

加振円柱をすぎる流れに関する予備的実験

本地, 弘之
九州大学応用力学研究所 : 講師

<https://doi.org/10.15017/4743474>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 36, pp.1-11, 1972-02. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



加振円柱をすぎる流れに関する予備的実験

本 地 弘 之†

概 要

風洞装置を用いて、一定の加振が円柱をすぎる流れ、とくに剝離点の後退におよぼす効果を遷移領域で調べた。測定は熱線風速計および煙による流れの可視化の方法で行なった。軸方向に加振した円柱（直径 10.0 cm）においては、intermittence の現象が定常円柱のときより広い Reynolds 数範囲にわたるが、臨界レイノルズ数自体はあまり変わらないことが見出された。主流方向に振動する円柱（直径 32.2 cm）では、実験範囲内（振動数 < 5 Hz, 振幅 < 6 cm $\Delta U/U_0 < \text{約 } 0.04$ ）では明確な加振効果は観測されなかった。本実験で用いた装置では、円柱の片方（下側）が常に他方（上側）よりも低い Reynolds 数で遷移した。但しスプリッタープレートをつけたときは大小関係が上下で逆転した。また、双方における臨界値はプレートなしのときより接近した。粗面によって積極的に流れに非対称性を作り出す実験も行なった。片方の早期の遷移は他方の遷移を遅らせる効果があることがわかる。

1. は じ め に

非定常流については境界層理論の誕生当時から多くの研究がなされてきた。とくに急な運動の開始に伴う非定常層流境界層の時間的発達是最もよくとりあげられてきたもののひとつである¹⁻⁸⁾。振動流の問題もそれに次いでよくとりあげられた⁹⁻¹⁴⁾。一方、流れの安定問題についても長い間多くの研究がなされてきた。しかし、そこで主流 (basic flow) の非定常性* が意識的に問題にされたのはごく最近のことである¹⁵⁻²¹⁾。非定常層流境界層の安定・不安定を一般的に論じようとする、数学的定式化を試みる前にまず判定基準 (criterion for instability) をどう設定するかというもっと根本的な概念上の困難さに逢着する。攪乱の成長と同時に主流自体も刻々変化するからである。現在、準定常的な考え方と初期値問題としての接近が試みられている**。

非定常層流境界層の構造の問題からその安定・不安定の問題へと進み、さらに乱流に進むと遷移の問題に行きあたる。ここでも主流の非定常性が意識的にとりいれられた研究は非常に少ない。これは層流

† 講師，九州大学応用力学研究所

* 流れは3つの範疇に分けられる；すなわち定常層流，非定常層流，および乱流。ここでは単に非定常流といえば主流（または物体の運動）が時間に依存するときの流れであると考え。

** 原稿完成後次の文献が発表された：Chen, C.F. and Kirchner, P.R., Stability of time-dependent rotational Couette flow, Pt. 2 Stability analysis, J. Fluid Mech., vol. 48, 1971, pp. 365-384. ここに両方法の検討がなされている。

境界層の範囲内ですら、非定常の場合には、剝離が問題になると不明確な点の多い現状では当然のことであろう²²⁾。

最近 Miller その他^{23~26)} は比較的高い振動数をもった正弦波状の変動部分をもった主流を作れる特別の風洞を設計・製作し、平板を用いて主流の振動が平板上の境界層の遷移におよぼす効果を調べた。その結果によると、主流の脈動の強さを表わす 1 つの無次元パラメータ $(U_0/\nu)(\Delta U/\omega)^{**}$ が約 2.7×10^4 をこえると遷移が主流の振動の影響を受けはじめる。さらに臨界 Reynolds 数は一様流に対する相対的な変動振幅 (ΔU) が増すにつれて減少するが振動数には無関係であるという興味ある事実が報告されている。また上述のパラメータの臨界値以下では臨界 Reynolds 数は振動の影響を受けず一定している。ここでは、規則的な振動流と fluctuation を含んだ一様流とを区別して考えよう。前者は直流成分 U_0 に比して交流成分 ΔU の大きい流れ、あるいはほとんど交流成分のみからなる流れであり、主流が非定常的というのはこの意味において用いる。平板上の流れでは、上述の非定常 Reynolds 数の臨界値が ΔU の相対的大きさを評価するときの基準を与えるだろう。

この報告では、同様な実験を円柱に対して試みた結果についてのべるが、境界層の内部構造についてたちいった観測を行っていないことと、振動数が低いところしか調べられていないことのために今後の研究にまっところが多い。

2. 軸方向に振動する円柱に関する実験

まずはじめに、流れと直角な方向（軸方向）に加振した円柱上に形成される境界層の遷移について行った実験の方法と結果についてのべる。同様な層流境界層の問題としては Wuest²⁷⁾ によって理論的な研究がなされている。この問題は非定常の問題であるとともに 3 次元境界層のそれであるが、円柱表面上の 1 点で仮に一様流と曲率を無視して考えると、Stokes の扱った有名な問題、無限平板を流体中で振動させるときの速度分布が確立されるはずであり、類似の振動的な変動速度が境界層に対する攪乱として作用することを意味する**。

2. 1. 実験の方法

実験には九州大学応用力学研究所津屋崎海洋災害実験所に設置されている吹出し型の検定用風洞を用いた²⁸⁾。この風洞のテストセクションは $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ で風は垂直上方から下方へ向っている。乱れは外気の乱れが入らない好条件のときには 0.03% 以下になしうる。加振のための装置その他を図 1 に示す。

試験円柱は直径 10cm、長さ 85cm の塩化ビニール製パイプで、表面には塗料が滑らかにスプレーコーティングされている。測定は DA-2 型熱線風速計（新興通信製）を用いて行なった。熱線プローブは円柱前方から約 90° のところで表面から約 2mm 離してとりつけた。円柱の加振は 1~6 Hz が可能であった。

この実験では境界層自体の中の乱れの消長を直接観測しておらず、単に注目する時刻にプローブが境界層外のポテンシャル流れの中にあるか、さもなければ乱れた後流の中にあるかをみているにすぎな

* 彼らはこれを非定常 Reynolds 数 (unsteady Reynolds number) と呼んでいる。 U_0 は一様流速、 ΔU は変動成分の振幅、 ω は振動数、 ν は流体の動粘性係数である。

** Navier-Stokes 方程式は $\partial u / \partial t = \nu \partial^2 u / \partial y^2$ といういわゆる熱伝導型の簡単な方程式に帰着し、適当な境界条件をおくと $u(y, t) = U_0 e^{-ky} \cos(\omega t - ky)$, ここで $k = (\omega / 2\nu)^{1/2}$, の形の解が得られる。

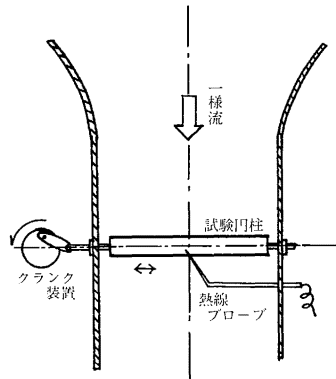


図 1 軸方向の加振実験装置（側面図）

い。直線化器なしの前記の流速計でもこの目的には十分である。したがって、いま乱流への接近度を示す断続因子 γ として、全観測時間間隔に対するプローブがポテンシャル流れの中に入っている時間間隔の比を採用しよう。この表現は誤解をまねきやすい。通常、境界層を直接観測しているときは γ としては全時間に対する乱れの時間の比をとるからである。先述したようにここでは、プローブがポテンシャル流の中にあるということは、境界層が乱流状態に遷移して乱流剥離するために剥離点が後退し、したがって層流剥離のとき後流中にあったプローブがポテンシャル流にさらされるようになると考えている。

2.2. 実験の結果

実験結果を図2に示す。最初の $\gamma > 0$ なる点をとって臨界 Reynolds 数とすれば $Re \sim 2.5 \times 10^5$ であるが、無加振の場合は $\gamma: 0 \rightarrow 1$ への変化は急激に起り、加振した場合には $0 \rightarrow 1$ の移行が Reynolds 数上に若干の幅をもつようになることがわかる。この幅は無加振時の Re より低い Reynolds 数側へとられている。また、振幅の大きいときの Re が小さいことは自然な結果である。 $Re \sim 2.5 \times 10^5$ は通常乱れの少ないときの円柱の抵抗係数の測定から知られている $Re \sim 3.8 \times 10^5$ に比較してかなり小さい値

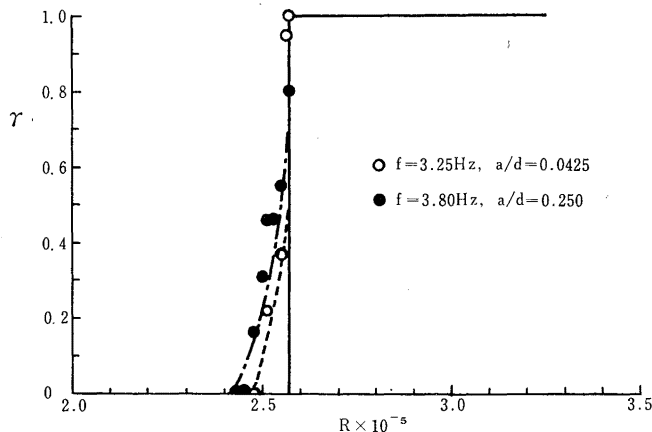


図 2 軸方向に加振された円柱上の境界層の遷移

である。これは測定対象の違いや実験時の風洞の乱れによるものと思われるが、本実験で用いた風速計は先述したごとく直線化器を欠いていたため風速変動の絶対測定がなされておらず、乱れの強さを記せない。一般に開回路型の風洞特性は使用時の外気の乱れに左右されやすい。

3. 主流方向に振動する円柱に関する実験

3. 1. 実験の方法

実験には前記検定風洞と併設されている閉回路型の大型風洞を使用した²⁸⁾。実験装置の概略を図3に、また加振装置とテストセクション内に設置された試験円柱をそれぞれ写真1および2に示す。テストセクションには写真2にみるように横型カート(2 m(高さ)×4 m(幅))を用いた。この風洞の最高風速は60m/secであるが、本実験では10~30m/secの範囲の速さの一樣風が用いられた。加振装置の駆動モータ(シンボ工業製、リングコーン減速器付)の出力は750W、振動数は1~4 Hz、振幅は0~5 cmの範囲内で連続可変。図3に示すように、駆動主要部は風洞カートの下に固定された。試験円柱は直径32.2cm、長さ150 cm、鉛化ビニルパイプ製、直径40 cmの端板付。この円柱は、幅8 cmの鉄製アングルで組まれた1 m(高さ)×1.5 m(長さ)の架台(左右に2台)の上に軸を水平にして主流方向の運動の自由度のみ残して固定された。駆動部分と円柱とは直径5 mmのワイアロープで連結され、後方に強いつまきバネをおいてその力を復元力として利用した。円柱を支える架台のうち、上流側の2つの架台の前脚はうすいアルミ板で作った翼型でおおった。

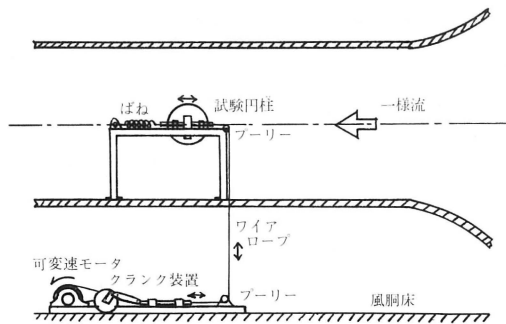


図 3 流れ方向の加振実験装置(側面図)

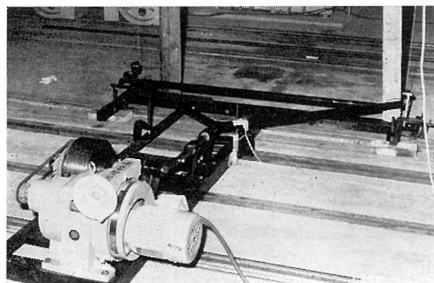


写真1 模型加振装置

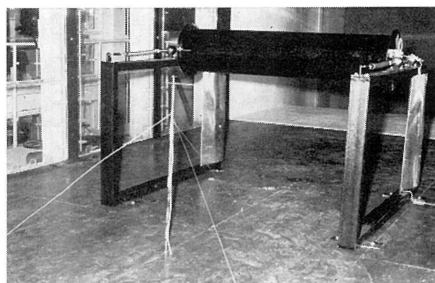


写真2 風洞内におかれた試験円柱

観測には熱線流速計と、煙による流れの可視化の方法を用いた。しかし、遷移のようなデリケートな現象を調べる場合、円柱表面に植えこんだプローブの先端は流れに対して不可避免的に表面粗さとして作用し、剝離線の形を著しく変えてしまうので好ましくない。また、加振された物体上の流れをみるにはプローブをその外側に固定しておく方法も好ましくない。結局、実験のほとんどは煙による方法によった。煙による方法は前記の欠点が緩和される上に流れの全局的観測ができて有利である*。煙発生は、流動パラフィンを経電的に加熱して蒸発した蒸気に冷風を吹送して白い霧状の微粒子を作り出す方法によった。内径 8 mm の銅製パイプを円柱の前方よどみ点の線にそってとりつけ、それを通して円柱の上下に白煙を出すようにした。1 kW のスライドプロジェクター 2 台で流れ出た白煙を照明し、剝離点の後退を観察して遷移時期を決定した。

一連の実験の最終段近くになって、粗面の効果の実験、およびスプリットプレートの効果の実験を行った。粗面については結果とともにまとめて後述することにして、ここではスプリットプレートについて記しておくことにする。プレートは長さ 2 m、幅 1.5 m であった；厚さ 5 mm と 3 mm、広さ 1 m × 1.5 m の 2 枚のアルミ板を水平にして用いた。このアルミ板を乗せるためには 8 cm 角材で組み立てた木製架台（1 m（高さ）× 1 m（幅））4 個（左右 2 個ずつ前後に）を用いた。このようにしてプレートは風洞カートに固定されており、円柱の後方よどみ点付近につけた幅 13 cm の発泡スチロールのうすい板がプレート上面をすきまなくスライドして円柱と一っしょに振動するようにした。

以上のような設置状態では、テストセクションを水平にみて、下半分には円柱の半分と、スプリットプレートの架台、円柱の架台、煙のためのリードパイプが入っているが、上半分には円柱ののこり半分以外には構造物は何も入っていない。したがって、流れの上下の非対称性が大きくなることを免れえなかった。さらに、スプリットプレートを入れた場合、風洞の送風ファンの回転数と実際の風速との検定曲線が役立たなくなり（実現される風速がスプリットプレートなしのときより約 90 cm/sec 一様に低下したため）、改めてプレートを入れた状態で風速検定を行なった。

3. 2. 実験の結果

次に実験結果について、無加振のとき、加振したとき、粗面のあるとき、スプリットプレートのあるときの順にのべる。

表 1 は加振しない定常な円柱についての実験結果を示す。上側というのは円柱の上半面で測った臨界 Reynolds 数**、下側は下半面で測った臨界 Reynolds 数をいう。流れが対称であれば両者はほぼ一致すべきものであろうが、表からもわかるように、現実には下側の境界層が常に低い Reynolds 数で遷移した。これは下半分にいろんな構造物がおかれたことと関係していると思われる。境界層が層流のまま剝離する場合と、一たん乱流に遷移してから剝離する場合とでは流れ模様に大きなちがいがあり、乱流剝離に伴う wake は剝離点の後流側への後退に伴って縮小され、これがいわゆる drag crisis の原因と

* 一方、微視的狀況が分らない欠点があり、瞬間的剝離点の可視化が可能か問題となっている。

** いわゆる intermittence の現象が Reynolds 数の広い範囲にわたる場合、乱れの発生の始まる時点を遷移 Reynolds 数とし、完全に乱流になったときを乱流 Reynolds 数として 2 つに分ける方が实际的であるとする考え方がある。本実験は主に流れの可視化の方法によったので、風速を増して平均的剝離点がはじめて後退したときの Reynolds 数をもって臨界 Reynolds 数としている。変動成分 ΔU が大きくなるとこのような測定方法は採用できなくなる可能性がある。

表 1 定常円柱上の剝離点の後退に伴う臨界 Reynolds 数

回	上 側		下 側	
	$U_{0c}(\text{cm/sec})$	R_c	$U_{0c}(\text{cm/sec})$	R_c
1	1.85×10^3	4.05×10^5	—	—
2	1.90×10^3	4.13×10^5	1.55×10^3	3.47×10^5
3	1.85×10^3	4.06×10^5	1.60×10^3	3.50×10^5
4	1.85×10^3	4.06×10^5	1.60×10^3	3.50×10^5
平 均	1.86×10^3	4.075×10^5	1.583×10^3	3.472×10^5

なっていることはよく知られている (図 4 参照). いまの実験の結果のように, 低速から高速へ風速を上げていったとき, 片方が他方より早く遷移してしまうと図 5 に示すように後流は全体として傾き, それに応じて前方よみ点も移動すると思われる. 前方よみ点付近から煙を出すと上下に別れてはじめ層流剝離した自由流線は可視化するが, 次に下方が遷移すると煙は遷移の終わった方へ流れやすくなる.

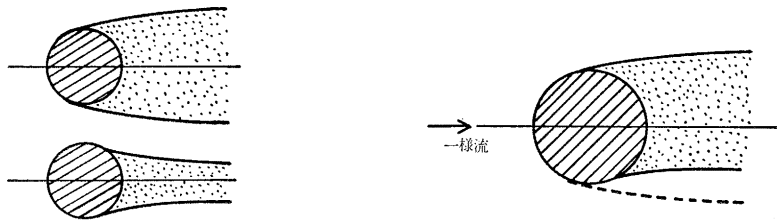


図 4 層流剝離(上)と乱流剝離(下) 図 5 下側の剝離点だけが後退したときの非対称な後流

先に下方が常に早く遷移する理由は, いろいろな構造物の下方における集中に原因があるであろうということを述べた. それを確かめるために, 円柱前方に $8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ の木製角材の柱を上下対称に立てたところ下側における臨界 Reynolds 数として 3.49×10^5 , 上側において 3.93×10^5 という値が得られた. この 2 つの値の差は平均値において, 計算した上下の値の差よりも小さく, 流れの非対称性を減じたことが上下の値の差の減少を結果したことを示している. 同時に平均的な臨界 Reynolds 数は 3.7×10^5 程度であったことを示している. この平均値に較べると, 円柱の上側で測った平均値 4.08×10^5 はかなり大きく, 先述した抵抗係数測定による値 3.8×10^5 を越えている. このことは円柱の片方が遷移してしまうと, 外側の流体はその方へ流れやすくなり他方における遷移はむしろ遅らされるということを意味している.

加振が遷移に与える効果をみよう. 表 2 は実験結果を示し, 図 6 は下側における測定値を振動を表わす無次元パラメータ (Strouhal 数) $S = fd/U_0$ についてプロットしたものである. 加振しても上下の差はあまり影響を受けない. 図 6 から加振の効果がわずかにうかがえるが, 無加振時に相当する線が平均値であることを考えると, その差はほとんどないといってよい. また振動数, 振幅による差もほとんどないことがわかる. 先に Miller 等の実験結果にふれたが, 本実験においても非定常臨界 Reynolds

表 2 加振円柱上の境界層の遷移の臨界 Reynolds 数

回	振 動			上 側			下 側		
	f (Hz)	a (cm)	a/d	U_{oc} (cm/sec)	R_c	S	U_{oc} (cm/sec)	R_c	S
1	1.00	4.00	1.24×10^{-1}	—	—	—	1.55×10^3	3.39×10^5	2.08×10^{-2}
2	1.82	5.25	1.63×10^{-1}	1.75×10^3	3.86×10^5	3.35×10^{-2}	1.55×10^3	3.42×10^5	3.78×10^{-2}
3	2.00	4.00	1.24×10^{-1}	1.70×10^3	3.70×10^5	4.02×10^{-2}	1.60×10^3	3.48×10^5	4.02×10^{-2}
4	2.00	4.00	1.24×10^{-1}	—	—	—	1.55×10^3	3.39×10^5	4.16×10^{-2}
5	2.50	4.00	1.24×10^{-1}	—	—	—	1.55×10^3	3.39×10^5	5.20×10^{-2}
6	3.00	2.00	6.22×10^{-2}	—	—	—	1.55×10^3	3.39×10^5	6.24×10^{-2}
7	3.00	2.00	6.22×10^{-2}	1.85×10^3	4.03×10^5	5.22×10^{-2}	—	—	—

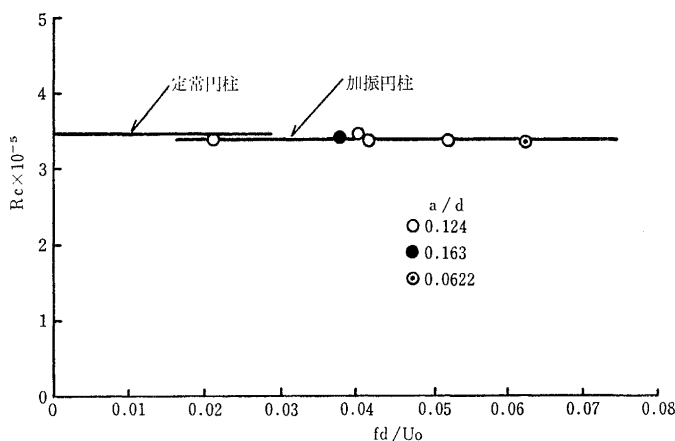


図 6 臨界 Reynolds 数に対する加振の効果

数を越えている例はあるが、円柱上の流れは圧力勾配を伴うので直接の比較はできない。ここでの否定的な結論はごく限られた低い振動数の範囲内での事実にすぎないのであって、非定常性が強くなると何らかの影響が出てくるであろう。低 Reynolds 数領域での振動実験では剥離点の大幅な動きが観測されている。

定常流においては、主流中の乱れが境界層の遷移に与える効果については Schubauer と Skramstad²⁹⁾ の有名な実験の際に平板について調べられており、 $(\sqrt{v_i v_i}/3)/U_0 > 0.001$ ではじめて R_c に対する影響が出はじめることが知られている。この臨界値以上では乱れの増加とともに R_c はさらに減少して行く。先に、構造物のある側の剥離点が常に早目に後退することをのべたが、それは以上の事実で説明できる。理論的には乱れの強さだけが遷移現象を支配しているのではない。すなわち線型安定理論は Reynolds 数を固定すると平板の境界層に関して増幅されやすい波数領域を指定している^{30)*}、すなわち特定の波数を持った波が選択的に増幅される。しかし、このような現象が実際に観測されるのは境界層

* 平板については $R_c = (U_0 \delta_1 / \nu)_c = 420$ において $(\alpha \delta_1)_c = 0.37$ 、ここで α は波数、 δ_1 は排除厚さである。また $(\alpha \delta_1)_{max} = 0.41$ において $R = 557$ 。

外の速度の変動成分の大きさが主流の平均速度の約 0.1% より小さいきれいな流れのときだけで、速度変動が大きくなると選択的な増幅はみられなくなる。圧力勾配の存在は定量的結果を修正する。非定常流に関して、これらの結果がどう変わるかは知られていない。

先に円柱の片方が遷移すると他方における臨界 Reynolds 数はむしろ平均値より大きくなる傾向がでてきたことを指摘した。そこで次に考えられるのは、円柱の上下で剝離点の後退時期の違いを粗さを与えることによって積極的にむしろずらしてやったらどうなるか、ということである。ここで粗さとして用いたのは日研シリコンカーボン紙 (CC100-CW) である。これを幅約 5.7cm のたんざく形に切り、円柱の前面に張りつけた。

表 3 はこの粗面を張った位置と上下で測った臨界 Reynolds 数の測定値を示す。粗面の幅は狭い方は 5.7cm, 広い方はその 2 倍である。下側の測定値のみに着目して比較すると、上のみに粗面のある場合 (B, D) の値の方が、粗面のない場合 (A) および粗面が上下対称にある場合 (C) の値よりもいずれも大きいことがわかる。このことは先に述べた事実、すなわち円柱の片方が早く遷移して wake が非対称になった場合の方が他方の遷移が遅れることを示唆している。なお粗面が存在した方が、それが無いときよりも、intermittence の起る間が Reynolds 数の広い範囲にわたる (遷移点がぼける) ことが観測された。B の場合について加振実験 (振幅 2.0cm, 振動数 3.0Hz) を行なったが、粗面なしのときと同様加振の顕著な効果は見出されなかった。

表 3 粗面をはりつけた円柱上の剝離点の後退に伴う Reynolds 数

( が粗面の位置を示すが、その高さは誇張されている。
各枠内の 2 つの数値が上下で測った臨界 Reynolds 数)

A	 $\frac{4.06 \times 10^5}{3.50 \times 10^5}$		
B	 $\frac{3.06 \times 10^5}{3.72 \times 10^5}$	E	 $\frac{3.89 \times 10^5}{3.02 \times 10^5}$
C	 $\frac{2.82 \times 10^5}{3.67 \times 10^5}$		
D	 $\frac{1.30 \times 10^5}{3.68 \times 10^5}$	F	 $\frac{3.68 \times 10^5}{2.16 \times 10^5}$

円柱の後方には、よく知られているように周期的な渦列 (Kármán vortex street) が形成される。この wake の周期性が逆に円柱上の境界層内の圧力変化にフィードバックされて何らかの非定常な効果をおよぼしている可能性は否定できない。渦発生 Strouhal 数は約 0.2 であるから、いま代表値として $d=32.2\text{cm}$, $U_0=15\text{m/sec}$ をとってみると振動数は約 9Hz となり加振振動数より高いが同じオーダーとなる。このことは、もし上述の効果があつたとすれば外部からの加振の効果を減殺してしまうことになる。これを調べるために姑息的方法ではあるが、円柱の後に長さ 2m のスプリットプレートを入れた

状態で臨界 Reynolds 数を調べた。もちろんプレートがついている限りあくまでもプレート付の円柱であり（円柱付のプレートという意見すらある），“純粋な”円柱ではありえないことはいうまでもない。

スプリットプレート付の定常な円柱に関する臨界 Reynolds 数の測定値を表4に掲げる。これと以前のスプリットプレートなしのときの数値（表1）とを比較してみると、まず第1に上下の値の大きさが逆転していること、第2に上下の値がプレートなしのときより接近してきていることがわかる。第1の原因は未だ不明であるが、第2の原因はプレートの存在が片方の剝離点が後退したあとでの wake の傾きを妨害したことによるものと思われる。

表 4 スプリットプレート付定常円柱に関する測定値

回	上 側		下 側	
	$U_{oc}(\text{cm/sec})$	R_c	$U_{oc}(\text{cm/sec})$	R_c
1	1.55×10^3	3.44×10^5	—	—
2	—	—	1.70×10^3	3.76×10^5
3	1.55×10^3	3.42×10^5	1.70×10^3	3.75×10^5
平 均	1.55×10^3	3.43×10^5	1.70×10^3	3.755×10^5

プレートをつけて加振（プレートの大部分は風胴に固定されて動かないことは先にのべた）したときの結果を表5に示す。プレート付の定常円柱の場合と比較すると上側はほとんど加振の影響を受けていないが、下側は加振したときの遷移が低い Reynolds 数で起っていることがわかる。そうしてわずかな点での比較ではあるが、最大振幅 $a=5.00 \text{ cm}$ のときの R_c が1番小さく、このことは、振動数よりも振幅の効果の大きいことを示唆しているようにみえる。定量的な結論をなしうるほどデータが多くないが、スプリットプレートをつけて加振したときの方が加振の効果が若干現われたといえる。同時にこれは、Kármán 振動数よりもはるかに高い振動数で加振すればプレートなしの円柱でもその効果が現われる可能性を示している。

表 5 スプリットプレート付振動円柱に関する測定値

回	振 動			上 側			下 側		
	f (H_z)	a (cm)	a/d	U_{oc} (cm/sec)	R_c	S	U_{oc} (cm/sec)	R_c	S
1	1.80	5.00	1.55×10^{-1}	1.55×10^3	3.44×10^5	3.74×10^{-2}	1.60×10^3	3.54×10^5	3.62×10^{-2}
2	1.82	5.22	1.63×10^{-1}	1.50×10^3	3.33×10^5	3.90×10^{-2}	1.60×10^3	3.53×10^5	3.66×10^{-2}
3	1.90	2.00	6.22×10^{-2}	1.55×10^3	3.44×10^5	3.94×10^{-2}	1.65×10^3	3.65×10^5	3.70×10^{-2}
4	3.12	2.00	6.22×10^{-2}	1.55×10^3	3.44×10^5	6.48×10^{-2}	1.65×10^3	3.65×10^5	6.09×10^{-2}

4. お わ り に

円柱の軸方向及び主流方向の振動と、円柱上において平均的剝離点の後退する Reynolds 数との関係を実験的に調べた。実験範囲内では両方の場合について臨界値自体に大きな差は見出されなかった。

軸方向に振動する円柱については、加振は遷移現象を臨界 Reynolds 数より低い方へ若干分散させる (intermittence を通して) ことが見出された。主流方向に振動する円柱においては、本実験の装置では上下で後退時期が異なっており、その値は抵抗係数の測定による臨界値 3.8×10^5 の上下に分かれていた。流れを粗面を用いて積極的に非対称にしてみた結果、片方の低い Reynolds 数における遷移はむしろ他方の遷移の臨界値を高める傾向がみられた。

今回の実験はごく予備的なものであり、まとまった定量的結論を出すべき段階ではない。製作した加振装置に関する技術的な制約のために振幅はともかく、高い振動数が得られなかったことが加振効果のより広い範囲での調査を不可能にした。機械的に試験体を高速で加振する方法ではどうしてもこのような制約が加わるので、風自体を高い振動数で変動させる (風胴の後でシャッターを回転させる方法²³⁾ 等がある) 方法がとられるべきであろう*。しかし、現在、より軽いモデルを用いた、剝離点の時間的変動を調べるための実験を計画中である。

なお、同じ風胴を用いて急加速・急減速をくりかえして大振幅の振動流を作り非定常性が遷移に与える効果に関する実験が始められている³¹⁾。これは本報にのべた実験と較べて風の直流成分がずっと少ない場合にあたる。

計測についていえば、単に煙による平均的かつ大域的な状況の可視化のみならず、熱線風速計による微視的な測定が必要であり、それは必然的に遷移過程そのものを追跡することになる。主流が周期的に変動する場合、振動の位相と乱れの発生との関係を調べるのが大切であろう。

おわりに、本実験に多大の関心を示され、有益な討論をして頂いた種子田定俊教授に深く感謝致します。また、実験中種々の技術的な援助をして頂いた石井幸治、高田三郎両氏、および風胴使用に関して援助して頂いた深町信尊、渡辺公彦両氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Blasius, H., Grenzsichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung, Z. Math. Phys., vol. 56, 1908, pp. 1-37.
- 2) Goldstein, S. and Rosenhead, L., Boundary layer growth, Proc. Camb. Phil. Soc., vol. 32, 1936, pp. 392-401.
- 3) Stewartson, K., On the impulsive motion of a flat plate in a viscous fluid, Quart. J. Mech. Appl. Math., vol. IV, Pt. 2, 1951, pp. 183-198.
- 4) Moore, F.K., Unsteady boundary-layer flow, NACA Tech. Note 2471, 1951, pp. 1-33.
- 5) Watson, E. J., Boundary-layer growth, Proc. Roy. Soc. London, A231, 1955, pp. 104-116.
- 6) Hassan, H. A., On unsteady laminar boundary layers, J. Fluid Mech., vol. 9, 1960, pp. 300-304.
- 7) Tokuda, N., On the impulsive motion of a flat plate in a viscous fluid, J. Fluid Mech., vol. 33, Pt. 4, 1968, pp. 657-672.
- 8) Hall, M. G., The boundary layer over an impulsively started flat plate, Proc. Roy. Soc. London, A310, 1969, pp. 401-414.
- 9) Lighthill, M. J., The response of laminar skin friction and heat transfer to fluctuations in the stream velocity, Proc. Roy. Soc. London, A 224, 1954, pp. 1-23.

* Schubauer 等の実験で用いられた金属リボンを振動させる方法は主流全体が時間的に変化するという意味での非定常流を作り出さない。

- 10) Rott, N. and Rosenzweig, M.L., On the response of the laminar boundary layer to small fluctuations of the free stream velocity, *J. Aerospace Sci.*, vol. 27, No. 10, 1960, pp. 741-747.
- 11) 堀 栄一, 非定常境界層の研究 (第1報), 日本機械学会論文集 (第2部), 第27巻 174号, 昭和36年, pp. 167-174.
- 12) 堀 栄一, 非定常境界層の研究 (第2報), 日本機械学会論文集 (第2部), 第27巻 177号, 昭和36年, pp. 564-582.
- 13) Sarma, G.N., Solutions of unsteady boundary-layer equations, *Proc. Camb. Phil. Soc.*, vol. 60, 1964, pp. 137-158.
- 14) Ishigaki, H., Periodic boundary layer near a two-dimensional stagnation point, *J. Fluid Mech.*, vol. 43, Pt. 3, 1970, pp. 477-486.
- 15) Shen, S.F., Some considerations on the laminar stability of time-dependent basic flows, *J. Aerospace Sci.*, vol. 28, 1961, pp. 397-404 (417).
- 16) 小橋安次郎・恩地瑛, 非定常境界層の相似解と安定, 航空宇宙技術研究所報告, 第42号, 昭和38年, pp. 1-14.
- 17) Conrad, P. W. and Criminale Jr, W. O., The stability of time-dependent laminar flow: parallel flows, *Z. angew. Math. Phys.*, vol. 16, 1965, pp. 233-254.
- 18) Conrad, P. W. and Criminale Jr, W. O., The stability of time-dependent laminar flow: Flow with curved streamlines, *Z. angew. Math. Phys.*, vol. 16, 1965, pp. 569-582.
- 19) Grosch, C.E. and Salwen, H., The stability of steady and time-dependent plane Poiseuille flow, *J. Fluid Mech.*, vol. 34, Pt. 1, 1968, pp. 177-205.
- 20) Rosenblat, S., Centrifugal instability of time-dependent flows, Part 1, Inviscid periodic flows, *J. Fluid Mech.*, vol. 33, Pt. 2, 1968, pp. 321-336.
- 21) Davis, S.H., Finite amplitude instability of time-dependent flows, *J. Fluid Mech.*, vol. 45, Pt. 1, 1970, pp. 33-48.
- 22) Despard, R.A. and Miller, J.A., Separation in oscillating laminar boundary-layer flows, *J. Fluid Mech.*, vol. 47, Pt. 1, 1971, pp. 21-31.
- 23) Miller, J.A. and Fejer, A.A., Transition phenomena in oscillating boundary-layer flows, *J. Fluid Mech.*, vol. 18, Pt. 3, 1963, pp. 438-484.
- 24) Obremski, H.J. and Fejer, A.A., Transition in oscillating boundary layer flows, *J. Fluid Mech.*, vol. 29, Pt. 1, 1966, pp. 93-111.
- 25) Morkovin, M. V., Loehrke, R. I. and Fejer, A.A., On the response of laminar boundary layers to periodic changes in free-stream speed, An invited contribution presented at the IUTAM symposium on unsteady boundary layers at Laval Univ., Quebec, Canada (May 24, 1971).
- 26) Loehrke, R.I., Morkovin, M.V. and Fejer, A.A., New insights on transition in oscillating boundary layers, Fluid dynamics symposium at McMaster Univ., Hamilton, Ontario, Canada (1970).
- 27) Wuest, W., Grenzschichten an zylindrischen Körpern mit nichtstationärer Querbewegung, *Z. angew. Math. Mech.*, Bd. 32, Nr. 6, 1952, pp. 172-178.
- 28) 応用力学研究所報 (本号), 1971.
- 29) Schubauer, G.B. and Skramstad, H.K., Laminar boundary layer oscillations and stability of laminar flow, N.B.S. Res. Paper 1772. (Reprint of a classified NACA Report 909 first published in April 1943).
- 30) Lin, C.C., *The Theory of Hydrodynamic Stability*, Cambridge Univ. Press, 1955.
- 31) 種子田定俊・天本肇・石井幸治, 遷移レイノルズ数における円柱の死水, 第26回日本物理学会年会予稿集, 4, 1971, p. 14.

(昭和46年10月28日 受理)