

# 航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-871

半円柱の臨界レイノルズ数前後における  
風圧分布風洞実験および関連特性

滝澤直人・岡田典秋・岩崎昭人

1985年8月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# 半円柱の臨界レイノルズ数前後における 風圧分布風洞実験および関連特性\*

滝澤直人\*\* 岡田典秋\*\* 岩崎昭人\*\*

## Wind-tunnel Investigation of the Pressure Distribution and Deduced Characteristics of Semi-Circular Cylinder in the Vicinity of Critical Reynolds Number

Naoto TAKIZAWA, Noriaki OKADA  
and Akihito IWASAKI

### ABSTRACT

Two-dimensional semi-circular cylinders have been tested over a Reynolds number range from 67,000 to 600,000 and over angles of attack of  $\pm 90^\circ$ , to measure pressure distributions and to deduce forces, stagnation, separation and other characteristics. Tests were conducted in the NAL instrument wind-tunnel, the NAL gust wind-tunnel and the Fuji Heavy Industries fume wind-tunnel. The wind-tunnel-boundary correction was specialized by the concept of effective model-height and wake-width.

Below an angle of attack of  $40^\circ$ , pressure distributions about the upper- and lower-surface were similar to the circular cylinder and the flat plate respectively and showed considerable difference between sub- and super-critical Reynolds number. The lift and drag coefficient range were  $-0.85 \sim 1.5$ ,  $0.4 \sim 2.28$  at sub-critical and  $0 \sim 2.02$ ,  $0.1 \sim 2.37$  at super-critical. Features were as follows: Near  $-60^\circ$ , suction peak and lift coefficients were extraordinarily high at super-critical. Near  $0^\circ$ , force coefficient curves, except the chord force, were concave. Near  $25^\circ$ , lift coefficient showed a maximum value of 2.02 at super-critical Reynolds number. At  $40^\circ \sim 50^\circ$ , upper suction double peak and negative chord force (but  $5^\circ \sim 50^\circ$  at super-critical) were shown. At  $60^\circ \sim 90^\circ$ , pressure distributions over the upper surface showed a low hat shape.

### 1. ま え が き

航空機の翼に用いられる翼断面の肉付線(対称翼型)の限界は、最大厚さを円、最小厚さを平板と考えることができる。今、円の下面を痩せさせて、下

面に凹みのない非対称翼型を作ると半円柱を得る。半円柱は下面の平坦な、厚さおよびキャンバともに最大の翼型として一つの終極の姿を示す。

この半円柱を2次元のにおい物体の一つと考えて、下面が流れにほぼ直交するような、正負の大迎角時の抵抗を取り扱った報告は見掛けるが<sup>1)2)3)</sup>迎角範囲 $\pm 90^\circ$ の全域に亘って3分力を含む空力特性を扱った報告は見当らない。

\* 昭和59年12月20日受付

\*\* 新型航空機研究グループ

半円柱の上面は円であるため、負から正のある迎角範囲では、円柱と同様に臨界レイノルズ数が存在すると予想される。円柱の臨界レイノルズ数は、元来層流剝離点の境界層レイノルズ数で定義されたものであり、この値以下では層流剝離して後流幅が広くて抗力係数が大であり、また、この値以上では乱流に遷移後乱流剝離して後流幅が狭くなって抗力係数が小となる。しかし、実際には上記の大きな変化は、レイノルズ数のある範囲にわたって起り、その前または後ではほとんど変化しない。また、レイノルズ数そのものも主流速度と直径（弦長）による値に対応させる場合が多く、本報告でもこれを用いる。このような現象は、円柱以外の翼型形状についても起ることが知られている<sup>1)</sup>。半円柱の上面の臨界レイノルズ数は同じ直径の円柱の場合に近いと考えられ、臨界レイノルズ数の前と後では、上面の剝離点位置や風圧分布などが大きく相違することが予想される。

半円柱の下面は平面であるため、迎角に対する対応の相違はあるにしても、平板とほぼ同様の風圧分布を示し、レイノルズ数の影響も小さいことが予想される。

このように、半円柱は厚さとキャンバの大きい翼型の一つの限界の姿であると同時に、特異なにおい物体としても興味深い問題を含んでいる。特に、航空機の翼は着陸時には臨界レイノルズ数以上であるが模型実験では臨界以下であることが多く、また、半円柱を用いた風車や構造物に作用する風は臨界以下から以上にわたると考えられる。このような観点から、ここでは、半円柱の±90°の迎角範囲にわたり、臨界以下および以上のレイノルズ数において、風圧分布の測定と気流試験を行い、これにもとづいて得られた空気力、岐点、上面剝離点などの迎角に対する変化を検討して報告する。

## 2. 記 号

### 2.1 主記号

$b$  ; 模型幅, width of model  
 $b_w$  ; 後流幅, width of wake  
 $c$  ; 半円弦長, chord length of semi-circle  
 $C_C$  ; 翼弦力係数, chord force coefficient

$C_D$  ; 抗力係数, drag coefficient  
 $C_L$  ; 揚力係数, lift coefficient  
 $C_{mc/2}$  ; 翼弦中央回り縦揺れモーメント係数, pitching moment coefficient about mid-chord  
 $C_N$  ; 法線力係数, normal force coefficient  
 $C_P$  ; 圧力係数, pressure coefficient  
 $C_R$  ; 合力係数, resultant force coefficient,  $= \sqrt{C_N^2 + C_C^2}$   
 $f$  ; フラップ長さ, flap length  
 $h$  ; 風洞測定部高さ, height of wind tunnel test section  
 $l$  ; 半円の平面投影長さ, chord length of semi-circle in plan view  
 $P$  ; 主流静圧, static pressure of main flow  
 $p$  ; 模型表面静圧, static pressure over the model surface  
 $P_T$  ; 主流総圧, total pressure of main flow  
 $RN$  ; レイノルズ数, Reynolds' number  
 $t$  ; 半円の正面投影高さ, height of semi-circle in front view  
 $t'$  ; 半円の有効正面投影高さ, effective height of semi-circle in front view  
 $V$  ; 主流風速, velocity of main flow  
 $v$  ; 模型表面流れ速度, velocity of model surface flow  
 $x$  ; 岐点からの表面距離, distance from stagnation point  
 $\alpha$  ; 迎角, angle of attack  
 $\epsilon$  ; 閉塞係数, blockage factor,  $= \epsilon_s + \epsilon_w$   
 $\epsilon_s$  ; 固定閉塞係数, solid-blockage factor  
 $\epsilon_w$  ; 後流閉塞係数, wake-blockage factor  
 $\eta$  ; 後流効果補正係数, corrective factor of wake effect,  $= b_w/t$   
 $\lambda$  ;  $= (1/2)(1 + l/t)$   
 $\rho$  ; 空気密度, air density  
 $\tau$  ;  $= \pi^2/12 \approx 0.822$   
 $\phi$  ; 半円の方角, radial angle of semi-circle

## 2.2 下付き記号

- max ; 最大, maximum  
 min ; 最小, minimum  
 s ; 剝離点, separation point  
 u ; 未修正, uncorrected  
 o ; 標準, standard, 岐点, stagnation point  
 i ; 模型の斜め前方位置, obliquely front position of model  
 ∞ ; 無限遠方, infinite distance

## 2.3 前付き記号

- Δ ; 臨界レイノルズ数以上と以下の空力的値の差, difference of aerodynamic values between over and under critical Reynolds' number

## 3. 模型および実験

模型は、アルミ合金製で大小各1種製作し、幅は両者とも0.25mであるが、直径は大を0.3m、小を0.05mとした。大模型は、幅方向の両側に各0.875mを木製で延長して、合計幅2mとできるようにした。静圧孔は模型中央に主測定用を26ヶ所、大模型木製延長部片側の内側から0.375m（模型中央から0.5m）の位置に2次元性監視用10ヶ所を用意した。静圧孔位置および模型断面ならびに模型を取り付けた風洞測定部断面を図1に示す。

実験は航空宇宙技術研究所の計器用風洞<sup>4)</sup>、突風風洞<sup>5)</sup>および富士重工業(株)の煙風洞<sup>6)</sup>において実施した。

計器用風洞では、小模型による風圧分布実験（臨界レイノルズ数以下）を実施した。測定部は高さ1m、幅0.25m、長さ1mで、模型は両側壁間に水平に取り付け、下面中心を測定部中心に合わせて迎角 $\alpha$ を $\pm 90^\circ$ 間で変化させた（下面が下で水平の場合を $\alpha = 0^\circ$ ）。主流風速は、上流の集合筒で総圧、測定部入口中央（下面中心前方0.5m）側壁で静圧を検出して求めた。この測定値は測定部上壁の中央より前方0.27m、下方0.12mにおけるピトー管による値と、 $\alpha = 0^\circ$ の場合にはよく一致するが、 $\alpha = 90^\circ$ の場合には、後者は前者より約2.5%高い値を示す（「9.4」、図13）。実験は、風速約20m/s（レイノルズ数約 $0.67 \times 10^5$ ）で行い、風圧分布を

測定した。風圧分布の計測にはスキヤニバルブを用いた。模型取付状況を図1(b)i)、図2(a)、図13(a)に示す。

突風風洞では、大模型による風圧分布実験および気流系試験（いずれも臨界レイノルズ数以下および以上）を実施した。実験には固定壁カート（断面 $2 \times 2$ m、長さ4m）を用いた。風圧分布実験では模型両側に木製延長部を等しく取り付けて幅2mとしたものを底面から天井まで直立させ、模型下面の中心をカート中心に合わせて迎角を $\alpha = \pm 90^\circ$ の範囲で変化させた（主流と下面が平行で円形面が風に向かって右側にある場合を $\alpha = 0^\circ$ ）。

気流系試験では厚さ0.05m、高さ2m、長さ2.2mの端板2枚を正面中央に対称かつ鉛直に立てて固定し、その間隔0.25mに模型を挟んで水平に取り付け、下面中心をカート中心に合わせて迎角を $\alpha = 0^\circ \sim 55^\circ$ 、 $160^\circ \sim 180^\circ$ の範囲で変化させ（下面が下で水平の場合を $\alpha = 0^\circ$ ）天井から観測した。模型表面には、長さ約0.03mの刺繍糸を翼幅方向に約0.03m間隔、気流方向に上面は $\phi \approx 10^\circ$ 間隔、下面は約0.03m間隔で千鳥状にセロハンテープでとめた。

主流の風速 $V$ は、風圧分布実験では、天井下方約0.27mでカート中心前方約0.86mの位置および風に向かって右側壁内方約0.325mで中心前方約1.13mの位置のピトー管をそれぞれ主従として用い（両者は前述のように相違することがある）、気流系試験ではこの従ピトー管（端板の外側となる）を用い、これと別に天井下方約0.3m、中心前方約0.37mのピトー管と端板内側中心より前方0.75mの静圧も計測した。風圧分布実験は風速 $V \approx 8, 20, 30$ m/s（レイノルズ数約 $1.6 \times 10^5, 4 \times 10^5, 6 \times 10^5$ ）で、また気流系試験は $V \approx 8, 20$ m/sで行った。風圧分布の計測にはスキヤニバルブを用いた。模型取付状況を図1(b)ii)、iv)、図2(b)、(d)に示す。

煙風洞では大模型による煙気流試験を実施した。測定部は高さ2m、幅0.2m、長さ2mで、模型は片側を約0.05m切離して幅を約0.2mとし、側壁に片持で水平に取り付け下面中心を測定部中心に合わせて迎角を $\pm 90^\circ$ の範囲で変化させた（下面が下で水平の場合を $\alpha = 0^\circ$ ）。主流風速は、模型なし状

態での模型位置におけるピトー管による値と、模型上流の測定部入口の壁圧ならびに大気圧の関係を予め較正しておいて、後二者から求めた。実験は  $V \approx 8\text{m/s}$  (レイノルズ数約  $1.6 \times 10^5$ ) で行い、側方から煙気流を観測した。煙は測定部上流からくし型ケロシン蒸気流出装置 (ノズル 86, ピッチ 20mm) によって側壁間中央上下に発生させた。模型取付状況を図 1(b) iii), 実験中の写真を図 2(c) に示す。

#### 4. 風洞壁の影響と修正

半円柱上のある点の静圧計測値  $P_u$  から未修正圧力係数  $C_{Pu}$  はつぎのように求められる。

$$C_{Pu} = (P_u - P_\infty) / (P_{Tu} - P_\infty) \quad (1)$$

ここに  $P_{Tu}$ ,  $P_u$  はそれぞれ模型前方の主流の総圧, 静圧の測定値である。この  $C_{Pu}$  は, 風洞壁の境界修正によって  $C_p$  に換算される。その方法をつぎに述べる。

##### 4.1 平均修正速度

一般に固定壁に囲まれた矩形断面内に置かれた 2 次元模型の閉塞効果は, 閉塞比  $t/h$  を用いてある程度厳密な理論計算ができる<sup>7)</sup>

また後流効果についても, 流線形のように剝離の影響が小さい場合には  $t/h$  と  $C_{Du}$  (実験値) を用いて理論計算できる<sup>7)</sup>。しかし, 剝離した後流を伴う場合には, 風洞壁面境界層の発達も加味されて, 後流効果は閉塞比が大きくなるにしたがって上記の理論値から外れてくるので, 実験値にもとづく修正法が必要となる。

ここでは, 矩形断面内の半円柱に対する閉塞効果および後流効果について検討して, 一般流に対する速度修正法を求め, 半円柱の風圧分布実験値から自由流中での値への換算に用いる。

この場合, 流れ方向に閉塞比が異なるので, 半円柱の層流域では速度修正は局所的に変化するが, 剝離域ではほぼ一定と考えてよいことは円柱の場合と同様である。また, 半円柱の  $\alpha = \pm 90^\circ$  以外では, 上下壁と模型との隙間が上下で多少異なることなどの違いがある。このような場合, これらを統一的に処理するために, 閉塞比を  $t/h$  で代表させ, かつ層流域と剝離域の修正速度を全周に亘って積分した形の

平均修正速度を求めることができれば好都合であり, 円柱では通常そのようにしているので, 半円柱でもこのように取り扱って, その当否は実験値によって最終的に判断することにする。

一般に平均修正速度  $V_\infty$  と閉塞効果  $\epsilon_s$  および後流効果  $\epsilon_w$  の関係はつぎのように表わされる。

$$\begin{aligned} V_\infty / V &= 1 + \epsilon & \epsilon &= \epsilon_s + \epsilon_w \\ V &= \sqrt{2(P_{Tu} - P_\infty) / \rho} & V_\infty &= \sqrt{2(P_T - P) / \rho} \end{aligned} \quad (2)$$

(円柱に対して閉塞効果および後流効果を分離しないこともあるが, その場合は, 自由流中と風洞内での抵抗の比が閉塞比  $c/h$  のみの簡単な関係で表わせるとした場合で Glauert<sup>8)</sup> および Modi<sup>9)</sup> などの修正法がこれに該当する。ここでは, この方法は扱わない。)

上記の平均修正速度を用いるに当っては, 閉塞比の変化に対して, 模型表面の風速分布形が相似であること<sup>7)</sup>, および剝離点位置とその後方の圧力一定域の範囲の変化がないこと<sup>10)</sup>が必要である。これらの条件は円柱では概ね満足されており, 特に剝離点の移動は多少認められても背圧一定域の範囲にはほとんど変化がない<sup>11)</sup>。半円柱についても円柱とほぼ同様に上記の条件を満たすと考えられ, 実験値がこれを示している (図 4)。

(2)式から圧力係数  $C_p$  はつぎのように表わすことができる。

$$C_p = 1 + (C_{Pu} - 1) / (1 + \epsilon)^2, \quad \epsilon = \epsilon_s + \epsilon_w \quad (3)$$

##### 4.2 固定閉塞効果 $\epsilon_s$

固定閉塞効果  $\epsilon_s$  は試験断面に模型があることにより, 空気の流れる断面積が減少するために生ずる水平速度の増大として考えられる。その効果は厚さおよび厚さ分布の函数で, キャンバは無関係とされる。

円柱の場合の速度増加は理論的に求めることができる。これを拡張して, 楕円柱の場合には等価直径  $t \sqrt{\lambda}$  の円柱に置き換えてつぎのように表わされる<sup>7)</sup>

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= \tau \cdot \lambda \cdot (t/h)^2 & (4) \\ \tau &= \pi^2 / 12 \approx 0.822 \\ \lambda &= (1/2)(1 + t/t) \end{aligned}$$

この関係は円柱 ( $\lambda=1$ ) に対してかなり大きな閉塞比まで ( $t/h < 0.4$ ) 実験値とよく一致する。<sup>12)</sup>

半円柱の厚さ分布は楕円そのものであるが、主流と平行な長さ  $l$  および直交する高さ  $t$  の  $\alpha$  に対する変化は異なる。また楕円と違って、 $\alpha$  の変化に対する剝離流の様相が大きく相違し、 $\epsilon_s$  の修正を必要とする場合を生ずる。たとえば半円柱の  $\alpha=0^\circ$  では、下面の下側に大きな剝離領域を生じ、主流はこの領域を避けるように下側に大きく迂回するように流れて、恰もここに膨らみのある物体があるかのように見掛けの幅が大きくなるので (図 3(a))、この分だけ閉塞比の割増しを必要とすることが考えられる。この割増しのためには、この剝離領域を含めた、半円柱の仮想高さ  $t'$  の概念を導入することが必要と考え、以下これを検討する。但し平板の場合のように上下の後流幅がほぼ対称に増大する場合は  $t'$  を導入しないで、後流効果の補正として取り扱うほうがよいようである。<sup>10)</sup>

半円柱の剝離流の  $\alpha$  に対する変化の実験結果にもとづくモデル化を図 3(a) に示し、 $t'$  をつぎのように考えることにする。まず  $\alpha = -90^\circ \sim 0^\circ$  では、上方には常に円表面があり、また下方の剝離領域の高さは 0 から  $c/2$  まで  $\alpha$  とともに変化して  $\alpha$  に拘らず近似的に  $t' = c$  と考えることができる。つぎに  $\alpha = 0^\circ \sim 10^\circ$  では、岐点が上面にあって、前縁下面の剝離領域は後縁で再付着する  $\alpha = 10^\circ$  まで次第に狭くなり、 $t'$  は  $\alpha$  に対してほぼ直線的に減少すると考えられる。さらに  $\alpha = 10^\circ \sim 90^\circ$  では、半円柱回りの流れは、はじめは楕円回りの流れに類似しているが、 $\alpha$  とともに平板回りの流れに類似するように変化して行くが、いずれの場合も  $t' = t$  と考えることができる。

以上まとめて半円柱の閉塞効果をつぎのように表わすことができる。

$$\epsilon_s = 0.822 \lambda (t'/h)^2 \quad (5)$$

$$\lambda = (1/2)(1 + l/t')$$

$$l = (c/2)(1 + \cos \alpha)$$

$$t' = c \quad \alpha = -90^\circ \sim 0^\circ$$

$$t' = (c/2) \{ 2 - (\alpha/10)(1 - \sin 10^\circ) \}$$

$$\alpha = 0^\circ \sim 10^\circ$$

$$t' = t = (c/2)(1 + \sin |\alpha|)$$

$$\alpha = 10^\circ \sim 90^\circ$$

$\alpha$  に対する  $t'$  の関係を図 3(b) に示す。上記の関係は円柱の場合と同様  $c/h \approx 0.4$  まで成立することが期待でき、また臨界レイノルズ数の前後に拘らず、下方の剝離領域の  $\alpha$  に対する変化は大差ないのでいずれの場合にも適用できると考えられる。

### 4.3 後流効果 $\epsilon_w$

後流効果  $\epsilon_w$  は固定壁に囲まれた場合には重要であるが、開放型の場合には省略される。流線形のように後流と風洞境界の関係が数学的に容易に模擬できる標準的な場合には後縁から放出される渦の量で抵抗を表わすことができ、これと鏡像法を用いて  $\epsilon_{w0}$  はつぎの式で表わすことができる。<sup>7)</sup>

$$\epsilon_{w0} = (1/4)(c/h) C_{Du} \quad (6)$$

この関係は、剝離を伴うにない物体でも、後流幅が物体の高さよりあまり大きくない円柱のような場合には閉塞比の小さい範囲 ( $c/h \leq 0.2$ ) で維持できる。<sup>11)</sup>

しかし、閉塞比の大きい場合や後流幅が物体の高さよりかなり大きい場合には上式からのずれが大きくなることが予想される。このような場合に補正係数  $\eta$  を導入して、かなり大きな閉塞比まで ( $c/h \leq 0.4$ ) 有効な表示式として、 $\epsilon_w = \eta \epsilon_{w0}$  がよく用いられる。<sup>9)12)</sup> 半円柱では後流幅と半円柱正面高さの比が  $\alpha$  とともに大きく変化するので、 $\epsilon_w$  も  $\alpha$  によってかなり変化することが予想される。

自由流中における有効な後流幅  $b_w$  の  $\alpha$  に対する変化の実験結果にもとづくモデル化を図 3(a) に示し、 $b_w$  をつぎのように仮定した。まず  $\alpha = -90^\circ \sim 0^\circ$  では、上方からの後流は円表面から生ずるので、ほぼ主流方向の接線を後流上限とすることができ、また下方からの後流は  $\alpha = -90^\circ$  と  $0^\circ$  では仮想円から生ずるが、 $\alpha = -30^\circ$  では仮想円から約  $c/8$  下方に膨らむので、 $b_w = c + (c/2) \sin |\alpha| (1 - \sin |\alpha|)$  と置くことができる。つぎに  $\alpha = 0^\circ \sim 10^\circ$  では、前縁下面からの剝離流は  $\alpha$  とともに後縁で下面に再付着するまで接近し、下面に沿って後縁から下方に拡がるようになり、また上方の流れは、上面前縁付近から上方に拡がるようになって、 $b_w$  は  $\alpha$  に比例して減少、 $t$  に比例して増大すると考えて  $b_w = (2 -$

$\alpha/20)t$ と置くことができる。さらに $\alpha = 10^\circ \sim 90^\circ$ では、岐点が下面に来て前後縁からの剝離流は平板の場合に類似して、 $b_w \approx 1.5t$ と考えることができる。

以上の $b_w$ を用いることにより、 $C_{Du}$ を受ける $t$ に対する $b_w$ の比を $\eta = b_w/t$ と考えることができる。

以上まとめて半円柱の後流効果を $\eta = b_w/t$ を用いてつぎのように表わすことができる。

$$\epsilon_w = \eta \epsilon_{w0} = \eta (1/4) (c/h) C_{Du} \quad (7)$$

$$\eta = 2 - \sin|\alpha| \quad \alpha = -90^\circ \sim 0^\circ$$

$$\eta = 2 - \alpha/20 \quad \alpha = 0^\circ \sim 10^\circ$$

$$\eta = 1.5 \quad \alpha = 10^\circ \sim 90^\circ$$

$\alpha$ に対する $\eta$ の関係を図3(b)に示す。上記の関係も $\epsilon_s$ の場合と同様 $c/h \approx 0.4$ まで成立することが期待でき、また臨界レイノルズ数の前後に拘らず適用できると考えられる。

#### 4.4 流線曲率への影響

半円柱に揚力を生ずる迎角では、上下の風洞壁によって流線が抑えられて、自由流中の場合より流線の曲率が減少するので、実験時の $\alpha$ は、 $57.3(\pi/96)(c/h)^2 C_L [\text{deg}]$ を加えて自由流中の値に換算する必要を生ずる<sup>7)</sup>。しかし、本実験では、この増分は高々約 $0.085^\circ$ と小さいのでこれを省略し、併せて、これに関連する $C_L$ 、 $C_{mc/2}$ 、 $C_D$ の修正も省略する。

#### 4.5 模型縦横比の影響

一般に2次元模型の翼幅中央での圧力計測に影響を与える模型縦横比の限界は明確でない。円柱表面の $C_p$ に対するPopeの境界修正法<sup>7)</sup>は臨界レイノルズ数以下においては縦横比 $b/c$ が6以上で、閉塞比 $c/h$ が $0.06 \sim 0.16$ ではそのまま適用には注意が必要<sup>13)</sup>、 $0.25 \sim 0.5$ では適当な補正法を導入すれば適用可能といわれる。

本実験では小模型では $b/t = 5 \sim 10$ 、大模型延長型では $b/t = 6.7 \sim 13.3$ となる。したがって円柱の場合と同様と考えれば $c/h \approx 0.4$ までは(3)、(5)、(7)式による境界修正は可能と考えられる。

なお物体の2次元模型の $b/t$ が小さい場合には、風洞側壁に発達または剝離した境界層と模型前面で

左右に分れた流れが干渉して背圧の絶対値がかなり小さくなるのが $b/t = 2$ の矩形断面の場合に知られている<sup>14)</sup>。

#### 4.6 風圧分布実験結果の比較

(3)、(5)、(7)式による境界修正法の妥当性を確かめるために、臨界レイノルズ数以下において、計器用風洞中の小模型( $c/h = 0.05$ )および突風風洞中の大模型( $c/h = 0.15$ )による風圧分布実験結果の未修正値 $C_{pu}$ と修正値 $C_p$ を図4に示し、つぎにこれを説明する。

両者の $C_{pu}$ の差の最大値は $\alpha = -90^\circ$ 、 $-45^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ において、それぞれ約 $0.4$ 、 $0.4$ 、 $0.3$ 、 $0.6$ 、 $0.9$ であったものが、修正後の $C_p$ の差の最大値は、それぞれ約 $0.015$ 、 $0.015$ 、 $0.02$ 、 $0.02$ 、 $0.01$ と、ほぼ0に近く、両者の $C_p$ が $\alpha = \pm 90^\circ$ の範囲ではほぼ一致することを示している。両者の $C_{pu}$ の差の大きい、 $\alpha = 90^\circ$ において、両者の $C_p$ がよく一致していることは注目値する。さらに $\alpha = 90^\circ$ の場合、閉塞比 $c/h$ の小さい小模型の上面中央でも $C_{pu} = -1.85$ が $C_p = -1.6$ とかなり差を生じていることに注意を要する。

### 5. 風圧分布

臨界RN前後における風圧分布測定値 $C_{pu}$ を(3)、(5)、(7)式によって修正した結果の $C_p$ の分布を代表的な11の $\alpha$ について図5に示し、特徴をつぎに述べる。ここで臨界RN以下の場合には小模型の風速 $V \approx 20\text{m/s}$ による結果を用い、臨界RN以上の場合には大模型の $V \approx 20\text{m/s}$ による結果を用いた。なお、主な $C_{pu}$ と $C_p$ の数値を表1、2に示す。

#### 5.1 臨界RN以下の場合(図5の○印)

実験RN約 $0.67 \times 10^5$ ( $c$ 基準)は臨界RN(約 $2 \sim 3 \times 10^5$ と推定)より十分低いと思われる。

$\alpha = -90^\circ$ では、岐点( $C_p = 1$ )が上面中央にあり、また負圧ピークは前後縁付近の $\alpha + \phi \approx \pm 70^\circ$ にあって、 $C_p \approx -1.3$ となり、上面の風圧分布は円柱のそれと非常によく一致している。さらに下面は $C_p \approx -1.25$ で、これも円柱の剝離領域の一定値に近い<sup>1)</sup>( $\alpha + \phi$ を採ることの効用については「7」

参照)

$\alpha = -60^\circ$  になると上面岐点の前進にしたがって前方の負圧は前縁で最大となって、下面の剝離領域の  $C_p \approx -1.25$  に一致するが、後方の風圧分布は  $\alpha + \phi$  に関してほぼ円柱のそれに一致し、負圧ピークは  $\alpha + \phi \approx 70^\circ$  にあって  $C_p \approx -1.35$  で、その後方の剝離領域でも  $C_p \approx -1.25$  である。

$\alpha = -45^\circ$  でも、 $\alpha = -60^\circ$  の場合と同様の傾向を示し、 $\alpha + \phi \approx 70^\circ$  に負圧ピークがあるが、上面の剝離領域の負圧が後縁で大きくなることおよび下面の負圧が前縁で小さく(約  $-1.0$ )、後縁で大きい(約  $-1.25$ )という傾向が顕われる所がやや異なる。

$\alpha = -30^\circ$  においても、 $\alpha + \phi$  に対する  $C_p$  の関係が  $\alpha = -45^\circ$  の場合とほぼ等しいが、上面岐点が相対的にやや後退し(図7)、負圧ピークが少し低下(約  $-1.2$ )した所が異なる。

$\alpha = -15^\circ$  では、これまでと様相が変わって、負圧ピークと剝離領域の負圧が低下し、それぞれ約  $-0.95$ 、約  $-0.8$  一定となっている。これは  $\alpha + \phi$  に対する負圧ピーク位置は変わらないで、岐点が後退し(図7)、その間隔が狭くなったことと関係すると思われる。

$\alpha = 0^\circ$  では、負圧ピークの相対位置は変わらないが岐点はさらに後退し(図7)、それに伴って負圧ピークも  $-0.75$  まで低下している。上面後半および下面の剝離領域の負圧はいずれもほぼ一定であるが、前者は約  $-0.6$ 、後者は約  $-0.85$  と差が大きく、これは、後縁において上面から下面側への急な流れ込みのあることを示唆していると受け取れるので注意を要する。

$\alpha = 15^\circ$  では上面の負圧は全体に約  $-0.25$  回復して負圧ピークは約  $-1.0$ 、剝離領域では約  $-0.85$  となるが  $\alpha + \phi$  に対する相対位置は  $\alpha = 0^\circ$  の場合に等しい。下面の風圧分布はこれまでと異なり、前縁直後で約  $0.3$  と正圧を示して岐点が下面に移動したことを覗かせ、後縁では上面剝離領域の負圧にほぼ等しく、大きな負の圧力勾配を生じている。この  $\alpha$  から下面は剝離しなくなる。

$\alpha = 30^\circ$  では、上面の負圧はさらに約  $-0.2$  回復して負圧ピークは約  $-1.2$ 、剝離領域では約  $-1.05$

となるが  $\alpha + \phi$  に対する相対位置は変わらない。下面の風圧分布は前縁の正圧が約  $1.0$  まで上昇し、また後縁の負圧も約  $-1.05$  と大きくなるので、負の圧力勾配は  $\alpha = 15^\circ$  の約2倍に大きくなる。

$\alpha = 45^\circ$  になると上面の風圧分布は独特の形を示す。すなわち前縁付近に鋭い負圧ピークがあって  $\phi \approx 20^\circ$  まで急激な圧力上昇を示した後、再び回復して  $\phi \approx 35^\circ$  で極大値約  $-2.0$  に達し、その後  $\phi \geq 70^\circ$  で一定値約  $-1.0$  となる。このことは前縁付近に気泡(バブル)の存在を覗わせる。下面では岐点が後退し、前後縁とも負圧となって、傾きある平板の前面と同様の風圧分布を示す。<sup>15)16)</sup>

$\alpha = 60^\circ$  では、上面は全面剝離してほぼ一定負圧約  $-1.4$  となるが、後縁寄りでは約  $-1.7$  まで膨らみを示す。この膨らみは、上面の最後方位置付近で終る。下面では岐点が後退したほかは  $\alpha = 45^\circ$  の場合と同様の風圧分布を示す。

$\alpha = 90^\circ$  では、上面の負圧は  $\alpha = 60^\circ$  の場合より膨らみが中央に移動し、前後縁で約  $-1.3$ 、中央で約  $-1.65$  の台形状の対称な分布を示す。下面でも岐点は中央にきて平板前面と同様の風圧分布を示す。

なお  $\alpha = -45^\circ, 0^\circ, 25^\circ$  における風圧分布展開図については「9.5」で考察する( $\alpha = 45^\circ, \pm 90^\circ$  は臨界RN以上の場合と同様である)。

以上総合して、臨界RN以下では、上面の風圧分布は、 $\alpha = -90^\circ \sim 30^\circ$  においては円柱の岐点に対応する位置(風軸上、 $\alpha + \phi = 0^\circ$ )を基準に見ると、後方では円柱と同様の分布を示し、負圧ピークは  $\alpha = -90^\circ \sim -45^\circ$  ではほぼ円柱の場合に等しく、 $\alpha = -30^\circ \sim 0^\circ$  で減少し、 $\alpha = 0^\circ \sim 30^\circ$  で増加するが、その後  $\alpha = 45^\circ$  付近で前縁に高低2つの負圧ピークを持つ特異な分布を示した後、 $\alpha = 60^\circ \sim 90^\circ$  では全面剝離してほぼ一定負圧となるが上面形状に対応してやや膨らみを示す。上面の岐点前方では  $\alpha$  の増加にしたがって円柱の風圧分布が前縁で切られる形となる。また、下面の風圧分布は、 $\alpha = -90^\circ \sim 0^\circ$  においては全面剝離して円柱の背圧にほぼ等しい一様分布に近い形を示すが、 $\alpha = -45^\circ \sim 0^\circ$  では減少する。その後  $\alpha = 15^\circ \sim 90^\circ$  では、岐点が下面前縁から中央に移動し、傾きある平板前面と同様の分布を示す。



## 5.2 臨界RN以上の場合(図5の▽印)

実験RN約  $4 \times 10^5$  ( $c$  基準) は臨界RN (約  $2 \sim 3 \times 10^5$  と推定) 以上と思われる。

$\alpha = -90^\circ$  では、岐点 ( $C_p = 1$ ) は上面中央にあるが前後縁で剝離するので、上面の風圧分布は円柱の臨界RN以下の場合に類似し、その結果上下面とも「5.1」における  $\alpha = -90^\circ$  の場合と同様の風圧分布形を示すが負圧ピークと剝離域の負圧はそれぞれ約  $-1.55$ 、および約  $-1.3$  とやや大きくなる ( $\Delta C_p \approx 0.25, 0.05$ )。

$\alpha = -60^\circ$  になると、岐点の前進に対して、その後方の負圧ピークの前進は少なく、両者の位置は、それぞれ  $\alpha + \phi \approx -5^\circ, 80^\circ$  にあって、円柱の場合 ( $\alpha + \phi = 0^\circ, 85^\circ$ )<sup>1)</sup> における両者の間隔とほぼ同様となる。しかし負圧ピークの値は約  $-3.25$  と円柱の場合 (約  $-2.3$ ) より著しく大きくなる。下面の剝離領域の  $C_p \approx -0.85$  一定も円柱の背圧 (約  $-0.4$ ) より大幅に大きい。このように高い負圧を示す理由については「9.1」で考察する。

$\alpha = -45^\circ, -30^\circ$  でも  $\alpha = -60^\circ$  の場合と同様、岐点と後方の負圧ピークの位置はそれぞれ  $\alpha + \phi \approx -5^\circ, 80^\circ$  にあって両者の間隔は円柱の場合にほぼ等しく、負圧ピークも約  $-3.25, -3.15$  と非常に大きいままである。しかし下面の剝離領域では  $\alpha = -45^\circ, -30^\circ$  でそれぞれ  $C_p \approx -0.65, -0.5$  と負圧減少を示し、円柱の背圧 (約  $-0.4$ ) に近くなる。

$\alpha = -15^\circ$  になると岐点とその後方の負圧ピーク位置はそれぞれ  $\alpha + \phi \approx 2^\circ, 85^\circ$  となって間隔が狭くなり、負圧ピークの値も約  $-2.9$  と小さくなる。しかし、下面の剝離領域では  $C_p \approx -0.5$  と、円柱の背圧とほぼ同程度のままである。

$\alpha = 0^\circ$  では上面の岐点とその後方の負圧ピーク位置はそれぞれ  $\alpha + \phi \approx 10^\circ, 85^\circ$  にあって両者の間隔は  $\alpha = -15^\circ$  の場合と同様に円柱の場合よりやや狭いが、負圧ピークの値は約  $-2.25$  と減少して円柱の場合にほぼ等しくなる。しかし下面では、前縁の剝離領域では  $C_p \approx -0.75$  と負圧増加に転じるが、中央から負圧が減少して圧力勾配を生じ後縁で約  $-0.2$  となり、上面の剝離領域の負圧に等しくなる。このことは  $\alpha$  の増加とともに後縁から流れの再付着が起る前ぶれを示す (「9.2」)。

$\alpha = 15^\circ$  では、上面の負圧ピーク位置は  $\alpha + \phi = 85^\circ$  と変わらないが、値は約  $-2.9$  と大きく負圧が増し、剝離領域でも  $C_p \approx -0.4$  と負圧増加を示している。下面では前縁直後で約  $0.5$  と正圧に転じて岐点が下面に移動したことを示し、後縁では上面剝離領域の負圧に等しくなり、前縁から後縁にかけて大きな負の圧力勾配を生じている。下面の風圧分布は臨界RN以下の場合に類似しているが、上面剝離領域の負圧が小さい分だけ正圧側に寄っている (負圧ピークの増加は  $\alpha = 25^\circ$  まで続いて  $C_{Lmax}$  に達し、その直後に負圧ピークは大幅に減少して  $C_{Lmax}$  も低下して失速状態となる)。

$\alpha = 30^\circ$  では上面の負圧ピーク位置は  $\alpha + \phi = 80^\circ$  とやや前進し、値も約  $-2.3$  と円柱並まで再び負圧が減少するが、剝離領域では  $C_p \approx -0.75$  と回復を続ける。下面の風圧分布は前縁から一旦圧力上昇の後、圧力降下に転じてほぼ一定の負の圧力勾配を示し、後縁では上面剝離領域の負圧に等しくなる。下面の風圧分布は臨界レイノルズ数以下の場合に類似しているが、上面剝離領域の負圧が小さい分だけ後縁に差を生じ前縁に行くにしたがってその差は小さくなっている。

$\alpha = 45^\circ$  になると上面の風圧分布は臨界RN以下の場合と同様に、前縁付近の鋭い負圧ピークに続く急激な圧力上昇から負圧増に転ずる気泡域およびその後方の負圧極大値という独特の形を示す。ただし、負圧ピークからその後の極大値までは、臨界RN以下の場合より負圧がやや大きい (約  $-0.2$ )。しかし、その後の上面剝離領域および下面の  $C_p$  は臨界RN以下の場合とよく一致している。

$\alpha = 60^\circ, 90^\circ$  では、上下面とも風圧分布は臨界RN以下の場合とよく一致している。

なお、 $\alpha = 0^\circ, 25^\circ, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ$  における風圧分布展開図については「9.5」で考察する。

以上総合して、臨界RN以上では、上面の風圧分布は  $\alpha = -90^\circ \sim 30^\circ$  においては、円柱の岐点に対応する位置 (風軸上、 $\alpha + \phi = 0^\circ$ ) を基準に見ると、後方では円柱と類似の分布を示すが、負圧ピークは  $\alpha = -90^\circ \sim -60^\circ$  で円柱の場合の約  $0.65$  倍から約  $1.4$  倍まで飛躍的に増大し、ほぼその値を保った後、 $\alpha = -15^\circ \sim 0^\circ$  で減少して円柱の場合に近くなり、

その後  $\alpha = 15^\circ$  で増加し、 $\alpha \approx 25^\circ$  で最大となるが、その直後に急減して、 $\alpha = 30^\circ$  では円柱並となる。 $\alpha = 45^\circ \sim 90^\circ$  では、臨界 RN 以下の場合とよく一致し、臨界状態のないことを示している。上面後縁寄りの剝離領域の負圧は、 $\alpha = -45^\circ \sim -15^\circ$  で円柱と同様約  $-0.5$  であるが、 $\alpha = 0^\circ$  で一旦減少した後増加に転じ、 $\alpha = 45^\circ$  で約  $-1.0$  に達する。上面岐点前方では、 $\alpha$  の増加にしたがって円柱の風圧分布が前縁で切られる形となる。また、下面の風圧分布は、 $\alpha = -90^\circ \sim 0^\circ$  においては全面剝離してほぼ一様な負圧分布を示すが、値は  $\alpha = -90^\circ \sim -45^\circ$  で円柱の背圧の約 3 倍から約 1 倍まで急激に減少して、その後落ち着くが、 $\alpha = 0^\circ$  では前半が大きく後半に圧力勾配を生じ、 $\alpha = 15^\circ \sim 90^\circ$  では岐点が下面に来て臨界 RN 以下の場合と同様の分布を示すが、 $\alpha = 15^\circ \sim 30^\circ$  ではやや正圧側に寄っている。

## 6. 空気力係数

臨界 RN 前後において、 $C_p$  の分布から  $C_N$ ,  $C_C$ ,  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_{mc/2}$  を通常の計算法で求め<sup>7)</sup>、それぞれの  $\alpha$  に対する変化を図 6 に示し、特徴をつぎに述べる。ここで、臨界 RN 以下の場合には、小模型の風速  $V \approx 20\text{m/s}$  による結果を用い、また臨界 RN 以上の場合は大模型の  $V \approx 20\text{m/s}$  による結果を用いたが、これと異なる結果を示した部分については大模型の  $V \approx 30\text{m/s}$  による結果も併用した。

なお、上記係数において、一般性ある重要な関係はつぎのとおりである。

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = \pm 90^\circ \text{ では} \\ C_L = \mp C_C, C_D = \pm C_N \\ \alpha = 0^\circ \text{ では} \\ C_L = C_N, C_D = C_C \end{array} \right\} (8)$$

特に半円柱においては、上面が円で下面が平面であることにより、 $C_C$  は上面、 $C_{mc/2}$  は下面のみの  $C_p$  に依存し、また  $\alpha = \pm 90^\circ$  において  $C_L = C_C = C_{mc/2} = 0$  となる。

なお、空気力係数の未修正値と修正値を表 3, 4 に示す。

### 6.1 臨界 RN 以下の場合 (図 6 の○印)

$\alpha = -90^\circ \sim -60^\circ$  において、 $-C_N \approx C_D \approx 1.22$

とほぼ一定で、この値は円柱 ( $C_D = 1.17$ ) に近く、平板 ( $C_D = 1.98$ ) より小さい<sup>1)</sup>。また前述の  $C_L = C_{mc/2} \approx 0$  はそのまま保たれるが、 $C_C$  は  $0.6$  まで増加する。

$\alpha = -45^\circ \sim 0^\circ$  では、 $C_C$ ,  $C_D$ ,  $C_L$  は  $\alpha$  とともに減少するが、 $C_N$  は  $\alpha = -5^\circ$  まで増加し、 $C_{mc/2}$  は全域でほとんど 0 である。この  $\alpha$  の範囲では  $C_N$ ,  $C_L < 0$  であるが、 $\alpha = 0^\circ$  において  $C_L \approx -0.45$  とかなり大きな負の値となることは、通常正の値をとるキャンバ翼型と逆の特性を示すので注意を要する<sup>17)</sup>。また  $\alpha = -5^\circ \sim 2.5^\circ$  で  $C_N$ ,  $C_L$  が急激に減少する。

$\alpha = 0^\circ \sim 7.5^\circ$  では、 $C_C$  以外の  $C_N$ ,  $C_L$ ,  $C_D$ ,  $C_{mc/2}$  が極小値を形成する特異現象が見られる。この原因については「9.2」で考察する。極小値は  $\alpha = 2.5^\circ$  で  $C_N = -0.62$ ,  $C_{L\min} = -0.65$ ,  $C_{D\min} = 0.4$ ,  $\alpha = 5^\circ$  で  $C_{mc/2\min} = -0.06$  である。

$\alpha = 10^\circ \sim 30^\circ$  では  $C_C$  以外の  $C_N$ ,  $C_D$ ,  $C_L$ ,  $C_{mc/2}$  は、 $\alpha$  とともに増大し、 $C_C$  は減少傾向を続ける。 $C_{mc/2}$  は  $\alpha \approx 30^\circ$  で最大約  $0.12$  となる。 $C_{mc/2}$  が不安定傾向 ( $\partial C_{mc/2} / \partial \alpha > 0$ ) を示すのは、下面前縁における正圧域が  $\alpha$  とともに増加すること (図 5) の影響が大きい。

$\alpha = 35^\circ \sim 51^\circ$  では  $C_N$  と  $C_L$  が高い台地 ( $\alpha = 40^\circ \sim 50^\circ$ )、 $C_C$  と  $C_D$  が深い凹地 ( $\alpha = 40^\circ \sim 50^\circ$ ) を形成する特異性を示す。これについては「9.3」で考察する。 $C_L$  最大  $1.5$  は通常のキャンバ翼型の最大値にほぼ等しい。 $C_C < 0$  ( $\alpha = 38^\circ \sim 54^\circ$ ) は帆走のリーチングまたはクローズホールドの原理によって流れに逆らって斜めに進むことのできる状態であることを示し、帆走域と呼ぶ。この  $C_C < 0$  は、また、Lanchester の「aerial tourbillion」として 1907 年頃から知られている現象 (半円柱の平面を一様流に直角にして、流れに平行な軸の回りに初期回転を与えると定常回転に発展する)<sup>2)</sup> の原因となるものと考えられる。

$\alpha = 51^\circ \sim 55^\circ$  では  $C_N$ ,  $C_C$ ,  $C_D$ ,  $C_L$  がいずれも  $\alpha$  とともに急増する。これは上面の負圧増加の影響が大きい。 $C_{mc/2}$  はほとんど変化しない。

$\alpha = 60^\circ \sim 90^\circ$  では、 $C_N \approx 2.28$ ,  $C_D$  は微増して  $2.28$  に、また  $C_C$ ,  $C_L$ ,  $C_{mc/2}$  は減少して 0 に達する。これは上面全面剝離による  $C_p$  がほぼ一定のまま、

下面の岐点の移動に伴う  $C_p$  の正圧が僅かに増加する程度であるためである。 $C_L$  の減少が著しいのは  $\alpha$  の影響である。

以上総合して、臨界 RN 以下では、 $\alpha = \pm 90^\circ$  間において、 $C_N$  は  $-1.22$  から  $2.28$  の間にあり、途中、 $\alpha = 2.5^\circ$  で鋭い極小、 $\alpha = 40^\circ \sim 50^\circ$  で台地を形成する。 $C_C$  は  $0, 0.8$  ( $\alpha = -45^\circ$ ),  $-0.4$  ( $\alpha = 45^\circ$ ),  $0$  の間にあり、 $C_C < 0$  となる帆走域 ( $\alpha = 38^\circ \sim 54^\circ$ ) の特異性に注意を要する。 $C_D$  は  $1.22, 0.4$  ( $\alpha = 2.5^\circ$ ),  $2.28$  の間にあり、途中  $\alpha = 40^\circ \sim 50^\circ$  に凹みがある。 $C_L$  は  $0, -0.65$  ( $\alpha = 2.5^\circ$ ),  $1.5$  ( $\alpha = 45^\circ$ ),  $0$  の間にあり、 $\alpha = 2.5^\circ$  で鋭い極小、 $\alpha = 40^\circ \sim 50^\circ$  で台地を形成する。 $\alpha = 0^\circ$  における  $C_L < 0$  は、通常のキャンバ翼と逆であり注意を要する。 $C_{mcl/2}$  は  $0, -0.06$  ( $\alpha = 5^\circ$ ),  $0.12$  ( $\alpha = 30^\circ$ ),  $0$  の間にあり、 $\alpha = 5^\circ \sim 30^\circ$  が不安定域となる。

臨界 RN 以下の  $C_L, C_D$  については F. Cheers の実験がある<sup>18)</sup> この結果は本報告と類似の特性を示しているものの、迎角間隔が  $10^\circ$  であるため、 $\alpha = 0^\circ \sim 10^\circ, 40^\circ \sim 50^\circ$  などに見られる特異性は捕えられていない。また  $C_D$  は、 $\alpha = \pm 90^\circ \sim \pm 60^\circ$  において本報告の値より約 9% 低く、これは文献 2) の  $\alpha = 90^\circ$  における  $-C_p = 1.4$  が本報告の値  $1.5$  より約 0.1 小さいことにはほぼ対応する (「9.4」)。

## 6.2 臨界 RN 以上の場合 (図 6 の $\nabla$ 印)

$\alpha = -90^\circ$  において  $C_D = -C_N = 1.2$  これは臨界 RN 以下の場合にはほぼ等しい。

$\alpha = -90^\circ \sim -60^\circ$  では  $C_N, C_C, C_L$  は急激に増大、 $C_D$  は減少、 $C_{mcl/2}$  は 0 のままである。これは上面の負圧が  $\alpha$  とともに増大することに対応している。この  $\alpha$  範囲で  $C_C, C_L$  がかなり大きな正の値を示すことは注目に値する。

$\alpha = -58^\circ \sim -7.5^\circ$  では  $C_N$  が右上り ( $\alpha$  とともに増加)  $C_L$  が右下りの台地を形成し、極大値は  $\alpha = -10^\circ$  で  $C_N = 1.0$ ,  $\alpha = -50^\circ$  で  $C_L = 1.6$  となる。ここで、 $\alpha$  が負で  $C_N$  が正ということは、流れに逆らう法線力成分のある逆法線力域を示し、風車への適性あることを示す。 $C_C$  は  $\alpha = -50^\circ$  で極大値  $1.6$  となり以後減少する。 $C_D$  は  $\alpha$  とともに減少するが勾配

はやや緩やかとなる。 $C_{mcl/2}$  はほとんど 0 のままである。RN =  $6 \times 10^5$  の場合 (図 6 の  $\Delta$  印) は  $\alpha = -55^\circ \sim -10^\circ$  で  $C_N, C_C, C_L$  とともに低い値を示すが  $\alpha$  に対する増減の傾向は  $\nabla$  印と同様である。

$\alpha = -5^\circ \sim 7.5^\circ$  では  $C_C$  以外の  $C_N, C_D, C_L, C_{mcl/2}$  が極小値を形成し、原因が下面の  $C_p$  にあることも臨界 RN 以下の場合とほぼ同様であるが、上面の負圧が大きい分だけ  $C_N, C_L$  は増加、 $C_D$  は減少を示す。詳細については「9.2」で考察する。極小値は  $\alpha = 0^\circ$  で  $C_N = C_L = 0.5$ ,  $\alpha = 2.5^\circ$  で  $C_{mcl/2} = -0.07$ ,  $\alpha = 5^\circ$  で  $C_D = 0.1$  である。 $C_C$  は  $\alpha \geq 5^\circ$  で負となって帆走域 (aerial tourbillion 域) に入る。

$\alpha = 10^\circ \sim 30^\circ$  では  $C_N, C_L$  は  $\alpha = 10^\circ$  で僅かな落差を生じた後  $\alpha = 25^\circ$  で鋭い極大値  $C_N = 1.98$ ,  $C_{Lmax} = 2.02$  に達し、その直後に失速する。 $C_C$  は負のまま引き続いて  $\alpha$  とともに  $\alpha = 25^\circ$  まで単調に減少して最小値約  $-0.56$  に達した後急増に転じて尖った凹地を形成する。 $C_D$  は  $\alpha$  とともに増加し始める。 $C_{mcl/2}$  は  $\alpha = 30^\circ$  で極大値  $0.1$  に達し、不安定傾向を示す。

$\alpha = 30^\circ \sim 48^\circ$  ではいずれも  $\alpha$  に対してほぼ直線的に変化し、 $C_N = 1.6 \sim 1.8$ ,  $C_D = 0.6 \sim 1.0$ ,  $C_L = 1.5 \sim 1.6$  と増加、 $C_C = -0.2 \sim -0.5$  と減少、 $C_{mcl/2} = 0.1$  と変化しない。 $\alpha \geq 40^\circ$  ではいずれも、臨界 RN 以下の場合とほぼ等しく、臨界状態のないことを覗わせる。 $\alpha = 30^\circ$  における RN による相違は上面の  $C_p$  の相違によるものである (図 5)。 $\alpha = 45^\circ$  の場合については「9.3」で考察する。

$\alpha = 48^\circ \sim 51^\circ$  では、 $C_L$  は  $1.08$  まで急落、 $C_N$  は  $1.6$  まで低下、 $C_C$  は  $-0.05$  まで増加、 $C_D, C_{mcl/2}$  はほとんど変化しない。

$\alpha = 51^\circ \sim 55^\circ$  では臨界 RN 以下の場合とよく一致し、 $C_N, C_C, C_D, C_L$  は急増する。

$\alpha = 60^\circ \sim 90^\circ$  でも臨界 RN 以下の場合とよく一致するが、 $C_N, C_D$  は約  $0.05$  大きく、 $\alpha = 90^\circ$  で約  $2.37$  となる。これは誤差の程度とも考えられる。

以上総合して、臨界 RN 以上では、 $\alpha = \pm 90^\circ$  間において、 $C_N$  は  $-1.2$  から  $2.37$  の間にあり、途中、 $\alpha = -58^\circ \sim 0^\circ$  で  $C_N > 0$  となる逆法線力域 (風車適性)、 $\alpha = 0^\circ$  で鋭い極小、 $\alpha = 25^\circ$  で鋭い極大、 $\alpha = 30^\circ \sim 50^\circ$  で鍋底を形成する。臨界 RN 以下で

の値に対する増分  $\Delta C_N$  は  $\alpha = -50^\circ \sim 25^\circ$  で約 1.5 ~ 1 と大きい。 $C_C$  は 0, 1.6 ( $\alpha = -50^\circ$ ),  $-0.56$  ( $\alpha = 25^\circ$ ), 0 の間にあり,  $\alpha = -20^\circ$  で臨界 RN 以下の場合と交叉し,  $\Delta C_C \approx \pm 0.8$  の間にある。 $C_C < 0$  となる帆走域 ( $\alpha \approx 5^\circ \sim 50^\circ$ ) は, 臨界 RN 以下の場合の約 3 倍広い。 $C_D$  は 1.2, 0.1 ( $\alpha = 5^\circ$ ), 2.37 と凹地を形成し,  $\Delta C_D$  は  $\alpha = -50^\circ \sim 25^\circ$  で約 0.6 ~ 0.4 である。 $C_L$  は 0, 1.6 ( $\alpha = -50^\circ$ ), 0.5 ( $\alpha = 0^\circ$ ), 2.02 ( $\alpha = 25^\circ$ ), 0 の間にある。 $\Delta C_L$  は  $\alpha = -50^\circ \sim 25^\circ$  で約 1.6 ~ 1.1 と大きい。 $C_{mc/2}$  は 0,  $-0.07$  ( $\alpha = 2.5^\circ$ ) から 0.1 ( $\alpha = 30^\circ$ ), 0 の間にあり,  $\alpha = 2.5^\circ \sim 30^\circ$  が不安定域となる。 $\Delta C_{mc/2}$  は  $\alpha = -5^\circ \sim 15^\circ$  で高々 0.05 である。

## 7. 前岐点と上面剝離点

$C_p$  分布から岐点位置  $\phi_0$  および上面剝離点位置  $\phi_s$  を求め, 風軸 (下面中央を通る主流方向の線,  $\alpha + \phi = 0$ ) を基準とした径角  $\alpha + \phi_0$ ,  $\alpha + \phi_s$  の  $\alpha$  に対する変化ならびに前縁, 後縁, クレストとの相対関係を図 7 に示し, 特徴をつぎに述べる。ここで, 臨界 RN 以下の場合, 小模型の風速  $V \approx 20\text{m/s}$  による結果を用い, 臨界 RN 以上の場合, 大模型の  $V \approx 20\text{m/s}$  による結果を用いた。なおここで風軸を基準とした径角  $\alpha + \phi$  を用いた理由は, 円柱の場合に対比させることによって,  $C_p$  の変化のある部分を認識し易くすることにある。特に下面でも仮想円上からの投影で  $\phi$  を表すことにより, 上下面の座標位置の相対関係を対応させたが, これは円柱の  $\phi$  と平板の  $\phi$  をこのように対応させることにより, 円柱と平板の  $\alpha + \phi_0$  と  $\alpha$  の対応がほぼ一致するので,<sup>15)16)</sup> 採用した。 $\phi_s$  は負圧ピークを超えて負圧一定もしくは凹となる領域の始めを採った。

### 7.1 臨界 RN 以下の場合 (図 7 の○印)

岐点は  $\alpha = -90^\circ \sim -40^\circ$  では風軸 ( $\alpha + \phi_0 = 0$ ) にあって円柱と対応している。 $\alpha = -40^\circ \sim 2.5^\circ$  では  $\alpha + \phi_0 \approx 0^\circ \sim 17^\circ$  と大きく増加し, 上面を相対的に後退する。 $\alpha = 0^\circ$  では  $\alpha + \phi_0 \approx 13^\circ$  である。 $\alpha = 5^\circ \sim 30^\circ$  では  $\alpha + \phi_0 \approx 17^\circ \sim 20^\circ$  と僅かに増加して,  $\alpha = 20^\circ$  で岐点は前縁を通過して, 下面に移動する。 $\alpha = 35^\circ \sim 40^\circ$  では  $\alpha + \phi_0 \approx 20^\circ \sim 3^\circ$  まで

急減し, 岐点は下面を相対的に後退して風軸に近くなる。 $\alpha = 40^\circ \sim 50^\circ$  では  $\alpha + \phi_0 \approx 3^\circ$  一定で, 円柱および平板の場合よりも相対的に僅かに前進しているがほぼ近いことを示している。 $\alpha = 51^\circ$  でステップ状に前進して  $\alpha = 51^\circ \sim 60^\circ$  ではそのまま  $\alpha + \phi_0 \approx 9^\circ$  一定となる。 $\alpha = 60^\circ \sim 90^\circ$  では  $\alpha + \phi_0 = 9^\circ \sim 0^\circ$  までほぼ直線的に減少して風軸位置まで後退する。

上面剝離点は  $\alpha = -90^\circ \sim 30^\circ$  では  $\alpha + \phi_s \approx 90^\circ$  一定とほぼクレストにあり, 円柱の場合と相対的に一致している。 $\alpha = 35^\circ$  で  $\alpha + \phi_s \approx 85^\circ$  と一旦相対的に前進した後  $\alpha = 37.5^\circ$  で  $\alpha + \phi_s \approx 110^\circ$  まで急に増加して相対的に後退する。 $\alpha = 40^\circ \sim 50^\circ$  では  $\alpha + \phi_s \approx 110^\circ$  一定のままである。 $\alpha = 51^\circ$  で突如クレスト ( $\alpha + \phi_s = 90^\circ$ ) まで相対的に前進する。 $\alpha = 52^\circ \sim 53^\circ$  では  $\phi_s = 0^\circ$  (前縁)  $\sim 50^\circ$  の間に気泡 (バブル) 類似形を形成しているのか, 剝離点が不鮮明である。 $\alpha = 55^\circ$  になると明らかに  $\phi_s = 0$  となって, 上面は前縁から剝離し,  $\alpha = 90^\circ$  までこの状態が続く。

以上総合して, 臨界 RN 以下の場合, 岐点は  $\alpha = -90^\circ \sim 20^\circ$  では上面にあって中央から出発して暫く, 風軸位置を保って円柱に対応した後  $\alpha + \phi_0$  が増加して  $\alpha = 20^\circ$  で風軸の最上方に達する。 $\alpha > 20^\circ$  で下面に移ると  $\alpha + \phi_0$  は急減, 増, 減と  $\alpha$  に対してほぼクランク状に変化して  $\alpha = 90^\circ$  で中央 (風軸) に達する。上面剝離点は,  $\alpha = -90^\circ \sim 30^\circ$  では風軸を基準として円柱に対応する位置 ( $\alpha + \phi_s = 90^\circ$ ) にあるが, 前縁に 2 つの負圧ピークが形成される所 ( $\alpha = 40^\circ \sim 50^\circ$ ) で突如として後退して, 暫く  $\alpha + \phi_s \approx 110^\circ$  一定の状態を保った後,  $\alpha \approx 55^\circ$  では前進して前縁に達し,  $\alpha = 90^\circ$  までそのままとなる。岐点が上面にあるときの, 岐点と剝離点の間隔の最大, 最小はそれぞれ,  $\alpha \approx -90^\circ \sim -40^\circ$ ,  $20^\circ$  にあって  $\phi_s - \phi_0 \approx 90^\circ$ ,  $70^\circ$  である。しかし  $\alpha = 40^\circ \sim 50^\circ$  では岐点は下面にあるが  $\phi_s - \phi_0 \approx 115^\circ$  は最大値を示す。

### 7.2 臨界 RN 以上の場合 (図 7 の▽印)

岐点は  $\alpha = -90^\circ$  では風軸 ( $\alpha + \phi_0 = 0^\circ$ ) にあるが,  $\alpha = -80^\circ \sim -25^\circ$  では風軸の下方にきて  $\alpha +$

$\phi_0 \approx -7^\circ$  まで下り、この時には「5.2」で述べたように上面の負圧が非常に大きくなるという特異性を示す。 $\alpha = -20^\circ \sim 0^\circ$  では  $\alpha + \phi_0 \approx 0^\circ \sim 11^\circ$  まで増加して上面を相対的に後退するが臨界 RN 以下の場合より  $\phi_0$  は約  $5^\circ$  小さく、上面で前縁寄りにある。 $\alpha = 0^\circ \sim 15^\circ$  では  $\alpha + \phi_0 = 11^\circ \sim 14^\circ$  と僅かに増加して  $\alpha \approx 15^\circ$  で岐点は前縁を通過して下面に移動するが、臨界 RN 以下の場合より  $\alpha$  は約  $5^\circ$  小さい。 $\alpha = 20^\circ \sim 40^\circ$  では  $\alpha + \phi_0 = 14^\circ \sim 3^\circ$  までほぼ直線的に減少して岐点は下面を相対的に後退してほぼ風軸に近くなる。 $\alpha = 40^\circ \sim 90^\circ$  では、臨界 RN 以下の場合とほぼ一致する。

上面剝離点は  $\alpha = -90^\circ \sim -50^\circ$  で後縁 ( $\phi_s = 180^\circ$ ) にあり、 $\alpha + \phi_s = 90^\circ \sim 130^\circ$  と直線的に増加して相対的に後退するが、これは円柱の剝離点の臨界 RN 以下の場合から以上の場合へ移ることに相当する。 $\alpha = -50^\circ \sim -10^\circ$  では  $\alpha + \phi_s = 130^\circ$  一定で円柱の場合と相対的に一致している。 $\alpha = -10^\circ \sim 0^\circ$  で  $\alpha + \phi_s \approx 130^\circ \sim 135^\circ$  と僅かに増加して、相対的に剝離点は後退する。 $\alpha = 0^\circ \sim 15^\circ$  では  $\alpha + \phi_s \approx 135^\circ$  はほぼ一定である。 $\alpha = 15^\circ \sim 30^\circ$  では  $\alpha + \phi_s \approx 110^\circ$  まで減少して、円柱の剝離点よりも相対的に前進する。 $\alpha = 40^\circ \sim 90^\circ$  では臨界 RN 以下の場合とほぼ一致する。

以上総合して、臨界 RN 以上の場合には、岐点は  $\alpha = -90^\circ \sim 15^\circ$  では上面にあって、中央(風軸上)から  $\alpha + \phi_0$  は蛇行し、 $\alpha < -20^\circ$  では風軸の下方に来る特異性を示し、 $\alpha = 15^\circ$  では風軸の最上方に達する。下面に移ると  $\alpha + \phi_0$  は減、増、減と  $\alpha$  に対してほぼクランク状に変化して  $\alpha = 90^\circ$  で中央(風軸)に達する。上面剝離点は風軸を基準として円柱に対応する位置 ( $\alpha + \phi_s \approx 130^\circ$ ) に後縁が達するまでは後縁にあるが ( $\alpha = -90^\circ \sim -50^\circ$ )、その後僅かに後退して失速 ( $\alpha \approx 25^\circ$ ) するまでは、ほぼ円柱に対応する。失速後は、急速に前進するが、前縁に2つの負圧ピークが形成される所 ( $\alpha = 40^\circ \sim 50^\circ$ ) では  $\alpha + \phi_s \approx 110^\circ$  で一旦停滞躊躇した後  $\alpha = 55^\circ$  で前縁に達し、 $\alpha = 90^\circ$  までそのままとなる。岐点、剝離点ともに  $\alpha = 40^\circ \sim 90^\circ$  では臨界 RN 以下の場合とほぼ一致し、臨界状態はなくなる。 $\alpha = 30^\circ \sim 50^\circ$  における剝離点は、円柱の臨界 RN 以下の場合

と以上の場合の丁度中間となる。また岐点が上面にあるときの岐点と剝離点の間隔の最大、最小はそれぞれ  $\alpha = -50^\circ, -90^\circ$  にあり  $\phi_s - \phi_0 = 137^\circ, 90^\circ$  である。

## 8. 気流試験結果

半円柱回りの流れは  $C_p$  分布と対応し、岐点が上面中央、上面前縁寄り、下面前縁寄り、下面中央にある場合でそれぞれ大きく異なる。第1の場合は上面では円柱前面、下面では平板裏面の流れに類似する。第2～第3の場合は半円柱特有の流れを示す。第4の場合は、下面では平板前面に類似し、上面では半円柱特有の剝離した流れとなる。したがってここでは第2、第3の場合を中心に流れの模様を述べる。臨界 RN 以下の場合には煙試験によって断面の流線を観察できるが、臨界 RN 以上の場合には煙が乱れて観察できないので気流系試験によって表面流れの乱れ状況のみを観察した。

### 8.1 煙試験結果(臨界 RN 以下)

半円柱の臨界 RN 以下の場合における煙試験結果のうち岐点が上面前縁寄り ( $\alpha = 1^\circ, 5^\circ, 15^\circ$ )、下面前縁寄り ( $\alpha = 30^\circ, 46^\circ, 50^\circ, 52^\circ$ )、下面中央 ( $\alpha = 90^\circ$ ) にある場合の写真を図8に示し、特徴をつぎに述べる。実験 RN は約  $1.6 \times 10^5$  である。写真は16ミリ映画を反転拡大したものである。

$\alpha = 0^\circ \sim 15^\circ$  では岐点が上面前縁寄りにあって、上面の剝離点はほぼクレストにある。下面は前縁から剝離するが、 $\alpha$  の増加とともに、上面岐点は前縁に近付いて前縁剝離流の後縁への廻り込みが大きくなり、同時に主流に対して後縁が前縁より下って、後縁から再付着が始まり、 $\alpha$  とともに次第に前縁に進む。ここでは下面の前縁剝離領域は  $\alpha$  の増加とともに後縁から再付着して狭くなるので負の  $C_{mc/2}$  を示し、また剝離領域の負圧は上面よりも大きいため負の  $C_L$  となる。いずれも極小値を持つ特異な凹地を形成する。

$\alpha = 30^\circ \sim 52^\circ$  では岐点が下面前縁寄りにあって、下面はほぼ同じ平板前面の流れに類似する。また、上面の剝離点は前縁になくて後方にあるので、前縁が尖っているにも拘らず、前縁半径を有する通常の

翼型回りの前縁付近の流れに類似している特徴を示す。剝離点は $\alpha = 30^\circ$ でクレスト、 $\alpha = 46^\circ, 50^\circ$ でクレスト後方にあるが、後2者は前縁に流線の膨らみがあって気泡域を観察できる。 $\alpha = 52^\circ$ でも前縁からクレスト後方にかけて流線の膨らみがあるように見えて、気泡類似域を観察でき(「8.2」参照)その後方で剝離している。

$\alpha = 90^\circ$ では岐点が下面中央にあって下面は直立平板の前面の流れに類似する。上面は前後縁から剝離するが後流の最大幅は弦長よりかなり大きい。これらの流れは $\alpha \geq 60^\circ$ でもほぼ同様の状態を示す。

## 8.2 気流系試験結果(臨界RN以上)

半円柱の臨界RN以上の場合における気流系試験結果のうち、基準となる $\alpha = 0^\circ$ での上下面および半円柱の特異性を示すものとして、 $\alpha = 5^\circ$ の後縁から再付着する下面ならびに $\alpha = 45^\circ$ の前縁に気泡域を形成する上面の場合について図9に示し、特徴をつぎに述べる。実験RNは約 $4 \times 10^5$ である。なお臨界RN以下の場合も実施したが、 $\alpha = 0^\circ \sim 30^\circ$ で上面付着域がやや狭いと思われる程度で特徴的な部分についてはほとんど差がないので省略する。図は35ミリフィルム写真を拡大して、不鮮明な部分を手書き修正したものである。

$\alpha = 0^\circ$ では岐点が上面前縁寄りであるが図9からは識別できない。上面の剝離点はクレスト後方にあるが円柱に類似していることが判る。下面は前縁部の乱れが小さくて、上面からの流れの廻り込みの大きいことが推測され、剝離は前後縁に亘っていることが判る。

$\alpha = 5^\circ$ の下面では $\alpha = 0^\circ$ の場合と同様に前縁部の乱れは小さいが、後縁部で再付着している所が異なる。この状態は臨界RN以下の場合でもほぼ同様である。

$\alpha = 45^\circ$ の上面では、前縁2列( $\phi = 0 \sim 10^\circ$ )の気流系が乱れているが、その直後ではきれいに再付着し、それがかなり続いて第7列の半ば( $\phi = 65^\circ$ )辺りの気流系から剝離している。前縁の乱れは気泡類似領域を示すものと思われる。

なお図8の $\alpha = 52^\circ$ に見られた上面前縁の気泡類似域はその直後の剝離域と気流系の乱れの上では識

別できなかった。また $\alpha = -50^\circ$ 付近で上面負圧が高くなる特異性も気流系試験では識別できない。

## 9. 考 察

### 9.1 臨界RN以上の負の大迎角における半円柱の前縁効果

臨界RN以上では、半円柱は負の $\alpha$ 全域で $C_L$ が正となる。特に $\alpha = -60^\circ \sim -50^\circ$ では $C_L > 1$ となり、負圧ピークが $-C_p > 3$ (円柱のポテンシャル流中の値)となる特異現象を示す。このような現象は円柱の $\phi = -60^\circ \sim -50^\circ$ にフラップを立てた場合(RN =  $5.2 \times 10^5$ )にも見られる<sup>19)</sup>そこで半円柱前縁位置と円柱のフラップ位置を対応させて、それぞれの $C_p$ を図10に示し、つぎにこれを考察する(円柱の $\alpha$ は前方フラップ位置を半円柱前縁に対応させて採る)。

図10(a)はフラップ( $f/c = 0.06$ )を取り付けた円柱との比較( $\alpha = -60^\circ$ )である。まず、フラップが前に1つの場合(図中の△印)は、岐点から下方に向う表面の流れは、フラップで堰止められて、その前で圧力は上昇し、また、フラップの後で剝離して一定の背圧約 $-0.6$ となる。そして堰止めによって、上面に向う流れが加速されるので上面負圧ピークは増大する。負圧ピークの大きさは半円柱の場合にほぼ等しいが、背圧は半円柱の場合( $-0.9$ )より小さく(約 $-0.6$ )、円柱の場合(約 $-0.4$ )よりやや大きい。

半円柱の場合(図中の▽印)は前縁に堰止め効果はないものの、円柱ならばここで下面に沿って加速されるべき流れが、半円柱では前縁で剝離して圧力が漏洩した形となって、岐点が円柱の下面相当位置( $\alpha + \phi < 0$ )に移り(図7)、それに応じて上面の加速領域(岐点とクレストの間)が広がって負圧ピークが増大するものと思われる。臨界RN以下の場合には、前縁が対応する円柱の剝離点に近いので、半円柱下面の剝離域の負圧と円柱の背圧がほぼ等しく(図5)、岐点もほぼ対応する位置にあるので負圧ピークが増大はない。

図10(a)において、また、円柱の前後に $\phi = 180^\circ$ の間隔をあけて2つのフラップを取付けた場合(図中の□印)は、前のフラップの効果は前述のとおり

であるが、後のフラップは負圧ピークを超えて未だ剝離していない減速流中にあるために、ここで流れを堰止めて圧力を増し、その前方の負圧ピークも低下して、円柱の場合にはほぼ等しくなるが、位置は円柱よりやや前方にくる。後のフラップ直前の $C_p$ は約 $-0.3$ と円柱の背圧にはほぼ等しいが、前と後のフラップの後方の背圧は約 $-1.2$ と大きくなる。

図 10 (b) はフラップ ( $f/c = 0.0037$ ) を前に 1 つ取付けた円柱 (図中の◁印) との比較 ( $\alpha = -50^\circ$ ) である。岐点から下方に向う表面の流れは前のフラップで一応堰止められるが、フラップが短いので、これを乗越えた流れは、フラップの下流で一旦負圧を増した ( $C_p \approx -1.5$ ) 後、一定値 ( $C_p \approx -0.5$ ) の背圧となり、円柱の背圧にはほぼ等しくなる。上面の負圧ピークは  $f/c = 0.06$  の場合よりやや小さくなるものと思われる。

以上総合して、臨界 RN 以上の場合の半円柱の  $\alpha = -60^\circ \sim -50^\circ$  における前縁の剝離は、円柱においてこれに対応する位置の 6% 翼弦フラップを有する場合の剝離と同様に、上面負圧ピークの大幅な増大効果を示すが、両者の機構は多少異なる。0.37% 翼弦フラップでは効果が薄く、また、径角  $180^\circ$  離れた 2 枚のフラップの場合後のフラップが負圧ピークを低下させて円柱並となる。

## 9.2 下面再付着を生ずる小迎角での空気力と $C_p$

図 6 から判るように半円柱では、臨界 RN 以下では  $\alpha = 0^\circ \sim 7.5^\circ$ 、臨界 RN 以上では  $\alpha = -5^\circ \sim 7.5^\circ$  において  $C_c$  以外の  $C_N$ 、 $C_L$ 、 $C_D$ 、 $C_{mc/2}$  が極小値を形成する特異現象を示すことは「6.1」、「6.2」で既に述べた。

この現象は前縁剝離した下面の流れが後縁から再付着することに伴って生ずる下面の  $C_p$  分布の変化が原因と考えられる。その詳細を調べるために上記  $\alpha$  における  $C_p$  分布および類似現象が想定される角柱の対応する  $C_p$  分布を図 11 に示し<sup>2)</sup> つぎにこれを考察する。なお図 6 から  $C_N$ 、 $C_L$  と  $C_{mc/2}$  の極小値を示す  $\alpha$  にずれのあることが判るがこれについても検討する。

半円柱の臨界 RN 以上では図中の▽~▽の  $C_p$  分布から明らかなように上面の負圧は▽が最小となり、

また下面の負圧は下面の前縁剝離流が後縁で再付着し始める▽が最大となって  $C_N$ 、 $C_L$  が極小となる。また、下面の D 点の前後の負圧の差が最大となる▽において  $C_{mc/2}$  が頭下げ最大となるが、これは再付着がかなり進んだ状態となるので、 $C_N$ 、 $C_L$  が極小となる  $\alpha = 0^\circ$  より大きな  $\alpha = 2.5^\circ$  で  $C_{mc/2}$  が極小とならずれを生ずることになる。 $C_D$  はこれより大きい  $\alpha = 5^\circ$  で極小となるが、これには  $C_c$  の負勾配が大きいことの影響が大きい。

半円柱の臨界 RN 以下では図中の①~④の  $C_p$  から明らかなように上面での  $-C_p$  は①②がほとんど変化なく③④で僅かに増加する程度であるが、下面の  $-C_p$  も臨界 RN 以上の場合と同様の変化を示し、②で最大となって  $C_N$ 、 $C_L$ 、 $C_D$  が極小となり ( $\alpha = 2.5^\circ$ )、③で下面の D 点の前後の負圧の差が最大となって  $C_{mc/2}$  が極小となる ( $\alpha = 5^\circ$ )。

前縁剝離流の再付着点が下面後縁から迎角とともに前進する場合に  $C_L$  等に負の勾配を生ずる現象は半円柱以外にもあり、角柱にその例が見られる<sup>2)</sup> すなわち図中の①~③の  $C_p$  から明らかなように、上面の  $-C_p$  は①②がほとんど変化なく、これは半円柱と同様であるが、 $B_1$   $B_2$  C の③が大きく低下していることは半円柱と異なる。下面の  $-C_p$  は下面の前縁剝離流が後縁で再付着し始める②が最大となり、これは半円柱と同様であるが、③は②より一様に低下しているが分布形は大差なく、これは半円柱の場合と異なる。以上の結果角柱の  $C_L$  は  $\alpha = 0^\circ \sim 12^\circ$  で低下して行く。

以上総合して半円柱では臨界 RN 以上および以下において前縁剝離流が下面後縁から再付着し始める  $\alpha$  で下面の  $-C_p$  が最大となって  $C_N$ 、 $C_L$  は極小となり、さらに再付着が進んで下面中央 D 点の前後の  $-C_p$  の差が最大となる  $\alpha$  で  $C_{mc/2}$  が極小となる。角柱でも再付着開始時に下面の  $-C_p$  は最大となるが、その後  $\alpha$  の増大とともに再付着点の前進が遅れ、上下面とも  $-C_p$  が大きく低下する。

## 9.3 $\alpha = 45^\circ$ 付近における半円柱の前縁気泡

半円柱では図 6 から判るように、 $\alpha \geq 40^\circ$  になると臨界 RN 以下および以上の空気力係数の差がほとんどなくなり、特に  $\alpha = 40^\circ \sim 50^\circ$  では  $\alpha$  に対して

$C_N$ ,  $C_L$ はほぼ一定,  $C_C$ は凹地状,  $C_D$ は増加率減少という特異現象を示すことは「6.1」, 「6.2」で既に述べた。

この現象は, 大迎角になると, 半円柱の上面の流れが前縁で剝離後, 気泡を形成して再付着し, 暫くしてから完全に剝離する(図5,  $\alpha = 45^\circ$ )ことにもとづき, RNとはほとんど無関係と考えられる。

$\alpha = 40^\circ \sim 50^\circ$ に見られた特異現象は前述のように $C_p$ 分布の変化によるものと考えられるので, これを図12(a)に示し, つぎにこれを考察する。臨界RN以下では図中の⑤~⑧から明らかなように下面は $\alpha$ とともに僅かな正圧増を見る。上面は後方の剝離領域の範囲と $C_p$ がほぼ一定のまま, ⑤⑥の間で前縁ピーク発生と本来の負圧ピーク(第2のピーク)の増大によって負圧が急増する。これは⑦で第2の負圧ピークが消滅するまで持続し, 負圧はほぼ一定に保たれる。その直後に⑧で前縁からの剝離が急激に広がって, 負圧が急減する。臨界RN以上では▽が⑤と大きく相違するが, ▽▽▽ (図中にはない)は⑥⑦⑧とほとんど大差なく, 臨界RN以下の場合と同様の変化を示す。⑥上面の前縁負圧ピークが気泡(バブル)を形成していることは図9( $\alpha = 45^\circ$ )から明らかである。

以上総合して $\alpha = 40^\circ \sim 49^\circ$ では前縁負圧ピークを生じ, 気泡域を形成してその後方の第2の負圧ピークを臨界RNと無関係に保持するという珍しい現象を示し, 剝離領域の範囲はほぼ一定し,  $C_p$ の変化も少ない。

#### 9.4 圧力係数に対する基準速度の採り方の影響

一般に, 1つの2次元のにおい物体に対する流れはかなり側壁の影響を受けることが指摘されており, 基準速度を採るべき風洞測定部内の位置によって空気力係数に差を生ずることが知られている。<sup>10)20)</sup>

そこで小半円柱( $c=0.05\text{m}$ )の $\alpha = 90^\circ$ の計器用風洞( $h=1\text{m}$ )中における実験(閉塞比 $c/h = 0.05$ と小さい)において, 本来の基準速度 $V$ (模型前方 $0.5\text{m}$ )と風洞上壁に近い通例の基準速度 $V_1$ (模型前方 $0.27\text{m}$ , 上方 $0.38\text{m}$ )の関係を図13(a)に示し, つぎにこれを考察する。 $V = 20 \sim 30\text{m/s}$ において $V_1/V$ は約 $1.025$ の程度であり, 風洞上壁

付近で通常計測される基準速度 $V_1$ は閉塞比が小さくても, 本来の基準速度 $V$ よりも速いことが判る(模型なしの場合は $V_1/V = 1$ )。

この我々の実験とほぼ同様の規模( $c=2\text{in}$ ,  $h=36\text{in}$ ,  $b=27\text{in}$ ,  $RN=0.66 \times 10^5$ )の半円柱に関する風圧分布実験値は<sup>2)</sup>我々の負圧係数よりやや小さい。前述の観点から, この結果が風洞上壁付近の速度 $V_1$ を基準としているものと考えれば, これを本来の基準速度 $V$ による負圧係数に換算すれば, やや大きくなる筈である。 $V_1$ を基準とする $C_{p1}$ と $V$ を基準とする $C_p$ の関係は次式で表わされる。

$$1 - C_p = (V_1/V)^2 (1 - C_{p1}) \quad (15)$$

この式を用い,  $V_1/V$ が前述の $1.025$ にほぼ等しいと仮定して文献2)の値を換算し, その前後の値と我々の値を図13(b)に示し, つぎにこれを考察する。文献2)の負圧係数( $C_{p1}$ と想定)約 $-1.4$ は我々の $C_p$ 約 $-1.5$ より約 $-0.1$ 小さいが, 前者を $C_p$ に換算すると, 非常によく我々の $C_p$ に一致する。

以上総合して, 半円柱の実験では閉塞比が約 $0.05$ と小さくても, 模型の前方と斜め上方では基準速度が約 $2.5\%$ 速くなることがあり,  $\alpha = 90^\circ$ の半円柱の背圧係数は約 $-1.4$ から約 $-1.5$ と約 $0.1$ の差を生ずる。

#### 9.5 二, 三の特別な場合の風圧分布展開図

臨界RN以上では, 負の大迎角( $\alpha \approx -45^\circ$ )で大きな正の $C_N$ (風に逆らう逆法線力)を, また,  $\alpha \approx 25^\circ$ では高い $C_{L\max}$ と大きな負の $C_C$ (帆走域)を示す(図6)。さらに $\alpha \approx 45^\circ$ ではRNにかかわりなく2つの負圧ピーク(図5)と大きな負の $C_C$ (帆走域)を示す。これらの特徴的な空気力と風圧分布の関係を直感的に理解するためには風圧分布展開図が効果的と考え, 上記の場合および基準となる $\alpha = 0^\circ$ ,  $\pm 90^\circ$ の場合を図14に示し(臨界RN以下の場合 $\alpha = -45^\circ, 0^\circ, 25^\circ$ で臨界RN以上の場合と大きく異なるので, 参考のために併せて図示した), つぎに考察する。

$\alpha = -90^\circ$ では,  $\phi = 90^\circ$ に岐点があり, 上面(前面)の正圧および負圧分布は臨界RN以下の円柱の場合に, また, 下面(裏面)の負の背圧分布は平板の場合によく類似している。 $C_R = -C_N = C_D =$



1.2である。

$\alpha = -45^\circ$ では、臨界 RN 以上で  $C_N > 0$  となって風に逆らう法線力を発生し、風車に利用する際の利点となる。これは下面中心で風軸に直交する軸の上面に、大きな負圧域を形成して、これが大きな  $C_L$  と  $C_N$  を発生させているためであることが判る。 $C_R = 1.47$ ,  $C_N = 0.65$  である。臨界 RN 以下の場合、この負圧域が大幅に減少するとともに、下面の負圧も増大して  $C_N$  は負となる。

$\alpha = 0^\circ$ では、岐点は上面にあり、臨界 RN 以上で上面にかなり大きな負圧域がある。しかし、下面の負の背圧も大きいので  $C_L$  はあまり大きくはならない。臨界 RN 以下の場合、上面の負圧域が大幅に減少して  $C_L$  は負となる。

$\alpha = 25^\circ$ では、臨界 RN 以上で、 $C_{Lmax} = 2.02$  という大きな値を発生し、また大きな負の  $C_C$  となる帆走域を示す。これは下面中心で風軸に直交する軸よりやや前寄りの上面に大きな負圧域が形成され、同時に下面の正圧域が狭いためであることが判る。臨界 RN 以下の場合、この負圧域が大幅に減少するとともに後縁寄りの上面負圧が増すため、 $C_C > 0$  となり、 $C_L$  も大幅に低下する。

$\alpha = 45^\circ$ では、RN にかかわりなく、大きな負の  $C_C$  となる帆走域を示す。これは、上面前縁の鋭いピーク状負圧域（気泡域を形成）と下面中心で風軸に直交する軸の上面にある大きな負圧域の合計が、上面後縁寄りの比較的大きな負の背圧域を上回っているためであることが判る。

$\alpha = 90^\circ$ では、 $\phi = -90^\circ$  に岐点があり、下面（前面）の正圧分布は平板の場合に、また上面（裏面）の負の背圧分布は、臨界 RN 以下の円柱の場合より僅かに大きめであるが類似している。 $C_R = C_N = C_D = 2.32$  である。

以上総合して、臨界 RN 以上の場合、 $\alpha = -45^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $45^\circ$ では、下面中心で風軸に直交する軸よりも前寄りの上面に大きな負圧域を形成し、これが風に逆らう法線力（風車に利用）、および負の翼弦力（帆走域）の発生に大きく寄与していることが判った。また、 $\alpha = \pm 90^\circ$  の風圧分布は、上面では臨界 RN 以下の円柱の場合に、また、下面では平板の場合に類似していることが判った。さらに  $\alpha = 0^\circ$ では、

臨界 RN 以下で上面より下面の負圧域が大きく  $C_L < 0$  となる。

## 10. むすび

以上、半円柱の風圧分布および空力特性について述べた。得られた成果の概要はつぎのとおりである。ここに風軸は主流が下面中心を通る線をいう。

1. 半円柱の境界修正は、迎角によって後流幅が大きく変化するので、迎角範囲を  $-90^\circ \sim 0^\circ$ ,  $0^\circ \sim 10^\circ$ ,  $10^\circ \sim 90^\circ$  に分けて修正し、閉塞効果と後流効果の割増が必要である。閉塞比は約 0.4 以下、正面縦横比は約 5 以上あれば、実用上修正可能と考えられる。

2. 風圧分布は、迎角約  $40^\circ$  以下では、円柱と同様に臨界レイノルズ数の前後で大きく変化する。迎角  $-90^\circ \sim 30^\circ$  の上面は、風軸を基準として、上方では円柱と類似の分布を示すが、負圧ピークは臨界レイノルズ数以上では、円柱並から約 1.4 倍の間で、また、臨界レイノルズ数以下では、円柱並から約 0.6 倍の間で変化する。下方では、迎角の増加とともに円柱の風圧分布が前縁で切られる形となる。下面では迎角約  $0^\circ$  以下では全面剝離して、臨界レイノルズ数以上では円柱並の背圧から約 2.5 倍の間で、また臨界レイノルズ数以下では円柱並から約 0.7 倍の間で変化する。迎角が増すと後縁から再付着が始まり、つぎに岐点が下面に移り、風圧分布は平板の前面に類似して、迎角  $90^\circ$  までこの傾向は続く。迎角  $40^\circ \sim 50^\circ$  では上面前縁に気泡を生じ高低 2 つの負圧ピークを持つ特異な風圧分布を示し、迎角  $60^\circ \sim 90^\circ$  では、上面は完全剝離して、中央にやや膨らみを持つ負圧分布を示し、背圧係数は約  $-1.5$  と平板より大きい。

3. 空気力係数は迎角約  $40^\circ$  以下では、臨界レイノルズ数の前後で大きく相違する。臨界レイノルズ数以下では迎角  $\pm 90^\circ$  間で、 $C_N = -1.22 \sim 2.28$ ,  $C_C = -0.4$  (帆走域)  $\sim 0.8$ ,  $C_D = 0.4 \sim 2.28$ ,  $C_L = -0.85 \sim 1.5$ ,  $C_{mc/2} = -0.08 \sim 0.12$  の間にある。臨界レイノルズ数以上では迎角  $\pm 90^\circ$  間で  $C_N = -1.2 \sim 2.37$ ,  $C_C = -0.56$  (帆走域)  $\sim 1.6$ ,  $C_D = 0.1 \sim 2.37$ ,  $C_L = 0 \sim 2.02$ ,  $C_{mc/2} = -0.07 \sim 0.11$  の間にある。 $C_C$  以外は迎角  $0^\circ$  付近で下面

後縁からの再付着に関係して極小値が形成されるが、臨界レイノルズ数以上の場合は以下の場合に比較して、 $C_N$ ,  $C_L$ は大きく $C_D$ は小さい。また、迎角 $45^\circ$ 付近では、上面前縁気泡とそれに伴う2つの負圧ピークに関連して、 $C_L$ の台地と $C_C$ ,  $C_D$ の凹地を形成する特異性を示す。

4. 岐点は迎角約 $40^\circ$ 以下では、臨界レイノルズ数以上の場合は以下の場合より前方にある。臨界レイノルズ数以下では迎角 $20^\circ$ で前縁にあり、これを境に上下面に別れ、 $\pm 90^\circ$ では風軸上に来る。臨界レイノルズ数以上では迎角 $15^\circ$ で前縁にあり、 $-20^\circ$ 以下では風軸の下方に来る特異性を示す。

5. 上面剝離点は迎角約 $-90^\circ \sim 40^\circ$ では、臨界レイノルズ数以上の場合は以下の場合より後方にある。臨界レイノルズ数以下の迎角 $30^\circ$ 以下では円柱同様クレスト(風軸からの方位角 $90^\circ$ )にある。臨界レイノルズ数以上の迎角 $-50^\circ \sim 20^\circ$ で円柱同様風軸からの方位角 $130^\circ$ にある。迎角 $40^\circ \sim 50^\circ$ では両者の中間の $110^\circ$ に来る。迎角 $50^\circ \sim 90^\circ$ では前縁剝離となる。

6. 閉塞比が5%程度であっても、迎角 $90^\circ$ の場合のように背圧が高い場合には、主流速度計測位置が模型の前方か斜前方かによって約2.5%の差を生じ圧力係数計算値が約7%異なる場合がある。

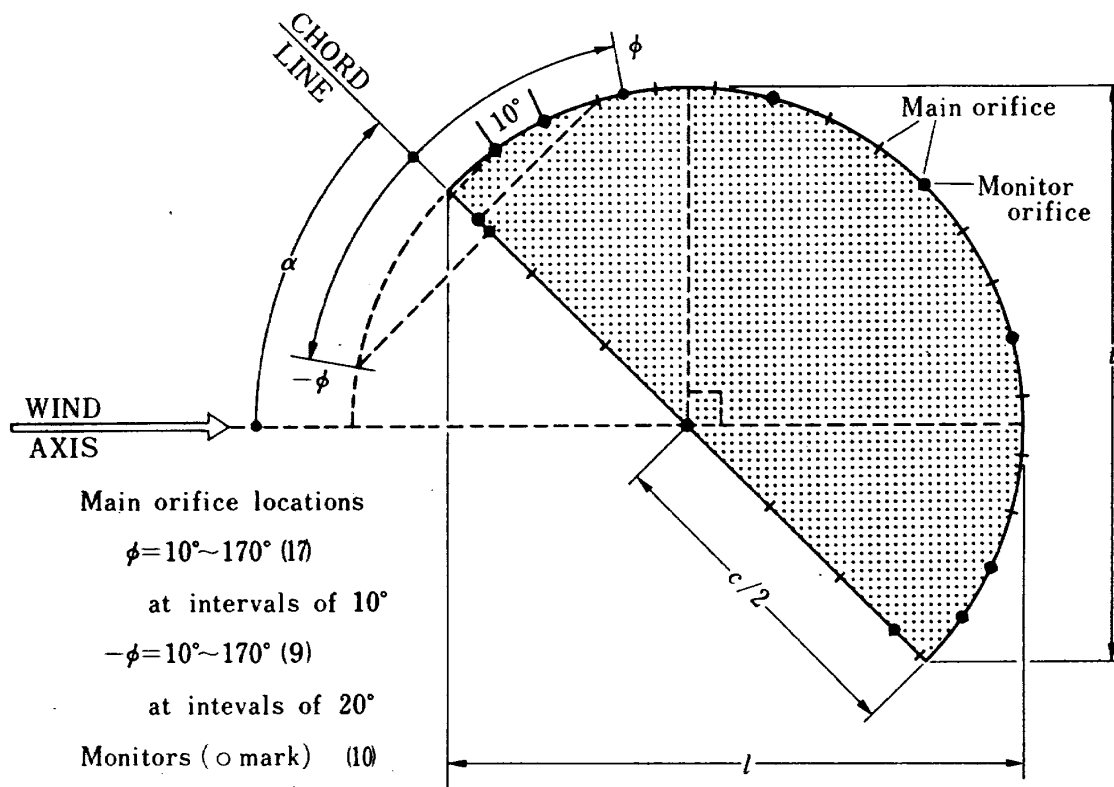
模型の製作および煙風洞実験には富士重工業(株)、模型の追加製作には(有)みづほ製作所の御協力を頂いた。また、中村泰治九州大学教授、吉永崇熱気流研究室長には文献の御教示を頂いた。実験には、廣末健一新型航空機第11グループリーダーに格別の配慮を頂き、富永幸一君、加藤祥二君の協力を得た。データ整理は、萬貴子嬢、小作まり子嬢、飯塚陽子嬢、寺崎ありさ嬢によった。

なお、本報告は既に航空宇宙学会に発表したもの<sup>21)-23)</sup>を大幅に改訂している。

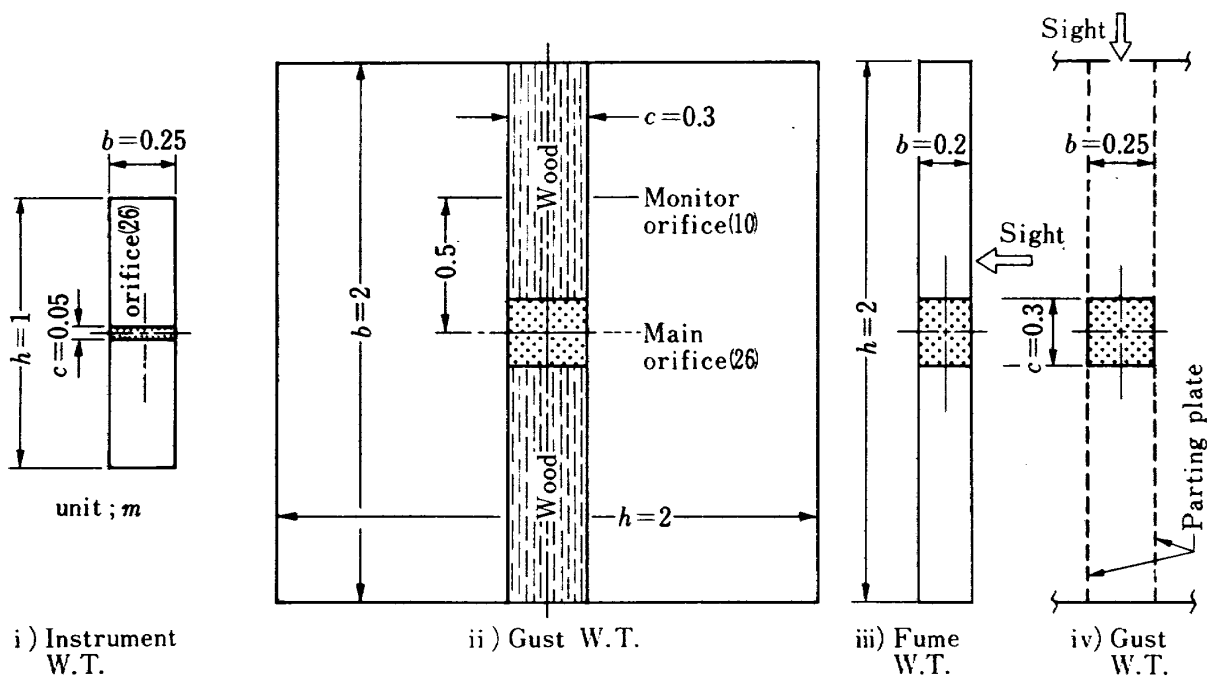
### 参 考 文 献

1. S.F. Hoener; Fluid-dynamic Drag (1958), 3-17, 6-2.
2. G.V. Parkinson, N.P.H. Brooks; On the Aeroelastic Instability of Bluff Cylinders, Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, (1961/6).
3. W.B. Karlsruhe; Bemerkenswerte Untersuchungsergebnisse aus der Arbeit des Windkanals der Dornier-Werke 1935-1945, Zeitschrift für Flugwissenschaften, (1954/12).
4. 航技研ニュース, (1980/12)
5. 廣末健一, 北村清美, 村上義隆, 進藤重美; 航空宇宙技術研究所突風風洞の計画と整備実験, 航空宇宙技術研究所報告 TR-335, (1973/9)
6. 空気力学部門委員会; 国内現用風洞一覽表, 日本航空宇宙学会誌 (1974/11)
7. A. Pope; Wind-Tunnel Testing, John Wiley & Sons Inc., New York, Chapman & Hall, Limited, London (1954).
8. M. Glauert; The Characteristics of Kármán Vortex Street in a Channel of Finite Breadth, British A.R.C., R & M 868, (1923/3), R & M 1151, (1923/11).
9. V.J. Modi, S. EL. Sherbiny; Effect of Wall Confinement on Aerodynamics of Stationary Circular Cylinders, Proceedings of the International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures, Tokyo (1971), p. 365.
10. E.C. Maskell; A Theory of the Blockage Effects on Bluff Bodies and Stalled Wings in a Closed Wind Tunnel, British A.R.C., R & M 3400, (1963/11).
11. 桧和田宗彦, 馬淵幾夫; 高ブロック比における円柱まわりの流動と熱伝達, 日本機械学会論文集(B編), (1980/9), p.1750
12. 桧和田宗彦, 丹羽清美, 馬淵幾夫, 熊田雅弥; 円柱からの局所物質伝達に対するブロック比効果に関する研究, 日本機械学会論文集(第2部), (1976/8), p.2485-11
13. G.S. West, C.J. Apelt; The Effects of Tunnel Blockage and Aspect Ratio on the Mean Flow Past a Circular Cylinder with Reynolds Numbers between  $10^4$  and  $10^5$ , Journal of Fluid Mechanics, (1982 Vol. 114), p. 375.

14. 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, 日本航空学会誌 (1968/1), p.3
15. A. Fage, F.C. Johansen; On the Flow of Air behind an Inclined Flat Plate of Infinite Span, British A.R.C., R & M, 1104, (1927/2), p. 83.
16. T.S. Shaw; Effect of Side Walls on Flow Past Bluff Bodies, Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, (1971/1), p. 66.
17. I.H. Abbott, A.E. von Doenhoff; Theory of Wing Sections, Dover Publications, Inc., New York, (1959).
18. F. Cheers; A Note on Galloping Conductors, Report No. MT-14, National Research Council of Canada, (1950/6/30).
19. V.E. Lockwood, L.W. McKinney; Effect of Reynolds Number on the Force and Pressure Distribution Characteristics of a Two-Dimensional Lifting Circular Cylinder, NASA TND-455, (1960/9).
20. A.S. Ramamurthy, P.M. Lee, G.P. Ng; Velocity Scales for Constrained Flow, Aeronautical Journal, (1975/1).
21. 滝澤直人, 岡田典秋; 半円柱の低レイノルズ数における空力特性, 第12回流体力学講演会講演集, (1980/10/16 ~ 17 九州大学工学部), p.242
22. 滝澤直人, 岡田典秋; 半円柱の高レイノルズ数における空力特性, 第13回流体力学講演会講演集, (1981/10/19 ~ 20 三菱重工業(株) 名古屋航空機製作所教育センター), p.14
23. 滝澤直人, 岡田典秋, 岩崎昭人; 半円柱風圧分布に関する比較実験, 第14回流体力学講演会講演集, (1982/10/18 ~ 19 京大会館), p.286



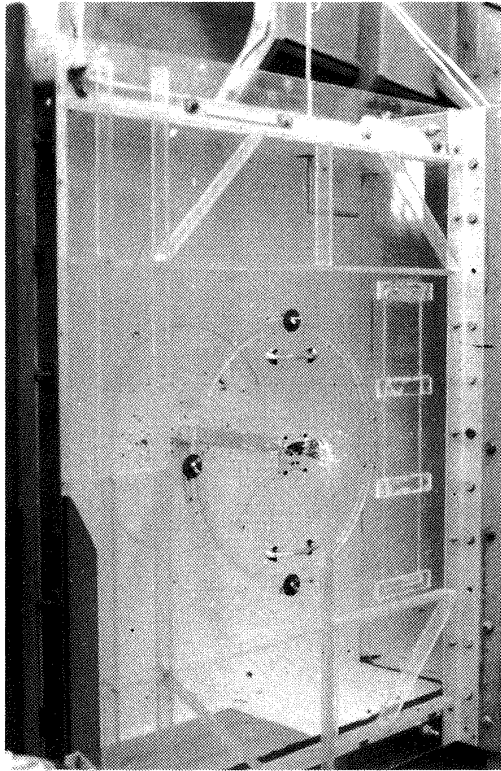
(a) Semi-circular cylinder section, flow geometry and orifice locations



(b) Front view of W.T. (wind tunnel) sections with the model

Figure 1 Geometry of semi-circular cylinder and wind tunnel sections

図1 半円柱と風洞断面の幾何学



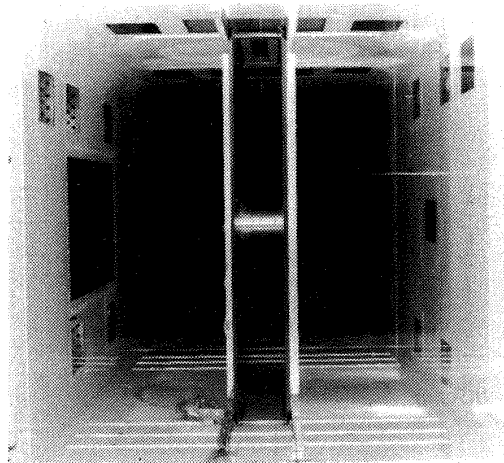
(a) Small model in NAL Instrument Wind Tunnel (side view)  
航技研計器用風洞中の小模型(側方)



(b) Long large model in NAL Gust Wind Tunnel (front view)  
航技研突風風洞中の長大模型(前方)



(c) Fume test in Fuji Heavy Industries Wind Tunnel (side view)  
富士重の煙風洞における気流試験(側方)

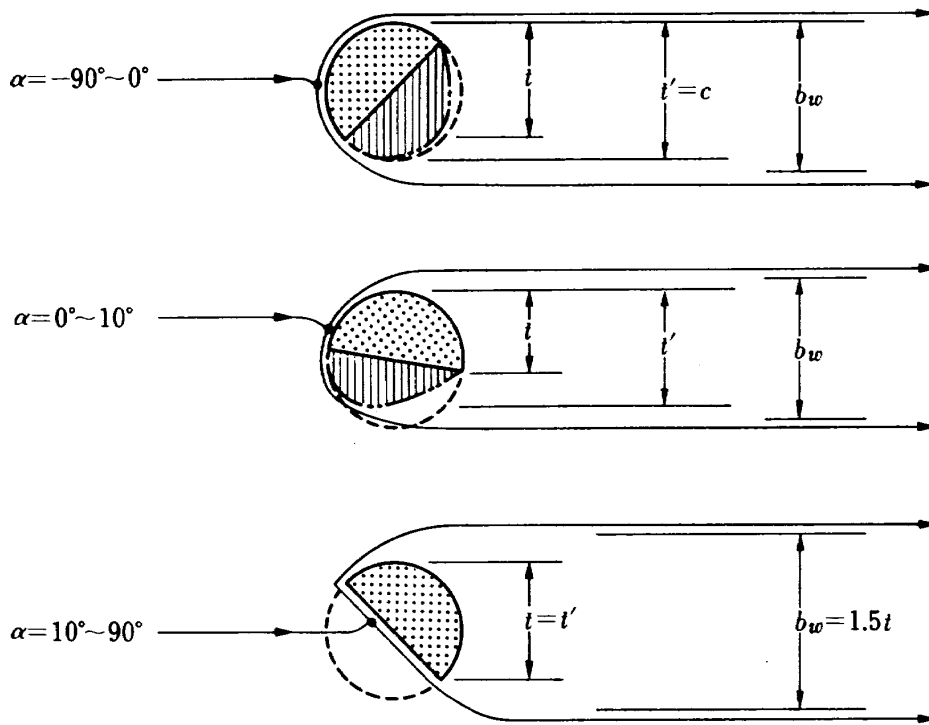


(d) Tufts test with two parting plates in NAL Gust Wind Tunnel (rear view)  
突風風洞で仕切板2枚をつけた気流系試験(後方)

Figure 2 Photographs of wind tunnel tests of semi-circular cylinders

図 2 半円柱風洞試験中の写真

(a) Stream model



(b) Parameters

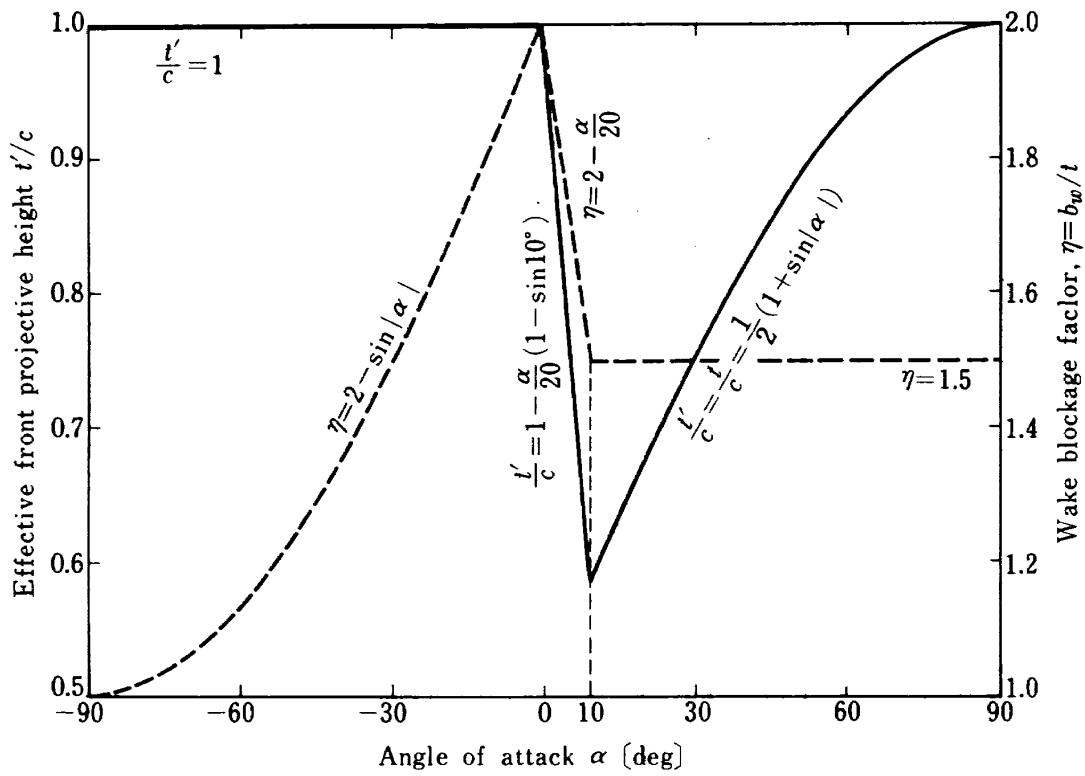


Figure 3 Stream model around semi-circular cylinder and parameters for blockages

図3 半円柱まわりの流れのモデルと閉塞パラメータ

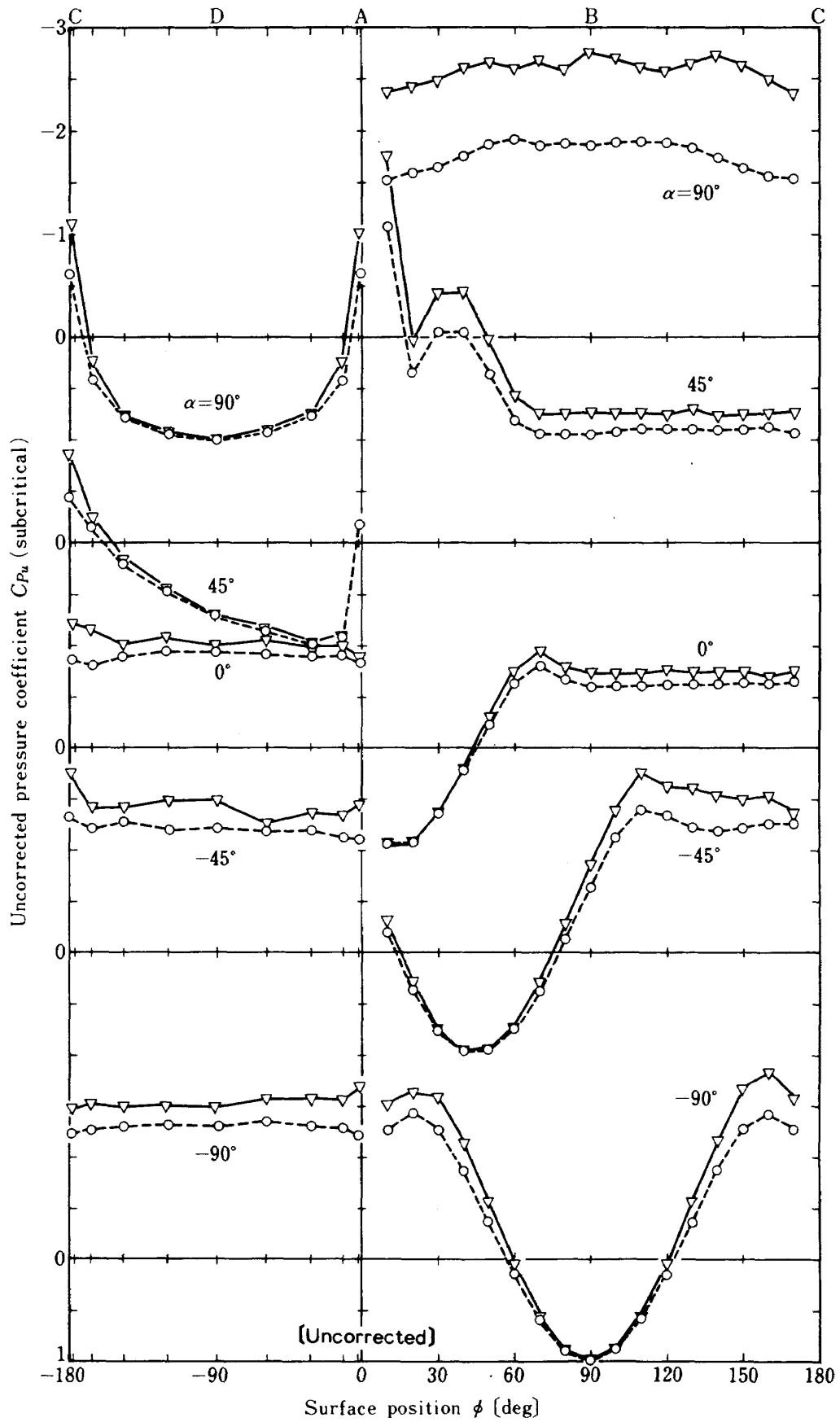


Figure 4 Comparison of pressure distributions over two semi-circular cylinders (I)

図 4 2つの半円柱風圧分布の比較

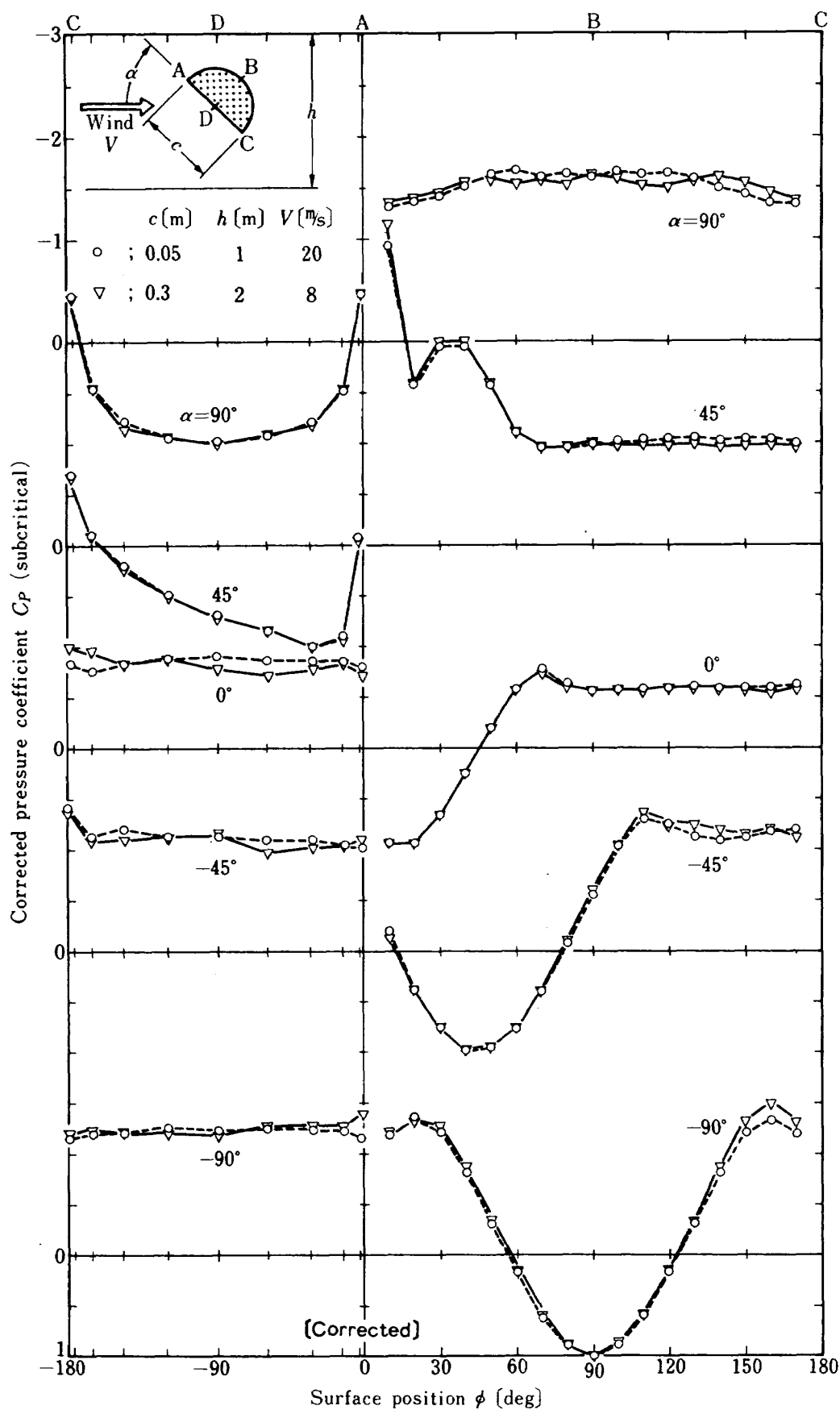


Figure 4 Comparison of pressure distributions over two semi-circular cylinders (II)

図4 つづき



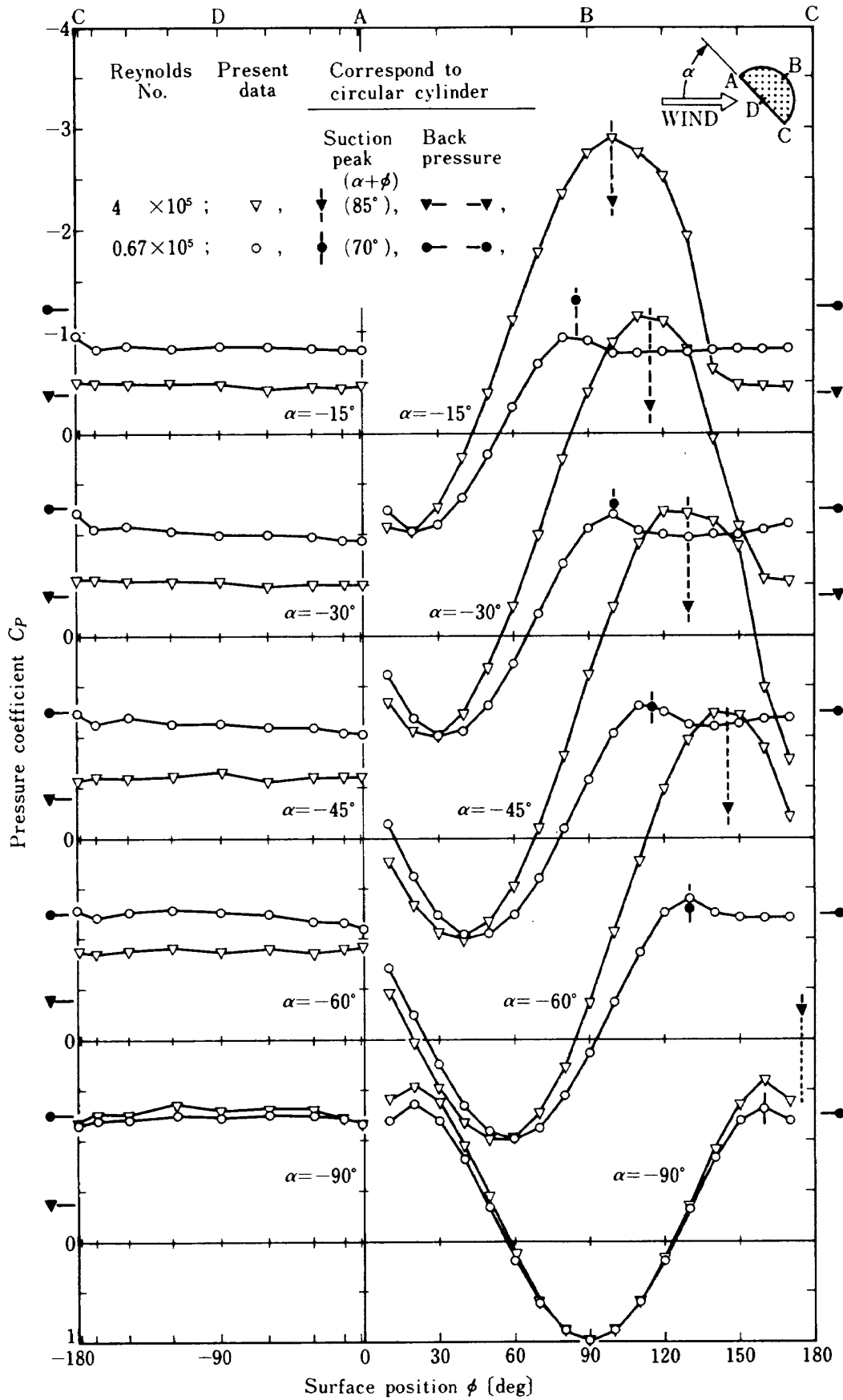


Figure 5 Pressure distributions over the semi-circular cylinder (I)

図 5 半円柱風圧分布

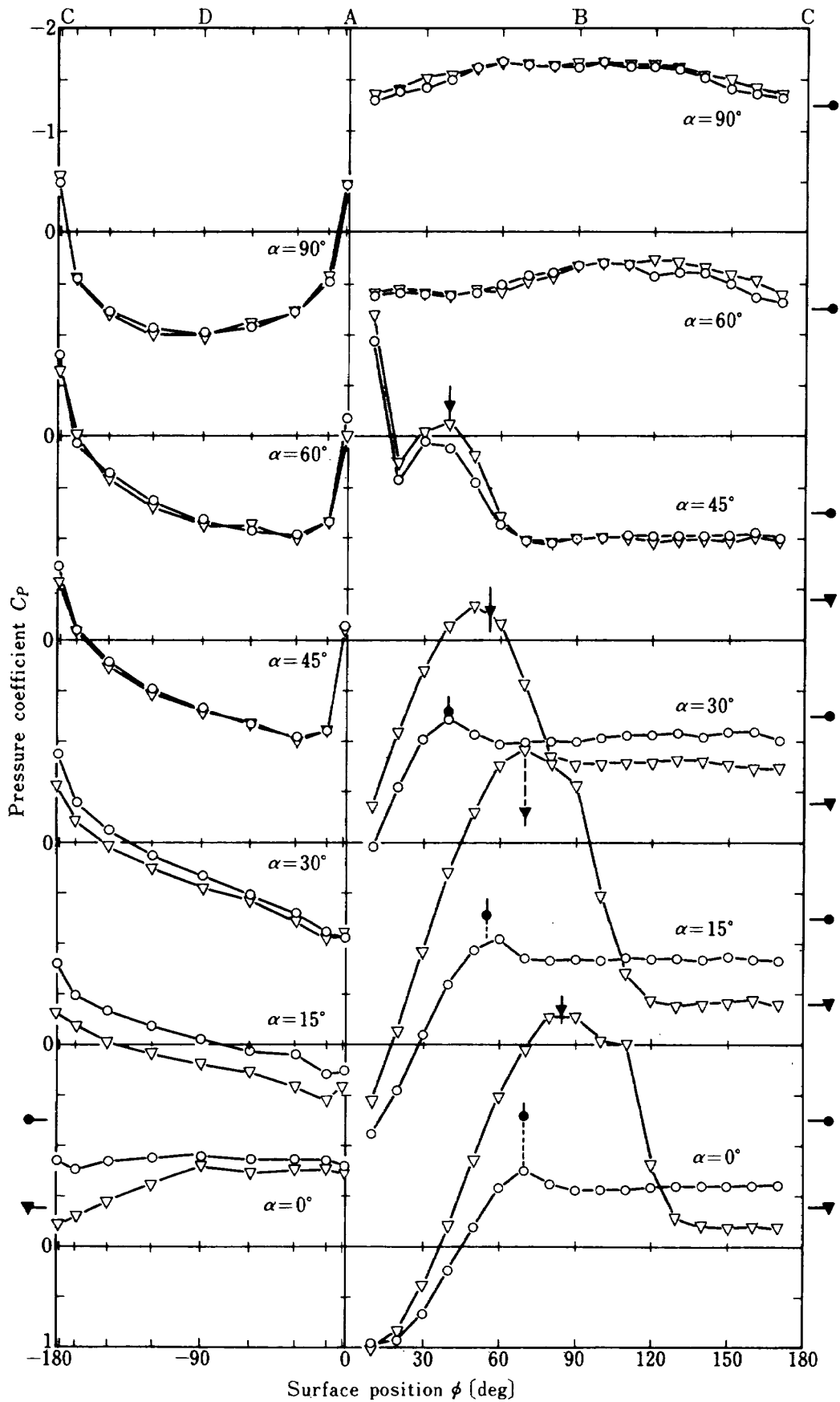


Figure 5 Pressure distributions over the semi-circular cylinder (II)

図 5 つづき

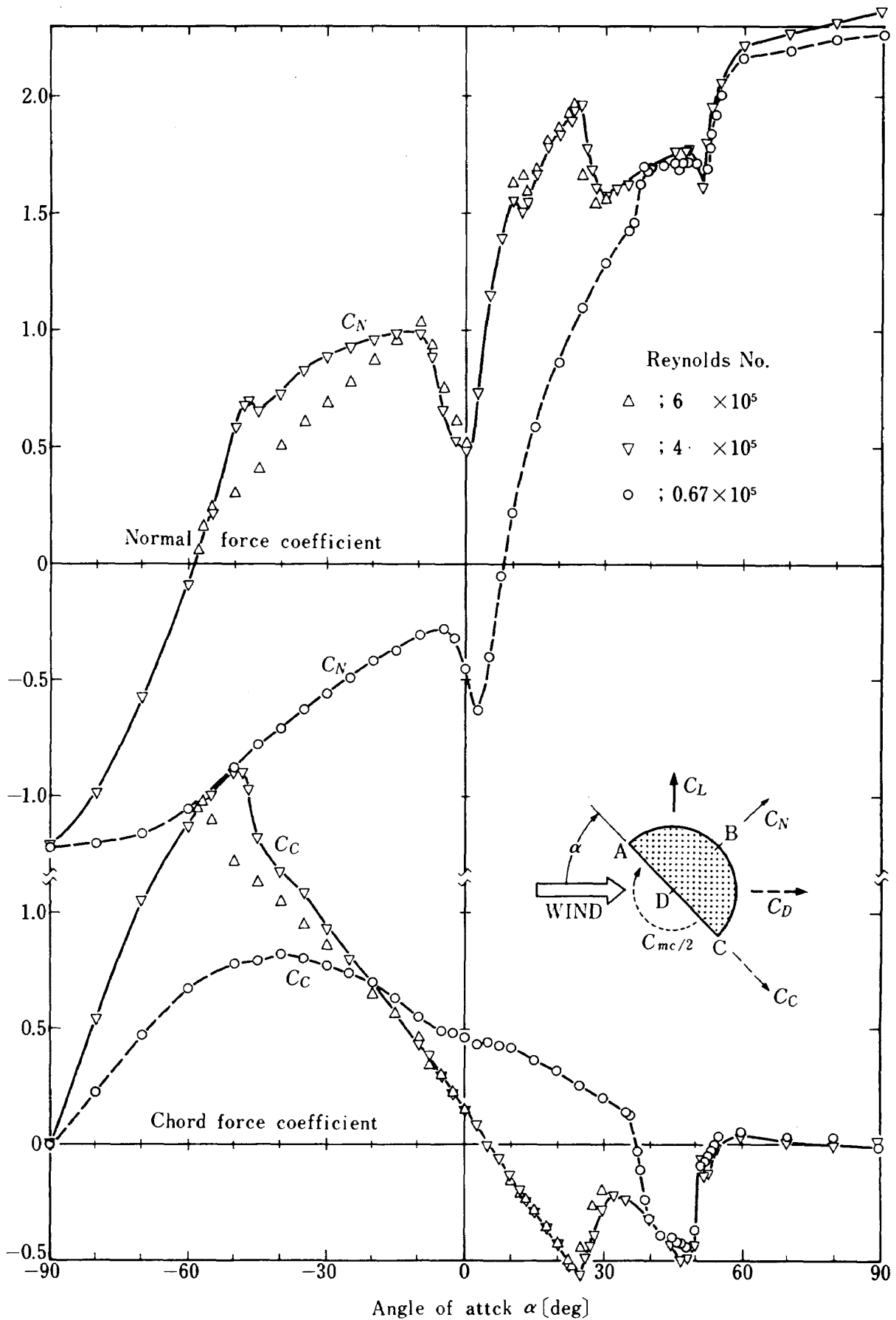


Figure 6 Force coefficients of the semi-circular cylinder (I)

図6 半円柱の空気力係数

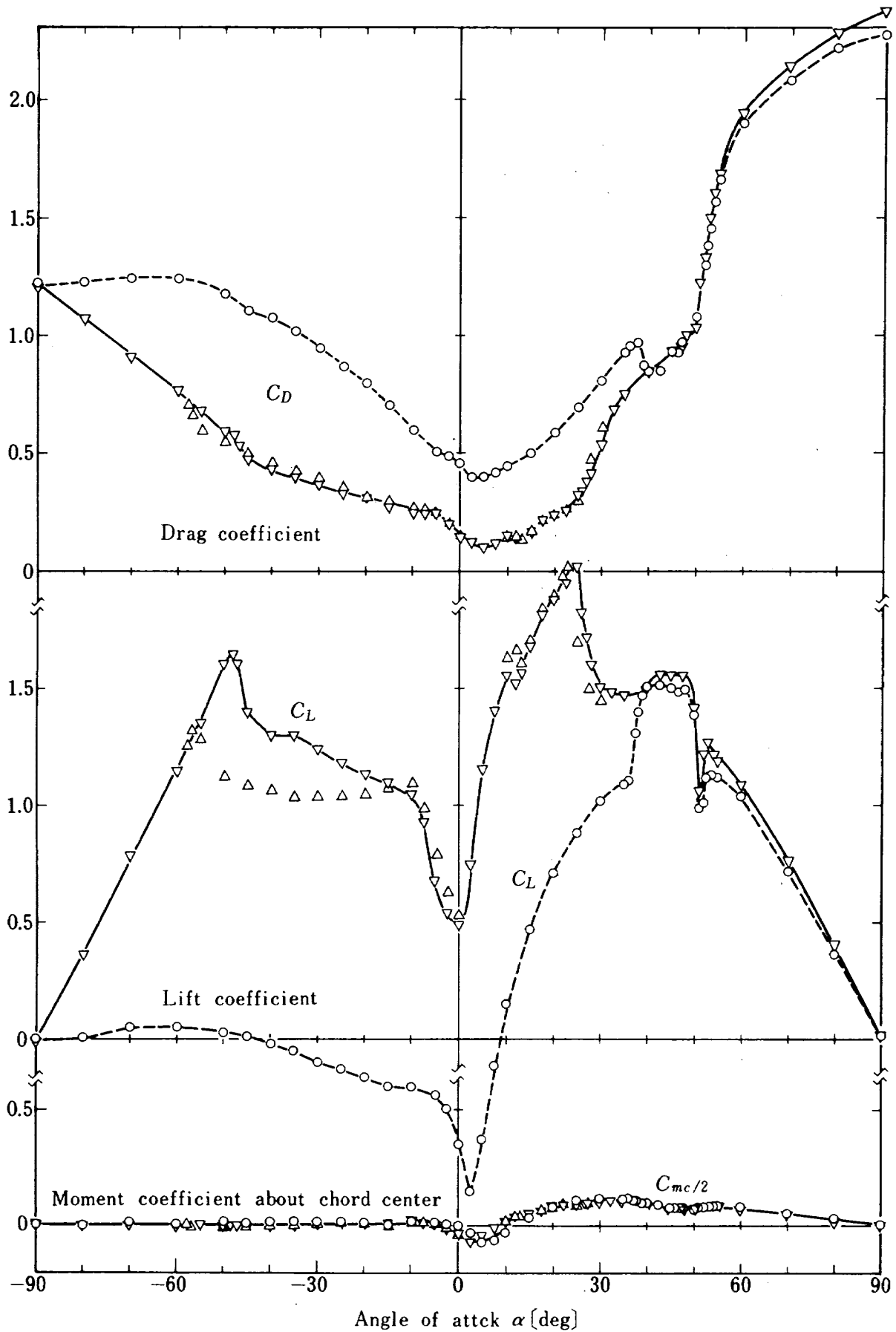


Figure 6 Force coefficients of the semi-circular cylinder (II)

図 6 つづき

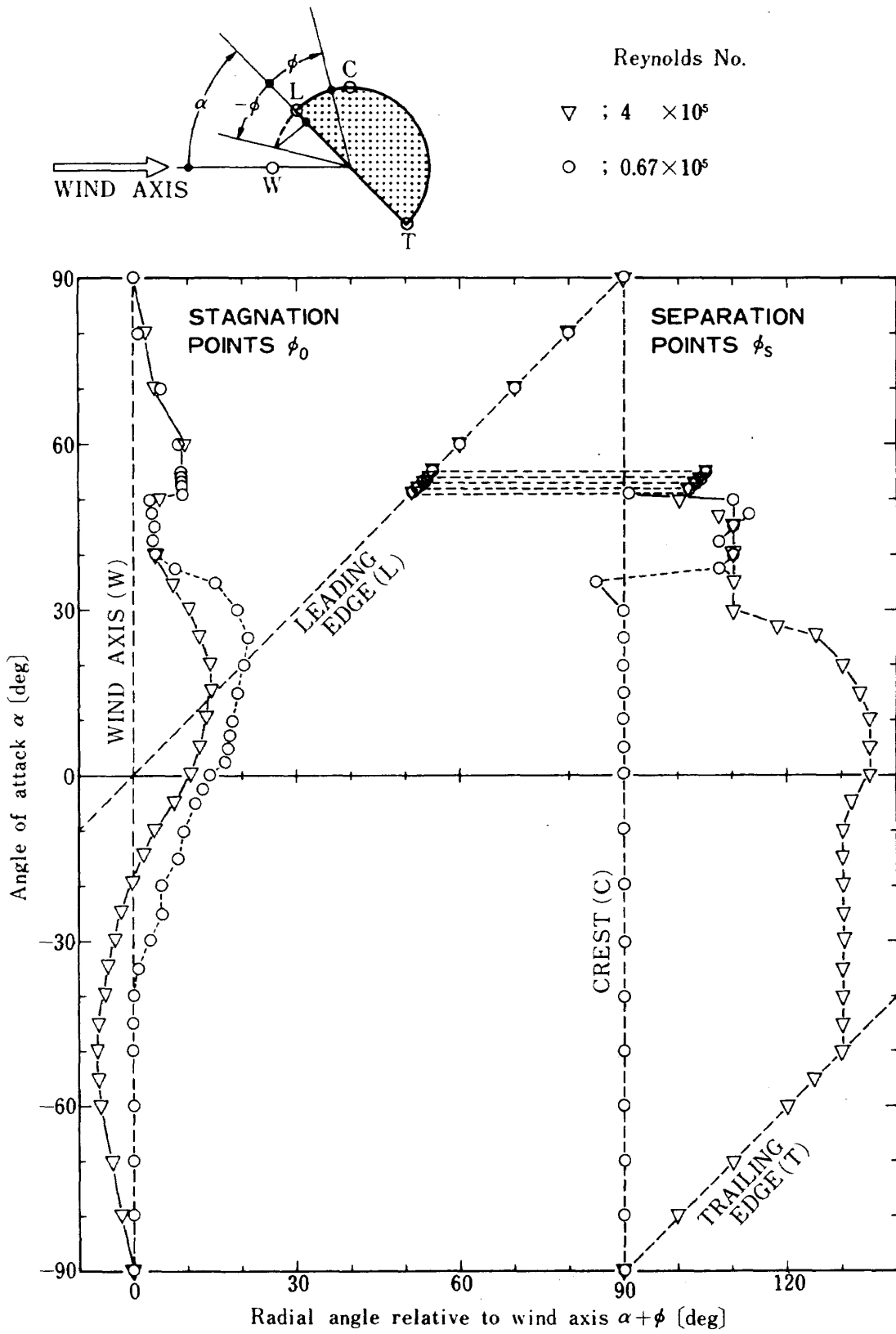


Figure 7 Stagnation and upper separation points on the semi-circular cylinder

図7 半円柱の岐点と上面剝離点

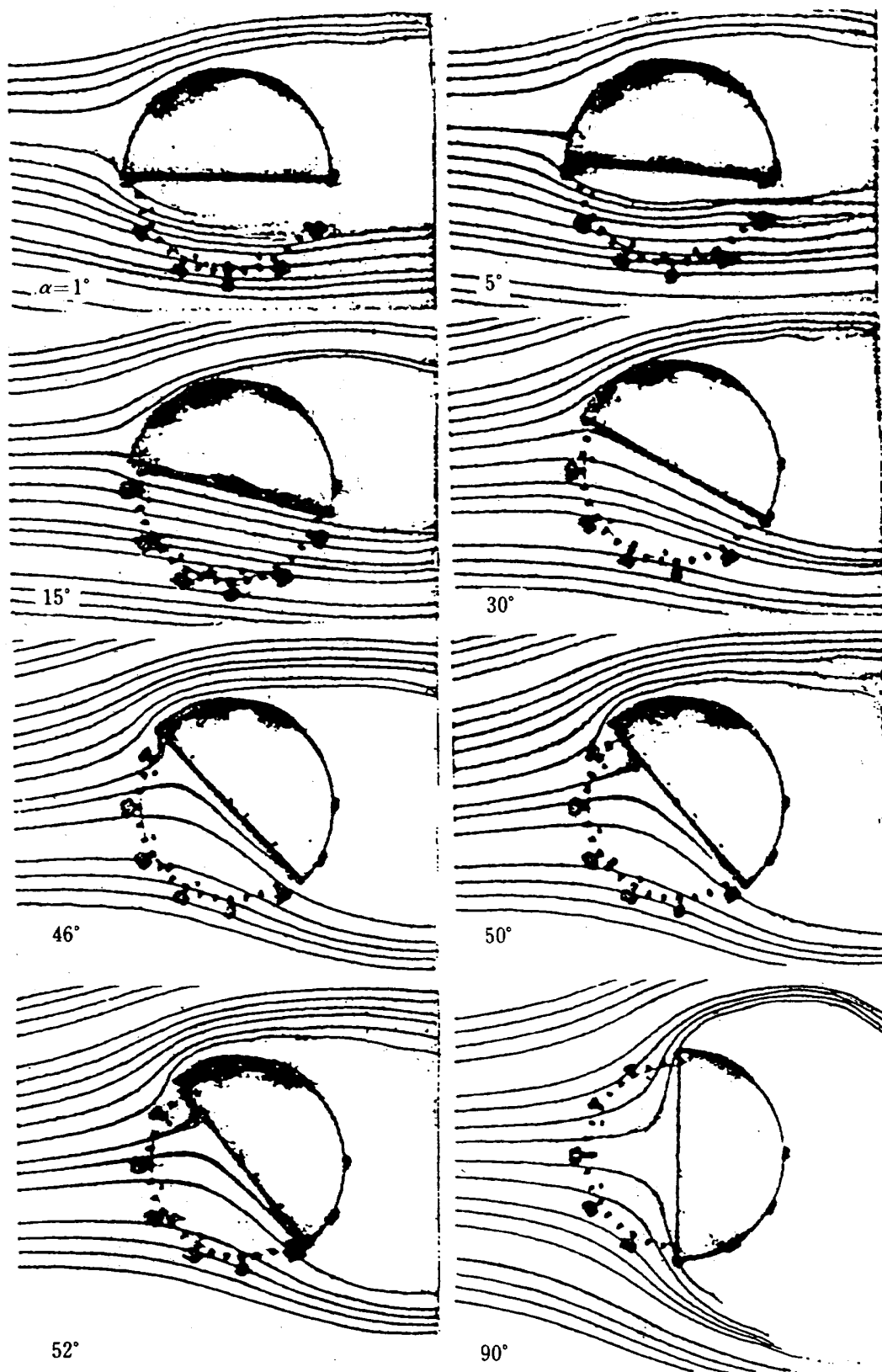


Figure 8 Fume test results on semi-circular cylinder ( $RN=1.6 \times 10^5$ )

図8 半円柱の煙試験結果 ( $RN=1.6 \times 10^5$ )

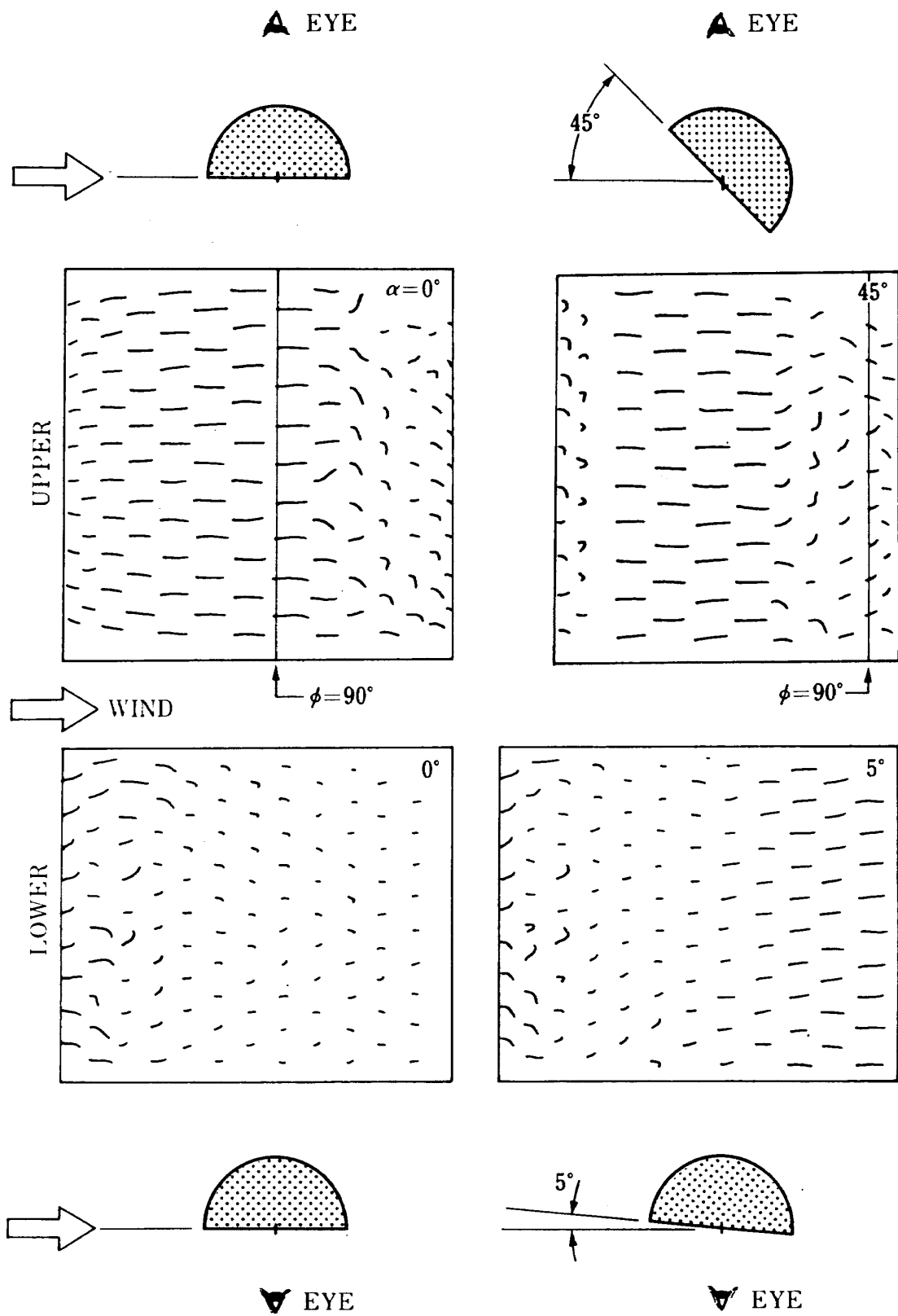


Figure 9 Tufts test results on semi-circular cylinder ( $RN=4 \times 10^5$ )

図9 半円柱の気流糸試験結果 ( $RN=4 \times 10^5$ )

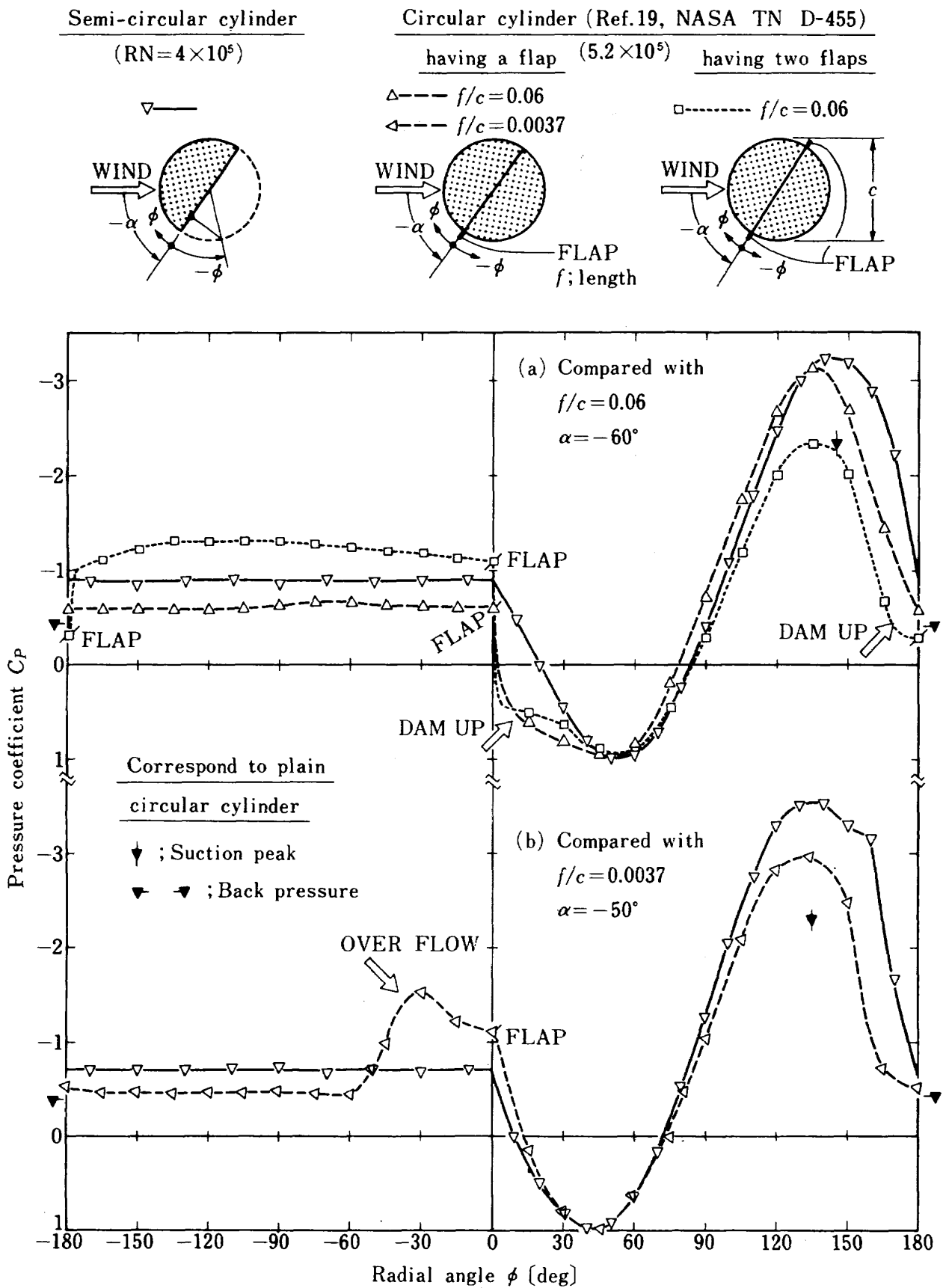


Figure 10 Pressure distribution about semi- and lifting-circular cylinders,  $\alpha=-50^\circ, -60^\circ$

図 10 半円柱と揚力円柱の風圧分布  $\alpha=-50^\circ, -60^\circ$



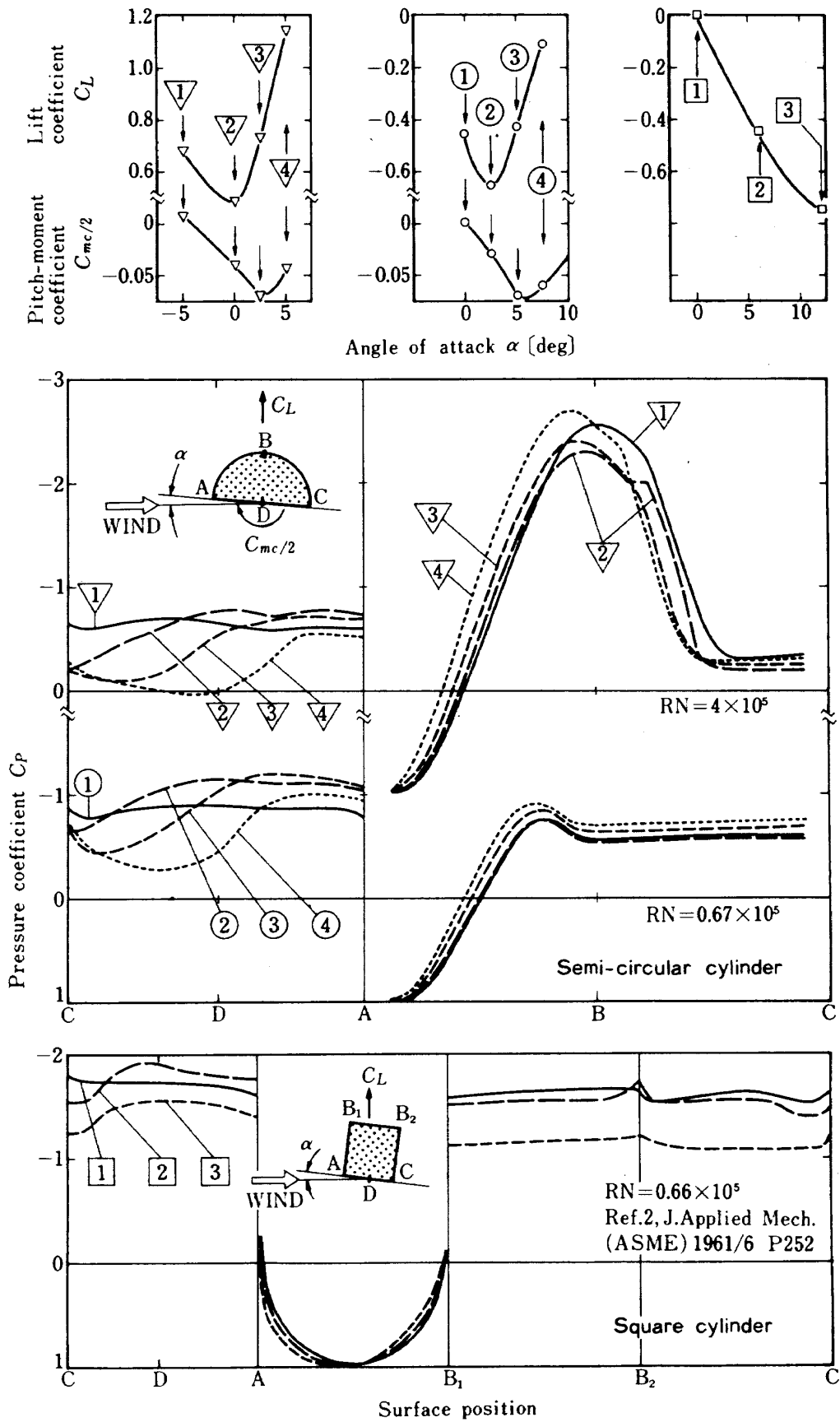


Figure 11 Pressure distribution about semi-circular and square cylinders near  $\alpha=0^\circ$

図 11  $\alpha=0^\circ$  付近の半円柱と角柱の風圧分布

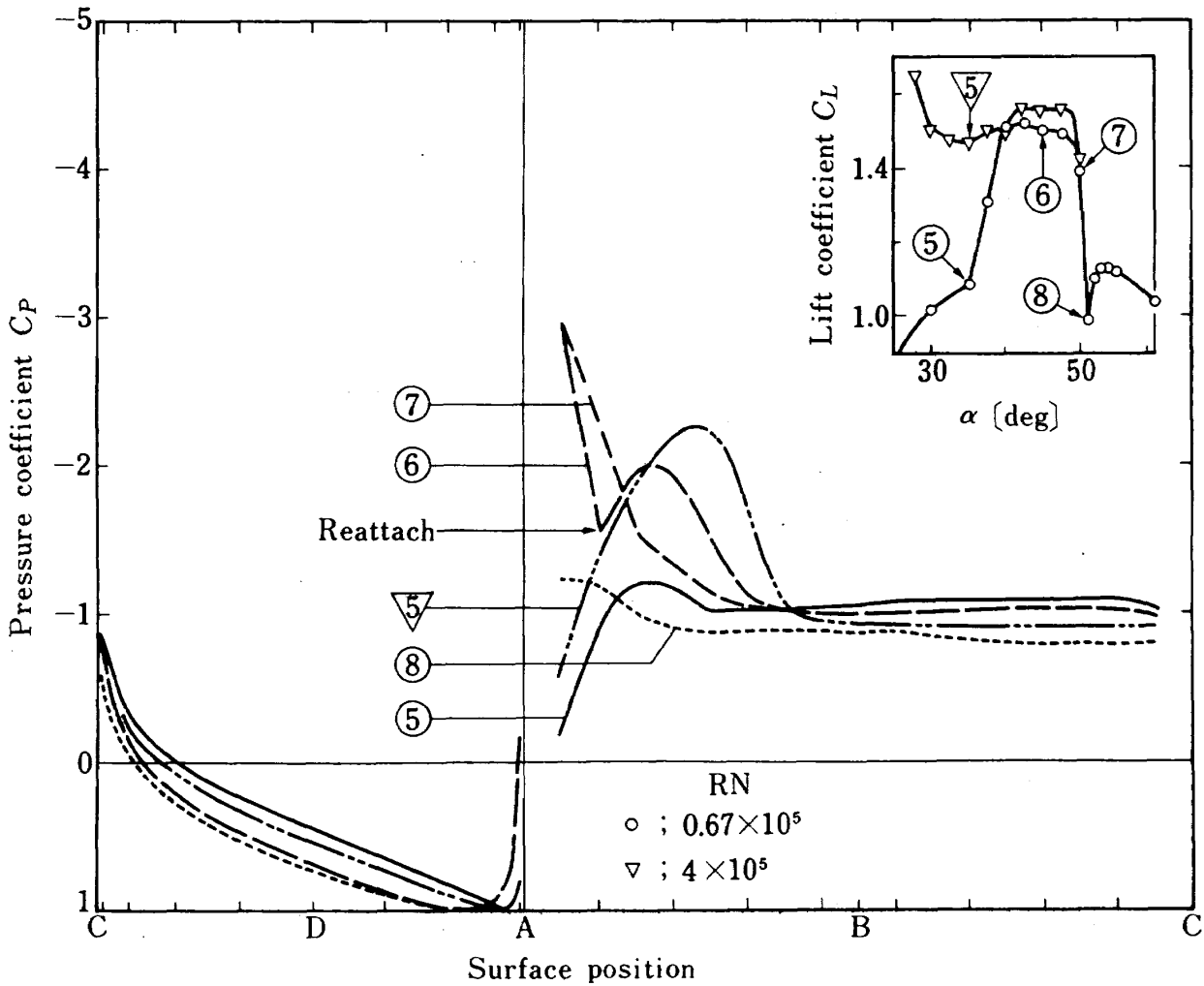
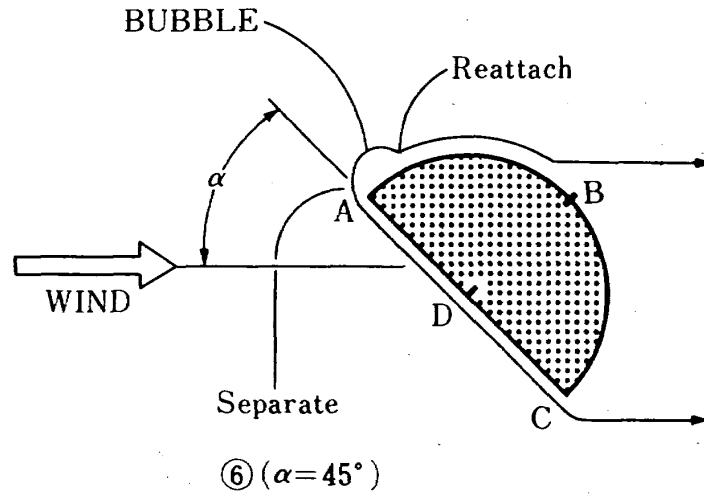
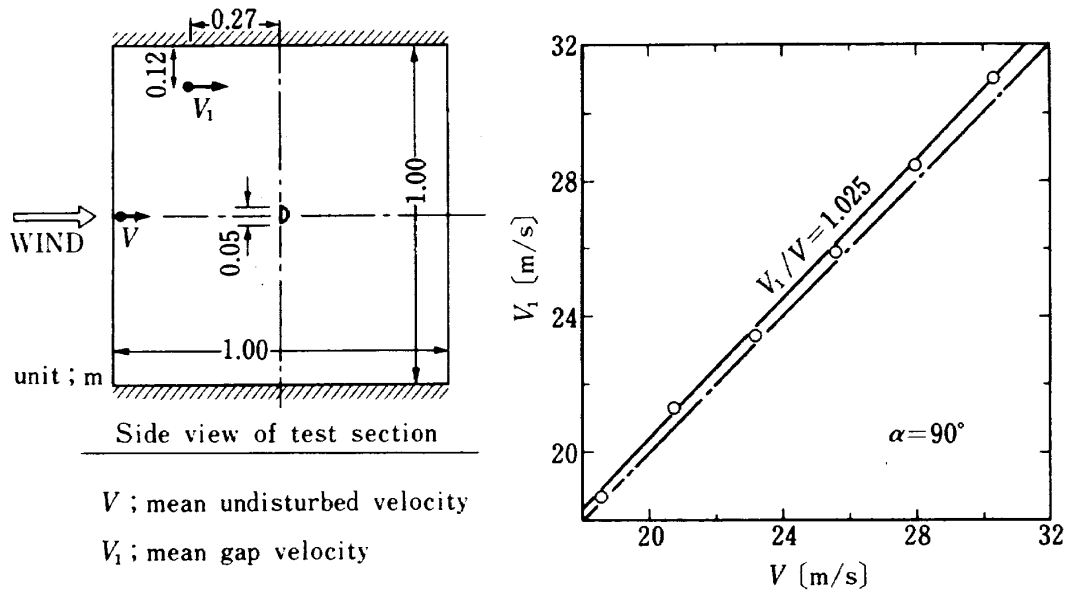


Figure 12 Leading edge bubble of semi-circular cylinder near  $\alpha=45^\circ$

図 12  $\alpha=45^\circ$  付近の半円柱の前縁バブル

(a) Two reference velocities in NAL instrument wind tunnel



(b)  $C_P, C_{P1}$  of ref.2 and present  $C_P$

$$1 - C_P = \frac{V_1^2}{V^2} (1 - C_{P1}) \quad C_P, C_{P1}; \text{ respectively based on } V, V_1$$

Ref.2 ;  $c = 2\text{in}, h = 36\text{in}, b = 27\text{in}$

J. Applied Mechanics (ASME) 1961/6 P252

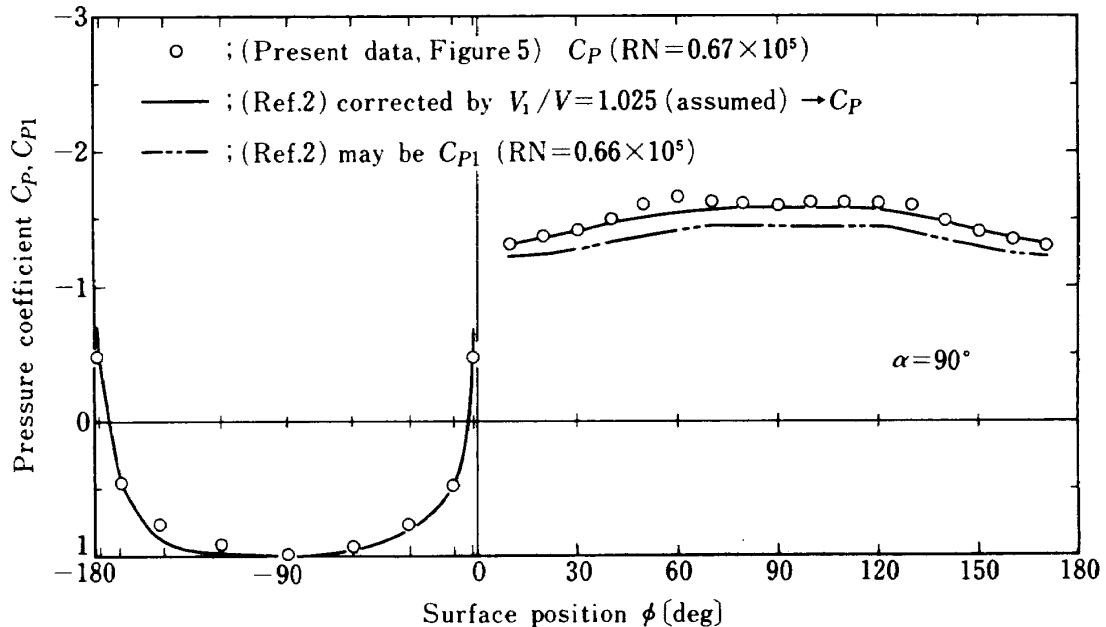


Figure 13 Pressure coefficients about semi-circular cylinder with two reference velocities

図 13 2つの基準速度による半円柱圧力係数 ( $\alpha = 90^\circ$ )

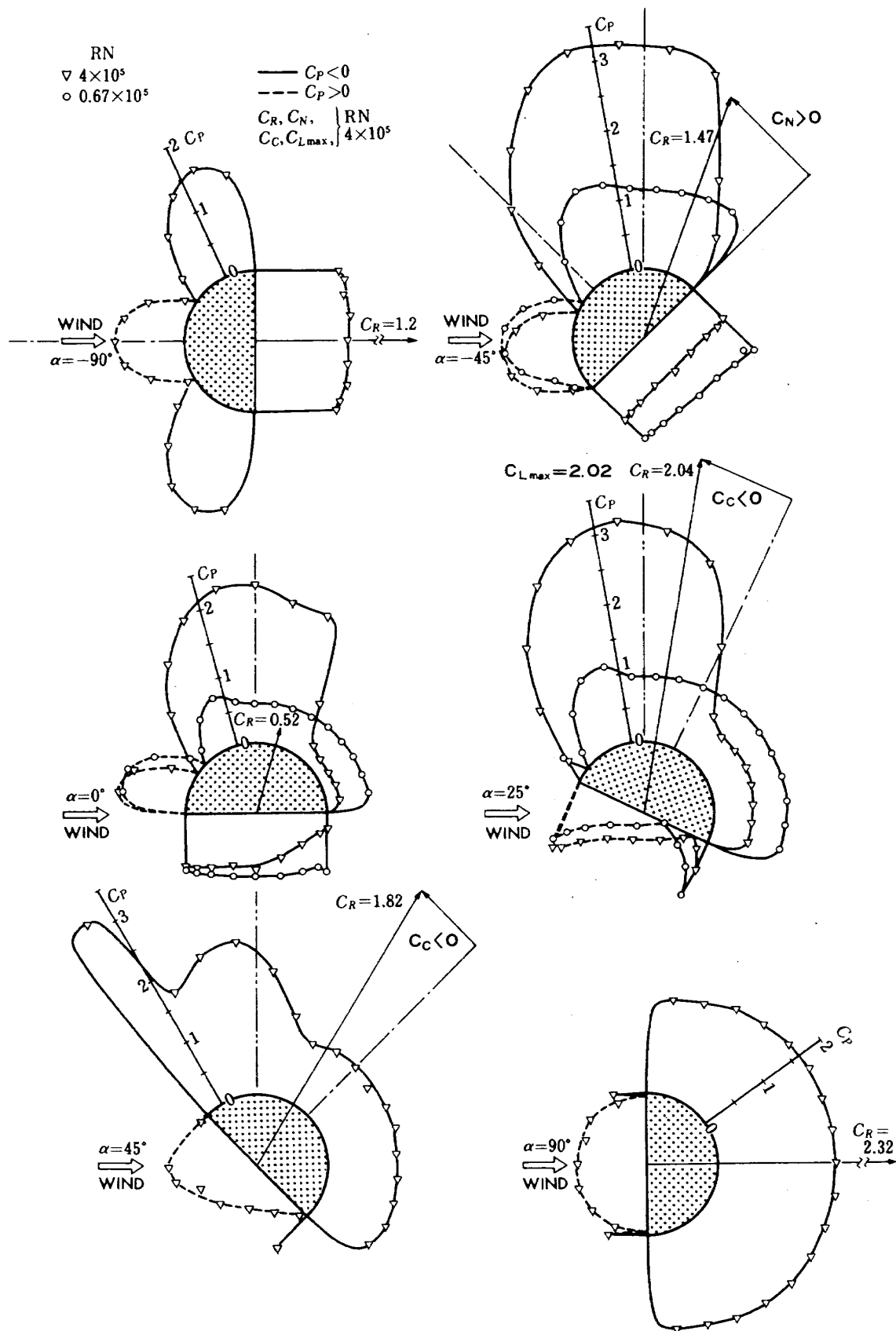


Figure 14 Development of pressure distribution about a semi-circular cylinder in special cases

図 14 特殊な場合の半円柱風圧分布展開図

表 1 半円柱の風圧分布,  $RN=0.67 \times 10^5$ 

Table 1. Pressure distribution for the semi-circular cylinder at $RN=0.67 \times 10^5$ (I)										
	$\phi$ [°]	$\alpha$ [°]								
		-90	-60	-45	-30	-15	0	2.5	5	7.5
Uncorrected pressure coefficient, $C_{Fu}$	10	-1.2737	-0.7881	-0.1895	0.3517	0.7538	0.9456	0.9519	0.9655	0.9864
	20	-1.4353	-0.2973	0.3616	0.8023	0.9788	0.9286	0.9283	0.8760	0.7991
	30	-1.2766	0.2167	0.7537	0.9768	0.9056	0.6429	0.6298	0.5128	0.3747
	40	-0.8790	0.6339	0.9515	0.9243	0.6178	0.2182	0.1996	0.0434	-0.1276
	50	-0.3716	0.9016	0.9513	0.6705	0.1871	-0.2310	-0.2468	-0.4225	-0.5846
	60	0.1557	0.9828	0.7515	0.2449	-0.2992	-0.6205	-0.6152	-0.7733	-0.9023
	70	0.5993	0.8697	0.3845	-0.2654	-0.7440	-0.8060	-0.7722	-0.8831	-0.8923
	80	0.8930	0.5554	-0.1316	-0.7854	-1.0247	-0.6714	-0.6198	-0.7033	-0.7430
	90	0.9844	0.1118	-0.6423	-1.1407	-0.9921	-0.6073	-0.5753	-0.6802	-0.7394
	100	0.8827	-0.4242	-1.1221	-1.2894	-0.8508	-0.6179	-0.5717	-0.6740	-0.7466
	110	0.5901	-0.9364	-1.3978	-1.1184	-0.8482	-0.6141	-0.5744	-0.6767	-0.7475
	120	0.1506	-1.3602	-1.3442	-1.0623	-0.8676	-0.6281	-0.5917	-0.7015	-0.7557
	130	-0.3632	-1.4985	-1.2182	-1.0534	-0.8773	-0.6400	-0.5889	-0.6935	-0.7692
	140	-0.8844	-1.3566	-1.1936	-1.0828	-0.8950	-0.6396	-0.5962	-0.6953	-0.7511
	150	-1.2776	-1.3140	-1.2236	-1.0739	-0.9003	-0.6430	-0.5898	-0.7050	-0.7638
	160	-1.4139	-1.3057	-1.2661	-1.1327	-0.8967	-0.6379	-0.5944	-0.7174	-0.7819
	170	-1.2708	-1.3106	-1.2760	-1.1906	-0.9038	-0.6574	-0.6016	-0.7201	-0.7765
	-170	-1.2291	-1.3785	-1.3314	-1.3019	-1.0309	-0.8977	-0.6878	-0.6599	-0.7023
	-150	-1.2744	-1.3213	-1.2145	-1.1532	-0.8985	-0.8135	-0.7368	-0.4845	-0.5276
	-130	-1.2892	-1.3661	-1.2709	-1.1728	-0.9320	-0.8923	-0.9229	-0.5288	-0.3919
-110	-1.3272	-1.3840	-1.2189	-1.1282	-0.9135	-0.9400	-1.0989	-0.7166	-0.3113	
-90	-1.3158	-1.3704	-1.2240	-1.0766	-0.9267	-0.9399	-1.1960	-1.0771	-0.4697	
-70	-1.3341	-1.3413	-1.1863	-1.0739	-0.9179	-0.9161	-1.1588	-1.2391	-0.9294	
-50	-1.3164	-1.2637	-1.1827	-1.0632	-0.9038	-0.9094	-1.1461	-1.2099	-1.0362	
-30	-1.2793	-1.2534	-1.1297	-1.0240	-0.8941	-0.8995	-1.1243	-1.1825	-1.0000	
-10	-1.2284	-1.1849	-1.1073	-1.0294	-0.8897	-0.8488	-1.1089	-1.1107	-0.9801	
Corrected pressure coefficient, $C_F$	10	-1.1966	-0.7177	-0.1422	0.3774	0.7624	0.9471	0.9529	0.9661	0.9866
	20	-1.3527	-0.2462	0.3870	0.8101	0.9795	0.9305	0.9298	0.8782	0.8023
	30	-1.1994	0.2475	0.7635	0.9777	0.9089	0.6526	0.6375	0.5216	0.3845
	40	-0.8153	0.6483	0.9534	0.9273	0.6312	0.2395	0.2163	0.0607	-0.1099
	50	-0.3251	0.9055	0.9532	0.6836	0.2156	-0.1975	-0.2207	-0.3968	-0.5597
	60	0.1843	0.9835	0.7614	0.2749	-0.2536	-0.5764	-0.5814	-0.7413	-0.8724
	70	0.6129	0.8748	0.4090	-0.2152	-0.6828	-0.7568	-0.7351	-0.8491	-0.8626
	80	0.8966	0.5729	-0.0866	-0.7146	-0.9537	-0.6259	-0.5859	-0.6726	-0.7156
	90	0.9849	0.1468	-0.5769	-1.0558	-0.9222	-0.5635	-0.5424	-0.6499	-0.7121
	100	0.8867	-0.3681	-1.0376	-1.1986	-0.7859	-0.5738	-0.5388	-0.6438	-0.7192
	110	0.6040	-0.8602	-1.3024	-1.0343	-0.7834	-0.5701	-0.5415	-0.6464	-0.7200
	120	0.1794	-1.2673	-1.2509	-0.9805	-0.8021	-0.5838	-0.5584	-0.6708	-0.7281
	130	-0.3170	-1.4001	-1.1299	-0.9719	-0.8114	-0.5953	-0.5557	-0.6629	-0.7414
	140	-0.8205	-1.2638	-1.1063	-1.0002	-0.8285	-0.5950	-0.5628	-0.6647	-0.7236
	150	-1.2004	-1.2229	-1.1351	-0.9916	-0.8336	-0.5983	-0.5565	-0.6742	-0.7361
	160	-1.3320	-1.2149	-1.1759	-1.0481	-0.8302	-0.5933	-0.5611	-0.6864	-0.7539
	170	-1.1938	-1.2196	-1.1854	-1.1037	-0.8370	-0.6123	-0.5681	-0.6890	-0.7486
	-170	-1.1535	-1.2849	-1.2386	-1.2106	-0.9596	-0.8460	-0.6525	-0.6299	-0.6756
	-150	-1.1973	-1.2299	-1.1263	-1.0678	-0.8319	-0.7641	-0.7005	-0.4577	-0.5036
	-130	-1.2116	-1.2730	-1.1805	-1.0866	-0.8642	-0.8408	-0.8827	-0.5012	-0.3700
-110	-1.2483	-1.2901	-1.1306	-1.0438	-0.8464	-0.8872	-1.0550	-0.6856	-0.2907	
-90	-1.2373	-1.2771	-1.1355	-0.9942	-0.8591	-0.8871	-1.1501	-1.0396	-0.4466	
-70	-1.2549	-1.2491	-1.0993	-0.9916	-0.8506	-0.8639	-1.1136	-1.1987	-0.8991	
-50	-1.2378	-1.1746	-1.0958	-0.9813	-0.8370	-0.8574	-1.1012	-1.1700	-1.0042	
-30	-1.2020	-1.1647	-1.0449	-0.9437	-0.8276	-0.8478	-1.0799	-1.1431	-0.9686	
-10	-1.1528	-1.0989	-1.0234	-0.9489	-0.8234	-0.7985	-1.0648	-1.0726	-0.9490	

表1 つづき

Table 1. Pressure distribution for the semi-circular cylinder at $RN=0.67 \times 10^5$ (II)										
	$\phi$ [°]	$\alpha$ [°]								
		15	25	30	35	45	50	51	60	90
Uncorrected pressure coefficient, $C_{Pu}$	10	0.8840	0.3817	0.0017	-0.2452	-3.0915	-3.1382	-1.3419	-1.5782	-1.5408
	20	0.4358	-0.2409	-0.5938	-0.9457	-1.6710	-2.4595	-1.3122	-1.6205	-1.6111
	30	-0.1151	-0.7876	-1.0878	-1.2882	-2.0638	-1.6226	-1.1090	-1.5921	-1.6581
	40	-0.6377	-1.1528	-1.2986	-1.2814	-2.0567	-1.4448	-0.9970	-1.5935	-1.7501
	50	-0.9734	-1.2237	-1.1299	-1.1033	-1.6527	-1.2278	-0.9495	-1.6199	-1.8735
	60	-1.0815	-1.0130	-1.0404	-1.1087	-1.1996	-1.1134	-0.9663	-1.6823	-1.9305
	70	-0.8857	-1.0052	-1.0620	-1.1128	-1.0658	-1.0788	-0.9653	-1.7967	-1.8639
	80	-0.8663	-1.0155	-1.0637	-1.1270	-1.0506	-1.0749	-0.9405	-1.8157	-1.8789
	90	-0.8866	-1.0276	-1.0577	-1.1353	-1.0712	-1.0862	-0.9277	-1.8747	-1.8656
	100	-0.8725	-1.0363	-1.1145	-1.1806	-1.0780	-1.1241	-0.9713	-1.9159	-1.8964
	110	-0.8990	-1.0389	-1.1274	-1.1712	-1.1066	-1.1357	-0.9267	-1.8867	-1.8865
	120	-0.8884	-1.0354	-1.1377	-1.1722	-1.1052	-1.1147	-0.9118	-1.7846	-1.8801
	130	-0.8937	-1.0587	-1.1454	-1.1629	-1.1065	-1.1194	-0.8632	-1.8247	-1.8465
	140	-0.8769	-1.0587	-1.1067	-1.1793	-1.1093	-1.1012	-0.8652	-1.8127	-1.7381
	150	-0.9123	-1.0725	-1.1627	-1.1660	-1.1063	-1.0970	-0.8979	-1.7009	-1.6503
	160	-0.8787	-1.0527	-1.1661	-1.1872	-1.1171	-1.0725	-0.8662	-1.5692	-1.5870
	170	-0.8671	-1.0320	-1.0731	-1.1177	-1.0706	-1.0558	-0.8860	-1.5078	-1.5422
	-170	-0.8184	-0.8998	-0.9217	-0.9216	-0.7920	-0.7390	-0.6422	-0.9565	-0.6299
	-150	-0.5155	-0.4793	-0.4329	-0.3953	-0.1535	0.0326	-0.1051	-0.0016	0.4112
	-130	-0.3658	-0.2375	-0.1515	-0.0608	0.1854	0.2682	0.2527	0.3068	0.7521
	-110	-0.2099	-0.0078	0.1024	0.2142	0.4707	0.5518	0.5223	0.6058	0.9300
	-90	-0.0806	0.1796	0.3115	0.4337	0.6871	0.7640	0.7195	0.8118	0.9803
	-70	0.0593	0.3480	0.5060	0.6306	0.8564	0.9195	0.8801	0.9398	0.9280
	-50	0.0753	0.5181	0.6893	0.8136	0.9691	0.9923	0.9722	0.9749	0.7520
	-30	-0.3260	0.6857	0.8752	0.9621	0.9187	0.8791	0.9405	0.8360	0.4406
	-10	-0.2879	0.8679	0.9664	0.8141	-0.1705	-0.1063	0.2745	0.1104	-0.6363
Corrected pressure coefficient, $C_p$	10	0.8864	0.3995	0.0349	-0.1979	-2.9353	-2.9569	-1.2395	-1.3830	-1.3121
	20	0.4476	-0.2052	-0.5408	-0.8718	-1.5690	-2.3080	-1.2111	-1.4221	-1.3760
	30	-0.0918	-0.7362	-1.0184	-1.2013	-1.9469	-1.5077	-1.0168	-1.3959	-1.4188
	40	-0.6035	-1.0909	-1.2222	-1.1947	-1.9400	-1.3377	-0.9097	-1.3971	-1.5025
	50	-0.9322	-1.1597	-1.0591	-1.0234	-1.5514	-1.1302	-0.8643	-1.4215	-1.6148
	60	-1.0381	-0.9551	-0.9726	-1.0286	-1.1156	-1.0208	-0.8803	-1.4792	-1.6667
	70	-0.8463	-0.9475	-0.9934	-1.0326	-0.9869	-0.9877	-0.8794	-1.5850	-1.6061
	80	-0.8274	-0.9575	-0.9951	-1.0462	-0.9723	-0.9840	-0.8557	-1.6025	-1.6197
	90	-0.8472	-0.9693	-0.9893	-1.0542	-0.9921	-0.9948	-0.8434	-1.6571	-1.6076
	100	-0.8334	-0.9777	-1.0442	-1.0978	-0.9987	-1.0311	-0.8851	-1.6951	-1.6356
	110	-0.8594	-0.9803	-1.0567	-1.0887	-1.0262	-1.0421	-0.8425	-1.6681	-1.6266
	120	-0.8490	-0.9769	-1.0666	-1.0897	-1.0248	-1.0221	-0.8282	-1.5738	-1.6208
	130	-0.8542	-0.9995	-1.0741	-1.0807	-1.0261	-1.0226	-0.7818	-1.6108	-1.5902
	140	-0.8377	-0.9995	-1.0367	-1.0965	-1.0288	-1.0092	-0.7837	-1.5997	-1.4916
	150	-0.8724	-1.0129	-1.0908	-1.0837	-1.0259	-1.0051	-0.8149	-1.4964	-1.4117
	160	-0.8395	-0.9937	-1.0941	-1.1041	-1.0363	-0.9817	-0.7846	-1.3747	-1.3541
	170	-0.8281	-0.9736	-1.0042	-1.0373	-0.9916	-0.9657	-0.8036	-1.3179	-1.3133
	-170	-0.7805	-0.8452	-0.8578	-0.8486	-0.7236	-0.6628	-0.5704	-0.8084	-0.4832
	-150	-0.4839	-0.4367	-0.3853	-0.3423	-0.1095	0.0750	-0.0568	0.0742	0.4642
	-130	-0.3373	-0.2019	-0.1132	-0.0205	0.2165	0.3003	0.2854	0.3593	0.7744
	-110	-0.1847	0.0212	0.1322	0.2440	0.4909	0.5714	0.5432	0.6356	0.9363
	-90	-0.0581	0.2032	0.3344	0.4552	0.6990	0.7743	0.7318	0.8260	0.9821
	-70	0.0789	0.3668	0.5224	0.6446	0.8619	0.9230	0.8853	0.9444	0.9345
	-50	0.0946	0.5320	0.6996	0.8207	0.9703	0.9926	0.9734	0.9768	0.7743
	-30	-0.2983	0.6947	0.8793	0.9635	0.9218	0.8844	0.9431	0.8484	0.4910
	-10	-0.2610	0.8717	0.9675	0.8212	-0.1258	-0.0578	0.3062	0.1778	-0.4890

表 2 半円柱の風圧分布,  $RN=4 \times 10^5$ 

Table 2. Pressure distribution for the semi-circular cylinder at $RN=4 \times 10^5$ (I)										
	$\phi$ [°]	$\alpha$ [°]								
		-90	-60	-50	-45	-30	-15	-5	0	2.5
Uncorrected pressure coefficient, $C_{Fu}$	10	-1.6895	-0.6230	-0.0807	0.1470	0.6245	0.9159	0.9804	1.0001	0.9928
	20	-1.8105	-0.0901	0.4430	0.6277	0.9492	0.9739	0.8776	0.8282	0.7344
	30	-1.6525	0.4003	0.8121	0.9257	0.9818	0.6998	0.4664	0.3609	0.1992
	40	-1.1479	0.7869	0.9943	0.9948	0.7443	0.1837	-0.1598	-0.2858	-0.4903
	50	-0.5887	0.9846	0.9297	0.8210	0.2586	-0.5117	-0.8832	-0.9886	-1.2040
	60	0.0314	0.9508	0.6223	0.4232	-0.4234	-1.2783	-1.5925	-1.6316	-1.8486
	70	0.5296	0.6765	0.0819	-0.1879	-1.1715	-2.0118	-2.2075	-2.1400	-2.3071
	80	0.8743	0.1736	-0.6533	-0.9737	-1.9780	-2.6303	-2.6720	-2.4605	-2.5468
	90	0.9972	-0.5483	-1.4903	-1.8414	-2.6964	-3.0402	-2.8168	-2.4755	-2.5087
	100	0.8882	-1.3109	-2.3400	-2.5719	-3.2146	-3.2070	-2.7037	-2.2333	-2.2404
	110	0.5776	-2.0948	-3.1026	-3.2461	-3.5048	-3.0475	-2.5056	-2.1810	-1.7792
	120	0.0601	-2.8642	-3.7135	-3.5887	-3.4406	-2.8006	-1.6439	-0.9248	-0.7788
	130	-0.5250	-3.4204	-4.0473	-3.5660	-3.1638	-1.6361	-0.8486	-0.3565	-0.3207
	140	-1.1543	-3.7023	-4.0796	-3.4970	-2.2031	-0.7620	-0.4112	-0.2788	-0.3078
	150	-1.6211	-3.6626	-3.7164	-3.2256	-1.2577	-0.5939	-0.4150	-0.2666	-0.3003
	160	-1.8669	-3.3118	-3.5568	-1.7143	-0.6897	-0.5853	-0.4196	-0.2713	-0.3026
	170	-1.6543	-2.5695	-1.9170	-0.9336	-0.7011	-0.5823	-0.4449	-0.2619	-0.2988
	-170	-1.4288	-1.0762	-0.8802	-0.7273	-0.6858	-0.6315	-0.7692	-0.2955	-0.2560
	-150	-1.5148	-1.0374	-0.8772	-0.7501	-0.6983	-0.6238	-0.7056	-0.3684	-0.1822
	-130	-1.4886	-1.0858	-0.8772	-0.7314	-0.6734	-0.5971	-0.7748	-0.5207	-0.1583
-110	-1.6017	-1.1073	-0.8928	-0.7581	-0.6772	-0.6102	-0.8570	-0.7234	-0.2598	
-90	-1.5647	-1.0567	-0.9036	-0.8025	-0.6686	-0.5968	-0.7907	-0.8851	-0.6094	
-70	-1.5636	-1.1139	-0.8057	-0.7029	-0.6044	-0.5369	-0.6673	-0.8215	-0.7543	
-50	-1.5672	-1.0673	-0.8644	-0.7503	-0.6437	-0.5766	-0.7393	-0.8719	-0.8153	
-30	-1.4445	-1.1003	-0.8477	-0.7464	-0.6446	-0.5509	-0.7140	-0.8635	-0.7924	
-10	-1.3995	-1.1215	-0.8624	-0.7583	-0.6379	-0.5916	-0.7140	-0.8382	-0.7862	
Corrected pressure coefficient, $C_F$	10	-1.4298	-0.4663	0.0135	0.2145	0.6531	0.9219	0.9818	1.0001	0.9932
	20	-1.5391	0.0152	0.4916	0.6571	0.9531	0.9758	0.8863	0.8382	0.7468
	30	-1.3963	0.4582	0.8285	0.9316	0.9832	0.7213	0.5042	0.3981	0.2366
	40	-0.9405	0.8075	0.9948	0.9952	0.7637	0.2420	-0.0776	-0.2110	-0.4205
	50	-0.4353	0.9858	0.9358	0.8352	0.3151	-0.4037	-0.7496	-0.8730	-1.1007
	60	0.1249	0.9556	0.6552	0.4688	-0.3149	-1.1156	-1.4087	-1.4786	-1.7150
	70	0.5750	0.7077	0.1619	-0.0939	-1.0060	-1.7966	-1.9800	-1.9574	-2.1520
	80	0.8864	0.2534	-0.5092	-0.8175	-1.7510	-2.3710	-2.4115	-2.2593	-2.3806
	90	0.9975	-0.3988	-1.2732	-1.6166	-2.4146	-2.7515	-2.5461	-2.2733	-2.3442
	100	0.8990	-1.0878	-2.0489	-2.2893	-2.8933	-2.9065	-2.4411	-2.0453	-2.0885
	110	0.6184	-1.7960	-2.7450	-2.9102	-3.1614	-2.7583	-2.2570	-1.9960	-1.6486
	120	0.1509	-2.4911	-3.3026	-3.2256	-3.1022	-2.5291	-1.4564	-0.8128	-0.6952
	130	-0.3777	-2.9936	-3.6073	-3.2048	-2.8464	-1.4478	-0.7175	-0.2776	-0.2587
	140	-0.9462	-3.2483	-3.6368	-3.1412	-1.9589	-0.6361	-0.3111	-0.2045	-0.2464
	150	-1.3680	-3.2124	-3.3052	-2.8912	-1.0856	-0.4801	-0.3146	-0.1930	-0.2393
	160	-1.5900	-2.8955	-3.1596	-1.4996	-0.5609	-0.4720	-0.3189	-0.1973	-0.2416
	170	-1.3980	-2.2249	-1.6627	-0.7806	-0.5715	-0.4692	-0.3424	-0.1885	-0.2379
	-170	-1.1942	-0.8757	-0.7163	-0.5907	-0.5573	-0.5149	-0.6437	-0.2202	-0.1970
	-150	-1.2719	-0.8407	-0.7136	-0.6116	-0.5688	-0.5078	-0.5846	-0.2888	-0.1268
	-130	-1.2483	-0.8844	-0.7136	-0.5944	-0.5458	-0.4830	-0.6489	-0.4322	-0.1039
-110	-1.3504	-0.9038	-0.7278	-0.6190	-0.5494	-0.4952	-0.7253	-0.6233	-0.2004	
-90	-1.3170	-0.8581	-0.7377	-0.6599	-0.5414	-0.4827	-0.6637	-0.7755	-0.5336	
-70	-1.3160	-0.9098	-0.6483	-0.5682	-0.4821	-0.4271	-0.5490	-0.7156	-0.6719	
-50	-1.3192	-0.8677	-0.7019	-0.6118	-0.5184	-0.4640	-0.6159	-0.7631	-0.7300	
-30	-1.2084	-0.8975	-0.6867	-0.6082	-0.5193	-0.4401	-0.5925	-0.7551	-0.7082	
-10	-1.1678	-0.9167	-0.7000	-0.6192	-0.5131	-0.4779	-0.5925	-0.7313	-0.7023	

表2 つづき

	$\phi$ [°]	$\alpha$ [°]								
		5	15	25	30	35	45	50	60	90
Uncorrected pressure coefficient, $C_{pu}$	10	0.9667	0.5488	-0.3522	-0.5000	-0.8372	-3.8253	-4.0262	-2.2687	-2.4148
	20	0.5686	-0.1934	-1.2279	-1.2842	-1.6793	-2.1604	-3.8598	-2.3141	-2.4992
	30	-0.0639	-1.0000	-2.0756	-1.9792	-2.2298	-2.5399	-2.1971	-2.2859	-2.6894
	40	-0.8496	-1.7832	-2.7701	-2.4594	-2.5564	-2.6731	-1.7287	-2.2291	-2.7147
	50	-1.5749	-2.4268	-3.2547	-2.6446	-2.6434	-2.2210	-1.2471	-2.2984	-2.8086
	60	-2.1826	-2.9033	-3.4358	-2.5396	-2.0609	-1.5167	-1.2460	-2.2491	-2.8567
	70	-2.6553	-3.0762	-3.2637	-1.8119	-1.2687	-1.1939	-1.1831	-2.4012	-2.8185
	80	-2.8447	-2.9043	-2.8965	-1.0277	-1.1109	-1.2938	-1.2063	-2.4792	-2.8365
	90	-2.6925	-2.7012	-1.7791	-0.9436	-1.1608	-1.2605	-1.3918	-2.6091	-2.8552
	100	-2.4886	-1.5508	-0.8010	-0.9802	-1.0719	-1.2010	-1.2772	-2.6427	-2.8739
	110	-1.5267	-0.7607	-0.6458	-0.8911	-1.1229	-1.3574	-1.2284	-2.6306	-2.8411
	120	-0.7074	-0.4902	-0.6507	-0.9149	-1.2418	-1.3756	-1.3460	-2.6986	-2.8478
	130	-0.3704	-0.4385	-0.6577	-0.9287	-1.1419	-1.2949	-1.5933	-2.6637	-2.7997
	140	-0.3618	-0.4502	-0.6667	-0.9149	-1.1099	-1.3141	-1.3712	-2.5828	-2.7035
	150	-0.3560	-0.4717	-0.6388	-0.8515	-1.1758	-1.3172	-1.3123	-2.5020	-2.6199
	160	-0.3722	-0.5039	-0.6219	-0.9752	-1.1508	-1.3495	-1.3092	-2.4172	-2.5032
	170	-0.3530	-0.4512	-0.6169	-0.8782	-1.1309	-1.2022	-1.2260	-2.2196	-2.4195
	-170	-0.2907	-0.3652	-0.4995	-0.7109	-0.8372	-0.8662	-0.8762	-1.2435	-1.2453
	-150	-0.2064	-0.2100	-0.1920	-0.3139	-0.3566	-0.2487	-0.2050	-0.4022	0.2247
	-130	-0.1183	-0.0596	0.0159	-0.0356	-0.0060	0.1580	0.2179	0.2026	0.7188
-110	-0.0417	0.0547	0.2060	0.1871	0.2597	0.4546	0.5160	0.5709	0.9937	
-90	-0.0071	0.1631	0.3781	0.3960	0.4925	0.6836	0.7350	0.8303	1.0408	
-70	-0.2980	0.2520	0.4995	0.5267	0.6094	0.7825	0.8243	0.8303	0.8162	
-50	-0.6099	0.3877	0.7264	0.7703	0.8721	0.9933	1.0048	1.0359	0.7323	
-30	-0.5860	0.5332	0.9154	0.9545	0.9950	0.9197	0.8924	0.7984	0.1593	
-10	-0.5706	0.3955	0.9562	0.8851	0.5894	-0.2751	-0.3200	-0.3743	-1.1533	
Corrected pressure coefficient, $C_p$	10	0.9680	0.5654	-0.2734	-0.3744	-0.6366	-3.1822	-3.2957	-1.4193	-1.3588
	20	0.5855	-0.1495	-1.0980	-1.0930	-1.3869	-1.7392	-3.1535	-1.4529	-1.4171
	30	-0.0222	-0.9265	-1.8964	-1.7298	-1.8772	-2.0681	-1.7325	-1.4320	-1.5485
	40	-0.7772	-1.6809	-2.5504	-2.1698	-2.1682	-2.1835	-1.3321	-1.3900	-1.5660
	50	-1.4741	-2.3008	-3.0068	-2.3395	-2.2457	-1.7917	-0.9205	-1.4413	-1.6308
	60	-2.0580	-2.7598	-3.1773	-2.2433	-1.7268	-1.1813	-0.9196	-1.4048	-1.6640
	70	-2.5122	-2.9263	-3.0152	-1.5765	-1.0211	-0.9015	-0.8658	-1.5174	-1.6377
	80	-2.6942	-2.7608	-2.6694	-0.8580	-0.8805	-0.9881	-0.8857	-1.5751	-1.6501
	90	-2.5479	-2.5651	-1.6171	-0.7809	-0.9250	-0.9592	-1.0442	-1.6712	-1.6630
	100	-2.3520	-1.4570	-0.6960	-0.8144	-0.8458	-0.9077	-0.9462	-1.6961	-1.6759
	110	-1.4278	-0.6960	-0.5499	-0.7328	-0.8912	-1.0432	-0.9046	-1.6872	-1.6533
	120	-0.6406	-0.4355	-0.5545	-0.7546	-0.9971	-1.0590	-1.0050	-1.7375	-1.6579
	130	-0.3168	-0.3856	-0.5611	-0.7673	-0.9081	-0.9890	-1.2164	-1.7117	-1.6247
	140	-0.3085	-0.3969	-0.5695	-0.7546	-0.8796	-1.0057	-1.0265	-1.6518	-1.5582
	150	-0.3029	-0.4176	-0.5433	-0.6965	-0.9383	-1.0083	-0.9762	-1.5920	-1.5005
	160	-0.3185	-0.4486	-0.5274	-0.8099	-0.9161	-1.0363	-0.9736	-1.5292	-1.4199
	170	-0.3000	-0.3978	-0.5227	-0.7210	-0.8983	-0.9087	-0.9025	-1.3830	-1.3620
	-170	-0.2402	-0.3150	-0.4121	-0.5677	-0.6366	-0.6175	-0.6035	-0.6605	-0.5510
	-150	-0.1592	-0.1655	-0.1226	-0.2039	-0.2086	-0.0822	-0.0298	-0.0378	0.4645
	-130	-0.0745	-0.0206	0.0733	0.0510	0.1038	0.2702	0.3315	0.4098	0.8058
-110	-0.0009	0.0894	0.2522	0.2552	0.3405	0.5273	0.5863	0.6824	0.9956	
-90	0.0323	0.1939	0.4144	0.4466	0.5479	0.7258	0.7735	0.8744	1.0282	
-70	-0.2472	0.2795	0.5287	0.5663	0.6520	0.8115	0.8498	0.8744	0.8730	
-50	-0.5469	0.4102	0.7423	0.7895	0.8861	0.9942	1.0041	1.0000	0.8151	
-30	-0.5239	0.5504	0.9204	0.9583	0.9956	0.9304	0.9080	0.8508	0.4193	
-10	-0.5091	0.4177	0.9588	0.8948	0.6342	-0.1051	-0.1282	-0.0172	-0.4874	



表 3 半円柱の空気力係数,  $RN=0.67 \times 10^5$ 

Table 3. Force coefficients for the semi-circular cylinder at $RN=0.67 \times 10^5$										
$\alpha$ [°]	[uncorrected]					[corrected]				
	$C_{Nm}$	$C_{Cm}$	$C_{Lm}$	$C_{Dm}$	$C_{mc/zm}$	$C_N$	$C_C$	$C_L$	$C_D$	$C_{mc/z}$
-90	-1.2709	-0.0014	-0.0014	1.2709	-0.0014	1.2278	-0.0014	-0.0014	1.2278	-0.0014
-80	-1.2566	0.2283	0.0066	1.2772	0.0015	-1.2129	0.2204	0.0064	1.2328	0.0014
-70	-1.2073	0.4917	0.0492	1.3027	0.0074	-1.1628	0.4736	0.0473	1.2546	0.0071
-60	-1.1030	0.6940	0.0496	1.3023	0.0112	-1.0596	0.6667	0.0476	1.2510	0.0108
-50	-0.9166	0.8130	0.0336	1.2247	0.0125	-0.8797	0.7802	0.0322	1.1754	0.0120
-45	-0.8085	0.8254	0.0119	1.1554	0.0120	-0.7764	0.7926	0.0115	1.1094	0.0115
-40	-0.7350	0.8502	-0.0166	1.1238	0.0180	-0.7052	0.8157	-0.0159	1.0782	0.0173
-35	-0.6526	0.8354	-0.0555	1.0586	0.0180	-0.6263	0.8016	-0.0532	1.0159	0.0173
-30	-0.5833	0.8027	-0.1038	0.9868	0.0162	-0.5602	0.7709	-0.0997	0.9477	0.0156
-25	-0.5076	0.7647	-0.1369	0.9075	0.0123	-0.4881	0.7352	-0.1316	0.8726	0.0118
-20	-0.4412	0.7244	-0.1668	0.8316	0.0100	-0.4247	0.6973	-0.1606	0.8005	0.0097
-15	-0.3858	0.6548	-0.2032	0.7323	0.0051	-0.3722	0.6318	-0.1960	0.7066	0.0049
-10	-0.3234	0.5675	-0.2199	0.6150	0.0060	-0.3132	0.5495	-0.2130	0.5957	0.0058
-5	-0.2874	0.5041	-0.2424	0.5272	0.0061	-0.2791	0.4895	-0.2354	0.5120	0.0059
-2.5	-0.3293	0.4897	-0.3076	0.5036	0.0090	-0.3200	0.4759	-0.2989	0.4894	0.0088
0	-0.4588	0.4711	-0.4588	0.4711	-0.0007	-0.4463	0.4583	-0.4463	0.4583	-0.0007
2.5	-0.6445	0.4378	-0.6629	0.4092	-0.0294	-0.6310	0.4286	-0.6491	0.4007	-0.0288
5	-0.4026	0.4471	-0.4400	0.4103	-0.0706	-0.3953	0.4390	-0.4321	0.4029	-0.0693
7.5	-0.0514	0.4387	-0.1083	0.4283	-0.0608	-0.0506	0.4318	-0.1066	0.4215	-0.0599
10	0.2253	0.4259	0.1479	0.4585	-0.0286	0.2210	0.4178	0.1451	0.4499	-0.0280
15	0.6005	0.3700	0.4843	0.5128	0.0414	0.5880	0.3623	0.4742	0.5021	0.0406
20	0.8901	0.3230	0.7260	0.6080	0.0848	0.8683	0.3151	0.7081	0.5930	0.0827
25	1.1284	0.2644	0.9109	0.7165	0.1102	1.0959	0.2568	0.8847	0.6959	0.1071
30	1.3330	0.2036	1.0526	0.8428	0.1215	1.2887	0.1968	1.0176	0.8148	0.1175
35	1.4856	0.1436	1.1346	0.9697	0.1222	1.4292	0.1381	1.0915	0.9329	0.1175
36	1.5204	0.1306	1.1533	0.9994	0.1207	1.4610	0.1255	1.1082	0.9603	0.1160
37.5	1.6964	-0.0291	1.3635	1.0096	0.1161	1.6295	-0.0280	1.3098	0.9698	0.1115
38	1.7688	-0.1060	1.4591	1.0055	0.1159	1.6991	-0.1018	1.4016	0.9659	0.1114
39	1.7561	-0.2519	1.5233	0.9094	0.1076	1.6929	-0.2429	1.4685	0.8766	0.1037
40	1.7611	-0.3334	1.5634	0.8766	0.1022	1.6997	-0.3218	1.5089	0.8460	0.0987
42.5	1.7681	-0.4046	1.5769	0.8962	0.0962	1.7051	-0.3902	1.5207	0.8643	0.0927
45	1.7841	-0.4163	1.5560	0.9672	0.0867	1.7160	-0.4004	1.4966	0.9303	0.0834
46	1.7617	-0.4345	1.5363	0.9655	0.0794	1.6944	-0.4179	1.4777	0.9286	0.0764
47	1.7871	-0.4443	1.5437	1.0040	0.0827	1.7164	-0.4267	1.4826	0.9643	0.0794
47.5	1.7885	-0.4630	1.5496	1.0059	0.0796	1.7177	-0.4446	1.4883	0.9660	0.0764
50	1.7968	-0.3886	1.4527	1.1266	0.0761	1.7181	-0.3716	1.3890	1.0773	0.0728
51	1.5175	-0.0979	1.0310	1.1177	0.0888	1.4511	-0.0936	0.9860	1.0688	0.0850
52	1.7963	-0.0744	1.1645	1.3697	0.0942	1.7023	-0.0705	1.1036	1.2980	0.0892
52.5	1.8924	-0.0485	1.1905	1.4718	0.0934	1.7865	-0.0458	1.1239	1.3895	0.0881
53	1.9612	-0.0273	1.2021	1.5498	0.0953	1.8461	-0.0257	1.1315	1.4589	0.0897
54	2.0639	0.0037	1.2102	1.6719	0.0948	1.9344	0.0035	1.1342	1.5670	0.0889
55	2.1480	0.0392	1.1999	1.7820	0.0936	2.0050	0.0366	1.1200	1.6633	0.0874
60	2.3446	0.0542	1.1253	2.0576	0.0818	2.1671	0.0501	1.0401	1.9018	0.0756
70	2.4021	0.0363	0.7875	2.2696	0.0611	2.2030	0.0333	0.7222	2.0816	0.0561
80	2.4725	0.0297	0.4001	2.4401	0.0309	2.2540	0.0271	0.3647	2.2245	0.0282
90	2.4982	-0.0061	0.0061	2.4982	0.0009	2.2733	-0.0056	0.0056	2.2733	0.0008

表 4 半円柱の空気力係数,  $RN=4 \times 10^5$ 

Table 4. Force coefficients for the semi-circular cylinder at $RN=4 \times 10^5$										
$\alpha$ [°]	[uncorrected]					[corrected]				
	$C_{Nu}$	$C_{Cu}$	$C_{Lu}$	$C_{Du}$	$C_{mc/2u}$	$C_N$	$C_C$	$C_L$	$C_D$	$C_{mc/2}$
-90	-1.3544	-0.0068	-0.0068	1.3544	0.0008	-1.1950	-0.0060	-0.0060	1.1950	0.0007
-80	-1.1167	0.6053	0.4022	1.2048	-0.0001	-0.9928	0.5381	0.3576	1.0712	-0.0001
-70	-0.6510	1.1659	0.8730	1.0105	-0.0054	-0.5842	1.0463	0.7834	0.9068	-0.0049
-60	-0.0562	1.5911	1.3498	0.8442	-0.0005	-0.0508	1.4374	1.2195	0.7627	-0.0004
-55	0.2348	1.6484	1.4850	0.7531	0.0087	0.2131	1.4955	1.3472	0.6833	0.0079
-50	0.6310	1.7544	1.7495	0.6444	0.0044	0.5760	1.6015	1.5970	0.5882	0.0040
-48	0.7451	1.7456	1.7958	0.6143	0.0023	0.6811	1.5957	1.6416	0.5616	0.0021
-47	0.7669	1.6649	1.7406	0.5746	0.0047	0.7031	1.5265	1.5959	0.5268	0.0043
-45	0.7036	1.4308	1.5092	0.5142	0.0004	0.6479	1.3176	1.3898	0.4735	0.0004
-40	0.7836	1.2627	1.4119	0.4636	0.0037	0.7231	1.1652	1.3029	0.4278	0.0034
-35	0.9034	1.1671	1.4094	0.4378	0.0044	0.8335	1.0768	1.3004	0.4040	0.0041
-30	0.9782	1.0279	1.3611	0.4011	0.0060	0.9037	0.9496	1.2574	0.3705	0.0055
-25	1.0031	0.8586	1.2719	0.3542	0.0040	0.9292	0.7953	1.1782	0.3281	0.0037
-20	1.0366	0.7323	1.2246	0.3335	0.0056	0.9604	0.6784	1.1345	0.3090	0.0052
-15	1.0550	0.5906	1.1719	0.2974	0.0062	0.9796	0.5484	1.0881	0.2762	0.0057
-10	1.0523	0.4651	1.1171	0.2753	0.0078	0.9780	0.4322	1.0382	0.2558	0.0072
- 7.5	0.9534	0.4102	0.9988	0.2820	0.0104	0.8845	0.3806	0.9266	0.2616	0.0096
- 5	0.7057	0.3275	0.7315	0.2647	0.0072	0.6556	0.3043	0.6797	0.2460	0.0067
- 2.5	0.5659	0.2396	0.5758	0.2146	-0.0137	0.5290	0.2240	0.5384	0.2006	-0.0128
0	0.5249	0.1589	0.5249	0.1589	-0.0429	0.4944	0.1496	0.4944	0.1496	-0.0404
2.5	0.7722	0.0878	0.7678	0.1222	-0.0690	0.7362	0.0836	0.7319	0.1164	-0.0658
5	1.2006	0.0024	1.1958	0.1070	0.0439	1.1536	0.0023	1.1490	0.1028	-0.0422
7.5	1.4572	-0.0686	1.4536	0.1226	-0.0076	1.4054	-0.0661	1.4022	0.1182	-0.0073
10	1.6179	-0.1328	1.6164	0.1502	0.0220	1.5642	-0.1284	1.5628	0.1452	0.0213
12	1.5599	-0.1920	1.5657	0.1365	0.0376	1.5094	-0.1858	1.5151	0.1321	0.0364
13	1.6011	-0.2251	1.6107	0.1409	0.0504	1.5480	-0.2176	1.5573	0.1362	0.0488
15	1.7308	-0.2886	1.7465	0.1692	0.0620	1.6672	-0.2780	1.6823	0.1630	0.0597
17.5	1.8815	-0.3556	1.9013	0.2268	0.0789	1.7994	-0.3401	1.8184	0.2170	0.0754
20	1.9432	-0.4418	1.9771	0.2494	0.0874	1.8524	-0.4212	1.8847	0.2378	0.0833
22	1.9591	-0.5029	2.0048	0.2676	0.0931	1.8627	-0.4782	1.9062	0.2544	0.0886
23	2.0550	-0.5798	2.1182	0.2692	0.0936	1.9530	-0.5510	2.0130	0.2559	0.0889
25	2.0887	-0.5909	2.1427	0.3472	0.0995	1.9670	-0.5564	2.0178	0.3270	0.0937
26	1.8963	-0.5219	1.9332	0.3622	0.1007	1.7824	-0.4906	1.8171	0.3404	0.0946
27	1.8073	-0.4697	1.8236	0.4020	0.1018	1.6909	-0.4395	1.7061	0.3761	0.0952
28	1.7315	-0.4155	1.7239	0.4460	0.1063	1.6118	-0.3868	1.6047	0.4152	0.0989
30	1.7099	-0.3097	1.6357	0.5868	0.1125	1.5668	-0.2838	1.4988	0.5376	0.1031
32.5	1.7878	-0.2489	1.6414	0.7507	0.1180	1.6085	-0.2240	1.4768	0.6754	0.1061
35	1.8325	-0.2597	1.6501	0.8383	0.1156	1.6324	-0.2314	1.4699	0.7468	0.1030
37.5	1.9146	-0.2986	1.7006	0.9286	0.1128	1.6884	-0.2634	1.4997	0.8189	0.0995
40	1.9319	-0.3627	1.7131	0.9640	0.1076	1.6964	-0.3184	1.5042	0.8465	0.0945
42.5	2.0010	-0.4576	1.7844	1.0146	0.0994	1.7468	-0.3994	1.5578	0.8856	0.0868
45	2.0379	-0.5126	1.8035	1.0785	0.0920	1.7663	-0.4443	1.5631	0.9348	0.0798
47	2.0544	-0.5813	1.8262	1.1060	0.0815	1.7748	-0.5022	1.5777	0.9555	0.0704
48	2.0789	-0.5654	1.8112	1.1666	0.0789	1.7844	-0.4853	1.5546	1.0014	0.0677
50	1.9917	-0.4993	1.6628	1.2048	0.0865	1.7023	-0.4267	1.4211	1.0297	0.0739
51	1.9359	-0.0709	1.2734	1.4599	0.0993	1.6113	-0.0590	1.0598	1.2151	0.0826
52	2.2205	-0.1673	1.4989	1.6468	0.1017	1.8129	-0.1366	1.2238	1.3445	0.0831
53	2.4635	-0.1447	1.5981	1.8803	0.1009	1.9642	-0.1154	1.2742	1.4992	0.0804
54	2.5732	-0.0480	1.5513	2.0536	0.0980	2.0162	-0.0376	1.2155	1.6091	0.0768
55	2.6534	-0.0187	1.5372	2.1629	0.0990	2.0564	-0.0145	1.1913	1.6762	0.0767
60	2.9709	0.1110	1.3894	2.6284	0.0958	2.1988	0.0821	1.0283	1.9454	0.0709
70	3.1726	0.0302	1.0567	2.9916	0.0562	2.2670	0.0216	0.7551	2.1377	0.0402
80	3.3365	-0.0106	0.5899	3.2839	0.0311	2.3200	-0.0074	0.4102	2.2835	0.0216
90	3.3658	-0.0028	0.0028	3.3658	-0.0048	2.3250	-0.0019	0.0019	2.3250	-0.0033

## 図 表 目 録

図  
(Figure)

- 1 半円柱と風洞断面の幾何学  
(Geometry of semi-circular cylinder and wind tunnel sections)
- 2 半円柱風洞試験中の写真  
(Photographs of wind tunnel tests of semi-circular cylinders)
- 3 半円柱まわりの流れのモデルと閉塞パラメータ  
(Stream model around semi-circular cylinder and parameters for blockages)
- 4 2つの半円柱風圧分布の比較  
(Comparison of pressure distributions over two semi-circular cylinders)
- 5 半円柱風圧分布  
(Pressure distributions over the semi-circular cylinder)
- 6 半円柱の空気力係数  
(Force coefficients of the semi-circular cylinder)
- 7 半円柱の岐点と上面剝離点  
(Stagnation and upper separation points on the semi-circular cylinder)
- 8 半円柱の煙試験結果 ( $RN=1.6 \times 10^5$ )  
(Fume test results on semi-circular cylinder ( $RN=1.6 \times 10^5$ ))
- 9 半円柱の気流糸試験結果 ( $RN=4 \times 10^5$ )  
(Tufts test results on semi-circular cylinder ( $RN=4 \times 10^5$ ))
- 10 半円柱と揚力円柱の風圧分布  $\alpha=-50^\circ, -60^\circ$   
(Pressure distribution about semi-and lifting-circular cylinders,  $\alpha=-50^\circ, -60^\circ$ )
- 11  $\alpha=0^\circ$  付近の半円柱と角柱の風圧分布  
(Pressure distribution about semi-circular and square cylinders near  $\alpha=0^\circ$ )
- 12  $\alpha=45^\circ$  付近の半円柱の前縁バブル  
(Leading edge bubble of semi-circular cylinder near  $\alpha=45^\circ$ )
- 13 2つの基準速度による半円柱圧力係数 ( $\alpha=90^\circ$ )  
(Pressure coefficients about semi-circular cylinder with two reference velocities)
- 14 特殊な場合の半円柱風圧分布展開図  
(Development of pressure distribution about a semi-circular cylinder in special cases)

表  
(Table)

- 1 半円柱の風圧分布,  $RN=0.67 \times 10^5$   
(Pressure distribution for the semi-circular cylinder)
- 2 半円柱の風圧分布,  $RN=4 \times 10^5$   
(Pressure distribution for the semi-circular cylinder)
- 3 半円柱の空気力係数,  $RN=0.67 \times 10^5$   
(Force coefficients for the semi-circular cylinder)
- 4 半円柱の空気力係数,  $RN=4 \times 10^5$   
(Force coefficients for the semi-circular cylinder)

---

## 航空宇宙技術研究所報告 871号

昭和60年8月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182

印刷所 株式会社 東京プレス  
東京都板橋区桜川2-27-12

---