

角柱まわりの流れ(Ⅱ)：平均流および平均圧力の測定

溝田, 武人
九州大学応用力学研究所：助手

<https://doi.org/10.15017/4743582>

出版情報：応用力学研究所所報. 46, pp.129-145, 1977-09. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：



角柱まわりの流れ(Ⅱ)

—— 平均流および平均圧力の測定 ——

溝 田 武 人*

概 要

一様流中にある、断面比 $1/0.4$ 角柱のまわりの平均流速ベクトル、および角柱の表面に作用する平均圧力を風洞実験により調べた。

正の迎角を付けた場合、上面側の流速が下面側に比べより加速され、その結果上面の圧力の方がより低くなる。上面と背面との間の後縁付近で流れが逆流し難くなり、それらの間で圧力の不連続が生じることによって正の揚力傾斜となる。

また種々の断面比の角柱の後流において速度分布に相似性が近似的に存在する。

1. ま え が き

前報¹⁾では、地上又は海中構造物の準定常的な空力弾性的不安定現象であるギャロッピング現象の発生に関連する基礎的研究として、構造物およびその部材の基本的断面形状である角柱のまわりの平均流速ベクトルを風洞実験により調べた結果を報告した。

すなわち迎角零度で周囲の流れが完全剝離型および再付着型を示す角柱として断面比 $1/1$ (正方形), $1/2$ および $1/4$ 角柱を例に、まず角柱まわりの逆流領域を含む比較的広い範囲における平均流線を描いた。さらに角柱近傍で従来死水域と称されその中で圧力は一定値とされてきた剝離流内部の平均流線を求めて、剝離渦の位置や, wake stagnation point, 後縁における逆剝離現象等をのべて、死水域内部の流れの構造を明らかにした。またギャロッピング現象の発生の十分条件である負の揚力傾斜が生ずるためには、まず死水域の内部における角柱の上下の表面の圧力に差が生じる必要がある。そして角柱に正の迎角を付けたとき下面における低圧が、下面だけで保たれなければならない。そこで周囲の流れが完全剝離型である断面比 $1/1$ 角柱については迎角 10° の場合においても平均流線を求めた。その結果、角柱下面の後縁は剝離流内部における流れを遮断する効果を持つことがわかった。その流れの遮断効果によって角柱下面の低圧が保持され、負の揚力傾斜の特性が生ずると指摘した。

しかし他方同じ完全剝離型の角柱であっても、迎角零度付近において揚力を直接測定した結果正の揚力傾斜を示す²⁾と考えられる断面比の角柱がある。このような角柱は準定常的に安定³⁾であるが、負の揚力傾斜を示す不安定な角柱と比較して、周囲の流れにはどのような違いがあるかを調べることは角柱まわりの流れと定常空気力の関係を総合的に把握するために重要である。

* 九州大学助手, 応用力学研究所

そこで本報では、はじめにこのような正の揚力傾斜を示す完全剝離型の角柱として、断面比 $1/0.4$ 角柱を例に、表面の平均圧力を詳細に求め、上下面や前背面の圧力分布が角柱の迎角や後縁の影響によりどのように変化するか等の問題を調べる。次に先に開発したタンデム型熱線プローブを使って、この角柱まわりの流速ベクトル測定し、特に剝離領域内部の流れの構造に着目する。そして先にのべた負の揚力傾斜を示す $1/1$ 角柱¹⁾と比較検討することによって、種々の断面比を持つ角柱に加わる揚力の特性とまわりの流れの問題を基本的に明らかにすることを目的とした。

最後に後方の流れの性質として種々の断面比を有する角柱後流の速度分布について相似性 (similarity) が存在することをのべた。

2. 実験方法

角柱まわりの平均流速の測定は前報と同じ風洞、およびタンデム型熱線流速計を使用して行った。また平均流線の求め方等はすべて、すでにのべた方法とまったく同様なのでここでは説明を省略する。

供試角柱の断面比は $1/0.4$ で、その寸法は高さ (H) $\times$ 幅 (D) $\times$ スパン長 $=150\text{ mm}\times 60\text{ mm}\times 700\text{ mm}$ で 60 mm の面を流れ方向に平行に設置した場合が迎角 (α) 零度である。角柱は 5 mm 厚の発泡スチロール (ウッド・ラック) 製で両端には直径 400 mm の円型端板を付け、流れの 2 次元性を保持する。なお迎角零度における背圧係数の値は他の実験値⁴⁾と一致している。また角柱表面の平均圧力を測定するために木製合板で同一形状の角柱を別に作製した。すなわち、この角柱のスパン方向の中央部に 15 mm 厚の亚克力樹脂板を挟み、その周上の表面に直径 1 mm の圧力孔を 4 面の合計で 50 箇所あける。圧力孔に加わる圧力は角柱の内部からビニールチューブの導管を使って風洞の外へ導く。圧力の測定には、ダイヤフラム型の微圧計を用い、その電気的出力をローパスフィルター (0.3 Hz) で時間平均化して X-Y レコーダに記録することにより求める。圧力の測定値 P は $C_p = (P - P_\infty) / \frac{1}{2} \rho U^2$ と無次元化する。ここで、 P_∞ は風洞内静圧、 ρ は空気密度、 U は一様流速で、 $U = 6.9\text{ m/sec}$ に設定した。 $\frac{1}{2} \rho U^2$ はよどみ点圧力である。

3. 揚力傾斜および表面圧力分布

はじめに、広い範囲の角柱断面比の違いによる迎角零度付近の揚力傾斜 $dc_{FY}/d\alpha$ ⁵⁾ の変化を図 1 に示す。 $dc_{FY}/d\alpha$ を求めるための代表長はすべて角柱の長辺を基準とする。図中 $\circ$ 印は角柱に加わる 3 分力を直接測定し、 $\bullet$ 印は表面圧力の測定値から⁶⁾、各々求めた値である。従って $\circ$ 印は表面摩擦による成分が含まれ、 $\bullet$ 印は含まれていない。 D/H の変化にともなって、 90 度平板から零度平板へと角柱の形状は変化するが、 $dc_{FY}/d\alpha < 0$ となる準定常的に不安定な断面比は $D/H \div 0.6 \sim 2.8$ の間である。 $D/H > 2.8$ で再付着型の流れであって、いったん $dc_{FY}/d\alpha > 2\pi$ となり、 D/H が大になるにつれ断面形状は零度平板に近くなり $dc_{FY}/d\alpha \div 2\pi$ に漸近的に近づく。 $D/H < 2.8$ ではすべて完全剝離型の流れである。角柱表面に作用する摩擦力による力の成分がほぼ無視できるとし、完全剝離型の角柱に関する負の揚力傾斜の発生の説明として従来から行われている定性的方法^{7,8)}に従えば、 $D/H < 2.8$ のすべての断面が負の揚力傾斜になるので、 $D/H < 0.6$ の正の揚力傾斜の部分の説明できない。

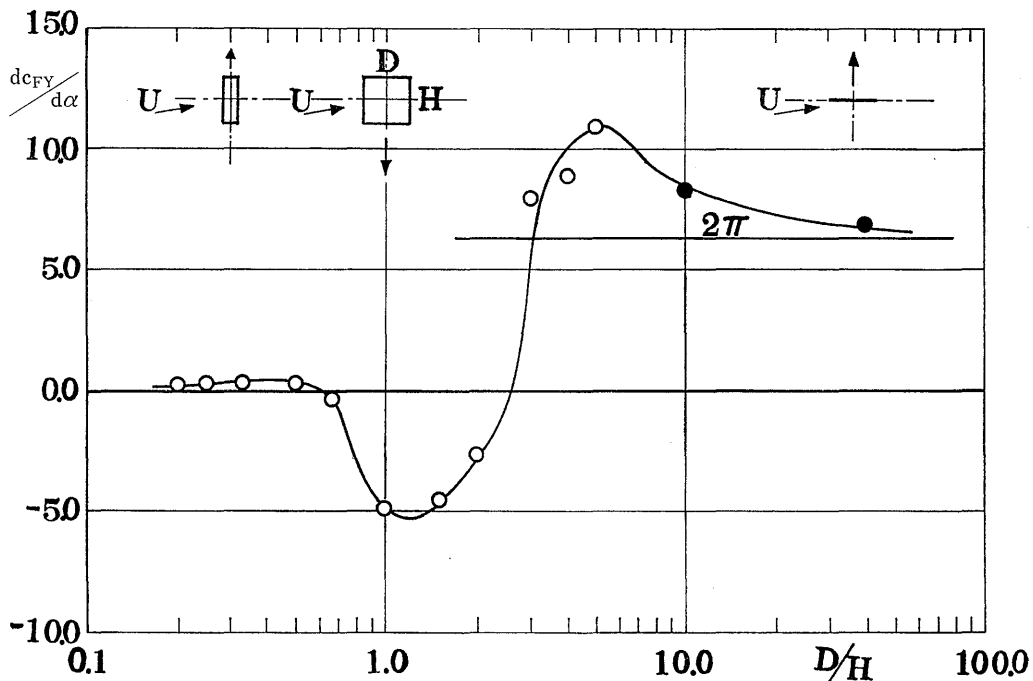
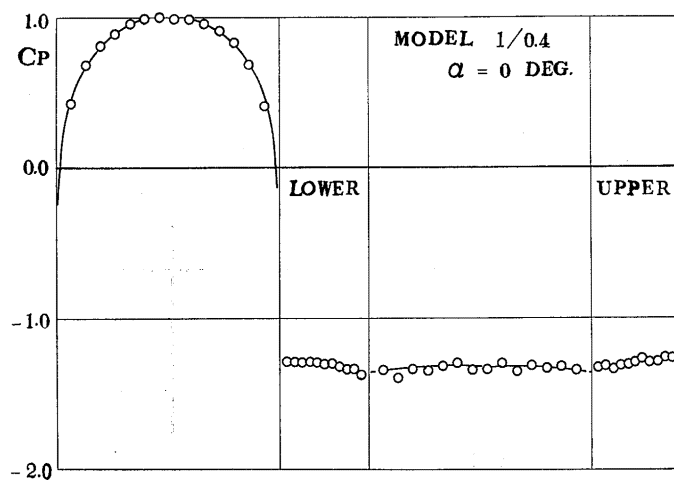
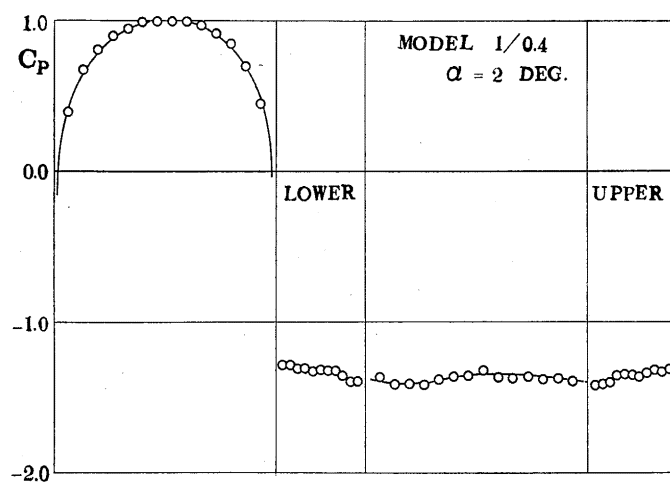


図1 角柱断面比と揚力傾斜 (その1)

このような揚力傾斜の特性を調べるために角柱まわりの表面圧力分布を知ることがまず必要である。しかしながら角柱のまわりの平均圧力分布を測定した例は多数^{5)・6)・9)}あるが特に比較的薄い断面について微小な迎角の変化にともなう、上下面や背面の圧力が、前縁や後縁の影響のもとにどのように変化するか、という観点から調べた例はない。そこで、完全剥離型の角柱で正の揚力傾斜を示す断面比である $1/0.4$ 角柱のまわりの表面圧力分布を迎角の変化をパラメーターとして詳細に測定した。その結果を迎角零度から 15° について図2a～2gに示す。

まず迎角零度(図2a)では、角柱背面と上下面の後縁付近における圧力差がほとんど無いことが、 $1/1$ 角柱の場合⁵⁾と相違している。迎角を $2^\circ \sim 10^\circ$ へと増加させるにつれて(図2b～2f)、 $1/0.4$ 角柱の前面におけるよどみ点は下面側に移動する。そして下面における圧力の分布は定性的にも定量的にもほとんど変化しないが、上面の圧力分布は迎角の増加とともに分布形状が変化し、値は次第に低下する。すなわち上下面の圧力差は、 $dc_{FY}/d\alpha > 0$ となることに寄与しており、 $1/1$ 角柱と逆の傾向を示す。また角柱背面における圧力分布には、まず迎角の増加とともに中心より下面に近い側に、より低圧部の谷ができるが、下面後縁に接近するにつれて圧力は回復して、比較的滑かに下面の圧力と接続している。一方上面に近い背面圧力は、迎角の変化に対してほとんど無変化である。上面の後縁付近の圧力が迎角の増加とともに徐々に低下することによって、後縁の上面と背面との間の圧力の不連続が著しくなる。

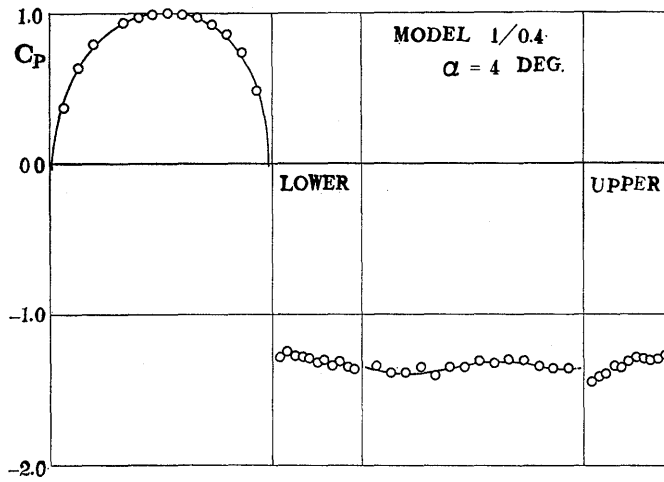
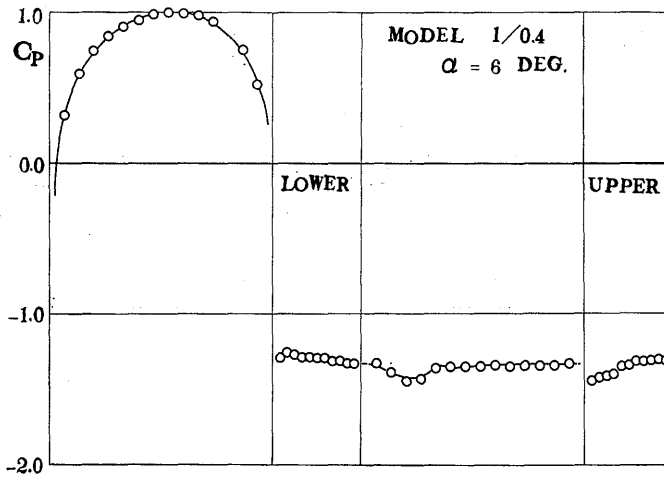
ここで再び、完全離型角柱について、 $dc_{FY}/d\alpha$ を図3に示す。図中●印は圧力分布より求めた値で、 $D/H=0.1, 1.0$ は各々他文献^{5)・6)}によった。 $D/H=0.4$ については図2a～2fに示した測定値から、

図 2 a 角柱まわりの平均圧力分布 ($\alpha=0^\circ$)図 2 b 角柱まわりの平均圧力分布 ($\alpha=2^\circ$)

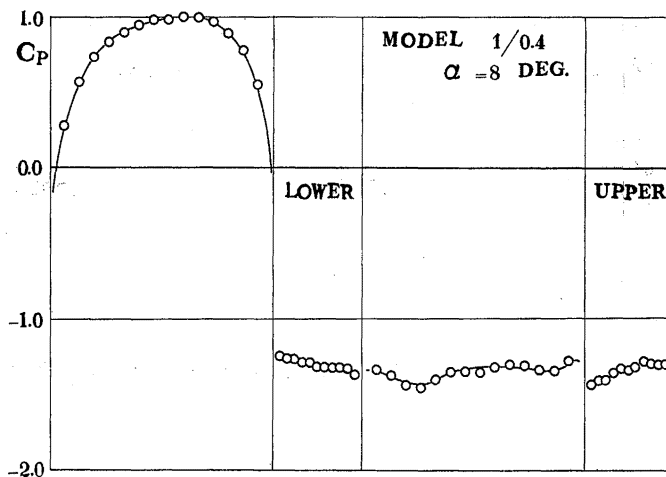
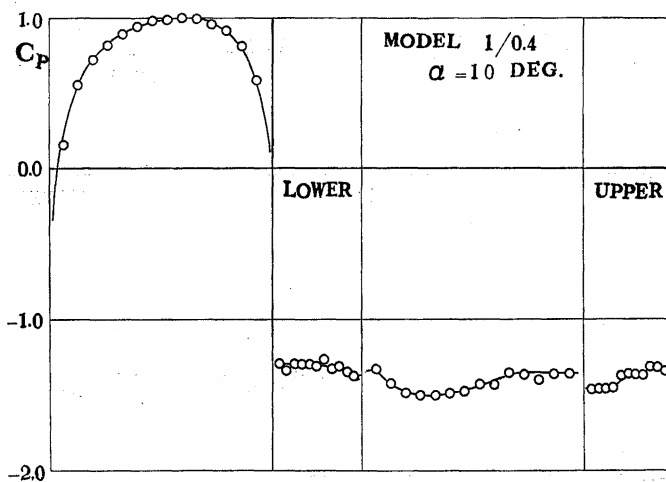
上下面の圧力分布を積分して求めた値である。このように、角柱に作用する力を直接測定して求めた値と、表面圧力を測定して求めた値は多少異なるが、 $D/H < 0.6$ においても、上下面の圧力分布の差による寄与だけで正の揚力傾斜となっていることが明白に判る。以上により 1/0.4 角柱まわりの表面圧力分布の迎角変化にともなう様子が明らかになった。

4. 平均速度分布

完全剥離型の流れを有する角柱に作用する負の揚力傾斜の発生は、角柱前縁の下面の角を廻る流れが上面のそれに比べ曲率が大きく、加速されるために、下面側でより低圧が実現される、と説明されてい


 図 2 c 角柱まわりの平均圧力分布 ($\alpha=4^\circ$)

 図 2 d 角柱まわりの平均圧力分布 ($\alpha=6^\circ$)

る^{7)・8)}。しかし3節でのべたように、完全剥離型の流れを示す角柱でも $D/H < 0.6$ の場合は、上面でより低圧が実現されている。そこで、迎角零度、10度における角柱まわりの平均流速の絶対値 W を 1/1, 1/0.4 角柱の場合について測定した結果を図4, 図5に示す。流速 W の符号は主流方向成分 U の符号によった。1/1 角柱の場合、迎角10度では、 W の最大値は、 $-0.5 < X < -0.1$ の間で上下面ともほぼ同一値を示すが、 $0.1 < X < 0.5$ では上面側に比べ下面側の方がより加速されていることがわかる。このことは下面側の方がより低圧になることと定性的には対応していると云えよう。次に1/0.4 角柱においては、迎角10度の場合、 $-0.2 < X < 0.0$ で上面側の W の最大値の方が下面側のそれより大きく、流れは上面側で加速されている。従って、角柱上面の圧力が下面に比べより低圧になっていることと対

図 2 e 角柱まわりの平均圧力分布 ($\alpha=8^\circ$)図 2 f 角柱まわりの平均圧力分布 ($\alpha=10^\circ$)

応する。

5. 平均流線

次にこのような正の揚力傾斜を示す完全剝離型の角柱である 1/0.4 角柱のまわりの流速を調べ、その結果から平均流線を用いて、前報でのべた 1/1 角柱のまわりの流線や他の報告¹⁰⁾と比較してのべる。

5.1. 迎角零度の場合

まず図 6 として迎角零度における平均流線を示す。本図からこの角柱のまわりの流れは中心軸上 $X=2.2$ に wake stagnation point があり、 $X=0.8$, $Y=0.4$ に渦の中心を持つことがわかる。なお最近

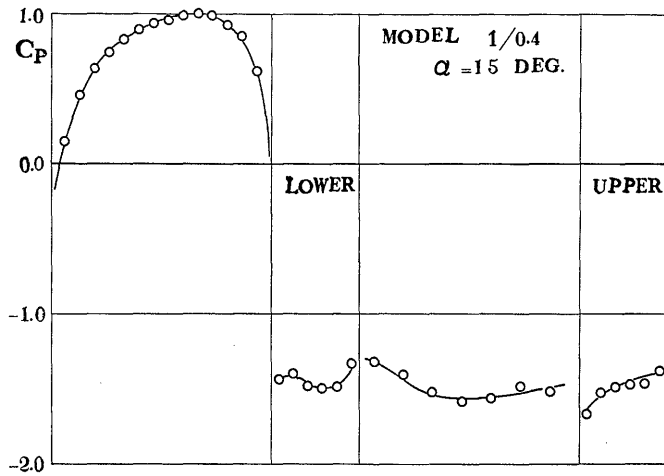


図 2 g 角柱まわりの平均圧力分布 ($\alpha = 15^\circ$)

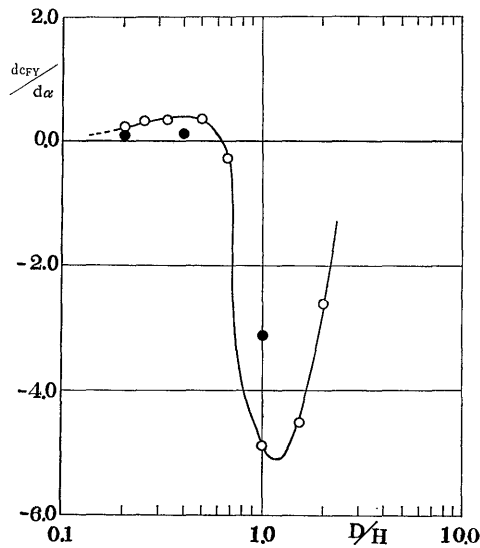


図 3 角柱断面比と揚力傾斜 (その 2)

Bradbury¹⁰⁾ は pulsed hot-wire を用いて 90 度平板まわりの流速分布を求めて平均流線を描いているが、図 6 はそのようなさらに薄い断面のまわりの流れとほぼ一致している。

次に図 7, 図 8 に 1/1, 1/0.4 角柱の迎角零度における上面近傍の平均流線を比較して示す。1/1 角柱では、迎角零度ですでに図中上面側の流れに対して後縁が流れの遮断効果を持ち、角柱背面と独立な循環流が形成されているが、1/0.4 角柱においては、そのような循環流はなく背面の流れと連続して循環流を構成している。この違いは、迎角零度において、角柱の上面と背面の後縁付近に平均圧力の不連続があるか、ないかに対応しているようである。すなわち、1/1 角柱では後縁を境に圧力の不連続があ

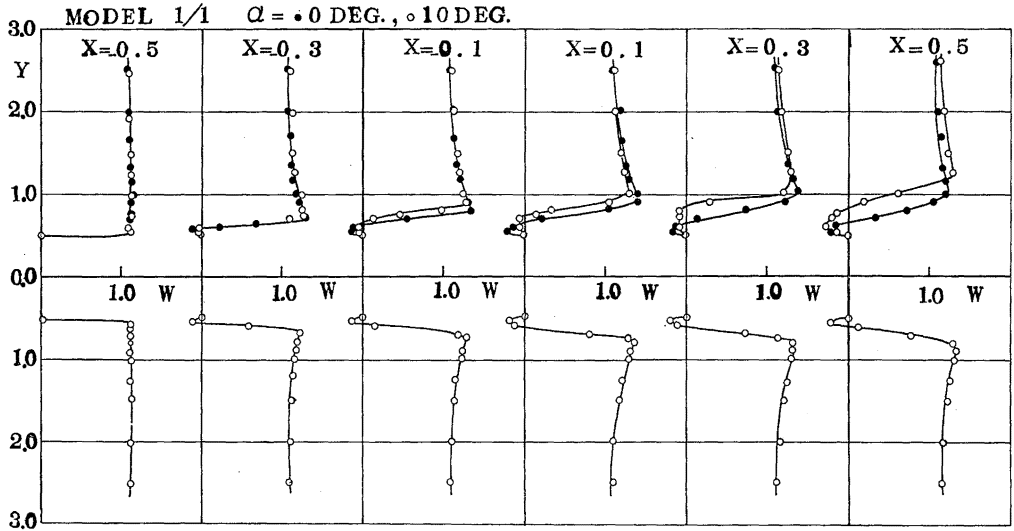


図4 角柱まわりの流速, 1/1角柱, $\alpha = 0^\circ, \alpha = 10^\circ$

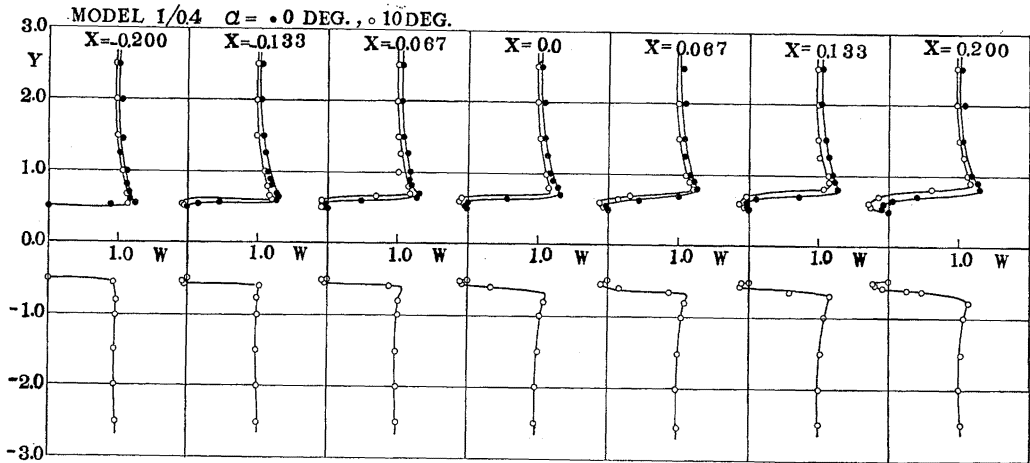


図5 角柱まわりの流速, 1/0.4角柱, $\alpha = 0^\circ, \alpha = 10^\circ$

り, 1/0.4 角柱では図2 aで示したようにほぼない。また, 1/1, 1/2 角柱の後縁付近の流れは複雑で, 後方からの逆流によって, 後縁付近に逆剝離領域が存在することをのべた。1/0.4 角柱にも, 測定の結果そのような領域があるが, その大きさは1/1, 1/2 角柱の場合に比べると小さい範囲に限られる。この逆剝離渦の存在は迎角零度における角柱の上下面と背面との間の流れや圧力の遮断効果に何らかの意味で関連があるものと考えられる。すなわち前報でのべたように, この逆剝離渦の大きさは, 1/2 角柱で比較的大きく, 1/1 角柱では, 少し小さく, さらにこのように1/0.4 角柱では非常に小さい。それに対して, 迎角零度における上下面と背圧の圧力差は後縁を境に 1/2 角柱⁶⁾で大きく, 1/1 角柱⁶⁾

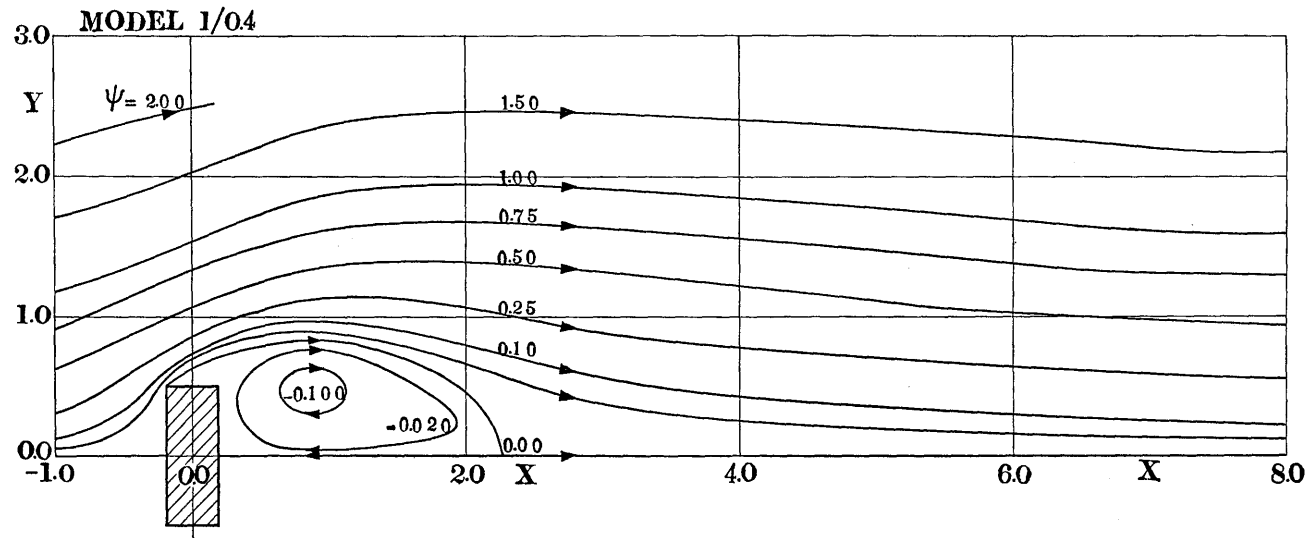


図6 1/0.4 角柱まわりの平均流線 ($\alpha=0^\circ$)

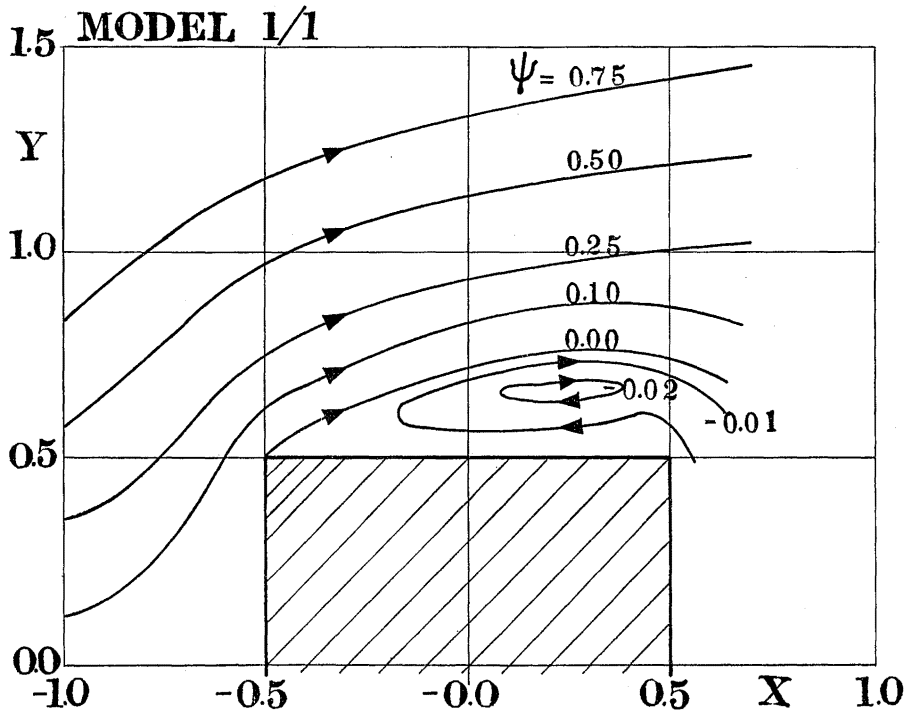


図7 1/1 角柱近傍の平均流線 ($\alpha=0^\circ$)

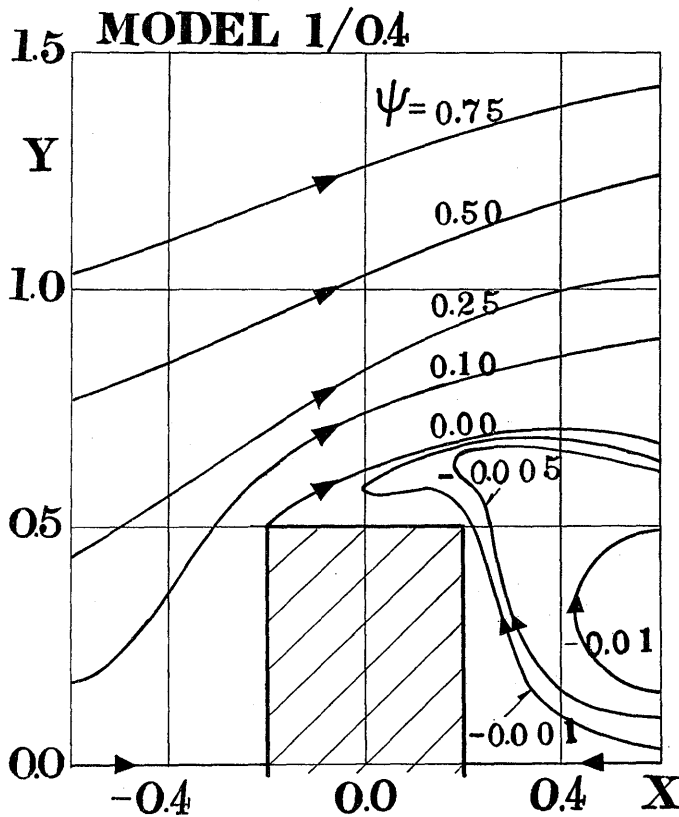
ではややその差は縮少し、1/0.4 角柱ではほとんど無いのである。

5.2 迎角 10 度の場合

一方剥離領域内部の循環流の形状等は角柱に迎角を与えた場合、断面比の違いによって、どのように変化するであろうか。1/1 角柱についてはすでにのべたように、迎角 10 度で下面後縁が剥離流中で流れの遮断効果を増して、下面側の自由剪断層の加速に基く低圧を下面だけで保持することがわかっている。

1/0.4 角柱の場合について図 9 にまず迎角 10 度の広い範囲の平均流線を示す。図からわかるように、迎角零度に比較すると wake stagnation point は、わずかに角柱に近づくが、平均循環流による渦の中心位置は、 X 方向にはほとんど移動していない。次に迎角 10 度の場合について、1/0.4 角柱の上下面近傍の平均流線を図 10 に示す。1/1 角柱と違い、下面側において、後縁は流れの遮断効果を持たず平均流線は角柱背後と連続して循環流を構成している。これは、3 節でのべたように、角柱下面と背面の圧力が後縁を境にしてほとんど差が生じないことと対応している。一方上面側においては、1/1 角柱の下面側における流れの遮断効果ほど明確ではないが、 $\psi = -0.005$, -0.010 の平均流線で示されるように、流れは後縁近くを通過した後に上面に沿わず、曲率を持って後縁近くの上面を避けて流れている。上面の後縁をまわる流れとしては、流れ難いことを示すと考えられる。すなわち上面だけで低圧が保持されることになり、その結果正の揚力傾斜の特性を持つことになる。

このように同じ完全剥離型角柱であっても、前縁の 2 個所の剥離点以後の物体形状という境界条件の

図8 1/0.4 角柱近傍の平均流線 ($\alpha=0^\circ$)

違いは、死水域と称されていた剝離領域内部の複雑な流れや自由剪断層付近の流れを全体として微妙に変化させる。その効果は角柱の揚力特性という空力特性に大きな影響を及ぼす。そして、動的に安定であるか否かという、構造物の耐風安定性を左右する問題に決定的な役割を持つことがわかる。

6. 後流の流速分布の similarity

以上は平均流れのうち、準定常的不安定現象に関して角柱に比較的近い部分における流れの性質をのべた。次にここでは角柱の後流の平均流れの1つの性質として、平均速度分布の similarity について考えよう。

低いレイノルズ数範囲における速度欠損の similarity については、円柱後流の定常流れの場合¹¹⁾においてすでにのべられている。また高いレイノルズ数範囲においても、物体後流の中心線上においてのみ平均流速と静圧に種々の断面について similarity が存在する¹²⁾ことが調べられている。しかし、速度欠損領域の広い部分にわたる similarity については現在までわかっていない。

そこでまず後流のある断面、 $X=\text{一定}$ 、における流速 U の最大値を U_{max} 、後流の中心線上の流速を U_c とする。流速の値が $(U_{max}-U_c)/2$ となる後流の幅を $b_{1/2}$ として、 $b=b_{1/2}/0.441$ の b を

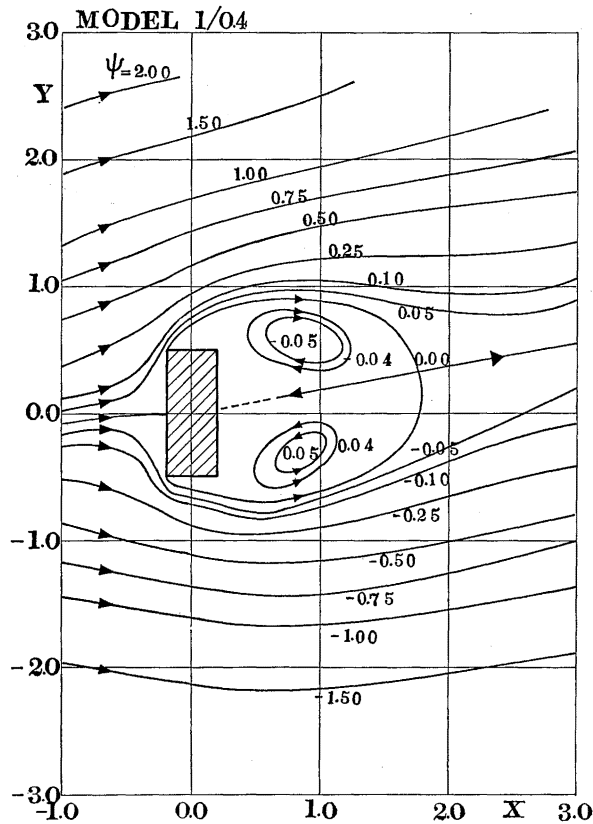


図 9 1/0.4 角柱まわりの平均流線 ($\alpha=10^\circ$)

後流が拡がる代表長として Y 方向の位置を整理する. $Y/b \sim (U_{max} - U)/(U_{max} - U_c)$ の関係を迎角零度の角柱について、各々求め、図 11a, 11b, 11c, 11d に示す. 図中 $\odot$ $\otimes$ 印は逆流部の流速である. 実線は、物体の充分後方に対して、平行流等の仮定のもとに境界層方程式を適用し理論的に求められた¹⁹⁾ 速度分布である. このような物体近くにおいては本来適用される理論ではないが、測定結果の index として記した. このように、後流の速度欠損領域のほぼ全域にわたって、角柱断面比によらず近似的に速度分布に similarity が成立している. しかし細部にわたり観察すれば 1/2 角柱の場合 (図 11 c), 他の角柱と少し異った分布を示すが、これはこの角柱の後流はとりわけ逆流の範囲が大きく、 $\psi=0$ の平均流線が長く後方にのびていることに起因すると考えられる.

7. 結 論

本報においては、主として 1/0.4 角柱の表面圧力、および角柱まわりの平均流速の性質をのべた. ここではまず本報のまとめをのべ、次に前報と比較して角柱まわりの平均流れの総合的なまとめを行う.

7.1. 1/0.4 角柱の結論

まず 1/0.4 角柱の迎角零度～15 度における表面圧力分布の測定結果から以下の結論を得た。

- 1) 迎角零度で、角柱上下面と背面の圧力は、後縁を境にしてほぼ連続的に接続している。
- 2) 迎角を付けると上面の圧力が低下し、下面はあまり変化しない。
- 3) そのとき下面と背面の圧力は後縁ではほぼ連続しているが、上面と背面の間で後縁を境にして、圧力の不連続が発生する。
- 4) 上下面の圧力差によって正の揚力傾斜となる。

次に同じ角柱のまわりの平均流速分布の測定結果から以下の結論を得た。

- 5) 迎角を付けた場合、角柱近傍の自由剪断層付近における角柱上面側の絶対流速が下面側のそれに比べ加速される。

- 6) 零度および 10 度において 比較的広い範囲の平均流線が明らかになった。

- 7) 零度では、上下面側と背面の平均流線は、死水域内部において連続している。10 度の場合では、下面と背面の後縁付近では連続しているが、上面と背面の後縁付近では、背面から上面へ流れる流線は、後縁をすぎて大きな曲率を持っておりこの部分で流れ難いことを示している。

7.2. 角柱まわりの平均流れの結論

前報と本報でのべた完全剥離型および再付着型の角柱のまわりの流れの基本的な性質をまとめる。

従来このような比較的高いレイノルズ数における鈍い物体まわりの流れのうち剥離領域内部については死水域と称され時間平均的には静止していると考えられてきた。しかし、例えば角柱の準定常的不安定現象に関連して負の揚力傾斜の発生の原因を考えると、剥離領域内部における圧力の不均一さが重要な因子である。そのためにはこの部分において時間平均的な流れが存在することが不可欠である。特に角柱の 4 個所の角の効果や、迎角の変化がどのように内部の流れに影響を与え、そのことが場所的に圧力が保持されたり、又は連続することに及ぼすメカニズムを知ることは重要な意味を持つ。そこでこのような問題を実験的に調べるために、タンデム型熱線プローブを開発し、これを使用して実際に風洞実験により剥離領域を含めた角柱まわりの時間平均的な流速を調べ、流線を書いて以下の結論を得た。

- 1) 完全剥離型、再付着型の流れを示す種々の断面比の角柱のまわりの広い範囲にわたる平均流線を定量的に画いた。そして従来死水域と称されていた剥離領域内部の平均渦や wake stagnation point の位置等の流れの構造が明らかになった。

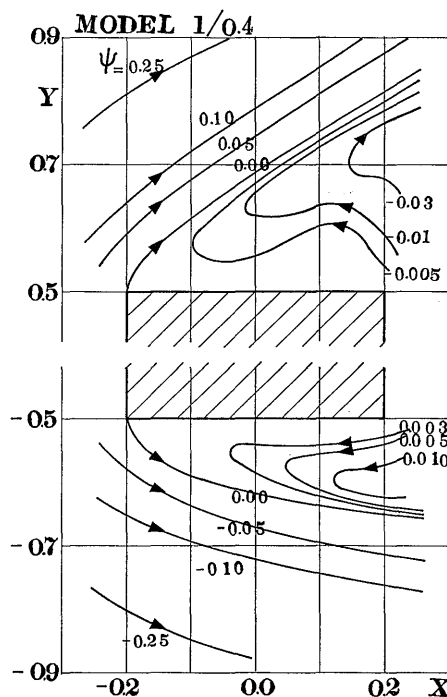


図 10 1/0.4 角柱近傍の平均流線 ($\alpha = 10^\circ$)

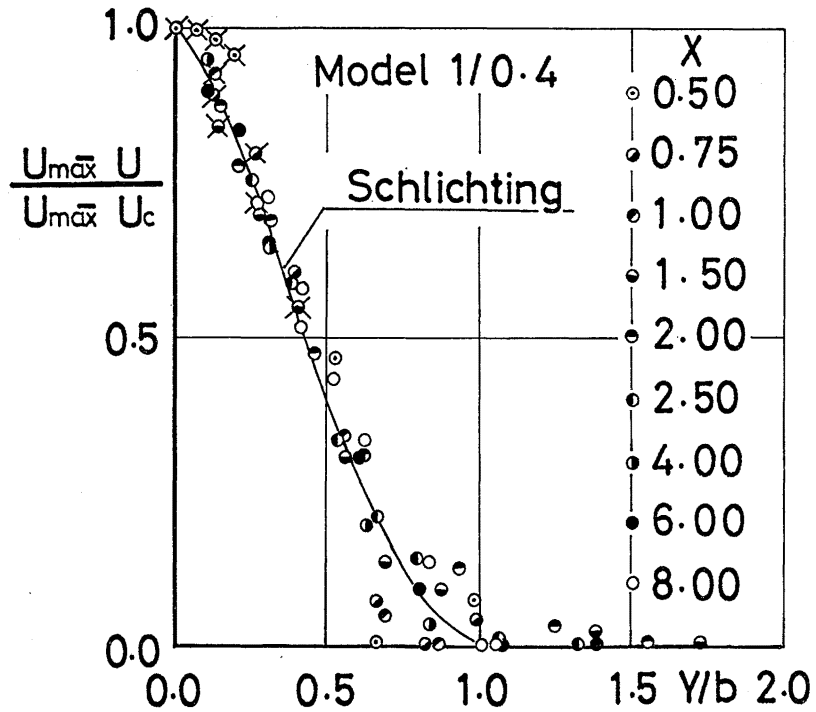


図 11 a 角柱後流の similarity (1/0.4 角柱)

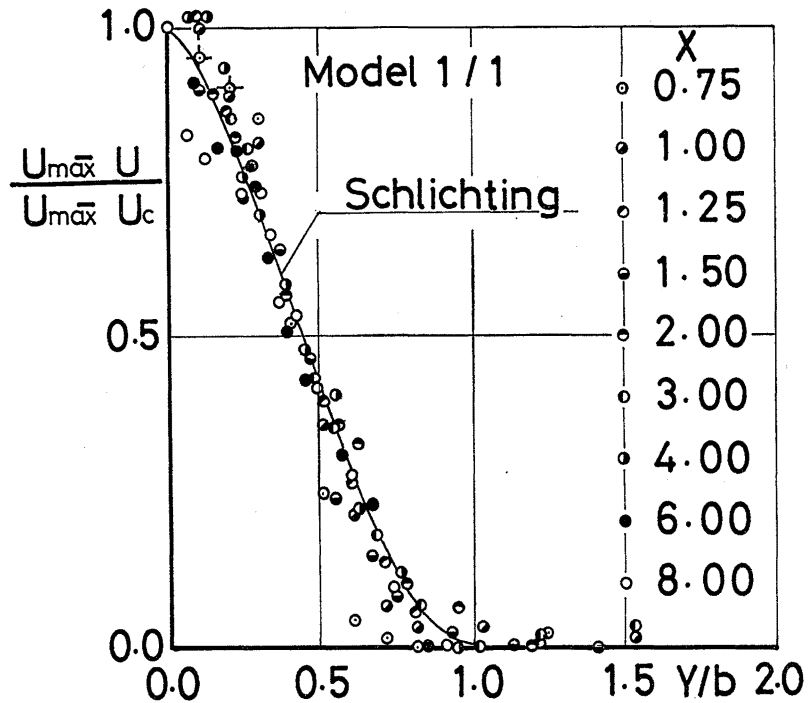


図 11 b 角柱後流の similarity (1/1 角柱)

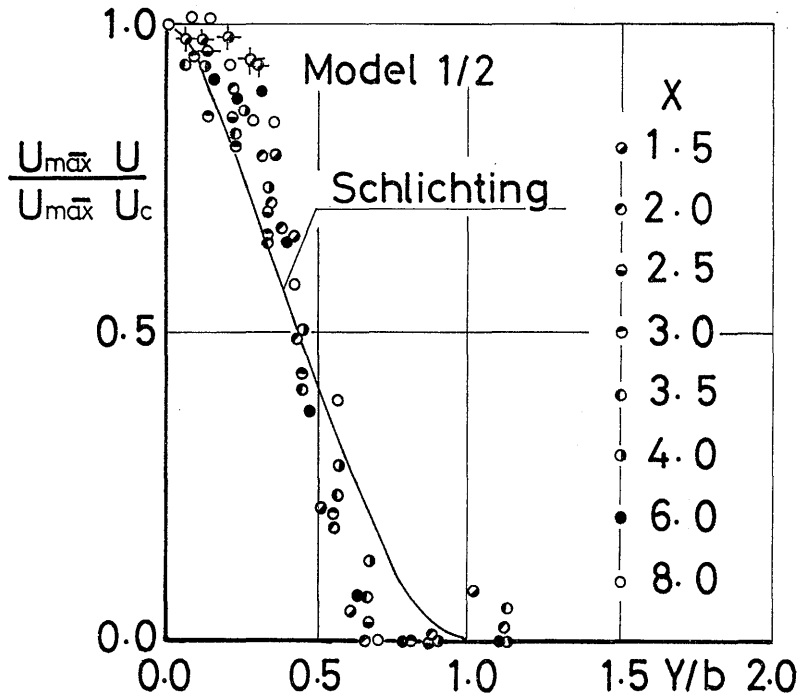


図 11 c 角柱後流の similarity (1/2 角柱)

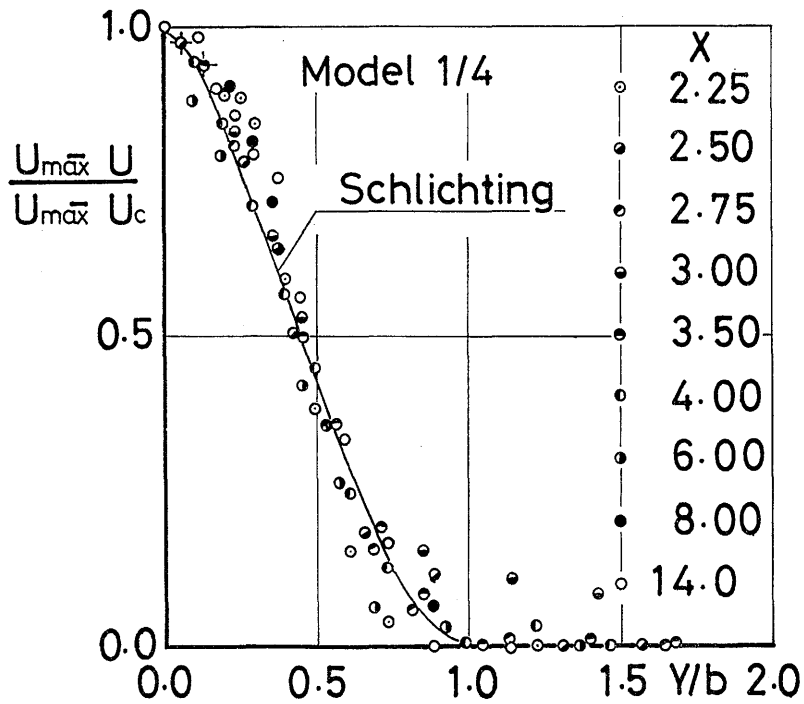


図 11 d 角柱後流の similarity (1/4 角柱)

- 2) 完全剝離型の角柱の後縁付近には、逆流によって、局所的に平均的逆剝離渦が形成されている。
- 3) 完全剝離型の角柱においても断面が薄い場合には迎角零度で上下面と背面で圧力の差はほとんど無いが、厚い場合には圧力差が存在し、上下面の方がより低い。薄い断面のまわりの平均流線は後縁を境にほぼ連続している。他方厚い断面の上下面には独立な循環流が存在している。すなわち、前者の後縁は流れの遮断効果があまりなく、後者にはそれがある。
- 4) 迎角を付けると、完全剝離型の角柱の中でも薄い場合、自由剪断層付近の流速は上面側の方がより加速され下面より低圧となる。しかも上面後縁付近が流れの遮断効果を持ち、下面後縁付近は流線が連続しており流れの遮断効果が少い。従って上面の低圧は上面だけで保持され、結果として正の揚力傾斜を生む。
- 5) 4) に対して厚い場合、逆に自由剪断層付近の流速は、上面側に比べ下面側がより加速され、下面がより低圧となる。そして下面付近に独立な循環流を形成することから、下面後縁が流れの遮断効果を持つと考えられ、その結果負の揚力傾斜を生む。
- 6) 角柱後流の性質として、断面比によらず後流の主流方向成分の速度分布には近似的に similarity が存在する。

謝 辞

本研究を行うに際し、種々の助言をして下さった中村泰治教授に厚くお礼申し上げる。また、数々の議論と激励を絶えず行って下さった岡島厚助教授ならびに友成義正助手に感謝の意を表す。データ解析の一部は、九州大学応用力学研究所電子計算機 FACOM 230-48 によった。

参 考 文 献

- 1) 溝田武人：角柱まわりの流れ，一平均流の測定一。九州大学応用力学研究所所報，第 45 号，1976，pp. 369-384.
- 2) 中村泰治，溝田武人，吉村健：矩形および H 型断面柱の空力 3 分力特性について，九州大学応用力学研究所所報，第 40 号，1973，pp. 245-255.
- 3) 中村泰治，友成義正：層流および乱流における矩形断面柱のギャロッピング，九州大学応用力学研究所所報，第 45 号，1976，pp. 283-293.
- 4) 中口博，橋本貴久裕，武藤真理：矩形断面の柱の抗力に関する一実験，日本航空会誌，16 巻 168 号，1968，pp. 1-5.
- 5) Parkinson, G. V. and Brooks, N. P. H., On the aeroelastic instability of bluff cylinders, J. Applied Mech., ASME., Vol. 28, 1961, pp. 252-258.
- 6) 伊藤学，矢野善章：構造断面における風圧分圧と風力，土木学会第 25 回年次講演会講演集，第 1 部，1970，pp. 433-436.
- 7) Den Hartog, J. P., Mechanical Vibrations, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, N. Y., fourth edition, 1956, p. 299.
- 8) Parkinson, G. V., Aeroelastic galloping in one degree of freedom, Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures, England, Vol. II, H. M. S. O., 1965, pp. 582-609.
- 9) 林 正徳：矩形断面の柱のまわりの流れについて，日本航空宇宙学会西部支部設立記念講演会講演集，1973，pp. 1-3.
- 10) Bradbury, L. J. S., Measurements with a pulsed-wire and a hot-wire anemometer in the highly turbulent wake of a normal flat plate, J. Fluid Mech., Vol. 77, part

- 3, 1976, pp. 473-497.
- 11) Nishioka, M. and Sato, H., Measurements of velocity distributions in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers, J. Fluid Mech., Vol. 65, part 1, 1974, pp. 97-112.
- 12) Sullerey, R. K., Gupta, A. K. and Moorthy, C. S., Similarity in the turbulent near wake of bluff bodies, American Institute of Aeronautics and Astronautics J., Vol. 13, No. 11, 1975, pp. 1425-1429.
- 13) Schlichting, H., Boundary Layer Theory, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, N. Y., forth edition, 1960, pp. 600-604.

(昭和 52 年 6 月 15 日受理)