

No.7 小さいレイノルズ数での渦列の形成

佐藤浩、斉藤博之助、中村宏（ながれ研究集団）

Formation of vortex street at small Reynolds numbers

H. Sato. H. Saito and H. Nakamura

Institute of Flow Research Tokyo, Japan

ABSTRACT

Experiments were carried out in a small water tunnel. The formation of vortex street behind cylinders was investigated in Reynolds number range from 20 to 100 by the simultaneous use of hydrogen bubble technique and hot-wire velocimeter. The boundary Reynolds number which is the smallest Reynolds number with vortex shedding was determined experimentally. The value is about 40. The Strouhal number, which is the nondimensional frequency of vortex shedding is around 0.13 at small Reynolds numbers. Because they are sensitive to a weak fluctuation in the flow, the precise values can not be determined.

Key Words: small Reynolds number, cylinder wake, vortex street

0. はしがき

円柱の後流の中に形成される渦列についての実験は数え切れないほどあります。しかし大抵の実験はレイノルズ数の大きな場合で、渦列が出来るかどうかきわどいあたりの、小さなレイノルズ数ではもっと実験が必要です。ここでは流水槽を使った小さいレイノルズ数での実験結果を報告します。

1. 実験装置

第1図は実験に使われた流水槽の平面図です。全体の大きさは1000 mm X 400 mm ほどで、測定部は幅が150mm、深さは120 mm、長さは600 mmです。図の右上に示した直流モーターにつながるスクリュウで流れを作ります。流れをよくする為にハネカムや網が入っています。また測定部には透明な天井を取り付けて上端の境界条件をはっきりさせています。流速の範囲は3 -- 9 cm/sです。

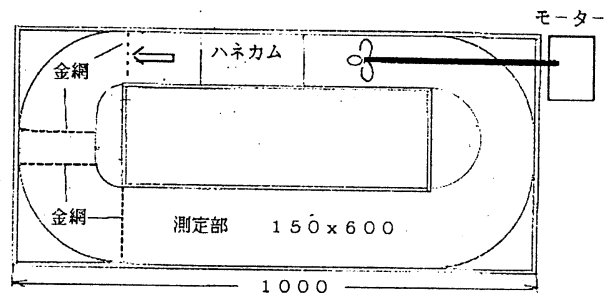
円柱として直径 0.5, 1, 2 mm の3種類が使われました。長さは120 mm ですから、アスペクト比はそれぞれ 240, 120, 60 です。レイノルズ数は15 - 200 の範囲です。

流れを視るために水素気泡が使われました。使用する水を0.1%の食塩水にして、白金の50マイクロ

ンの太さ、100 mm の長さの線から水素の気泡を発生させます。連続泡面と、断続泡面を発生させることが出来ます。流速の測定は分かった周波数の断続泡と寸法板を同時に撮影した写真から行われました。写真はデジタルカメラでシャッタースピードを変えながら撮られました。

流れの一樣性は横方向にも深さ方向にもかなり良いことが泡線写真で実証されました。水素の泡の密度は水に比べてずっと小さいので浮力が働き、写真を見にくくします。この実験では流速が3 cm/s 以下では良い写真は得られませんでした。

作られた速度変動を調べるために熱線流速計が使われました。水の中ではちょっとした動きで切れます



第1図 流水槽平面図

ので線の直径は10 ミクロンにしました。熱伝達も大きいので定電流動作にしました。供給電流はほぼ 250 mA です。周波数特性も気になりますが、対象とする周波数は最大で 20 Hz ですから、まず大丈夫でしょう。支持棒が絶縁された熱線は 0.1 % の塩水の中でも安定に動作します。プローブを微動装置の先端に取り付けて後流の中を動かしました。

2. 泡線静画

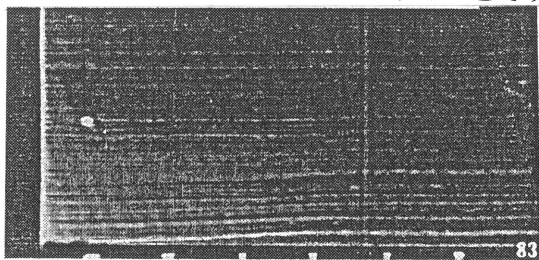
泡の静画を撮るときに重要なことの一つはシャッター速度をどのように選ぶかということです。シャッターが開いている間に泡は動きます。シャッターが遅すぎると泡が大きくなり流れ、速すぎると泡が凍りついて流れを視ることが出来ません。どの速度が最適かというのに客観的な基準はありません。これが流れの観察の不確定な事の一つです。この実験では 1 / 50 秒か 1 / 60 秒あたりが快適なシャッター速度のようです。

第2図はレイノルズ数が小さくて後流が層流であるときの泡線画像です。泡の線は何もなかったようにほぼ平行に流れています。

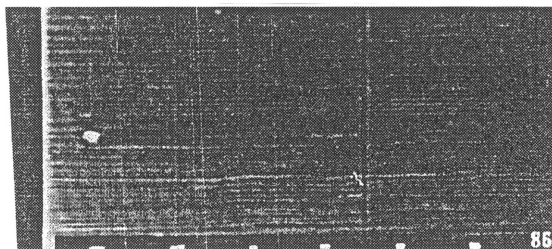
第3図は3種類のレイノルズ数で、渦列が作られない場合と、作られる場合の画像です。

3. 境界レイノルズ数

3種類の円柱についてレイノルズ数を変えて第3図のような後流の写真を撮り、渦列の発生を調べました。発生のレイノルズ数を決定するには2つの問題があります。一つは後流の中に波が視られたとき、それを渦列と解釈するかどうかです。それによって境界レイノルズ数に幅が出ます。もう一つは全く同じ条件でも渦が出たり出なかったりすることです。

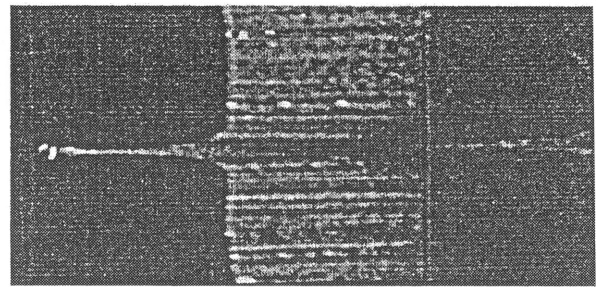


Re = 28

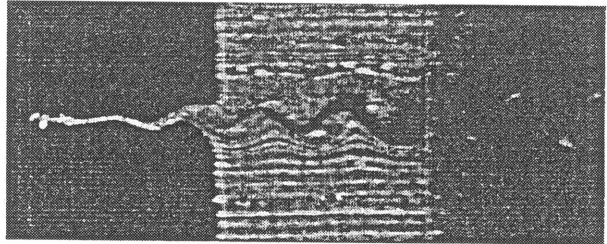


Re = 32

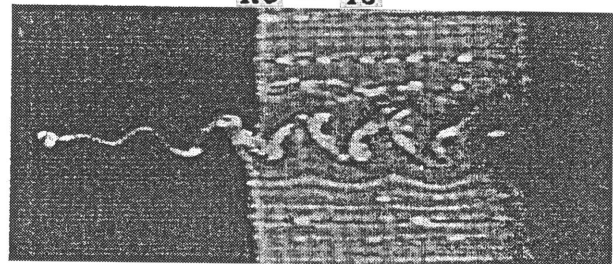
第2図 層流後流 d = 0.5 mm



Re = 40



Re = 43

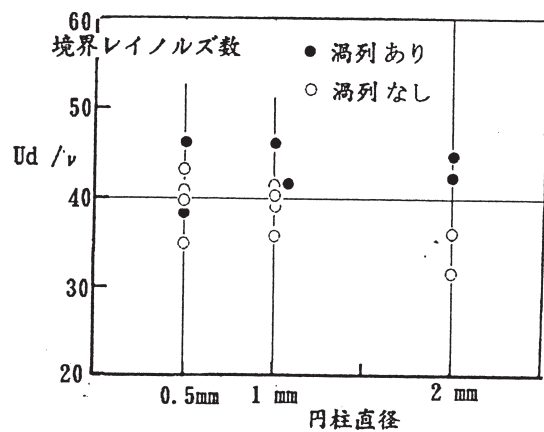


Re = 49

第3図 後流 d = 1 mm 断続 1 Hz

これは流れの中の非常に弱い速度変動が必ずしも一定でないことから理解できます。

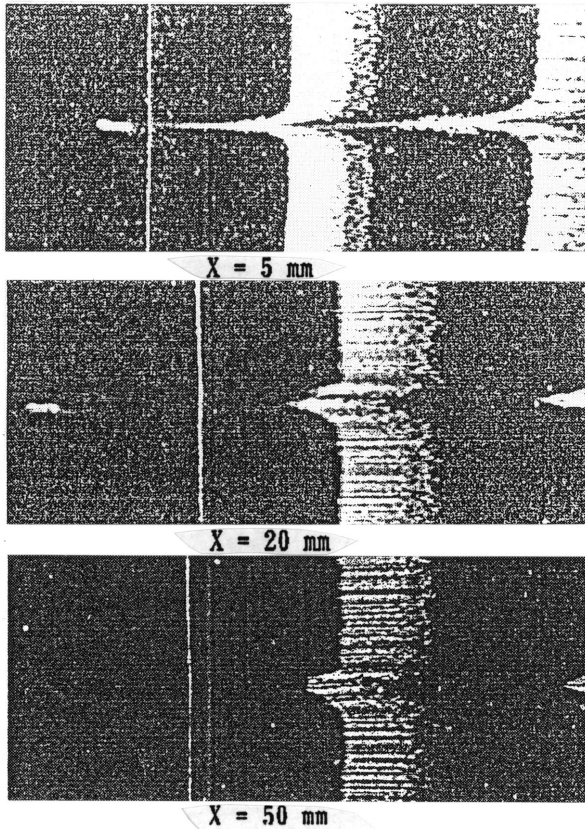
熱線流速計の出力からも境界レイノルズ数を決定できるはずですが、しかし実際は小さなレイノルズ数では熱線の出力は小さく、判定には渦写真の方が鋭敏のように見えます。また細かいことを言えば、熱線の出力が正弦波だからといって、そこに渦があるとは言えません。



第4図 境界レイノルズ数

4. 平均速度分布

レイノルズ数が小さくて後流の中に速度変動が存在しないときには断続泡線の写真から層流後流の速度分布を調べることが出来ます。第5図のような写真で泡のある白いところと、泡のない黒いところの境目が速度分布を示しています。泡面は1 Hzで断続しています。泡線を後流の色々な場所に置くとその付近の速度分布が得られます。3つの絵を比べると後流が下流方向に広がり、中心線上の速度欠陥が減っていることが分かります。

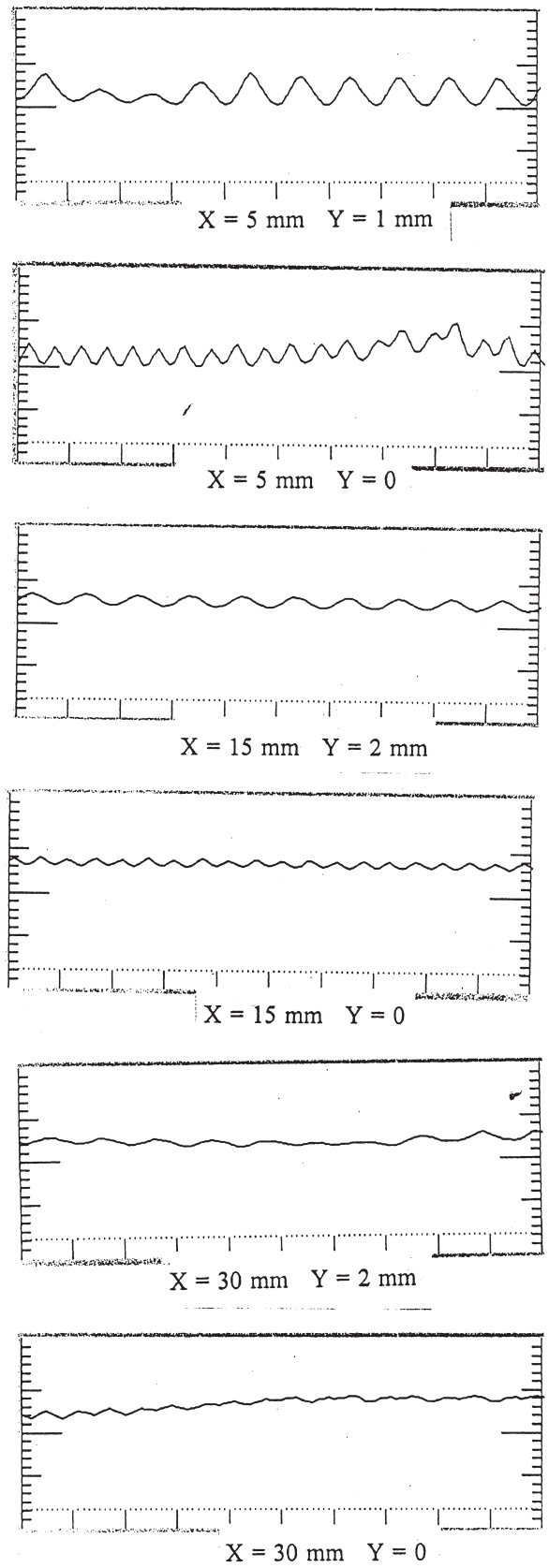


第5図 層流後流 $d = 1 \text{ mm}$ $Re = 31$

5. 速度変動

熱線流速計を後流の中でトラバースすると、色々な点での速度変動の波形が観察できます。第6図はその一例です。後流の中心軸上では2倍の周波数が認められました。これはレイノルズ数が大きいときと同じです。

レイノルズ数が大きいときは渦列は下流で崩れて、乱雑化して乱流になるのですが、レイノルズ数が小さいと渦が徐々に弱まって消えていくところが熱線流速計でははっきりと分かりました。



第6図 速度変動波形
 $d = 1 \text{ mm}$ $Re = 55$

6. ストロウハル数

小さなレイノルズ数で無次元化された放出周波数すなわちストロウ数が3種類の円柱を使って、熱線流速計で測定された結果を第7図に示します。実線は参考文献1の結果です。ほぼ一致していると言えましょう。データの散りは流れの中の変動の変化によるものでしょう。

7. 古い泡と新しい泡

水素気泡の流れの中の変位は発生から撮影までの積分効果です。ともすれば我々は撮影された画像がその瞬間の流れを現しているかのように錯覚してしまいます。”古い泡は人を騙す”のです。それがどのようなものであるかを調べたのが第8図です。泡線を円柱に対して色々な場所に置いて写真を撮りました。泡線のすぐ下流の泡は流れ場の忠実な表現です。古い泡と新しい泡は違っているようでもあり、同じようでもあります。これがやはり観察の限界でしょう。

8. 強制振動

レイノルズ数が小さいときは渦列の形成は弱い変動の線形成長に起因すると考えられています。そこで外部から人工的な変動を与えてみます。変動の周波数が線形成長する範囲に入っていればその成長が観察されるでしょう。

直流モーターに偏心した負荷をとりつけ、回転数に応じた振動を測定部の下流に与えました。レイノルズ数に応じてある周波数で応答があり、渦列が形成されます。作られた渦の周波数はストロウハル数として 0.14 あたりです。このことは文献1)の結論と一致します。

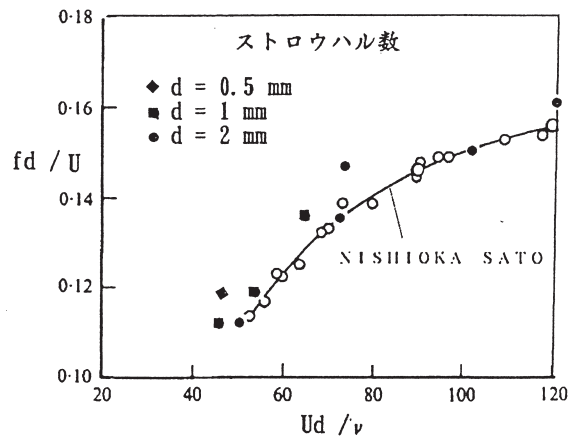
9. むすび

我々の実験から得られた結論は次の通りです。

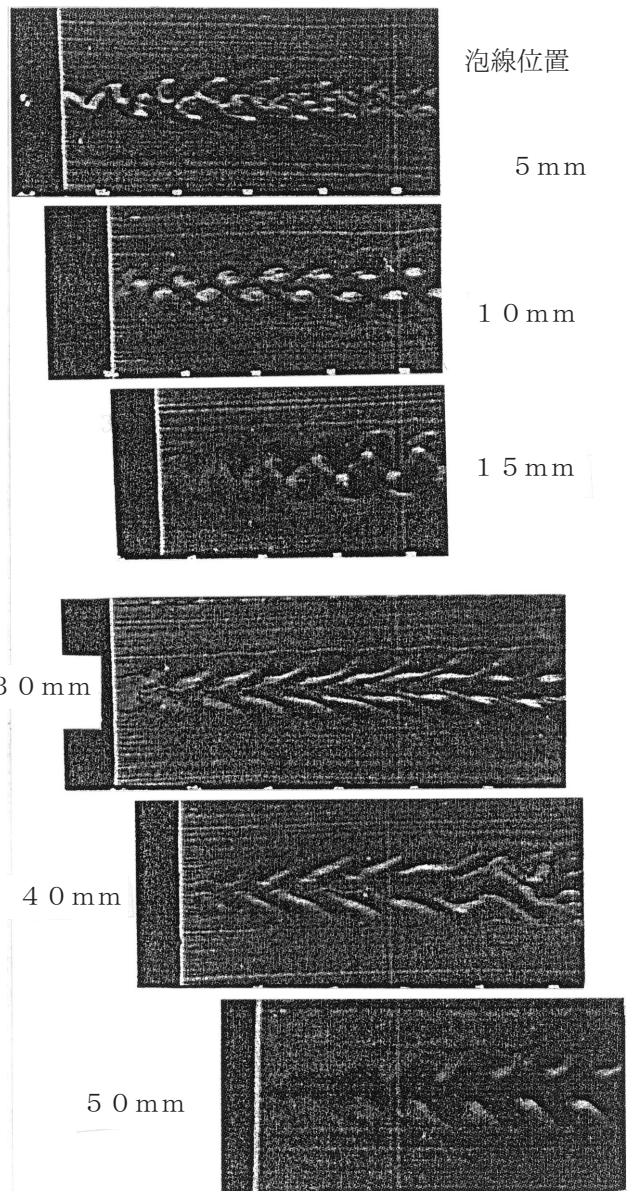
1. 後流に渦列が形成される最小のレイノルズ数はほぼ 40 で、これはいままでに言われていたものと一致する。しかしこの値は一様な流れの中に存在する弱い速度変動に依存します。
2. 渦放出の周波数が熱線流速計で測定され、レイノルズ数が小さいときには無次元のストロウハル数は0.13 あたりであることが分かった。しかしこの値も流れの中の変動に依存します。
3. レイノルズ数の小さいときに渦列が乱流にならないで徐々に減衰していく過程がはっきりしました。

参考文献

1) Nishioka M and Sato H Mechanism of determination of the shedding frequency of vortices behind a cylinder at low Reynolds numbers. J. Fluid Mech 1978 vol 89: 49-60



第7図 ストロウハル数



第8図 泡線位置と画像
d = 1 mm Re = 55