

一様剪断流の人工的製作と吹出し付き円柱の実験

林 農・吉野 章男・若 良二

機械工学科

(1990年9月1日受理)

Experiments on Artificial Uniform Shear Flows and a Circular Cylinder with Tangential Blowing Jet

by

Tsutomu HAYASHI, Fumio YOSHINO, Ryoji WAKA

Department of Mechanical Engineering

(Received September 1, 1990)

This paper presents two methods of creating artificial uniform shear flows. The first method uses the grid bars spaced non-uniformly across the flow and the second method uses the straw tubes arranged parallel to the flow direction. The aerodynamic characteristics of a circular cylinder with tangential blowing jet immersed in the uniform shear flow for seven shear parameters $K=0, \pm 0.03, \pm 0.045, \pm 0.15$ and Reynolds number 6×10^4 are also presented in this paper. Consequently, the shear parameter in the main flow yielded the difference of both coefficients of the lift and drag, and yielded different beginning points for the forced reattachment phenomenon. All variable characteristics (which include the angle and the pressure coefficient of the stagnation point, separation points, minimum pressure and back pressure) with increasing lift coefficient were clearly distinguished into three categories of which one was influenced only by the shear parameter, another was influenced only by the location of the tangential blowing jet, and the third was influenced by both parameters.

Key words : Fluid Dynamics, Fluid Force, Pressure Distribution, Uniform Shear Flow, Circular Cylinder, Tangential Blowing, Lift, Drag, Characteristic Value

1. はじめに

流れの中におかれた物体の表面上に発達した境界層の剥離を制御するために曲壁面噴流を用いる方法は、接線方向吹出しと呼ばれ広く応用されている。接線方向吹出しを持つ円柱に関しては、円柱それ自身を揚力発生装置として利用しようとする実用上の見地から多くの研究がなされてきており⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾、また、境界層制御に関する有益な基礎資料を得る目的からも多くの研究がされてきている⁽⁵⁾⁻⁽⁹⁾。

著者らも、揚力発生装置の基礎的研究として、一様流中のみならず一様剪断流中に於いても、円柱軸の垂直方向に速度勾配があるように置かれた接線方向吹出しを持つ円柱に働く翼性能について、強い速度勾配の種類の一様剪断流に限定して、噴流を吹出すスリットの位置を一様剪断流の高速側に置いた場合と低速側に置いた場合の翼性能の比較を行うことによって、速度勾配の影響を詳しく調べた⁽¹⁰⁾。その結果、接線方向吹出しを持つ円柱の翼性能に対する一様剪断流のシアパラメータ K の違いは

- (i) 発生する揚力および抗力に差を生じること、
- (ii) 揚力の増加する傾向は揚力微増領域、揚力激増領域、高揚力発生領域の三つの領域に分けられること、

(iii) 剥離剪断層の強制再付着が開始する $C\mu$ 値は K の違いによって異なり、負の K での強制再付着は正の K のそれより早く始まることなどを明かにした。さらに、円柱表面の圧力分布から得られる諸特性値の揚力や抗力に寄与する程度についても詳細に検討した。ただし、これらは全て一種類の一様剪断流に限定した場合について、吹出し強さ $C\mu$ の値の変化から見た翼性能および特性値の違いを論じたものである。

一方、発生揚力から見た各種特性値の違いを種々のシアパラメータについて検討すれば、その揚力発生メカニズムや空力特性の変化過程の詳細が明らかになるとと思われる。

そこで本研究では段階的に変えた何種類かの速度勾配の一様剪断流中に接線方向吹出しを持つ円柱を置いて、発生揚力に対する各種特性値の寄与の仕方について検討する。比較のために用いられた一様剪断流のシアパラメータは $K = -0.045, -0.030, 0, +0.030, +0.045$ の5種類に既報の $K = -0.15$ および $+0.15$ を加えた合計7種類である。また、一様剪断流の中心速度を基にしたレイノルズ数は $Re = 6 \times 10^4$ で、これは円柱の臨界レイノルズ数よりも十分低い値である。

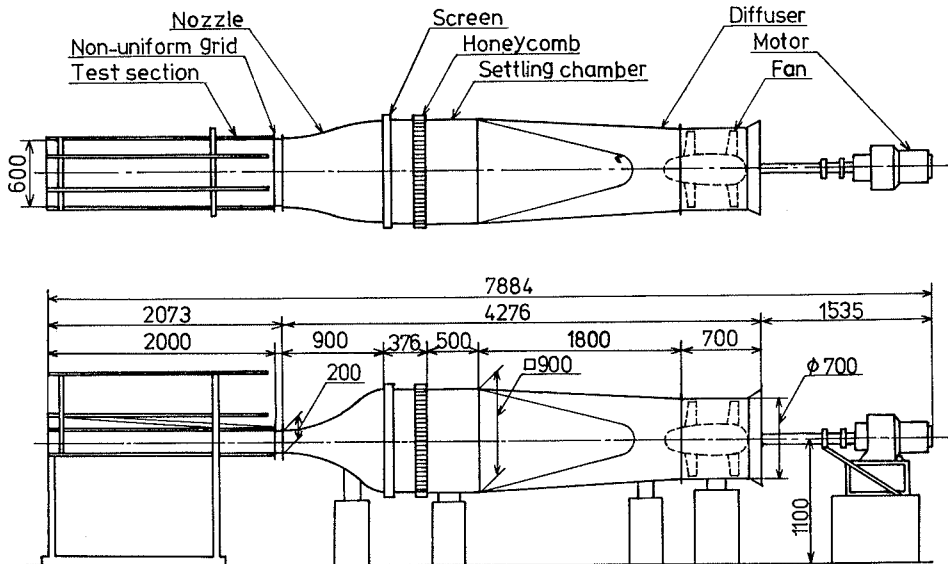


図1 実験装置

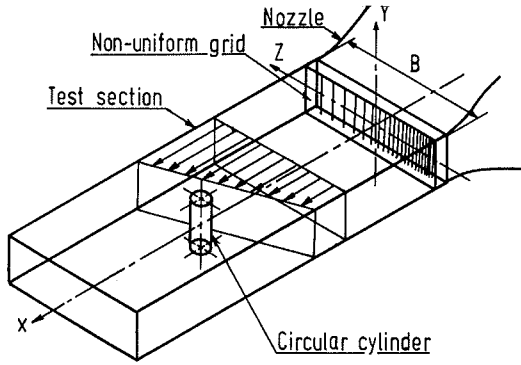


図2 試験部内の一様剪断流と座標系

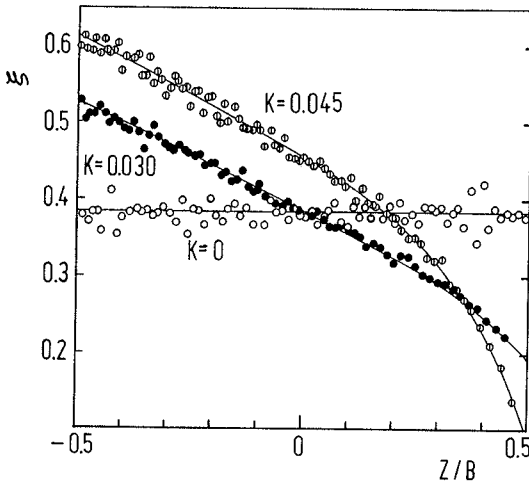


図3 格子棒間隔比ξの分布

2. 記号

- B : 風洞試験部の幅
- C_l : 揚力係数 $= -\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p \sin \theta d\theta$
- C_d : 抗力係数 $= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} C_p \cos \theta d\theta$
- C_p : 円柱表面圧力係数 $= (p - p_a) / (\rho U_c^2 / 2)$
- C_{pb} : 背圧係数
- C_{pm} : 最低圧力係数
- C_μ : 吹き出し噴流の強さ $= (\text{噴流の単位翼幅当りの運動量}) / (\rho U_c^2 R)$

- d : 格子棒の直径
- h : スロット幅
- K : シアパラメータ $= (2R/U_c)(dU/dz)$
- R : 円柱の半径
- s : 格子棒の間隔
- U : 一様流および一様剪断流の流速
- U_c : 一様剪断流の中心流速 (図6参照)
- U_{st} : 淀み流線の流速
- x, y, z : 風洞試験部内の座標軸
- Re : 一様剪断流の中心速度 U_c を基にしたレイノルズ数 $= 2U_c R / \nu$
- θ : 円柱の幾何学的前縁からの角度 (図6参照)
- θ_j : スロットの位置 (図6参照)
- θ_m : 圧力分布における最低圧力点の位置
- θ_{sb} : 剥離領域の角幅 $= \theta_1 - \theta_u$
- θ_{st} : 前方淀み点の位置
- θ_u および θ_1 : それぞれ円柱上面側および下面側剥離点の位置
- ξ : 格子棒間隔比 $= d/s$

3. 実験装置および実験方法

3.1 実験装置

図1は実験装置の外観を示す。風洞は絞り比6.75:1, 試験部寸法600mm×200mm×2mの吹抜け形であり, 実験中は試験部内の静圧を大気圧に等しく一定に保持するために, 上壁面はたわむことのできる薄い塩化ビニール板で作られ, 上下移動の微調整が可能な構造としている。送風機は西芝電機製DBFP形70P式, 定格流量144m³/min, 静圧80Aq (0.78kPa), 回転数1500rpm, 内径700mm, 長さ700mmの軸流送風機で, 回転数制御で風量を調整することによって試験部中心の流速は0~30m/sの範囲で変えることができる。送風機からの空気は, 直径700mmの円形断面入口から一辺90.0mmの正方形断面の出口へ拡がり角10°で拡がるデフューザを経てセツリングチャンバへ入り, 絞り比6.75:1の三次元ノズルにより絞られ試験部へ送られる。

図2は試験部通路に形成される一様剪断流と供試円柱および座標系を示す。試験部内の流れは, Owenらの理論⁽¹⁾に修正を加えた方法にしたがって, 直径3mmの黄銅製丸棒をy軸に並行に不等間隔に並べた剪断格子によって, シアパラメータK=0.030と0.045の2種類

の、歪みや捻れのない一様剪断流を得ることができた。図3は一様剪断流の流速分布が直線的になるように試行錯誤した結果、最終的に得られた流路横断面の格子棒間隔比 δ の分布の実測値を示す。速度分布の微少な修正は、速度分布を計測しながら、各々の格子棒に応じた修正量の厚さだけニッケルメッキを施すことにより達成した。また、速度勾配の大きい $K=0.15$ の場合はストローを流れに沿って積み上げた積層格子の長さを整形することにより、その速度が直線的に変化する一様剪断流を製作した。

実験は、この3種類の一様剪断流中と速度勾配のない一様流中について行った。また、円柱表面での層流境界層の遷移および背圧係数は主流に含まれる乱れ強さに影響されることが分かっているので⁽¹²⁾、円柱設置予定位置に於ける乱れ強さが一様剪断流および一様流双方とも同程度になるように、一様流のためにも格子を採用した。この乱流格子は直径3mmの格子棒を $\delta=0.385$ の等間隔に配列した格子である。得られた平均速度の中心流速 U_c で無次元化した分布の比較を図4に示す。平均速度分布は、側壁近くの境界層を除いて、直線的に変化しているものと見なすことができ、下流においてもその直線性は崩れておらず、流れ方向の $0.67 < X/B < 2.83$ の領域および中心速度 $U_c = 1.6 \sim 2.4 \text{ m/s}$ の範囲で相似であることを確認した。

図5は流路中央に於ける乱れ強さの流れ方向減衰状況を示す。円柱設置予定位置 $X/B = 1.67$ に於ける乱れ強さ $\sqrt{u'^2}/U_c$ は $K=0.045$ のとき2.3%、 $K=0.03$ のとき2.0%、 $K=0$ のとき1.7%で、いずれの場合も約2%でほぼ同一と見なせる程度である。その位置での乱れの積分スケールはそれぞれ14.8mm、18.5mmおよび26.0mmである。主流に直交な z 方向の乱れ強さの一様性はシアパラメータの増大に伴って保たれなくなるが、最大3%以内に収まっていることを確認した。供試円柱の断面は図6(a)に示す。円柱は外径40mmの中空管に直径8mmの小円柱が内接しており、この小円柱をノズル壁の片側として噴流は全スパン方向に一様な幅0.2mmのスリットから円柱壁面に沿って流出する。壁面は硬質クロムメッキを施した滑らかな鏡面仕上げとなっている。円柱の縦横比は約5であるので、中央断面での特性値は二次元特性値を代表することができる⁽⁶⁾。試験部中央に垂直に設置される円柱はスリットを任意角度の位置になるように回転し固定することが可能である。円柱のスパン中央断面には周方向に約 10° 間

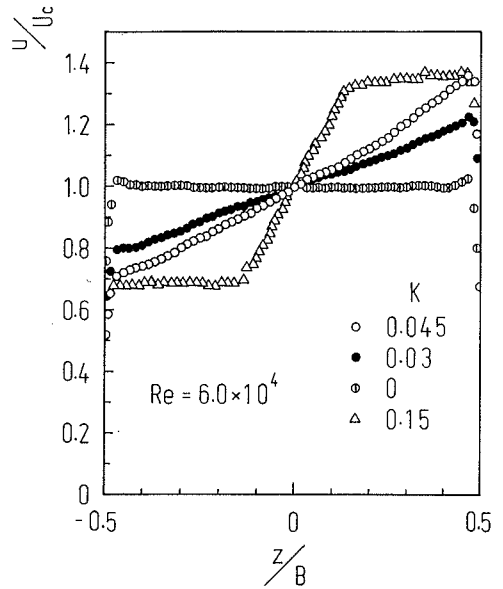


図4 平均速度分布

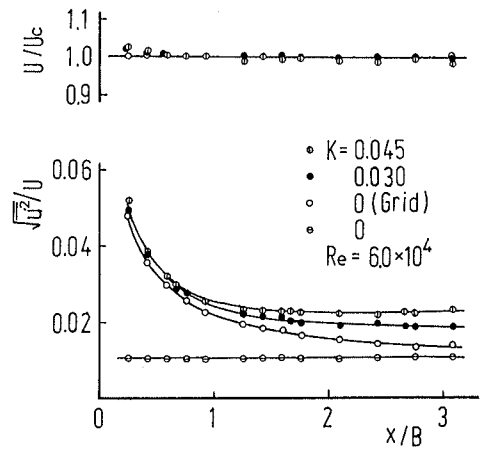


図5 乱れ強さの流れ方向減衰状況

隔の34ヶ所に直径0.3mmの圧力測定孔があけてある。また、円柱内部のスパン方向ほぼ等間隔の4カ所に円柱内圧測定管が配置されている。上下壁を貫通する部分の円柱は試験部外側へ直接突き出し、壁面と円柱との接触面は壁面を片刃のエッジ形状にすることによって、噴流が内壁面に沿って滑らかに流れ去るようにした。壁面か

ら突き出た円柱の両端から、往復圧縮機で圧縮された空気が流量計、減圧弁、空気溜を経て供給される。試験部上壁面は排除厚さ分だけ下流に進むにしたがって広がっているため、境界層の速度分布は上下壁面で必ずしも対称ではない。したがって、側壁の境界層内の速度勾配によって生ずる糸状随伴渦は上下で必ずしも対称でなく、それによって生ずる吹き下ろしは上下で対称ではない。しかし、糸状随伴渦による誘導迎え角の発生は壁近傍に限定され円柱中央には及ばないので⁽¹³⁾、円柱の二次元特性には影響ないものとして扱った。

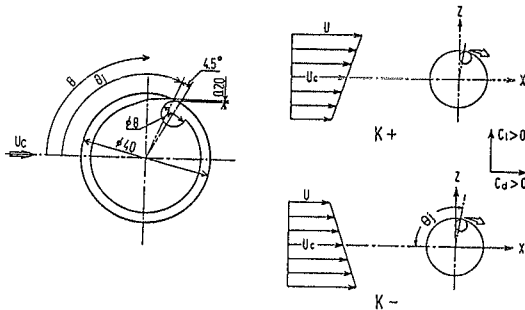


図6 供試円柱および高速側・低速側吹出し

3・2 実験方法および実験条件

本実験は、一様剪断流のX軸上における流速 U_0 を基にしたレイノルズ数が $Re = 6.0 \times 10^4$ である条件で行った。この値は多少レイノルズ数が変化しても、一様流中の単純円柱の抵抗係数が一定に留まる臨界レイノルズ数より十分低い範囲である⁽¹⁴⁾。

実験の主要なパラメータは円柱直径に相対的な一様剪断流の速度勾配の大きさを表すシアパラメータ $K = (2R/U_0)(dU/dz)$ 、噴流の吹出し強さ C_μ とスリットの角度位置 θ_j である。表面圧力分布の測定は7種類の一様剪断流 $K = -0.15, -0.045, -0.030, 0, +0.030$ および $+0.045, +0.15$ 、3種類のスリット位置 $\theta_j = 30^\circ, 60^\circ$ および 100° について、 C_μ を0から0.4の範囲で変えて行った。シアパラメータ K の符号は、図6(b)に示すように、噴流の流出方向が主流と一致する状態で、円柱のスリット位置が一様剪断流の高速側にある場合を正($K > 0$)、低速側にある場合を負($K < 0$)と定義した。ただし、実際には K の正負は速度勾配を逆にするのではなく円柱の上下を転倒させることによって達成した。3種類の噴

流吹出し位置は円柱の順圧力勾配領域($\theta_j = 30^\circ, 60^\circ$)と逆圧力勾配領域($\theta_j = 100^\circ$)の2通りであり、前者は剥離点上流吹出しに対応し、後者は剥離剪断層の強制再付着現象が期待される位置である。

円柱まわりの流れの淀み点や剥離点などの各種特性値や円柱に働く揚力係数や抵抗係数は円柱表面の圧力分布曲線から決定した。さらに、円柱スパン方向の二次元性および剥離点はカーボンブラック、灯油、流動パラフィン、オレイン酸を適度な割合で調合した油膜剤を用いて円柱表面上の流れを可視化することによって確認した。

4. 実験結果および考察

4・1 圧力分布

4・1・1 シアパラメータの影響 一様剪断流中の速度勾配のみの効果を調べるために、 $\theta_j = 185.5^\circ$ でスリットを後縁近くに位置させるとともにそのスリットをセロテープで目張りして円柱表面圧力分布を測定した。その結果の一例として、 $K = 0.045$ の場合を図7に示す。図は円柱上下表面上での僅かな圧力差を比較するために幾何学的前縁を基準に重ね合わせたので、僅かに非対称分布であることがわかる。前縁近くから最低圧力点近くまでの範囲($10^\circ < \theta < 70^\circ$)では剪断流の高速側の方が僅かに圧力が高く、その差は最大でも $\Delta C_p = 0.15$ である。剥離点は $\theta = 80^\circ$ 前後で層流剥離であり、剥離領域での背圧係数は幾何学的後縁に関して対称である。この測定された圧力分布曲線から求めた揚力係数は $C_l = -0.04$ で非常に僅かであるが発生し、抵抗係数は $C_d = 1.22$ 、淀み点は $\theta_{st} = 1.5^\circ$ である。

図8は円柱表面上の圧力分布を一様剪断流のシアパラメータ K 、吹出し強さ C_μ およびスリットの角度位置 θ_j をパラメータにして比較したものである。 $\theta_j = 60^\circ$ の時の $C_\mu = 0.2$ および 0.4 については $K = 0.045$ と $K = -0.045$ の実験結果をプロットして、吹出しのある場合の速度勾配の影響を比較している。剪断流の速度勾配の圧力分布への影響を観察すれば、正の K は、スリット直後の極端な負圧点を別にして、最低圧力点 θ_m まわりに円柱上面側全域にわたってなめらかに分布する負圧領域の圧力係数を減少し、最低圧力係数 $C_{p,m}$ を低下させている。と同時に背圧係数 $C_{p,o}$ をも減少させ、負の K は逆の傾向を示していることが明かである。速度勾配の影響を別にして、噴流の吹出し条件(C_μ, θ_j)による圧力分布の変化は既に報告されている一様流中の

結果とほぼ同様である⁽⁵⁾。すなわち $\theta_j = 30^\circ$ で C_μ の小さいときにはスリットのない単なる円柱と同様な圧力分布を示しているが、 C_μ および θ_j が増加するにしたがつて、最低圧力点 θ_m および上面側剥離点 θ_s は円

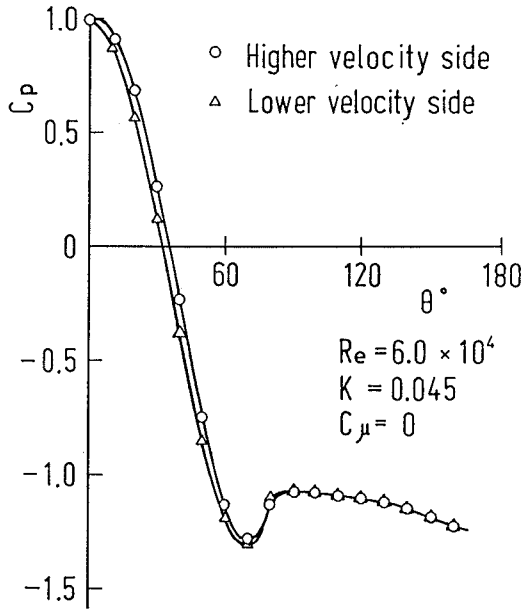


図7 円柱表面圧力分布への速度勾配の影響

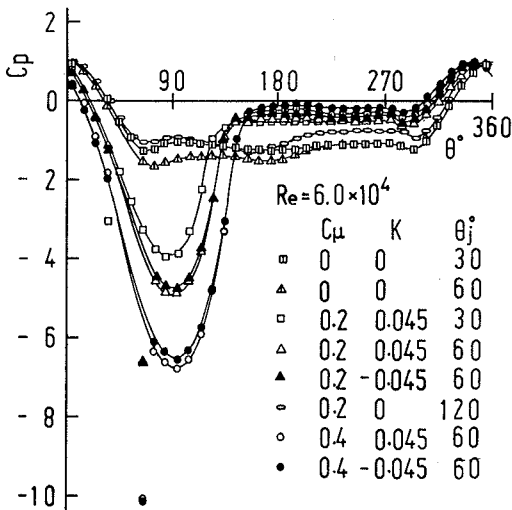


図8 円柱表面上の圧力分布

柱後方に移動し、淀み点 θ_{st} は円柱前面をスリットのある反対側に回り込み下流に移動し、 C_{pm} は減少し、 C_{ps} は上昇する傾向を示している。しかし $\theta_j = 120^\circ$ では、 $C_\mu = 0.2$ であつても層流剥離した円柱表面上の流れは再附着することなく圧力分布は吹出しのない場合に類似している。また、 $C_\mu = 0$ で $\theta_j = 60^\circ$ の時にはスリットがトリッピングワイヤと同様な働きをして円柱の上面側だけ剥離を遅らせて圧力分布を非対称にしている。

このスリットがトリッピングワイヤ作用をなすのは C_μ の小さい範囲に限られ、圧力分布を非対称にする θ_j の範囲は、本実験のレイノルズ数ではおおよそ $50^\circ \leq \theta_j \leq 90^\circ$ である。その時の発生揚力 C_l と C_μ および θ_j の関係を図9に示す。

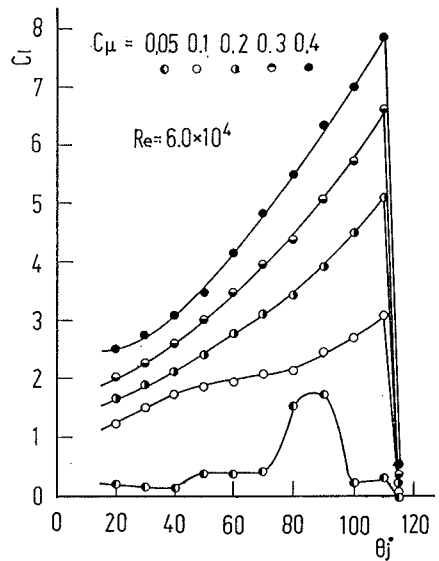


図9 スリットのトリッピングワイヤ作用

4・2 空力特性

4・2・1 揚力 図10は実験によって得られた円柱表面圧力分布曲線を積分することによって求めた揚力係数 C_l と C_μ の関係を示す。ただし、図的積分に際して、測定孔の間隔が約 10° と粗いのでスリット直後のごく狭い領域に限られる極端な負圧領域の圧力分布の詳細は不明であるという理由からその負圧は積分値には加えていない。

$\theta_j = 30^\circ, 60^\circ, 100^\circ$ と吹出し位置が後方になるにしたがつて、同じ C_μ 値でも発生 C_l は大きくな

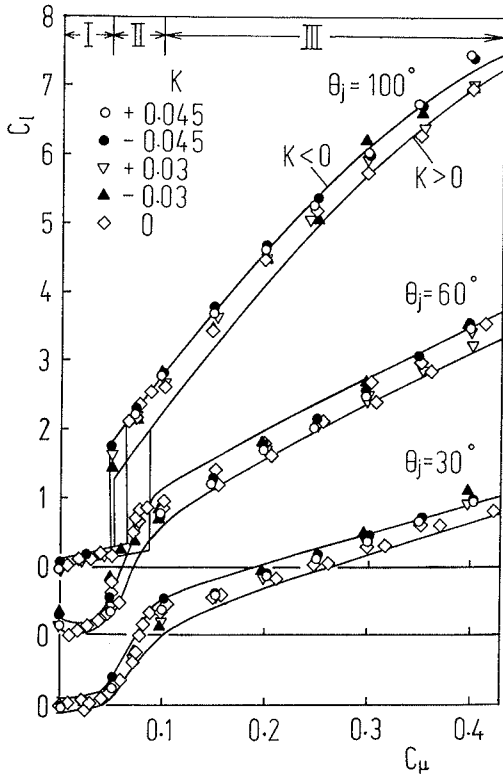


図10 揚力係数

ること、揚力の増加傾向が3つの領域に区分できることや、 $\theta_j = 100^\circ$ の場合に $0.05 < C_\mu < 0.1$ の範囲で安定性の喪失が生じ解の分枝が行われる結果、揚力の跳躍を伴うヒステリシスサイクルが生じていることは、 $K = \pm 0.15$ の場合の前期に説明したのと同様である⁽¹⁰⁾。一方、本実験では、 θ_j のいずれの場合も測定誤差と思われるバラつきによって、 K による C_l の差は不明確である。図中の実線は $K = \pm 0.15$ の一様剪断流を用いてシパラメータの効果のみを強調した実験の結果⁽¹⁰⁾ を示しているが、この実線の間にはほぼ取まっていることと、全体的傾向として負の K の C_l は正の K のそれに比べて僅かに大きめであることが感じとれる。発生揚力に差を生じない原因は、既報で詳細に説明したように⁽¹⁰⁾、負圧領域と背圧領域の圧力の揚力への寄与が互いに打ち消し合うことにより、 K の正負によって生じるべき C_l の差を消去することにある。そこで以下の考察では、同じ揚力を発生している状態における特性値の違いについて検討する。

4・3 各種特性値

円柱表面圧力分布から読み取ることのできる特性値としては、最低圧力係数 $C_{p,m}$ 、最低圧力点の位置 θ_m 、上面側剥離点 θ_u 、下面側剥離点 θ_l 、背圧係数 $C_{p,b}$ 、前方淀み点 θ_{st} 、前方淀み点の圧力係数 $C_{p,st}$ などがある。ここでは、 C_l との関係を表す近似式が得られた下面側剥離点と前方淀み点について詳細に検討する。

4・3・1 下面側剥離点 θ_l 下面側剥離点 θ_l と揚力係数 C_l の関係を図11に示す。 θ_l は前方淀み点 θ_{st} に連動して動くが、 θ_{st} ほどの移動量はない。さらに C_l の増加にともなう、円柱上面側の噴流付着による θ_u の円柱後側への回り込みの影響を受けて、その移動量は減衰しており、 θ_l に関係なく K および C_l のみによって決まる特性値であることを示している。揚力の増加とともに、速度勾配による違いは減少して、剥離領域が円柱後方下側 $1/4$ 表面上の範囲に限定されてくるので、実験結果から θ_l は $C_l \rightarrow \infty$ の時 $\theta_l = 270^\circ$ に漸近すると仮定できる。また、 θ_l は K に対して逆正接関数の関係で変化すると見なすと、

$$\theta_l = 12.5(1 + 0.3 \tan^{-1}(20K)) \exp(-C_l/4.5) + 270 \quad (1)$$

の近似式を得る。図11中の実線は式(1)より求めた関係を示す。

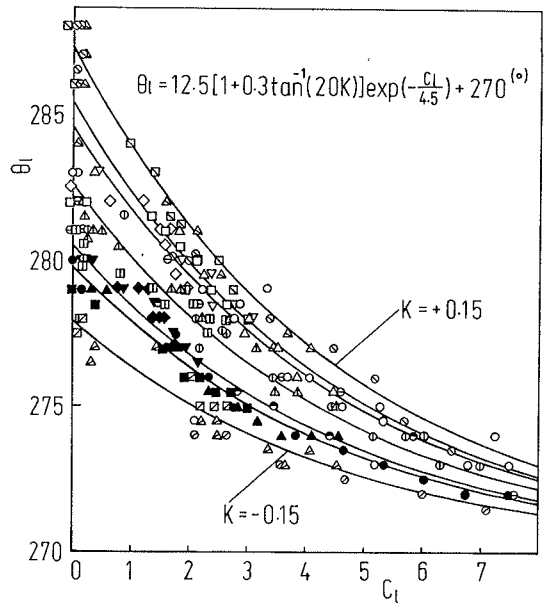


図11 $C_l - \theta_l$

4・3・2 前方淀み点 θ_{st} 速度勾配の影響を最も強く受ける特性値は前方淀み点の θ_{st} および $C_{p, st}$ である。

図12は θ_{st} と C_1 の関係を示す。 θ_{st} は C_1 の増加にともなって、円柱前面をスリットのない円柱下面側へ回り込むが、 $C_1 = 0$ において K の正負に応じて符号同順の θ_{st} に振り分けられる。 C_1 の増加にともなってシアパラメータの影響は減衰しその差は減少する。著者らは⁽¹⁵⁾、剪断流中では吹出しを持たない単純円柱ですら、剪断流の高速側から低速側に向かう揚力が発生し、その成分は変位効果に起因するものが大部分を占めることを明らかにした。したがって、 $C_1 = 0$ 付近では、 $K > 0$ のとき $\theta_{st} > 0$ であり、しかも僅かな負の揚力があることは、単純円柱と同様、変位効果によって揚力が作用することを表している。逆に、 $K < 0$ のときには $\theta_{st} < 0$ であり、 $C_1 = 0$ にならなく僅かな正の揚力しか見られないのも同じ理由である。

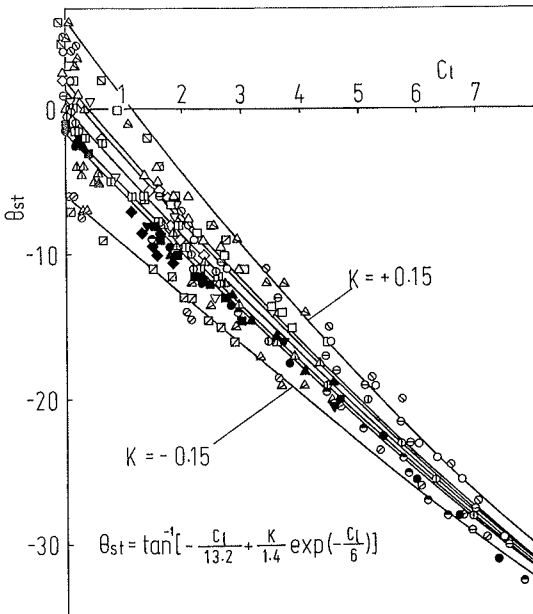


図12 $C_1 - \theta_{st}$

簡単なポテンシャル理論の展開⁽¹⁵⁾からの推論に加えて、 θ_{st} の K に対する変位量は C_1 の増加にしたがって減衰しながら K の大きさに比例して線形的に配分されている実験の結果を考慮して θ_{st} の式を求めれば

$$\theta_{st} = \tan^{-1} \left\{ -\frac{C_1}{13.2} + \frac{K}{1.4} \exp\left(-\frac{C_1}{6}\right) \right\} \quad \dots (2)$$

図12中にて実線で示した式(2)の曲線は $C_1 = 1 \sim 3$ の範囲を除いて、実験結果とよく一致する。

5. 結 論

一様剪断流を格子棒を不等間隔に配列する方法およびストローを流れ方向に長さを変えて積み重ねる方法の2種類によって作った。いずれの方法も試験部中央に速度分布が直線的に変化する一様剪断流を得た。この一様剪断流中に置かれた接線方向吹出しを持つ円柱の空力特性について、シアパラメータ $K = 0, \pm 0.03, \pm 0.045, \pm 0.15$ の7種類の速度勾配と3種類のスリット位置 $\theta_s = 30^\circ, 60^\circ, 100^\circ$ で実験をおこない、円柱まわりの圧力分布から求められる各種特性値の発生揚力に対する関係を詳細にまとめた。それらの特性値の内、下面側剝離点は式(1)、前方淀み点は式(2)によって近似的に表すことができた。

文 献

- (1) Lockwood, V.E., NASA TN D-244(1960), 1.
- (2) Cheeseman, I.C., Aeronaut. J. Aeronaut. Soc., 72(1968), 635.
- (3) Dunham, J., Aeronaut. J. Aeronaut. Soc., 74(1970), 91.
- (4) Dunham, J., J. Fluid Mech., 33-3(1968), 495.
- (5) 古屋・吉野, 機論, 42-358(1976), 1830.
- (6) 若・吉野・林・岩佐, 機論, 48-433(1982), 1650.
- (7) 佐藤・松岡, 機論, 36-289(1970), 1493.
- (8) 上田・田中, 機論, 41-350(1975), 2853.
- (9) Awbi, H.B., Aerospace, 2-9(1975), 18.
- (10) 林ほか, 機論, 55-515, B(1989), 1896.
- (11) Owen, P.R. & Zienkiewicz, H.K., J. Fluid Mech., 2-6(1957), 355.
- (12) 有江・ほか4名, 機論, 46-408(1980), 1427.
- (13) 吉野・若・岩佐・林, 機論, 46-410(昭55), 1890.
- (14) Schlichting, H., Boundary-Layer Theory 7th ed. McGraw Hill
- (15) 林・吉野, 機論, 56-522, B(1989), 289.
- (16) 吉野・林・若・吉田, 鳥取大学工学部研究報告, 14-1(1983), 29.