境界層遷移におよぼす円柱後流の影響*
(第 1 報, 平板壁と円柱との間隔の効果)

村 岡 一 雄**, 田 代 伸 一**

The Effect of the Wake from Circular Cylinder
on Boundary-Layer Transition
(1st Report, The Effect of Gap between the Cylinder and Surface)

by Kazuo MURAOKA and Shinichi TASHIRO

This report is concerned with results of the systematic experiment which aims to clarify the relation between the behavior of the wake from a circular cylinder within a laminar boundary-layer and the boundary-layer transition.

Main results are as follows. The behavior of wake is different according to the gap size, the boundary-layer thickness and the distance from the origin of boundary-layer to the element, and is classified into three regions. First, in the region I, no vortex shedding is found and the process of transition is substantially same as the process caused by the roughness element which is laid on the surface. In region II, the periodic laminar vortex shedding is observed to be died out in downstream and the transition process is similar to one in region I. In region III, the regular vortex shedding develops rapidly to turbulent wake and causes the boundary-layer transition.

Key Words: Boundary-Layer, Laminar-Turbulent Transition, Wake, Effect of Gap Size, Vortex Shedding

1. 緒 言

平板境界層の層流から乱流への遷移を人工的に促進させるために、二次元あらさ要素としての、円柱を壁に密着させ、その遷移におよぼす影響を調べた報告は多数ある^{(1)~(3)}。また物体と平板との間に間隔をとり、物体後流と境界層との干渉による境界層の遷移促進に関してもいくつかの報告がある⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

物体と壁との間に間隔をとり、その間隔の大きさが物体まわりの流れに与える影響については、乱流境界層内の二次元円柱まわりの流れを調べた Bearman らの報告⁽⁶⁾、平板についての Everitt⁽⁷⁾、三角柱、平板についての亀本らの報告⁽⁸⁾があり、Bearman らは円柱直径 D と間隔 G の比 G/D が 0.3 のあたりで、円柱まわりに二つの流れ模様の起こることを示している。物体を壁と間隔をもたせて層流境界層内においた場合の境界層遷移に関しては、物体後流の挙動が重要な問題となる。Hall は三次元物体を壁と間隔をもたせて、管内層流境界層内においた場合の境界層遷移について報告しているが⁽⁹⁾、物体後流の挙動を支配する重

要な要素のひとつである壁との間隔の大きさについては明確には言及していない。

著者らはすでに、平板境界層内に二次元円柱を平板との間に間隔をもたせて取り付け、その間隔の大きさと、円柱の十分下流の境界層の乱流への遷移完了との関係を調べ、円柱直径と間隔の比によって、境界層の遷移機構があらさ要素によるものから、円柱後流との干渉によるものへと変化し、境界層の遷移にたいする効果に跳びの起こることを報告した⁽¹⁰⁾。

本報では、平板境界層内の円柱に関する長さの次元をもつパラメータ、前縁からの距離・直径・平板との間隔のうち、距離と直径とを固定し間隔を変化させて、円柱後流の状態が境界層遷移にあたえる影響を、境界層内平均速度分布、乱れ度分布、速度変動の周波数分布について調べた。

その結果、間隔の大きさによって後流の挙動に 3 領域があり、境界層遷移に 2 現象のあることが判明した。

主 な 記 号

 D : 円柱直径 G : 平板壁と円柱との間隔 $K = G + D$

* 昭和 59 年 8 月 28 日 第 927 回講演会において講演、原稿受付 昭和 59 年 1 月 30 日。

** 正員、東京都立工科短期大学 (〒191 日野市旭が丘 6-6)。

- x : 平板前縁からの距離
 x_K : 平板前縁から円柱までの距離
 x_t : 最初に境界層の乱れのスパイクを観察した位置
 x' : 円柱から下流への距離 ($x - x_K$)
 δ : 円柱のない場合の境界層厚さ (理論値)
 U_0 : 主流の速度
 u : 境界層内流れ方向速度
 u_K : K の高さでの流速 (理論値)
 u_G : G の高さでの流速 (理論値)
 u' : 乱れ成分
 Re_x : 局所レイノルズ数 $= U_0 x / \nu$
 Re_d : 円柱のレイノルズ数 $= u_K D / \nu$
 Re_n : 単位長さあたりのレイノルズ数 $= U_0 / \nu$
 ν : 動粘度
 η : 無次元 y 座標 $= y \sqrt{U_0 / \nu x}$

2. 実験装置

実験に使用した風洞は吐出しノズルが $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ で、測定部長さが 1.1 m である。境界層用平板模型は長さ 0.7 m 、幅 0.6 m 、厚さ 15 mm の布入りベークライト製で、前縁部 70 mm はジュラルミンで 25° のナイフエッジとなっている。

平板は風洞吐出し部に鉛直に取り付け、流れを二次元化するため、平板の上下に $0.7\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ のアルミニウム製端板を取りつけた。

乱れ要素としての円柱はピアノ線またはロッド棒を用いた。流速および乱れの測定には、定温度形熱線流速計を2台使用し、1台は主流の監視用とした。

速度変動の周波数分析はスペクトラムアナライザを用いた。なお、全実験中、流れの状態をオシロスコープで監視した。

3. 実験方法

実験は平板のごく前縁近傍と後縁付近を除き、主流に速度こう配のない平板層流境界層内に円柱を埋没させた状態で行った。

円柱と平板との位置および境界層との関係を図1に示す。図2は測定範囲での円柱のない場合の境界層内

図1 座標系

平均速度分布を示したものがブラジウス分布によく一致しており、境界層は層流に保たれている。円柱の高さ $K (= G + D)$ と、円柱の取りつけた位置での円柱のない場合の境界層厚さとの比は $0.19 \sim 0.47$ であった。なお、主流の乱れ度は約 0.4% であった。

以上のような条件で円柱後流および境界層遷移におよぼす平板と円柱との間隔の大きさの影響を調べるため以下の実験を行った。

3.1 遷移現象の相違 G の大きさによる境界層の遷移現象の相違を調べるため、 Re_n , x_K , D を固定し G を 0.2 mm から 0.1 mm ずつ変化させ円柱の下流 $10D$, $30D$, $50D$ および最初に境界層の乱れのスパイクが観察された位置での境界層の平均速度分布、乱れ度分布、速度変動の周波数分布の変化を調べた。なお、 $G = 0.6\text{ mm}$ の場合は円柱の後流が早期に乱れるため境界層の乱れのスパイクの観察は困難で測定位置を $G = 0.5\text{ mm}$ の場合と同一にした。

3.2 臨界 Re_d 数 後述のように G の大きさによって円柱下流に3種類の流れの状態が生ずる。その各々の臨界値を決定するため、 $D = 1.0\text{ mm}$ とし、 x_K が 0.1 m と 0.25 m の場合に種々の G と主流速度の組合せで各流れ模様の臨界となる Re_n 数をみつけその値から後流状態を変化させる u_K を求め臨界 Re_d 数を決定した。

4. 結果と考察

4.1 平均速度分布 3.1節で述べたように $Re_n = 3.5 \times 10^5$, $x_K = 0.25\text{ m}$, $D = 1.0\text{ mm}$ に固定し、 G を 0.2 mm から 0.6 mm まで 0.1 mm 間隔で変化させ円柱下流の平均速度分布にあたる G の大きさの影響を調べた。その結果のうち $G = 0.3, 0.5, 0.6\text{ mm}$ の場合を同じ x_K で円柱の無いときのブラジウス分布と対比さ

図2 測定範囲内平均速度分布

せて図3～5に示す。なお、この条件での円柱の無い場合の境界層厚さと、図3～5の各 G での円柱上部の壁からの高さとの比 K/δ は $G=0.3, 0.4, 0.5\text{mm}$ で各々0.31, 0.36, 0.38である。

図3は $x'=10D$ での結果である。図は η が4.2程度までは円柱の存在による速度欠損があることを示しており、それ以上では円柱の上側の加速流の影響を示している。 η が1.7～4.2程度ではどの G でも同じような速度欠損を示しているが $\eta < 1.7$ では円柱下側からの流れこみが G とともに増していることがわかる。なお、 $G=0.2\text{mm}$ では図3の0.3mmの場合と同様下側の流れこみはほとんどなく、0.4mmではわずかにある。

図4は $x'=30D$ での状態である。この位置では円柱の影響による速度欠損はかなり回復し $G=0.3, 0.5\text{mm}$ と0.6mmとでは明らかな違いをみせている。すなわち、 $G=0.6\text{mm}$ では η が1のあたりでブラジウス分布と交差しておりすでに境界層遷移が始まって

いることを示している。一方0.3mmと0.5mmではその差がほとんどなくなっている。

図5は $x=x_t$ での結果である。ただし各 G にたいする x_t は $G=0.3\text{mm}$ では円柱の下流、約 $100D$ 、0.5mmでは $90D$ 、0.6mmでは $50D$ である。この位置では、 $G=0.3, 0.5\text{mm}$ の場合がほぼブラジウス分布に復帰しているのに対し、0.6mmでは $\eta > 1.7$ では円柱の影響を残しており、またそれ以下ではブラジウス分布の下側にあり境界層の遷移がさらに進行している。

4.2 乱れ度分布 図6～8は4.1節と同様に $Re_n=3.5 \times 10^5$, $x_K=0.25\text{m}$, $D=1.0\text{mm}$ とし、 G による乱れ度($\sqrt{u'^2}/U_0$)の流れ方向の変化を4.1節と同じ位置で測定した結果である。

図6は $x'=10D$ での結果で、 G によって乱れの発生に相違のあることを示している。 $G=0.3\text{mm}$ では円柱上部からの離れ流れが主であり、 $G=0.5, 0.6\text{mm}$ の場合は大きさには差があるものの円柱上下からの渦

図3 平均速度分布 ($x'=10D$)

図5 平均速度分布 ($x=x_t$, $G=0.6\text{mm}$, $x'=50D$)

図4 平均速度分布 ($x'=30D$)

図6 乱れ度分布 ($x'=10D$)

放出による乱れを示している。

図7は $x'=30D$ での結果だが興味深いのは、 $G=0.5\text{ mm}$ の乱れ分布が図6では $G=0.6\text{ mm}$ に類似していたのに図7では $G=0.3\text{ mm}$ の場合に大きさも形もほとんど同じになっていることである。この事実は設定した主流流速（すなわち Re_n 数）では速度変動のオシロスコープによる観察の結果とあわせて考えると、 $G=0.5\text{ mm}$ の場合の円柱から放出された渦は層流状態であり、円柱下流 $30D$ ではすでに消滅しているのに対して、 $G=0.6\text{ mm}$ での渦は乱流になっていることを示している。この場合は壁のごく近くまで大きな乱れ度となっており、平板境界層と円柱後流との干渉による遷移の特徴をよく示している。

図8では、 $G=0.5\text{ mm}$ 乱れ度分布は 0.3 mm の場合と同じ形でこの両者は境界遷移に関しては壁面のあらさ要素としての作用をしているとみなせる。

以上の結果から、設定した条件下での G の大きさ

図7 乱れ度分布 ($x'=30D$)

図8 乱れ度分布 ($x = x_t$, $G=0.6\text{ mm}$, $x'=50D$)

による流れの違いは後流状態としては3種類であるが境界層の遷移にあたえる作用としては2種類、すなわち、 $G=0.3, 0.5\text{ mm}$ ではあらさ要素としてであり、 $G=0.6\text{ mm}$ の場合は円柱後流との干渉によるものであると言える。

4.3 周波数分析 図9は各 G にたいする4.1, 4.2節と同位置での速度変動の周波数分布の変化を示したものである。これらの分布は4.2節の乱れ分布の結果と対応している。 $G=0.5\text{ mm}$, $x'=10D$ で存在した約560 Hzのカルマン渦の周波数を示すピークは $30D$ ではほとんど消滅しており、 $G=0.3\text{ mm}$ の分布とほぼ同じ分布を示している。また、 $G=0.6\text{ mm}$ では $x'=10D$ では約650 Hzあたりにピークがあるが、 $G=0.5\text{ mm}$ と比較して横に広がっておりすでに変動周波数に不規則性がみられる。さらに、 $30D$ では広い帯域の周波数分布を示しており、4.1, 4.2節の結果を考慮すれば境界層の遷移が進行していることを示している。 $G=0.3, 0.5\text{ mm}$ の x_t 位置での分布は約240 Hz程度までの周波数が成長しており境界層の遷移が始まっていることを示している。

図10は周波数計算と同時に撮ったオシロ写真である。周波数分布曲線にもあらわれているが、 G が0.5

図9 速度変動の周波数分布 (縦軸は任意目盛)

図10 速度変動波形

mm と 0.6 mm の $10D$ にみられる波形は $30D$ ではまったく異なった波形となっている。0.5 mm では $10D$ でのカルマン渦に対応する波形は完全に消滅しその波形は 0.3 mm の場合と同じようになっており、さらに下流では境界層の乱れのスパイクを示している。G が 0.6 mm の場合は $10D$ ですでに速度変動に不規則性が見られ、 $30D$ では速度変動がさらに激しくなっていることを示している。

Re_n , x_K , D を固定し, G を変化させた以上の実験から次のようなことが言える。

- (1) 円柱後流に着目すれば 3 領域が存在する。
- (2) 境界層遷移からみれば 2 現象がある。

領域 I : 円柱背後の明りょうな渦放出のみられない領域 ($G=0.3$ mm)。

領域 II : 規則的な渦放出 (カルマン渦) がみられるが、下流にいくにしたがい消滅する領域 ($G=0.5$ mm)。

領域 III : 放出された渦が発達し後流が乱流になる領域 ($G=0.6$ mm)

現象 I あらさ要素による遷移 ($G=0.3, 0.5$ mm)

現象 II 円柱後流による遷移 ($G=0.6$ mm)

以上の領域、現象の臨界値を決めるために以下のような実験を行った。

4・4 臨界レイノルズ数 Re_D 実験は $x_K=0.25$ m, $D=1.0$ mm, とし G を 0.2 mm から 0.8 mm まで、0.1 mm 間隔で変化させ、各 G にたいし各領域を分ける Re_n を求め、その値から層流境界層計算を行ってレイノルズ数 Re_D を決定した。

領域 I は、円柱の直下流でオシロスコープを観察し正弦波がほとんどみられない場合とした。このときスペクトラムアナライザによる周波数分析を行い、周期的な速度変動にあたるピークのほとんどないことを確認した。

領域 II は、円柱の直下流 ($5D$ 程度) で規則的な速度変動が観察され、さらに、円柱の下流においてその変

動が発達しない上限のレイノルズ数 Re_n とした (前実験の $G=0.5$ mm はほぼこの状態であった。)

領域 III は前実験の $G=0.6$ mm の場合に相当し、円柱の下流で渦が発達するレイノルズ数 Re_n である。図 11 はその結果を示したものである。

図 11 の縦軸は円柱の高さ K と $x_K=0.25$ m の位置での円柱の無い場合の境界層厚さ δ との比, K/δ をとり、横軸にはレイノルズ数 Re_n より求めた K の高さでの流速 u_K と D によるレイノルズ数 Re_D をとっている。

図 11 は各 G にたいする結果を各領域を表すシンボルで示し実線で結んである。また各領域の限界値を結んだ一点鎖線は下側のものが領域 I, II の境界、上側が領域 III を表している。さらに各 G を横断する破線で結んだ点は前実験 ($Re_n=3.5 \times 10^5$: 一定) の実験点である。図 11 から以下のことがわかる。

さまざまな Re_n 数の境界層にたいして前実験と同様に G の大きさによって円柱後流の挙動に変化が生じ 3 領域に分けられる。また、 G = 一定の曲線は K/δ の一定値にたいしては G が小さいほどこう配がゆるいので、二つの境界線には含まれた領域 II (後流が乱流にならず減衰してしまう) は G が大きいほどレイノルズ数 Re_D に関して狭くカルマン渦の発生とその乱流化がごく近い Re_D 数で起こることを示している。また、 G の小さい値 (≤ 0.3 mm) では領域 II, III の境界線が G = 一定の線に漸近的に近づくため領域 II の Re_D 数の範囲が広く、一方、 Re_n 数を増すとあらさ要素としての作用による境界層の乱れが急速に発達するので、 $G \geq 0.4$ mm の場合のような明りょうな、カルマン渦発生 → 乱流化という過程の識別は困難であった。

図 12 は x_K を 0.1 m に変えた場合 ($D=1.0$ mm) に図 11 と同様な方法で調べた三つの領域を示している。図 12 には円柱下流 0.5 m で遷移完了という条件の前報⁽¹⁰⁾の実験結果のうち $D=1.0$ mm のものも併記してある。

図 11 臨界レイノルズ数 Re_D ($x=0.25$ m)

図 12 臨界レイノルズ数 Re_D ($x=0.1$ m)

おおよその特徴は図 11 と同様であるが異なる点は以下のとおりである。領域境界線は 2 本とも K/δ の高い値にシフトしている。すなわち $x_K=0.25\text{m}$ とくらべ薄い δ で同じような後流状態が現れている。また、領域 II と III の境界線の右上がり傾向が顕著でこのため図 11 では $G=0.3\text{mm}$ の線に漸近していたが図 12 では $G=0.4\text{mm}$ の線に近づいている。つまり $x_K=0.25\text{m}$ の場合より間隔が広くないと後流遷移が起こりにくいことを示している。また、レイノルズ数 Re_D が 200 程度以下では同じ G で比較した場合、 $x_K=0.25\text{m}$ ではすでに領域 III にはいるレイノルズ数 Re_D でも $x_K=0.1\text{m}$ では領域 I ないし II にとどまっている。このことは同一 Re_D 数では x_K が小さいほど δ が薄いため u_K は同じでも u_G が小さくなり円柱上下の速度差が増すとともに u_G の絶対値が強い渦放出を行うには不十分となるためと考えられる。しかしながら、この傾向は $Re_D>300$ 程度になり u_K の大きさが十分になるとともに解消し x_K の差による後流の違いは小さくなる。

図 11, 12 の結果をまとめると以下のとおりである。種々の G にたいしてレイノルズ数 Re_D によって円柱後流の挙動に三つの状態が現れ、その Re_D 数は G によって異なり G が小さいほどレイノルズ数 Re_D は大きくなる。また x_K を変えた場合には x_K を小さくすると同じ U_0, D, G にたいして $K/\delta, G/\delta$ が大きくなり、したがって u_K, u_G が大きくなり後流の発達により進む (図 11, 12)。また Re_D 数一定 (u_K 一定) の場合には x_K を小さくすると境界層のせん断が大きくなり x_K が大きい場合より壁と円柱の間の流速が小さくなって後流の遷移が遅れる。このため同じ主流流速では後流が遷移するためにはより大きな G が必要となり、明りょうな領域 III となる G は x_K によって異なる。

境界層の遷移にたいする影響は領域 II, III の境界を越えれば後流との干渉によって行われ、その境界の下側ではあらさ要素として作用する。

5. 結 言

平板と円柱との間隔の大きさが円柱後流の挙動および境界層遷移にあたえる影響についての実験を行い以下の結論を得た。

(1) 層流境界層内に置かれた円柱の後流は平板との間隔、および主流流速により 3 種類の挙動を示す。

(2) 周期的渦放出のみられない領域 I および層流状態の渦放出を行う領域 II では下流にいくにしたがい平均速度分布はブラジウス分布に復帰するが、後流が乱流化する領域 III では急速に乱流境界層の速度分布に近づく。

(3) 乱れ度分布の下流方向への変化も上記の結論 (2) に応じて、領域 I では壁面密着のあらさ要素の場合に類似し、領域 II では円柱直下流の周期的速度変動が減衰して領域 I に同一化するが、領域 III では壁面近くまで急速に乱れる。

(4) 円柱径一定の場合、間隔の大きさによって後流の挙動を分ける U_0 は異なり間隔が小さいほど大きな U_0 を必要とする。

(5) 円柱を取りつけた位置 x_K によっても後流の挙動を分ける U_0 は異なり、ある程度以上の間隔があれば x_K が小さければ U_0 も小さい。

(6) 間隔が小さい場合には領域 III となる主流流速が大きいのであらさ要素としての作用による境界層の発達も急速になり後流の挙動の明りょうな判別が困難になる。この状態となる間隔の下限は x_K によって異なる。

(7) 境界層の遷移にたいする効果は、領域 III では後流と境界層との干渉による遷移となり、領域 I, II では円柱の直下流には周期的速度変動があってもあらさ要素による遷移となる。

文 献

- (1) Lachmann, G. V., *Boundary Layer and Flow Control*, 2 (1961), 637, Pergamon Press.
- (2) Tani, I. and Sato, H., *J. Phys. Jpn.*, 11-12 (1956), 1284.
- (3) Klebanoff, P. S. and Tidstrom, K. D., *Phys. Fluids*, 15-7 (1972), 1173.
- (4) 平山, 機論, 27-177 (昭 36), 583, 590.
- (5) 金元・ほか 2 名, 機論, 46-407, B (昭 55), 1237.
- (6) Bearman, P. W. and Zdravkovich, M. M., *J. Fluid Mech.*, 89-1, (1978), 33.
- (7) Everitt, K. W., *Aeronaut. Q.*, 33-1 (1982), 90.
- (8) 亀本・ほか 2 名, 機論, 48-448, B (昭 58), 2929.
- (9) Hall, G. R., *AIAA J.*, 5-8, (1967), 1386.
- (10) 村岡, 機論, 50-449, B (昭 59), 59.

討 論

(質問) 藤 田 秀 臣 [名古屋大学工学部]

(1) 円柱は、平板の幅 60 cm にわたって端板から

端板へ張ったのか、そのとき、すきま G の精度はどの程度か。また、円柱が気流によって振動することはない

かったのか。

(2) 境界層の遷移を、(i)後流と境界層の干渉によるものと、(ii)あらさ要素によるものに大別しておられるが、両者の区別を何によって判定されたのか。また、遷移後の流れの挙動には、両者でどのような差異があるのか。

(3) 4・3節には、カルマン渦の周波数などが記されているが、ストローハル数で示していただきたい。

〔回答〕 (1) 円柱の張り方は、端板の外側に、片側は固定し、反対側をタンバクルに接続し間隔が零になるように張り、平板の中心線の上下 100 mm (間隔 200 mm) 程度のところに直径 G の短い円柱をはさんで作り、すきまゲージで確認した。間隔の精度は大きめにみて 0.025 mm 程度と思われる。また円柱の張りの強さによっては気流によって円柱が振動することもあるが、張りの強さはタンバクルで加減し本実験の範囲では振動はしていない。

(2) ご質問の(i)については、円柱の直下流 (5 D 程度) で規則的な渦放出がみられ、さらに下流に行

くにしたいが発達し、かつ平均速度分布が乱流境界層の分布に近づいている場とし、(ii)については、たとえ円柱の直下流に規則的な渦放出がみられても、間隔が零の場合と同様な遷移過程をとる場合とした (図 6~10 参照)。遷移後の流れの挙動については、十分発達した乱流境界層ではその差異はないが、遷移域では後流との干渉による場合は図 7, 8 の $G=0.6$ mm の場合のように乱れ度が壁近くで垂直になるような特徴をもっている。

(3) ストローハル数 $S_t = fD/u_k$ とすると

ただし、 f : 速度変動の周波数、

D : 円柱直径、

u_k : 円柱のない場合の円柱の高さ $K (= D + G)$ での境界層内流速 (計算値)。

とすると

$G=0.5$ mm では : $S_t=0.2$

$G=0.6$ mm では : $S_t=0.22$

となる。