

端板を持った円柱の後流渦について

光安, 信

平城, 直治
九州大学工学部応用力学専攻

<https://doi.org/10.15017/6769095>

出版情報：応用力学研究所所報. 31, pp.1-15, 1969. 九州大学応用力学研究所
バージョン：
権利関係：

端板を持った円柱の後流渦について

光 安 信
平 城 直 治*

概 要

円柱に端板をつけた場合、この端板の存在により、後流渦の発生の様子、および発生周期などが二次元流れの場合とどんな変化があるか、また発生した後流渦がどのようなつながり状態で流れ去るか、などを水槽および風洞実験で観測した。

端板をつけた場合でも、後流渦の発生周期は二次元流れの場合と等しく、しかも主流部から端板面まで直線状の渦管として同時に円柱から剝離することが認められた。また発生する渦の強さは端板に近くなるほど弱くなることが認められた。

更に剝離した渦管は、端板近傍の速度勾配による Shear flow 層内で、端板面から消散を始め、Shearing Stress のおよばない層まで十分に消散が進んだ状態で、端をもった渦管として安定に流れて行くことが認められた。

§ 1 序

円柱の運動に伴ってその後流に後流渦が生じることは古くから知られ、Karmann¹⁾, Tyler²⁾ らによって研究がなされて来た。

この渦の発生は境界層の剝離によるもので、剝離した流れが後流渦を造り出し、ある Reynolds 数の範囲ではこの後流渦は、円柱の両側に 2 列に交互に配列された安定な状態で流れて行き、この安定な渦列が Karmann 渦列といわれている。

また Relf³⁾ はこの後流渦は、 $10^2 < Re < 10^5$ の範囲では周期的に発生するが、 $Re > 10^5$ では発生は非周期的であることを知った。一方 Richardson⁴⁾ は、 $Re < 10^2$ においても渦の発生は、周期的であることを実証した。

ただこれらの場合、流れは完全に二次元流れの場合に限られ、例えば円柱端付近における後流渦については、種子田⁵⁾ の研究があるにすぎない。

ここでは円柱に端板をつけた場合、この円柱の後流に発生する渦がどんなであるか、を特に端板の近くに注目して観測した。

§ 2 実験装置、方法について

端板近傍での後流渦の観測を、今回は次の二つの方法で実験した。

* 九州大学工学部応用力学専攻博士課程

(1) 水槽実験

「端板近傍での渦」の定性的な観測を主とし、そのため流れの可視化に便利なよう水槽を用いた。使用水槽としては航空教室の幅445mm、長さ3,000mm、深さ600mmの総ガラス製の水槽を用い、静止水中を円柱を動かし、任意方向からの記録、撮影ができるようにした。

モデルとしては、直径 $D=21\text{mm}$ 、長さ200mmの円柱を、幅200mm、長さ350mmの木製板の前方から120mm点に固定したものをを用いた。図1に概略を示す。

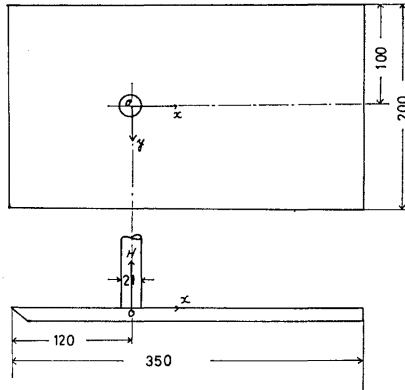


図-1 円柱と端板

水槽において行なった実験は次の二つを目的とした。

(1-1) 円柱後流渦の定性的観測

円柱表面に condensed-milk を一様に塗り、水中を移動させ水にとけ出した condensed-milk により円柱後方の渦を可視化し、これを連続撮影記録した。

なお、この場合円柱の移動速度としては、 $4\sim 16\text{cm/s}$ であり、この移動速度を代表速度 U 、円柱の直径 D を代表長さとした Reynolds 数 $Re=U\cdot D/\nu$ は $680\sim 2,720$ の範囲であった。

(1-2) 端板からの高さによる後流渦の強さの変化について

円柱後方に生じる渦の、端板からの高さによる渦の大きさ、および渦の強さの変化などを調べるため、アルミ粉を水中に混入し、この水中でモデルを動かし、端板から任意の高さの流れをスリットを通した 1.5mm 厚さの光で照射し、これを撮影記録した。

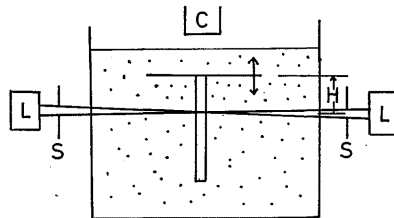


図-2 アルミ法による実験装置

L; 光源 S; スリット
C; カメラ

この場合に限り撮影に便利なように、300mm×350mmの透明なアクリライト板を端板として用い、前縁から160mmの点に円柱の中心を固定した。

なお、アルミ粉の沈でんによる悪影響をさけるため、円柱をつるした状態で実験した。

図2に概略を示す。

モデルの移動速度としては、1~20mm/sで、Re数は16~320の範囲であった。

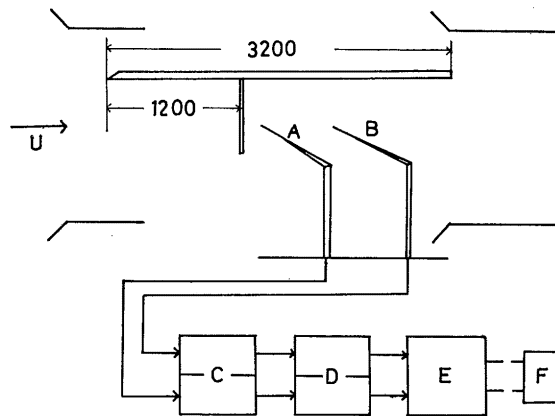
(2) 風 洞 実 験

水槽での実験が余り高くない Reynolds 数の場合の定性的観測に限られていたので、ここではより高い Reynolds 数の場合を、定量的にまで行なった。

使用風洞は航空教室の Göttingen 型風洞を用いた。円柱としては、直径60mm, 30mm, 8mm, それに2mmの4種を用い、幅1,600mm, 長さ3,200mmの木製板の前縁から1,200mmの点に中心を位置するように固定した。

後流渦の検出には熱線風速計を用い⁶⁾、流れを電氣量に変え、これをシンクロスコープ上に走査させ記録した。

図3に風洞を使った実験の概略を示す。



図—3 風 洞 実 験 装 置

A, B; 熱線風速計検出部
C; 増幅器 D; リニアライザー
E; シンクロスコープ F; カメラ

今回の風洞実験では次の3項目を行なった。

(2-1) 後流渦の発生周波数、および Strouhal 数の測定

この場合には固定用の熱線Aは取りはずし、熱線Bを流れと直角方向に移動させ、渦の中心位置を求めるとともに、その点における流速変動を記録し周波数を読みとった。更にこの周波数を用いて Strouhal 数を求めた。

(2-2) 後流渦の間隔距離および渦の流れ速度の測定

先に求めた渦の位置に熱線Aを固定し、熱線Bを流れ方向に移動させ、A、B熱線による渦の位相のずれを検出し、これにより渦間隔を測定し更に渦の流れ速度を求めた。

(2-3) 端板からの距離による後流渦の比較

熱線を上下方向に移動させ、端板からの距離による後流渦の変化を求めた。

以上の風洞実験において、風速は4.3~9.5m/sで Reynolds 数は660~31,000の範囲であった。

§ 3 結 果

端板の近傍で、円柱後方に発生する渦が主流部で発生する渦とどんな関係にあるか、特にその発生周期および後流へ流れ去る場合、渦のつながりがどんなになっているかなどに注目して行なった水槽および風洞実験の結果を項目別にまとめることにする。

まずここで示すデータに関して、その記号と意味を記す。

(x, y, H): 座標

D : 円柱の直径

l : 渦の間隔距離

L : 固定渦の長さ

N : 渦の発生周波数

Re : Reynolds 数 $D \cdot U / \nu$

ν : 動粘性係数

St : Strouhal 数 $N \cdot D / U$

u : 境界層内の速度 x 成分

U : 主流速度, または円柱の移動速度

Uv : 渦の流れ速度

T : 渦の発生周期

なお、長さはことわらない限りmm単位である。

(1) 水 槽 実 験

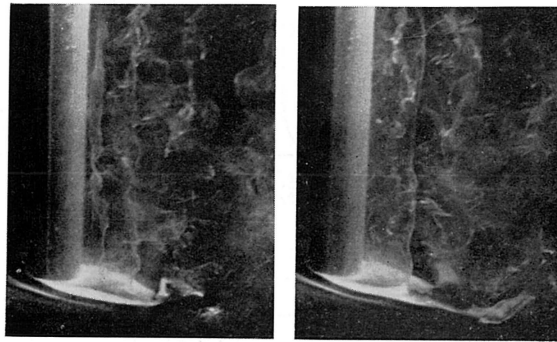
(1-1) 端板近傍の後流渦について

図4-1に Re 数875の際のななめ後上方からの写真を示す。(A)から0.8秒後の状態が(B)である。渦管のつながりに注目したスケッチを図4-2に示す。

円柱上流の端板表面に中口ら⁷⁾によって指摘された「襟巻き形の渦」の存在がはっきりと認められる。

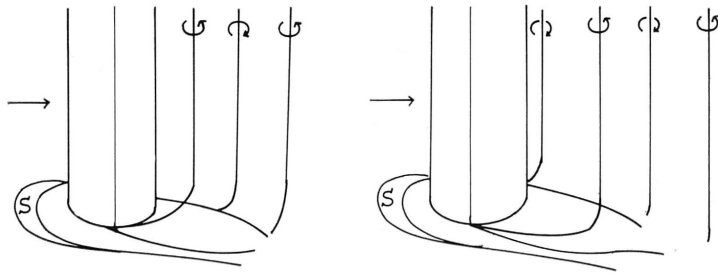
図-5は真横から見た渦管のつながりの様子である。

円柱の片側の一本の渦管についてのみ注目すると、時間の経過につれて、図-6のスケッチで表わせる。



(A) Re=875 (B)

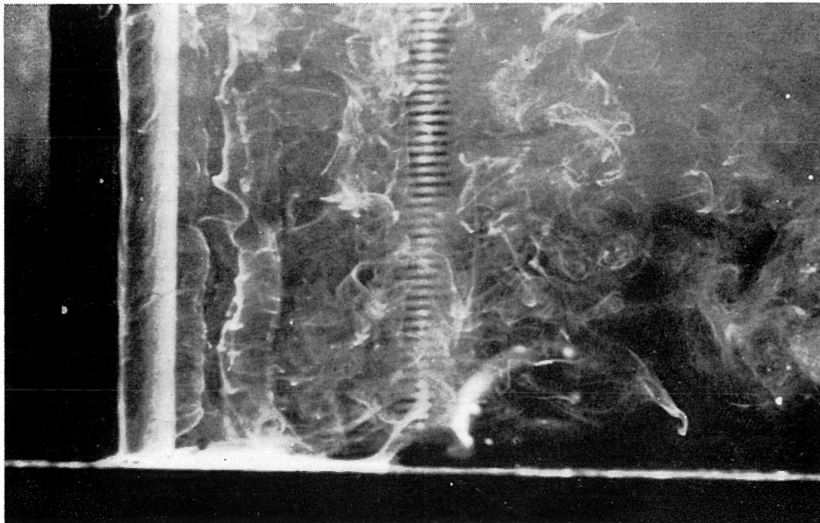
図-4-1 ななめ後上方からの写真



(A) (B)

図-4-2 渦のつながりのスケッチ

S; 襟巻形の渦



Re=875

図-5 側面写真

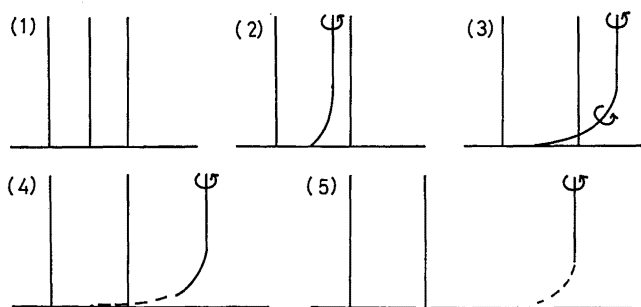


図-6 時間の経過による渦管の変化

図7にある瞬間における渦管の状態をスケッチで示す。すなわち、円柱の側面にある瞬間、主流部から端板表面まで直線状の剝離がみられ(1)、時間の経過とともに渦管となって流出する。

端板の近傍には、速度勾配が存在するため、渦管は端板近傍では速度分布に比例した状態で流れ去って行く。(2)→(3)。

速度境界層外では渦管は円柱に平行な状態で安定に流れて行き、この断面をとると安定な Karmann 渦列になっている。図7の(B)。

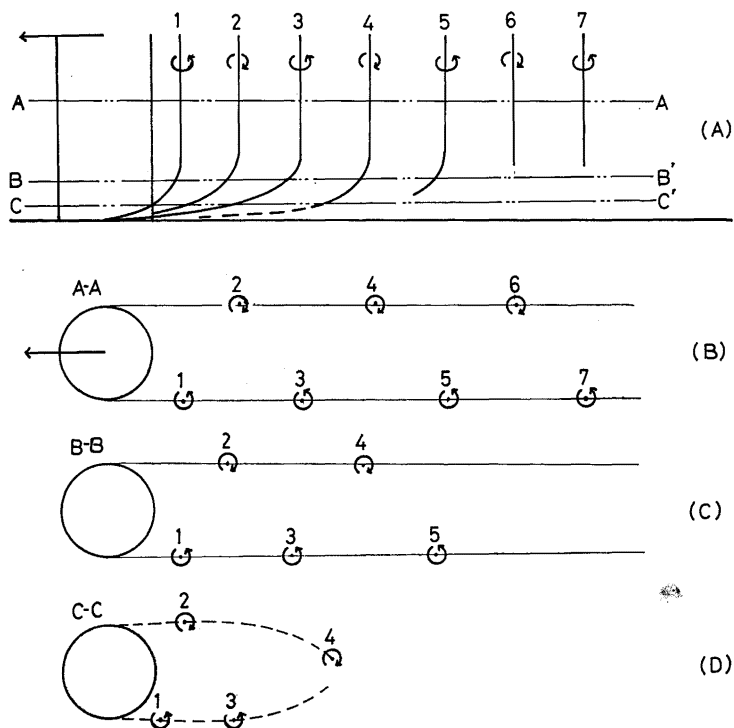


図-7 渦の側面および断面図

図一五の円柱直後の渦管の状態が図一六の(3)に相当する。ところが境界層内では、(3)→(4)と次第に流れ方向へ傾むくのが見られ、ある位置まで流れた状態でこの傾斜した部分と流れに垂直な部分との連続性がなくなってしまい、(5)、以後この垂直な部分のみが安定な状態で流れて行くのが認められる。図一七(A)の6、7。

端板近傍では流速が主流部よりも小さく、ある断面での流速をとった Re 数をとると主流の Re 数に比べ小さくなるのは当然である。

円柱の直径が等しく流速が異なれば、一般には流速の大なる方が渦の発生周波数は多くなるはずである。

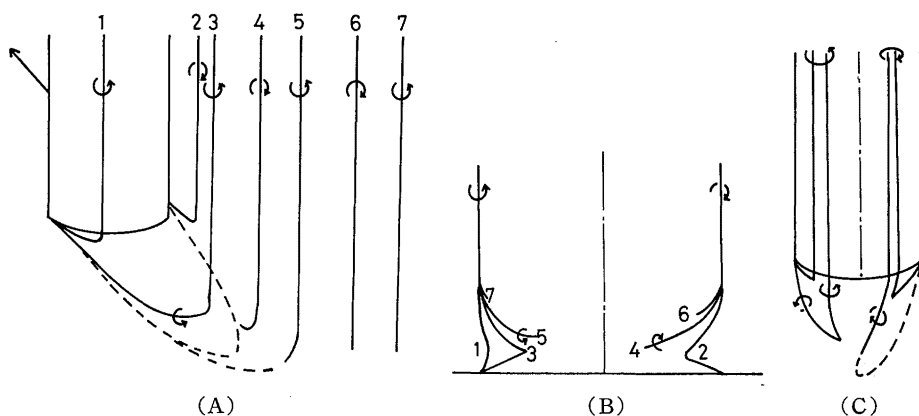
ところが端板を持った円柱の場合、流速の異なる端板の近くにおいても、主流部と等しい周期で渦が発生している。

渦の周期について述べると、図一四-1、図一五の場合 $Re=875$ で2.1秒であった。二次元流においての Tyler による $N \cdot D/U=0.198(1-19.7/Re)$ から求めると2.13秒となり、端板を持った場合も周期に対する端板の影響はなく主流部から端板面まで主流部の発生周期で一樣に渦が生じていることになる。とすると流速のおそい端板近傍では渦は十分に発達しないままで円柱から剣がれ渦管となって流出しているといえるだろう。

渦の強さを考えて見ると主流部における渦の方が、境界層内の渦よりも強いし、更に端板に近づくとつれ次第に弱くなっているが実験(1-2)で認められた。

しかも端板に近いほど、速度勾配は大きく、shear flow による渦の消散が大きいのも当然である。

すなわち、主流部から端板面まで同時に発生流出した渦は剝離後、端板面から次第に消散しているものと考えられる。この shear flow 層で、渦の消散が次第に進み、ついにはこの効果のおよばない層外に一端を持った渦として安定な状態で流れ去っているものと思える。図一七(A)の6、7。

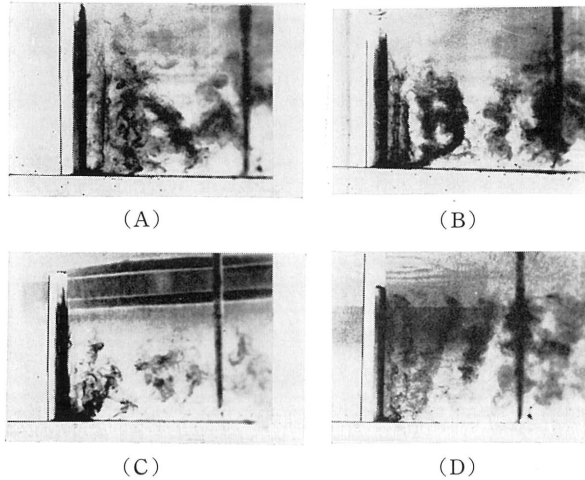


図一八 後方からのスケッチ

A; ななめ後上方より B; 真後より C; 後上方より

円柱後方で端板に近い所では渦がまき込まれているのがわかる。
なお襟巻形の渦は略している。

図一9は主流速度の変化によって、渦の端板からの離脱点（渦の消散が充分進み端板上に残存する condensed-milk のあとひき部との連続性がなくなる点）の変化を示したものであるが、流速が大になるほど円柱から近い所で離脱しているのが認められる。



図一9 Re 数による離脱点の変化

A; $Re = 680$
 B; 1,020
 C; 1,700
 D; 2,720

速度勾配が急激で消散効果の大きい高 Reynolds 数の流れの場合の方が、速度勾配のゆるやかな低 Reynolds 数流れの場合より離脱が早いのは当然である。逆にいえばこのことから shear stress により端板面から渦の消散が起り次第に消散が進行し、消散効果のない shear flow 層外に端を持った渦として安定に流れて行く、といえよう。

一応まとめると、

- 1) 端板を持った場合、端板による速度勾配の存在にかかわらず渦の発生は二次元流れの周期と等しく、主流部から端板面まで同時に直線状に発生する。
- 2) 速度境界層内で渦の消散が起り、この消散が充分進んだ状態で層外に端をもった安定な直線状の渦管として流れ去る。
- 3) 流速が大なるほど、円柱直後で渦は安定化し直線状の渦管となってしまう。

(1-2) 端板からの距離による後流渦の変化について

図一10でわかるように、速度 U が余り大きくない場合、速度勾配の存在する層が相当厚い。よって端板から相当の距離まで、円柱後方の渦の大きさ、強さなどが変化していると考えられる。

これを確かめる意味で、図2のようにアルミ粉を水中に混入し、任意の高さにおける後流渦の様子を 1.5mm 厚の光で照射し記録測定した。

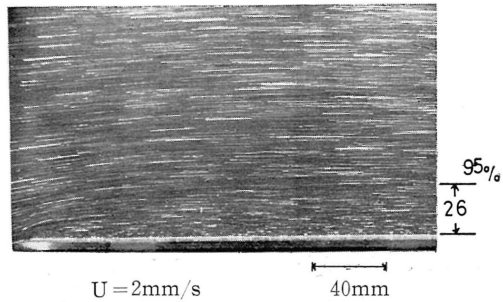


図-10 アルミ軌跡法による速度分布

図-11は Re 数 36.7 の場合の各高さにおける渦の変化を示したものである。 $H=100\text{mm}$ では固定した対称な双子渦がはっきりと認められるが、 $H=20\text{mm}$ 以下では、はっきりした双子渦は撮影できなかった。更に端板に近づくにつれて、渦領域はますます小さくなり、後方に小さい死水領域が認められるだけになった。

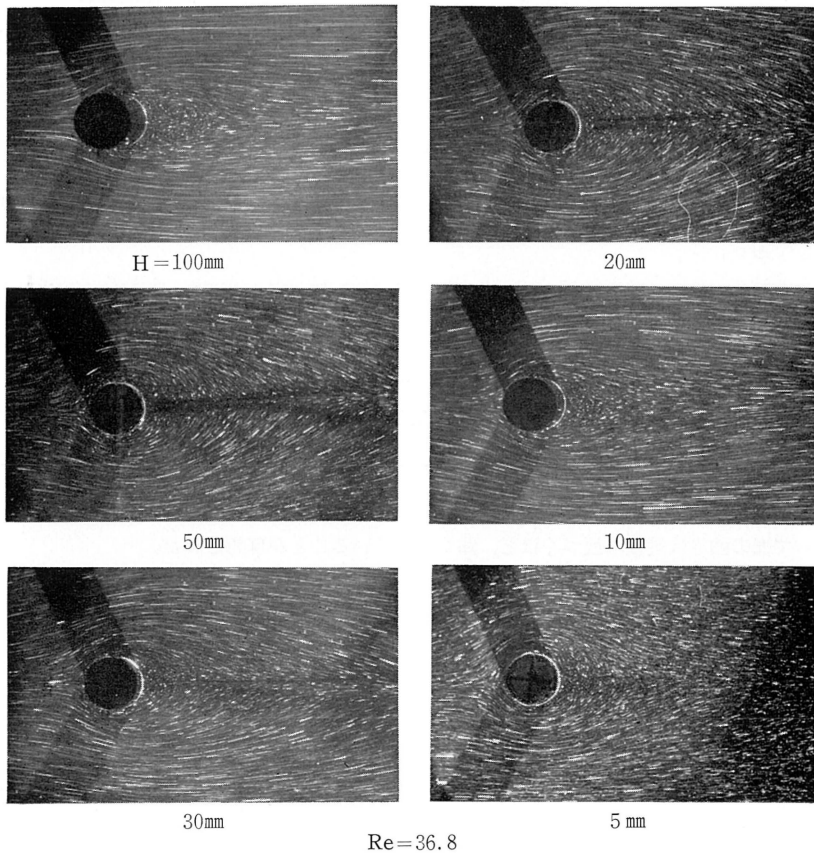


図-11 端板からの高さによる双子渦の変化

端板に近づく程、渦の大きさもまた Circulation も小さくなっているのわかる

また、アルミ軌跡からわかるよう、回転運動の速さも小さくなっていることはあきらかである。すなわち渦の面積に周速度を積して求められる渦の強さ、を考えると、板面に近づくほど弱くなっていることが確認された。

図-12は円柱後方の渦領域の長さ L の高さ H による変化をグラフに示したものであり、 $H=40\text{mm}$ 以上では各流れにおいてほぼ一定値になっている。

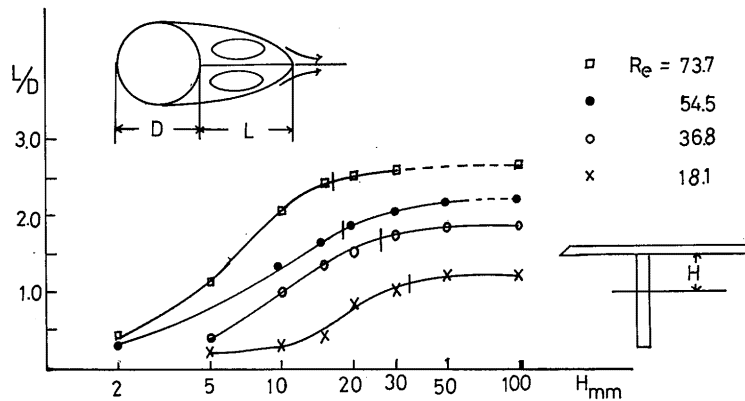


図-12 端板から高さによる渦の大きさの変化

グラフ曲線上に短いたて線で印したのは、各流れにおいて図10のようにしてアルミ軌跡法で求めた境界層の厚さである。

また破線で示したのは、円柱後方の渦が対称な双子渦として固定せず下流へ交互に流れ出したことを表わしている。

わかったことをまとめると、

- 1) 端板からの高さが小さくなるほど円柱後方の渦は小さくなり、この変化は境界層のやや外側からすでに始まっている。
- 2) 渦の周速度も端板に近くなるほど小さくなっている。
- 3) よって渦の強さは端板に近づくほど、弱くなっていることが確認された。

この場合、 Re 数が相当小さかったが同様の現象が、より高い Re 数の場合も生じているものと思える。

(2) 風洞実験

図-13は円柱のない平板上の速度分布を示したものである。この図に限り前縁からの距離を x としてとっている。

図面上の一点鎖線は速度回復95%の点を結んだものであり、境界層の厚さは主流速度 4.75m/s の場合、円柱の 50mm 後方で約 30mm 、 400mm 後流では約 37mm 程度であった。

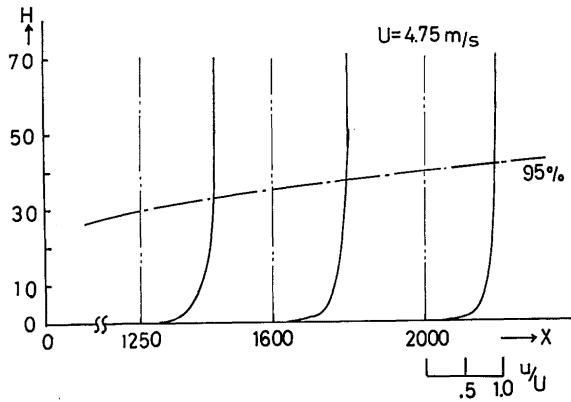


図-13 平板上の速度分布図

(2-1) 渦の周波数, および Strouhal 数について

円柱後流の周期的速度変動をシンクロスコープ上に描かせ、これを記録し渦の周波数を測定し、これを用いて Strouhal 数を算出した。

測定は $H=200\text{mm}$ および $H=30\text{mm}$ の二点で行なったが、周波数の変化は全く認められなかった。一部は $H=20\text{mm}$ の点でも行なったが同様であった。

図-14に Strouhal 数の測定結果を示す。

Tyler による $N \cdot D/U = 0.198(1 - 19.7/Re)$ を比較のため図中に実線で示したが、よく一致している。

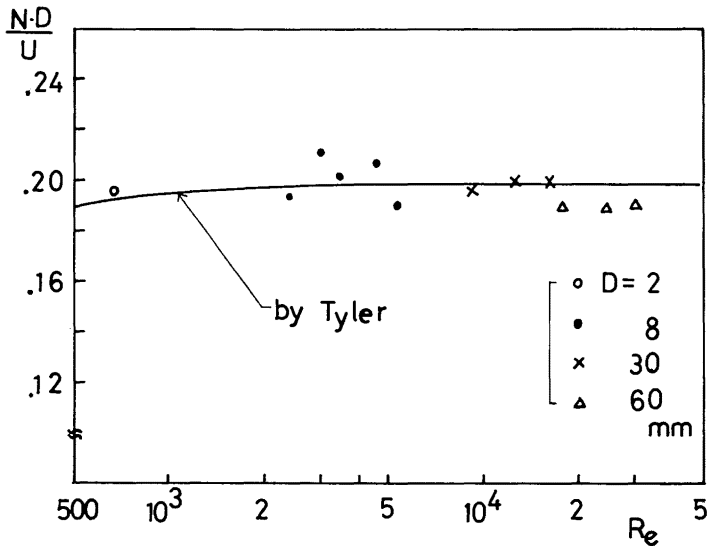


図-14 Strouhal 数

このことから端板の存在が渦の発生周波数に何ら影響をおよぼしていないことがいえる。すなわち主流部における周波数をもって、渦は端板近傍からも同時に発生していることが、定量的にも確かめられた。

なお、端板近傍では流速が遅いにもかかわらず、主流部と同じ周波数で渦は発生しているので、その点における局部速度を用いた Strouhal 数を求めると、端板に近づくほど、局所 Strouhal 数は大きくなる。

図-15に流れ直角方向における渦の変化の様子を示す。D = 8 mm, U = 4.38m/s, Re = 2,440の流れを H = 200mm, x/D = 3 の位置に熱線を位置させ、y 方向に熱線を移動させ記録したものである。

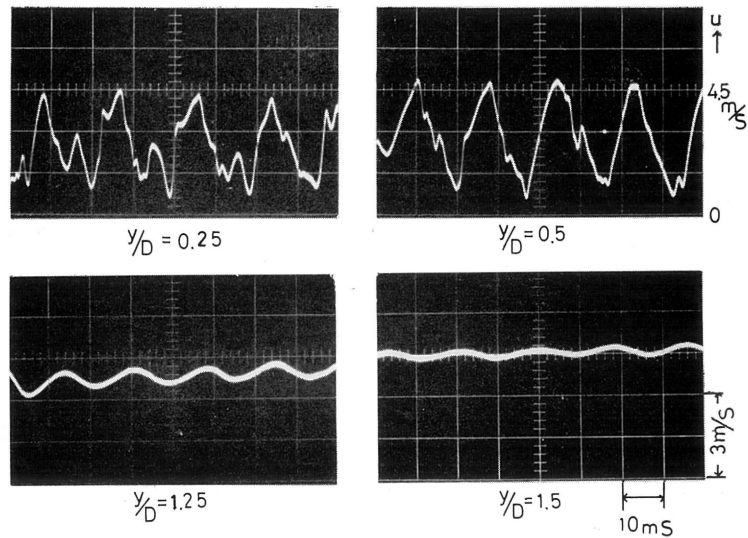


図-15 流れ直角方向への渦の変化写真
D = 8 mm, U = 4.38m/s, Re = 2,440 H = 200mm, x/D = 3

y/D = 0.25の写真において、ピークとピークの間小さいピークが見られるが、これは円柱の反対側の渦による変動であり、y/D = 0 においては同振幅のピークとなり、周波数が丁度2倍になったような変動を示す。

y/D = 0.5 では反対側の渦の影響は全んど見られなくなり、一方振幅は最大であった。すなわちこの点を渦の中心が流れ去っていることがわかる。

y/D を次第に増大させていくにつれ、単調な振動を示し振幅は急に小さくなって行く。y/D = 1.5 においては、変動部は主流の10%程度に減少し、y/D = 2.5 では全んど変動は見られなくなり、渦の横への広がりがこれ以上はないことがわかる。

(2-2) 後流渦の間隔および渦の流れ速度について

二個の熱線間隔を変え、周期変動が同位相を示す点までの距離を求めることによって渦の間隔を測定した。この場合円柱の同一側の渦について求めた。

今この間隔を l ，渦の発生周波数を N とすると，渦の流れ速度 U_v は， $U_v = l \times N$ で求まる。

表 1 に代表的 5 例についての結果を示す。

D_{mm}	Re	N	l_{mm}	St	U_v m/s	U_v/U
8	2,440	108.0	30	.198	3.24	.742
30	9,160	28.6	105	.196	3.00	.687
	12,400	37.0	115	.188	4.26	.723
60	18,300	13.9	220	.192	3.06	.700
	24,800	18.5	240	.188	4.43	.751

表-1

図-16は U_v/U ，および St 数を Re 数に対して図示したものである。

渦は主流の70%程度の速度で流れ去っていることが求められた。また同じ円柱においては，主流速度が大になるほど，渦の流れ去る速度の割合 U_v/U も大きくなることが求められた。

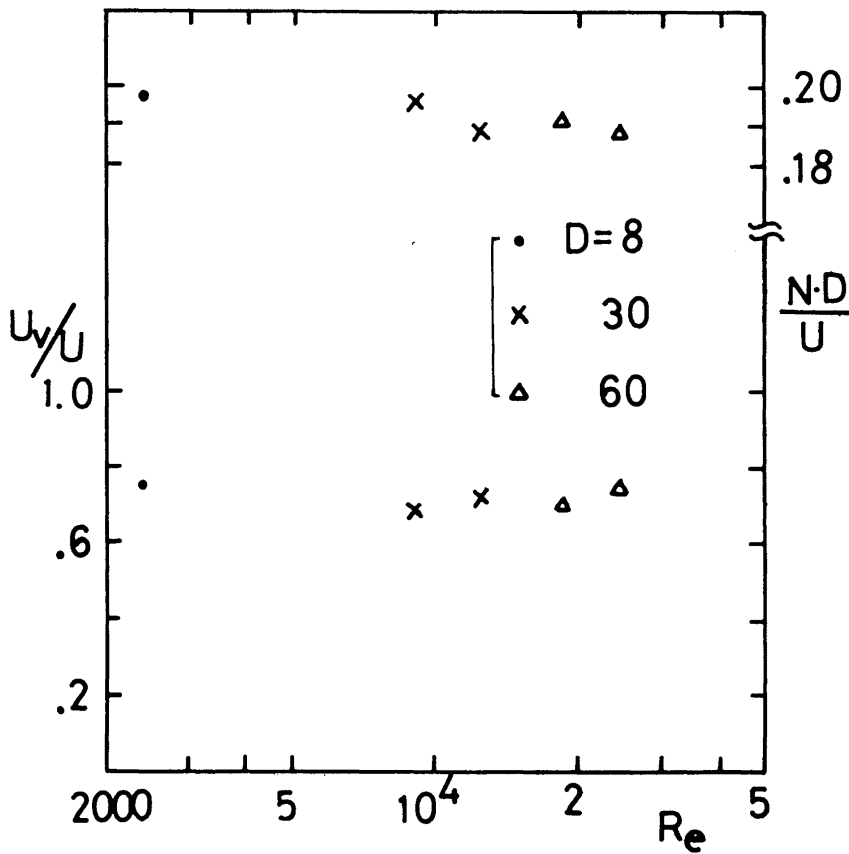


図-16 渦の流れ速度および Stronhal 数の測定

なお、この測定において、上流側の熱線は $H=200\text{mm}$, $x/D=2$, $y/D=0.5$ の点に各円柱の場合とも固定し、下流側の熱線を $H=195\text{mm}$, $y/D=0.5$ で流れ方向に移動させた。

(2-3) 端板からの距離による渦の変化

端板からの距離による渦の変化を、熱線を高さ方向に移動させ記録した。

図-17に例を示す。

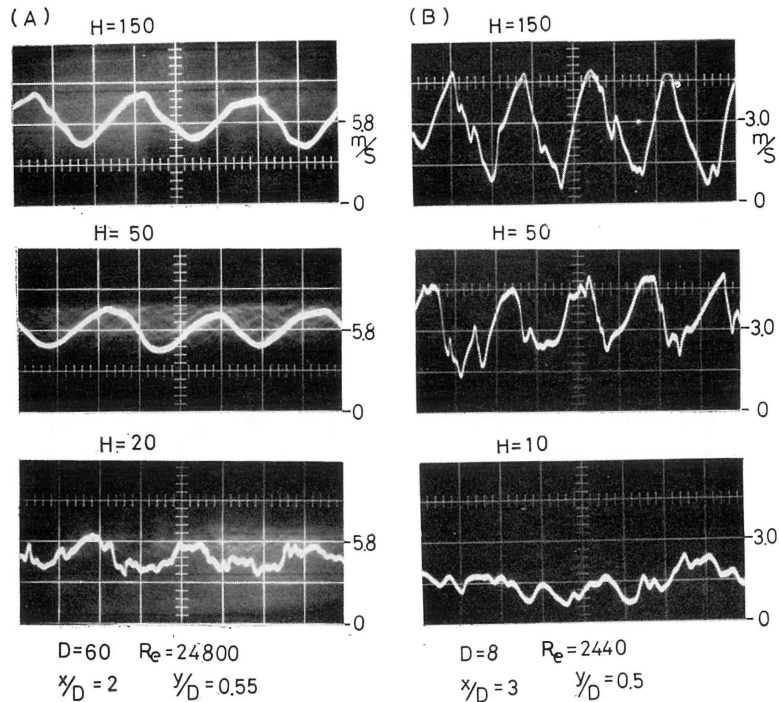


図-17 端板からの距離による渦の変化

(A)の場合、主流部においては約 3.7m/s の速度変動が見られるが、 $H=50\text{mm}$ においては約 3.2m/s になり更に $H=20$ では 2.1m/s に減少してしまう。この変動速度が渦の周速度とみなせる。

一方 $H=20$ においてもまだ周期性は認められ、しかも主流部の周期と等しい。

すなわち、円柱の後流渦の circulation は速度境界層内において、端板に近づくほど弱くなっていることが確かめられる。 x/D を増して行くと、よりこの傾向は強く見られ、渦が流れ去って行くにつれ、境界層内において消散が進んでいることが認められる。

(B)の場合、 $H=150$ で変動は約 4.2m/s 。 $H=50$ で 2.7m/s 。 $H=10$ では 1.1m/s に減少している。

更に $H=10$ においては、もうはっきりした周期性は認められなくなっている。

すなわち端板面から始まった渦の消散がすでにこの点までおよんでいると考えられる。

この二例からもわかるように、主流部における渦の circulation に比べ、端板付近におけるそれは極

めて小さくなっていることが確かめられた。当然「渦の強さ」も端板近傍では主流に比べ小さくなっている。

§ 4 結 び

円柱に端板をつけた場合、円柱の後流に発生する後流渦が二次元流れの場合に比べ、どんな変化があるか、また発生した渦のつながりがどんなであるかなどを、水槽および風洞を使って定性、定量的に観測した。

その結果次のことが確かめられた。

(1) 後流渦は端板の存在にかかわらず、主流部から端板表面まで二次元流れの場合と等しい周期で発生、流出する。

(2) 速度境界層内では、渦の circulation は端板に近づくほど小さくなり、渦の強さも弱くなっている。

(3) 速度境界層内の shear flow により、渦は端板面から消散を始め、速度勾配の存在する層内で消散が進み充分消散が進んだ状態で層外に端を持った安定な渦として流れ去って行く。

以上、端板をもった円柱の後流渦について、定性・定量的結果を報告したが、今後流れの検出法などを改良し、より細かい研究を行なってみることが残された問題だと考える。

なお、今回の実験に当り終始協力して下さった工学部大学院修士課程学生、岸川清大郎君に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) Th. von Kármán: Phys. Zeits. 13 (1912).
- 2) E. Tyler: Phil. Mag. (7) (1931).
- 3) Relf and Simmons, R.: R & M. No. 917 (1924).
- 4) Richardson: Proc. Phys. Soc. 36 (1923).
- 5) S. Taneda: Studies on Wake Vortices (1), Reports of Research Inst. for App. Mech. Vol. I No. 4 (1952).
- 6) L. S. G. Kovasznay: Hot-wire investigation of the wake, N. A. C. A. Tech. Mem. No. 1130. 他.
- 7) 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, 第16巻第168号, 昭和43年1月.

(昭和44年4月30日 受理)