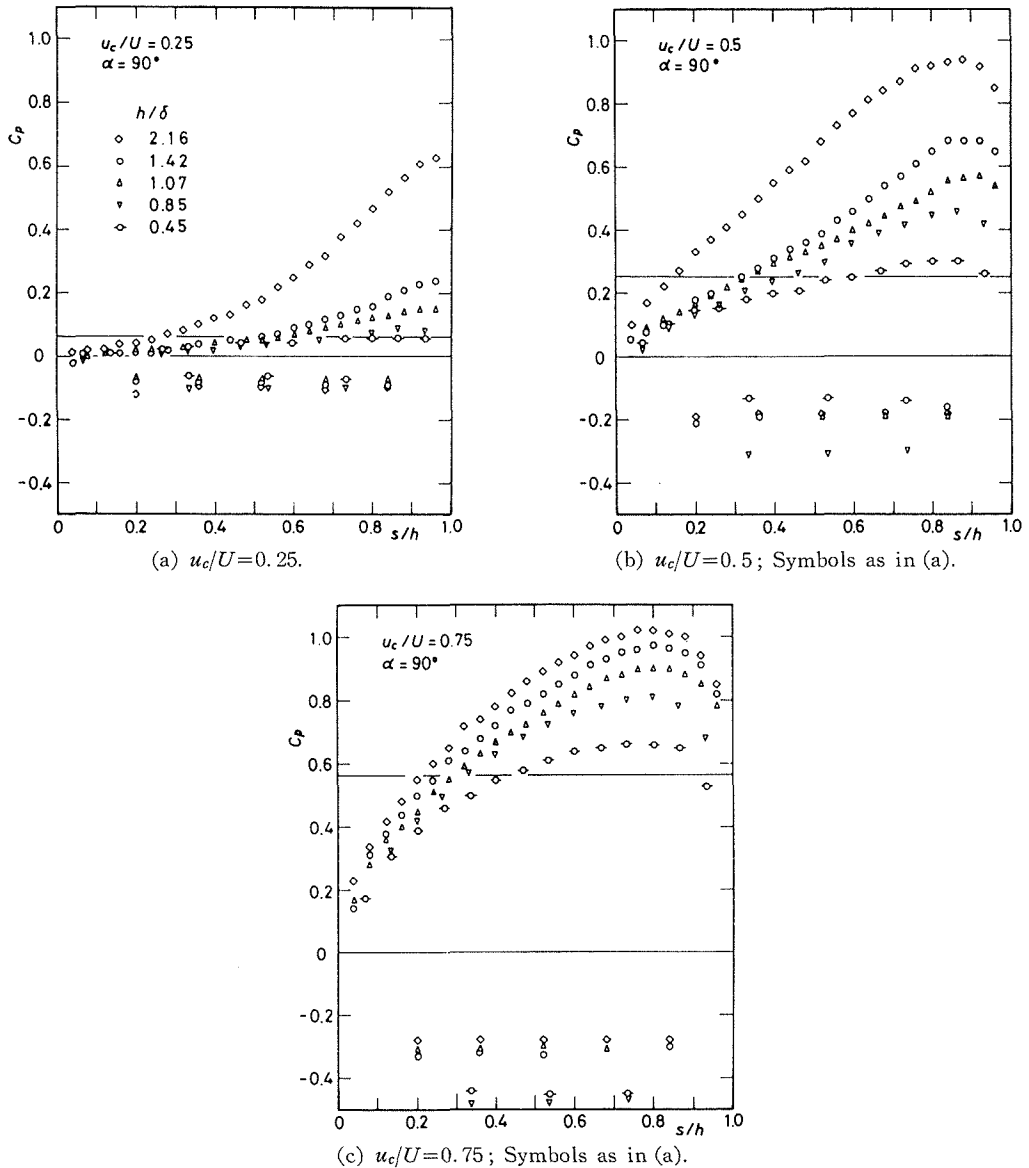


Fig. 6 Pressure distributions along the surface of normal plates placed in turbulent plane mixing layer. Horizontal lines above the zero level imply stagnation-pressure coefficients corresponding to uniform flow of velocity u_c .

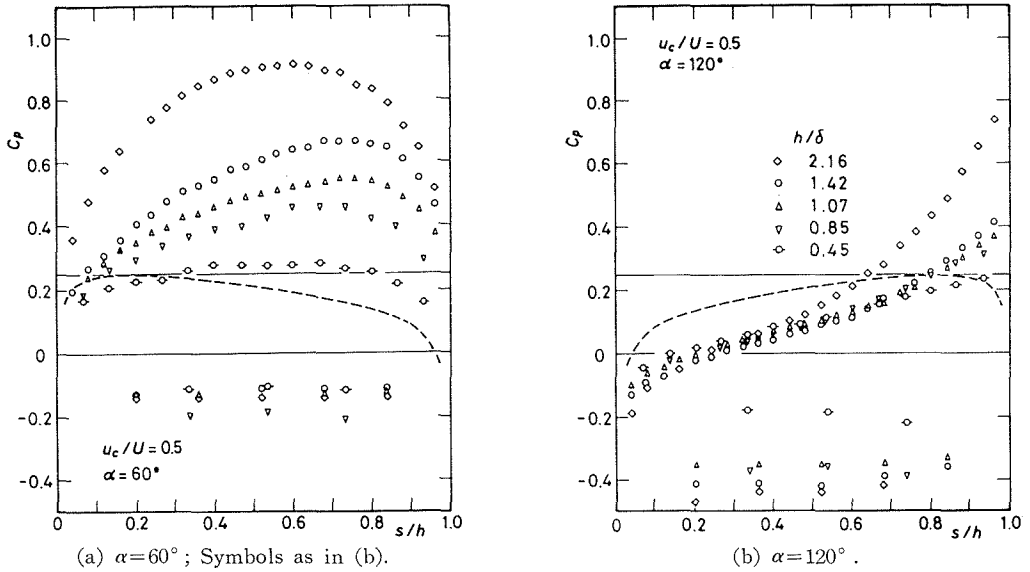


Fig. 7 Pressure distributions along the surface of two inclined flat plates at $u_c/U=0.5$.
 ---, pressure distribution along the front surface of the plates when placed in uniform flow of velocity u_c .

圧力分布形状は一樣流の場合とは大幅に異っており、とくに最大圧力点（よどみ点と考えることができる）が混合域の高速側に移動していることが指摘できる。また、 $\alpha=60^\circ\sim 105^\circ$ の範囲で最大圧力係数 $C_{p\max}$ はほぼ一定値をとることが認められる。このことは、 $60^\circ\sim 105^\circ$ の傾斜角では、ほぼ同一流れが平板に対するよどみ流れとなっていることを示している。これら二つの特徴は他の u_c/U および h/δ の場合についても定性的に同一であった。図 6 (a)-(c) は、 $\alpha=90^\circ$ の場合の圧力分布を、 u_c/U および h/δ をパラメタとして示したものである。 u_c/U が一定の場合、平板前面の圧力レベルは h/δ の減少とともに全体として減少するが、圧力分布形状はほぼ相似形を保つことがわかる。この傾向は他の傾斜角についても同様であった。また、最大圧力点の高速側への移動は、同一の傾斜角において、 u_c/U の値が小さいほど著しい。これに対し、背圧係数（平板後面の圧力係数）は h/δ の変化に対しかなり不規則な変化を示しており、両者の間に系統的な関係を見出すことは困難である。

図 7 (a), (b) は x 軸に対称な配置をもつ平板表面の圧力分布の代表的な例として、 $\alpha=60^\circ$ および 120° に対する結果を $u_c/U=0.5$ の場合について示したものである。近寄り流れが一樣流のときには、これら二つの平板のまわりの流れは力学的に等価であって、圧力分布も平板前縁からの距離の関数として表示すると同一なるべきものである。図中に破線で示した一樣流の場合と比較すれば明らかなように $\alpha=60^\circ$ の場合のよどみ点位置はより後縁側（高速側）に移動するのに対し、 $\alpha=120^\circ$ のときには、より前縁側（やはり高速側）へ移動する。なお、 $h/\delta \rightarrow 0$ の極限は一樣流の場合に相当するはずであるから、この極限における圧力係数は $(u_c/U)^2$ でなければならない。図 6 および 7 の図中に実線で示される圧力係数はそれぞれ $(u_c/U)^2$ を示している。

5.3.2 よどみ点位置および最大圧力係数

図 8 は $h/\delta=1.07$ の場合について、平板表面のよどみ点位置と傾斜角 α の関係を u_c/U をパラメタとして示したものである。なお、図中には参照のために一樣流におけるよどみ点位置もあわせてプロットしてある。混合域内の平板の位置を示すパラメタ u_c/U の値が小さいほど、よど

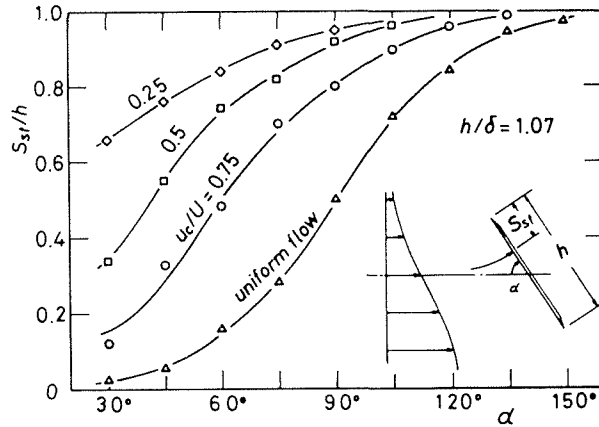
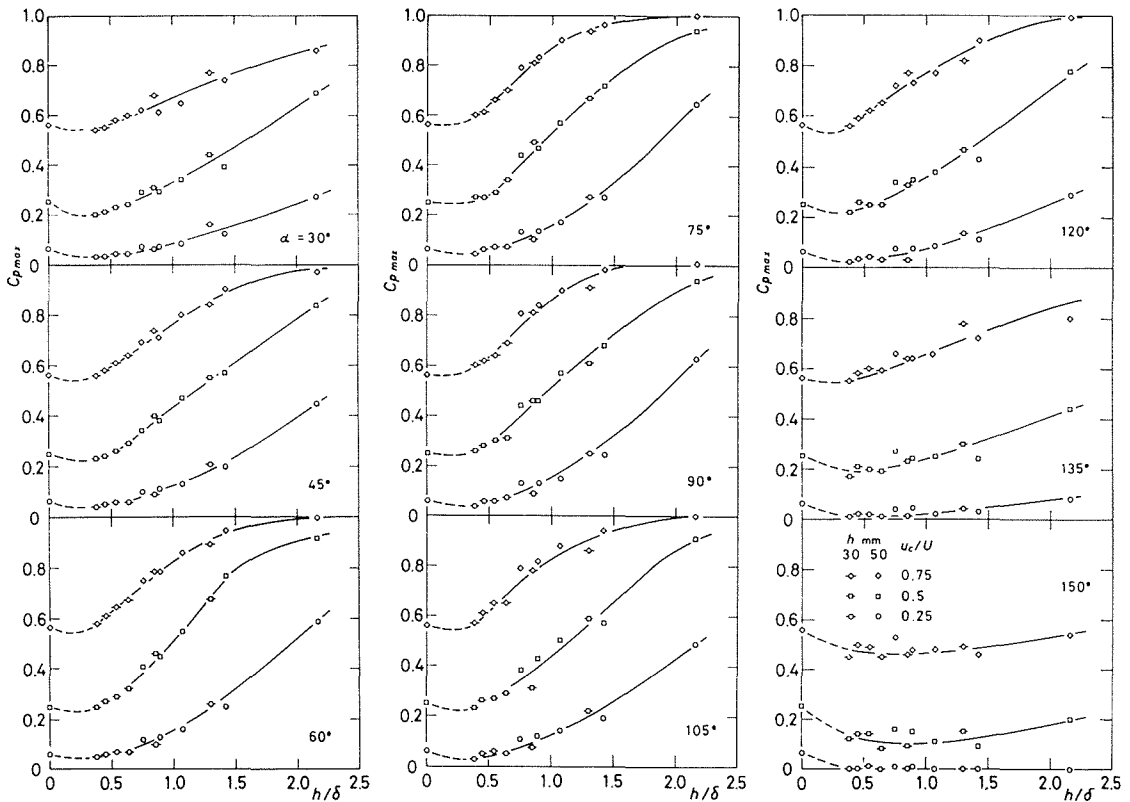


Fig. 8 Location of stagnation point S_{st} as a function of the angle of attack α .



(a) $\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$; Symbols as in (c). (b) $\alpha = 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ$; Symbols as in (c). (c) $\alpha = 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$.

Fig. 9 Stagnation-pressure coefficient $C_{p,max}$ as a function of the ratio h/δ .

み点位置の高速側への移動は著しいことがわかる。

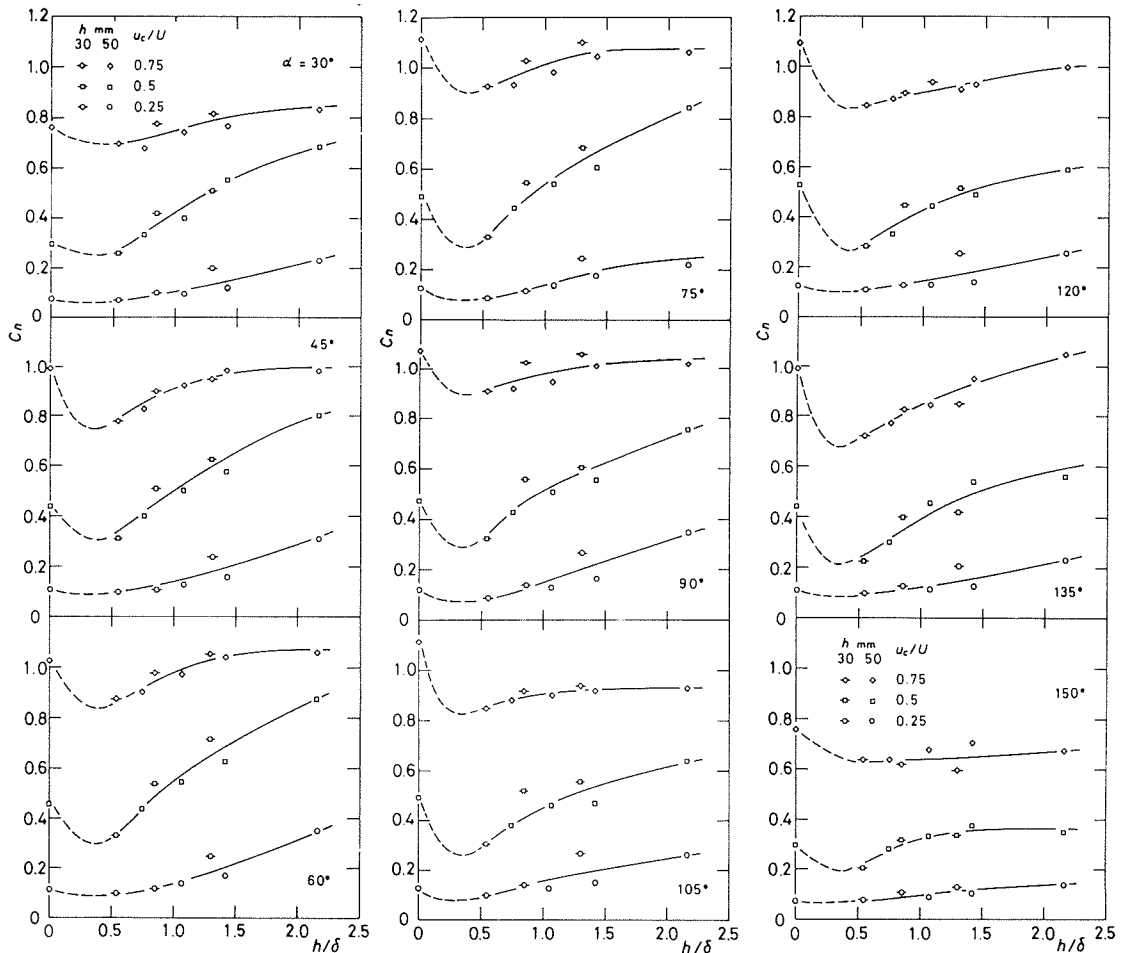
図9 (a)–(c) は平板前面の最大圧力係数 $C_{p,max}$ と h/δ の関係を u_c/U および α をパラメタとして示したものである。 $h/\delta=0$ における圧力係数は u_c の速度をもつ一様流中にある平板前面のよどみ点圧力係数 $(u_c/U)^2$ に対応する。 $C_{p,max}$ が $(u_c/U)^2$ よりも大きいことは、平板に対するよどみ流線が対応する一様流の場合の流線よりも高速側に位置していることを意味する。逆に $C_{p,max} < (u_c/U)^2$ のときには、よどみ流線は一様流の場合のそれよりも低速側に位置することに

なる。図9の一連のプロットから明らかなように、 h/δ の変化にともなって、これら二つの場合がともに出現しており、 h/δ と $C_{p\max}$ の関数関係は単調ではない。しかしながら、 u_c/U および傾斜角 α が一定の場合、種々の h/δ に対する $C_{p\max}$ の値は、個々の平板高さにかかわらず、一つの曲線上に集約される。

5.3.3 法線力係数および平板中心周りのモーメント係数

図10 (a)-(c) は傾斜平板の法線力係数 C_n と h/δ の関係を示す。図中の $h/\delta=0$ における C_n の値は、一様流での法線力に $(u_c/U)^2$ を乗じて算定されたものである。 C_n は $h/\delta=0.3\sim 0.4$ の範囲に極小値をもち、一般に h/δ の増加とともに増加する。 C_n と h/δ の関係は $C_{p\max}$ の場合と定性的に同一である。概括的にいえば、 $u_c/U=0.5$ および 0.25 については、乱流自由混合域の中におかれた傾斜平板に作用する法線力は、 u_c の速度をもつ一様流の場合の法線力よりも大きい。しかし、 $u_c/U=0.75$ のときには、逆に一様流中における法線力の方が大きくなる。

平板中心の周りのモーメント係数 C_m と傾斜角 α との関係を図11に示す。混合域内の傾斜平板においては最大圧力点が高速側に移動するため、 $C_m=0$ に対応する α は、一様流の場合に比



(a) $\alpha=30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$; Symbols as in (c). (b) $\alpha=75^\circ, 90^\circ, 105^\circ$; Symbols as in (c). (c) $\alpha=120^\circ, 135^\circ, 150^\circ$.

Fig. 10 Normal-force coefficient C_n as a function of the ratio h/δ .

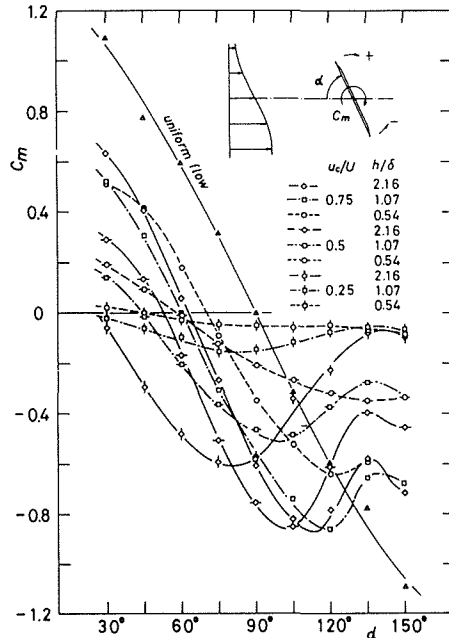


Fig. 11 Moment coefficient C_m as a function of the angle of attack.

較して大幅に小さくなる。これにともない、平板に作用するモーメントは、傾斜角の広い範囲にわたって反時計方向（図 11 の定義図参照）となる。

6. 結 言

本論文では、乱流自由混合域の中におかれた傾斜平板表面の圧力分布を測定し、これにもとづいて傾斜平板に作用する流体力およびモーメントを求めるとともに、当該平板周辺の流れの特性について簡単な考察を行なった。その主な結果を要約すれば次の通りである。

(1) 乱流自由混合域の中にある傾斜平板表面の最大圧力点（よどみ点）は一様流の場合に比較して混合域の高速側に移動する。その移動量は、混合域内の平板の相対位置を示す速度比 u_c/U に依存し、同一傾斜角では u_c/U が小さいほど大きくなる。

(2) パラメタ u_c/U および傾斜角 α が指定された場合、平板表面の最大圧力係数は、平板の高さ h と混合域の幅 δ との比 h/δ のみの関数として表わされる。

(3) 平板に作用する法線力係数 C_n は、 u_c/U および α が指定された場合、 h/δ のみの関数として表現することができる。

(4) 最大圧力点の高速側への移動のために、平板中心周りのモーメントは傾斜角の広い範囲について反時計方向（図 11 参照）となる。

最後に、測定方法および実験結果の検討に参加した鈴木雍宏助手および実験装置の作製にあたって援助を受けた山崎輝夫、山保敏幸両技官に謝意を表する。

文 献

- 1) Zdravkovich, M. M., J. Fluids Engng. Trans. A. S. M. E., Ser. I, 99-4 (1977-12), 618.
- 2) 小林, 日本機械学会論文集, 42-357 (昭 51-5), 1452.
- 3) Reinhold, T. A., Tieleman, H. W. & Maher, F. J., J. Ind. Aerodyn., 2-3 (1977-11), 223.

- 4) Wagnanski, I. J. & Fiedler, H., *Fluid Mech.*, 41-2 (1970), 327.
- 5) Liepman, H. W. & Laufer, J., *NACA TN 1257* (1947).
- 6) Fage, A. & Johansen, F. C., *A. R. C. R&M*, 1104 (1927).
- 7) Maskell, E. C., *A. R. C. R&M*, 3400 (1965).