

流れ方向に振動する円柱後方の渦列

辰野, 正和
九州大学応用力学研究所 : 助手

<https://doi.org/10.15017/4743476>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 36, pp. 25-37, 1972-02. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



流れ方向に振動する円柱後方の渦列†

辰 野 正 和*

概 要

一様な粘性流体の中に流れに直角においた円柱を流れ方向に正弦的に振動させた場合、その後方にできる渦列はいかなる特性を持つかを実験的に調べた。実験は小型の水槽を使用し、円柱を一定速度で牽引すると同時に進行方向に正弦的に強制振動させた。測定は主に Reynolds 数を 100 と固定し、円柱の振動振幅をいろいろ変えて円柱の振動数と後流渦の発生振動数およびその幾何的配置との関係について調べた。実験結果によると、Kármán 渦の自然発生振動数の近傍で円柱を強制振動させると円柱の振動と完全に同期して Kármán 渦が発生される領域がある。また Kármán 渦の自然発生振動数の 2 倍の振動数の近傍で円柱を強制振動させると、円柱振動数の $\frac{1}{2}$ に同期して wake が振動する領域があり、この場合 wake の 1 振動は 4 個の渦からなっている。同期の領域は、前者より後者の方が数倍大きく円柱表面の剝離点是非対称である。さらに円柱の振動数を増大すると、円柱の両側面から円柱の振動毎に 1 対の対称な渦が発生される。しかしこの対称渦列は十分後方まで安定に存在し得ないのであって、再び大きな非対称渦列に巻き込まれていく。この非対称渦列はもはや円柱の強制振動数とは無関係に振幅／円柱直径比に応じて大体一定の振動数をもつ。

1. 緒 言

近年、流体力学において非定常問題が多く研究されるようになったが、物体が振動する場合も広い意味で非定常問題と考えられる。

一様流中で円柱が流れと直角方向に振動する問題については、Koopman¹⁾、種子田・本地²⁾、Bishop & Hassan³⁾ 等によって実験的研究がなされており、円柱振動と円柱後方渦列の発生振動とが同期する領域があることが報告されている。また一様流中で物体を流れ方向に振動させた場合の問題については、Lighthill⁴⁾ 等によってその速度場に関する理論的研究がなされている。また森・徳田⁵⁾ は非定常熱伝達の研究の過程で Kármán 渦の自然発生振動数の 2 倍の値の近傍で円柱を振動させた場合、渦発生振動との間に同期現象が見られたことを報告している。

本研究は円柱が流れ方向に振動する場合、その振動数および振幅が円柱後方に形成される渦列の発生振動数および渦模様にいかなる影響を持つかを調べることを目的として行なわれた。

2. 実 験 方 法

実験は小型の水槽 (38cm×40cm×200cm) を使用し、静止流体中で円柱を carriage で曳航して行

* 九州大学助手、応用力学研究所

† 日本物理学会第26回年会 (1971年10月1日) において講演

なった。写真 1 に示すように carriage にはクランク機構を備えた小型の振動装置が固定されており、これに円柱を装着して流れ方向に正弦的に振動させる。写真 2 が振動装置であり、クランク機構を交換することによって 0.100cm, 0.275cm, 0.55cm の振動振幅を得ることができる。実験は大体 $f_c < 3.5\text{c/s}$ の範囲内で行なわれた。

wake の振動周期の測定は、手作りの熱線流速計を使用した。また flow visualization の方法としては主に電気分解法を利用した。金属製の試験円柱の中心付近の表面を約 5mm 幅だけ全周にわたって露出させ、他の部分は黒色の吹き付けラッカーで薄く coating してしまう。写真 2 の円柱の中央付近に白く見える部分が金属表面を露出した部分である。そのようにして試験円柱を正の電極とし、円柱の後方離れたところの水の中におかれた金属棒を負の電極として、10~50V の適当な電圧をかけてやれば、試験円柱の金属表面が露出した部分に白色の微粒子の化合物が生成する。この物質をトレーサーとして flow visualization を行なった。この方法の利点は、condensed milk 法と異なり、実験にあたって水を乱すことがないこと、両極に通じる電流値を変えることによって、円柱から溶け出す化合物の量を任

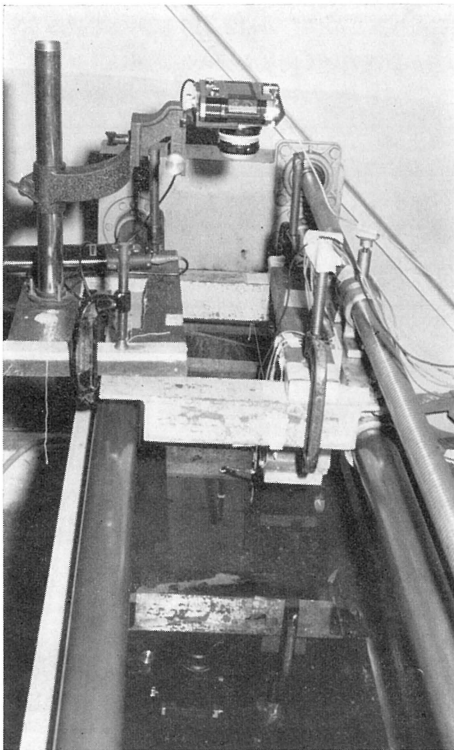


写真 1 実験装置
水槽、曳航装置、振動装置、撮影装置

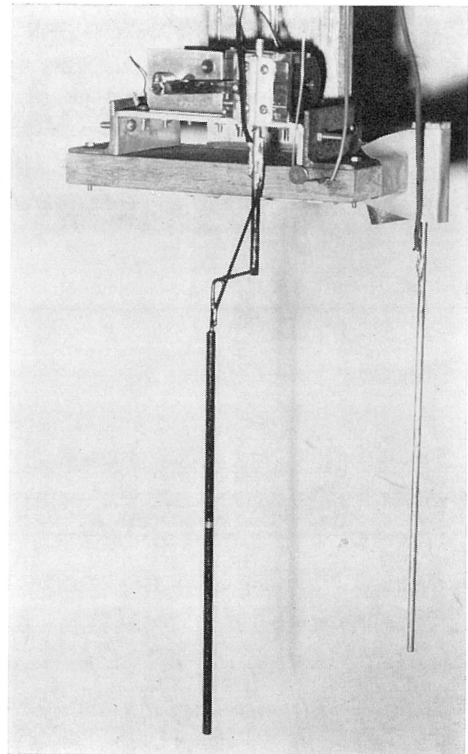


写真 2 振動装置及び試験円柱
上方に見えるのが振動装置。試験円柱の中央部付近は電解法による flow visualization のために金属表面を露出している。右に見える金属棒は陰極。

意に加減できることである。ただし円柱から円柱を構成している金属の化合物が溶け出しているのであるから、円柱表面が次第に侵されてくる。使用目的によっても違うであろうが、数回の実験毎に新しい試験円柱と取り替える必要がある。

剝離点の測定にはモータードライビングカメラを使用した。

本実験で使用した試験円柱は、直径 0.506cm、長さ 21.0cm、直径 0.700cm、長さ 20.4cm、直径 2.22cm、長さ 20.3cm の真鍮製の円柱および直径 1.03cm、長さ 17.0cm の銅製の円柱である。

3. 実験結果

実験結果の報告の前に各物理量を次のように定義する。

d : 円柱の直径 [cm]

a : 円柱の振動振幅 [cm]

f_c : 円柱の強制振動数 [c/s]

S_c : f_c の無次元量, $f_c d / U$

$u \sin \theta$: 円柱の振動速度, $u = 2\pi f_c a$

θ : 振動円柱の位置

U : 一様流の速度 [cm/s]

f_v : 非対称渦列の振動数 [c/s]

S_v : f_v の無次元量, $f_v d / U$

ν : 動粘性係数 [cm²/s]

R : Reynolds 数, Ud/ν

一様な流れの中で円柱を振動させた場合、その円柱の後方渦列の振動数は次のような物理量によって関係づけられる。

$$f_v = F(d, U, a, f_c, \nu)$$

この関係式は6個の量が2個のディメンションからなっているので、次のような4個の無次元量の間の関係として表わせる。

$$S_v = G(S_c, a/d, R)$$

本実験においては Reynolds 数を100と固定し、 a/d を parameter として S_c と S_v の関係を調べた。

図1は $a/d = 0.267$ の場合の1例である。円柱の振動数を低い方から高い方へと順次変えて調べていくと、まず Kármán 渦の自然発生振動数の近傍の振動数で円柱を強制振動させた場合、同期の現象 ($S_v = S_c$) が見られる。これをここでは1倍の同期と呼ぶことにする。この同期領域は比較的狭いものであり、写真3にその渦模様の1例を示す。ここでの最も大きな特徴は、円柱の最後端の点を通り流れ方向に平行な直線に対して渦列が並ぶ2つの線は対称な位置になく、左または右側に片寄って並ぶことである。これは円柱に接した wake が円柱の1回の振動毎に左または右のどちらかにずれ、その後も円柱の振動毎に同じパターンを繰り返すからである。この傾向は a/d が大きい程顕著である。

さらに S_c を上げていくと、Kármán 渦列自然発生振動数の約2倍の近傍の領域において次の同期の現象がみられる。これを $1/2$ 倍の同期と呼ぶことにする。つまりこの領域では $S_v = 1/2 S_c$ であり、その範囲はかなり広く、1倍の同期領域と比較すると数倍大きい。写真4は $1/2$ 倍の同期の状態にある渦列

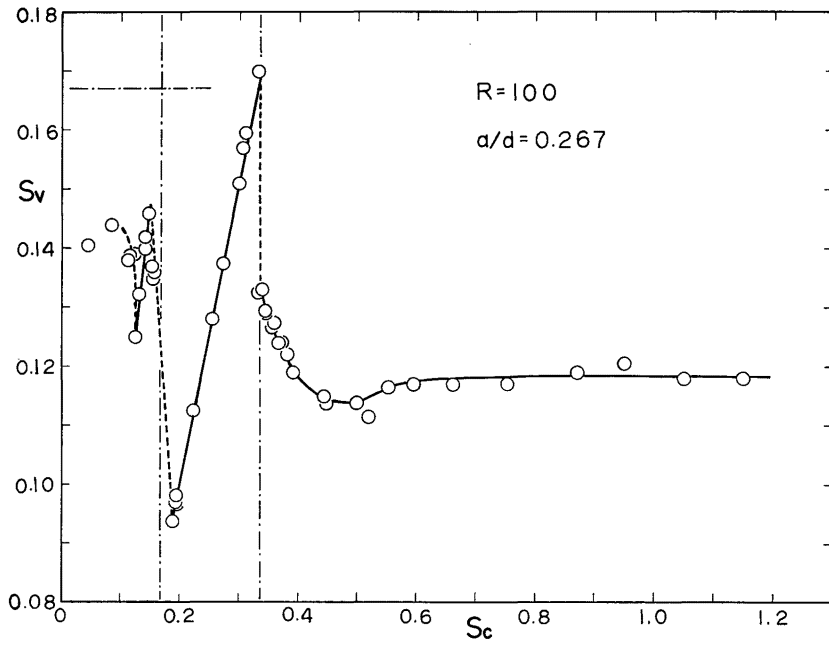


図 1 $R=100$, $a/d=0.267$ における S_v - S_c 関係

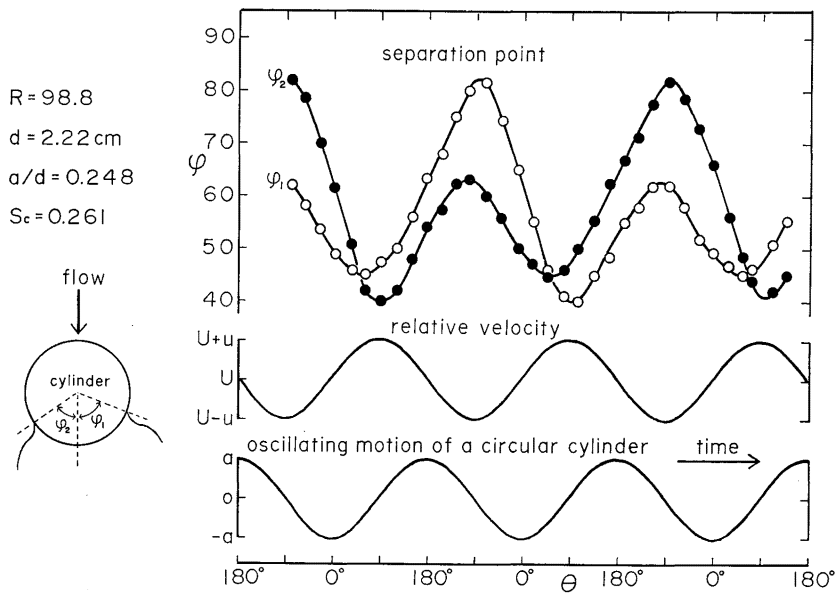


図 2 $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域における剥離点の移動
 $d=2.22\text{cm}$, $a=0.55\text{cm}$, $a/d=0.248$, $U=0.445\text{cm/s}$,
 $R=98.8$, $f_c=0.0523\text{c/s}$, $S_c=0.261$.
 円柱の振動運動の時間的経過は、図で左から右へと進む。

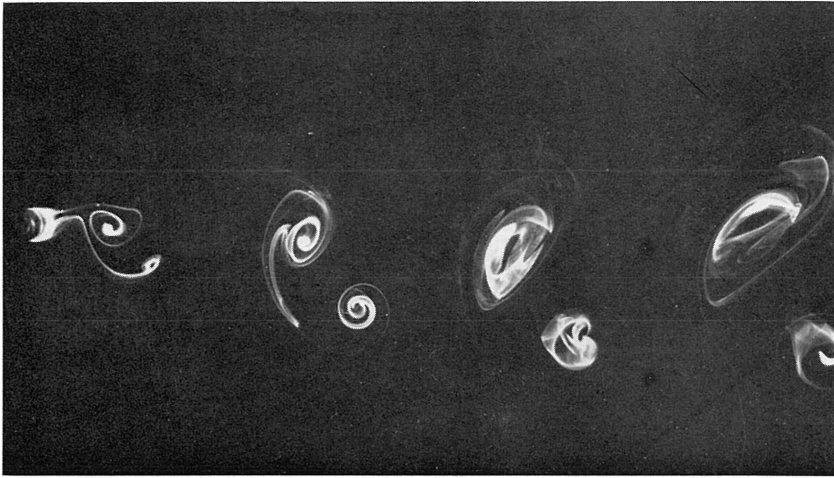
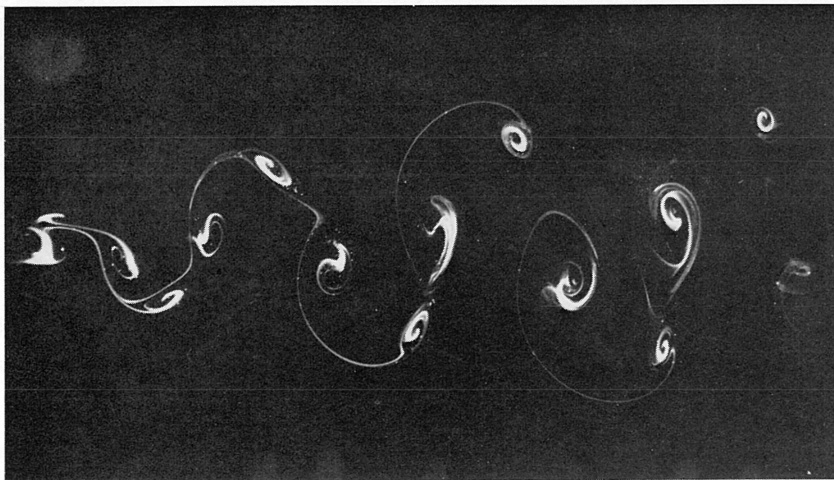


写真 3 1 倍の同期領域における渦模様

$d=1.03\text{cm}$, $a=0.55\text{cm}$, $a/d=0.534$, $U=1.03\text{cm/s}$,
 $R=103$, $f_c=0.124\text{c/s}$, $S_c=0.124$.

の典型的な pattern である。写真から明らかなように、定常な円柱の後方にできる Kármán 渦列と際立って異なる点は、円柱背部に接した wake が円柱表面の極く近傍で左右に大きく振れ動くことと、同一回転方向の渦が円柱の同一側から時間的に引き続いて 2 個ずつ形成され、1 周期は 4 個の渦からなっていることである。図 2 は円柱の振動運動の各位置で、円柱表面の左右剝離点を調べたものである。運動の時間的経過は図に示す通りであるが、測定は流れ模様が一定になった後に行なった。円柱は正弦運動をしているので、進行方向に向って最も後退した位置を 0° とし、最も前進した点を 180° と定義す

写真 4 $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域における渦模様

$d=1.03\text{cm}$, $a=0.275\text{cm}$, $a/d=0.267$, $U=1.01\text{cm/s}$,
 $R=100$, $f_c=0.257\text{c/s}$, $S_c=0.262$.

ると、円柱に対する流れの相対速度は、 $U+u\sin\theta$ となる。ここで $u=2\pi f_c a$ である。図から明らかなように、剝離点は前後に振動しているものであり、 a/d が大きい程その変位角は大きい。また左右の剝離点は進行方向に対して非対称であり（図 2 で 2 つの曲線が交わる所で瞬間的に対称であるが）、左と右では 360° の位相のずれがある。また同一側の剝離点の変動は 720° で 1 周期を完了している。このように円柱に接した wake は、円柱振動数の $\frac{1}{2}$ で振動している。今仮に、wake が円柱の左側方に大きく振れ動いたとすると、左側から 1 個の反時計方向の回転を持った渦がはき出される。その時にはすでに円柱の右側には、時計方向の回転を持った渦が形成されつつある。この渦がはき出された後、wake は円柱の右側へと大きく振れ動いて時計方向の渦が形成され後方へとはき出される。このようにして同一回転方向の渦が引き続いて 2 個円柱後方にはき出されるわけである。この wake が大きく振れ動いてできた渦は写真からわかるように後方渦列の外側に位置し、その反対側でできた渦は渦列の内側に配置される。このように円柱後方渦列の全体的な振動周期は、円柱に接した wake の振動周期と等しく、円柱の振動周期の 2 倍である。写真 5 はこのような $\frac{1}{2}$ 倍の同期状態にある渦列の流線をアルミ粉末法で見たものである。同一回転方向の渦が 2 個ずつ 1 組になっている様子が明瞭に見られる。

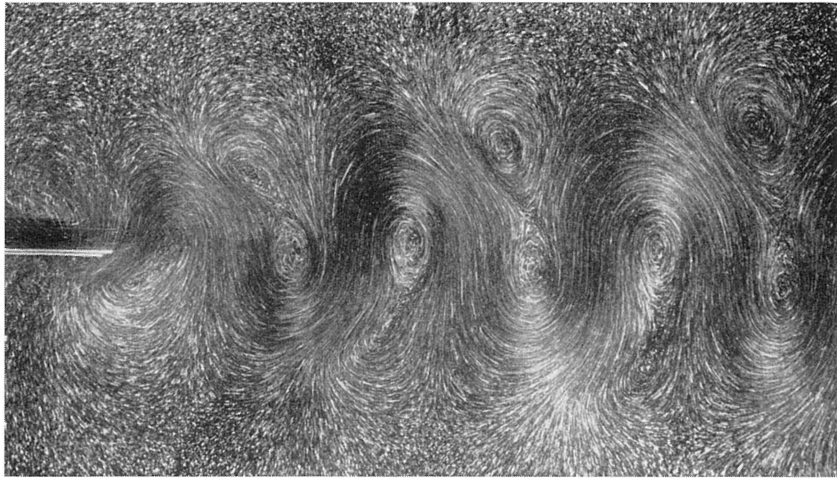


写真 5 $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域における渦模様

$d=1.03\text{cm}$, $a=0.275\text{cm}$, $a/d=0.267$, $U=0.837\text{cm/s}$,
 $R=101$, $f_c=0.200\text{c/s}$, $S_c=0.246$.

なお図 2 によると、円柱の振動運動と剝離点の変位との間には一定の関係がある。円柱の運動の 90° から 270° の範囲は減速過程であり、wake は大きくなり、剝離点は前方に移動する。円柱が 270° の付近に到達すると、剝離点は左右とも最も前方まで移動する。この点は円柱と流体との相対速度が最も小さい点である。円柱の運動の 270° から 90° までの範囲は加速過程であり、円柱と流体との相対速度が最も大きい点の付近で剝離点は最も後退する。写真 6 も $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域の pattern であるが、写真 4、写真 5 と異なって内側の渦列に比べて外側の渦列の減衰が著しい。こうした pattern は同期領域の S_c の値の小さい方で見られる。例えば $a/d=0.267$ の場合 $S_c<0.24$ の同期領域内でこのような pattern

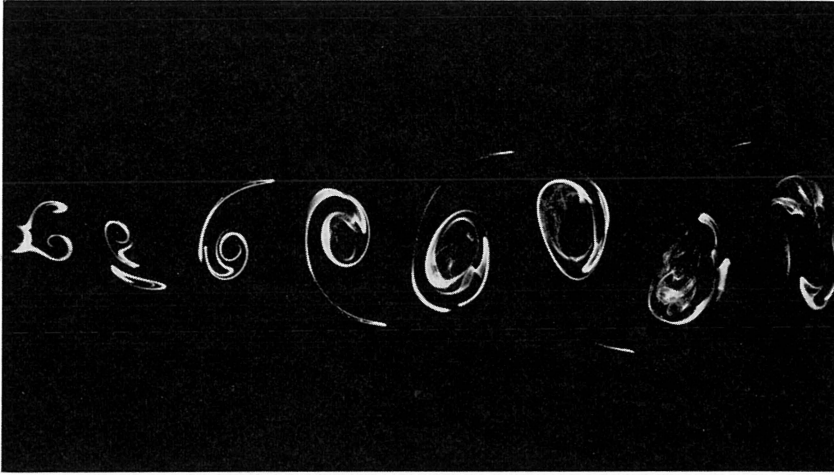


写真 6 $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域における渦模様
 $d=1.03\text{cm}$, $a=0.275\text{cm}$, $a/d=0.267$, $U=1.01\text{cm/s}$,
 $R=101$, $f_e=0.200$, $S_c=0.204$.

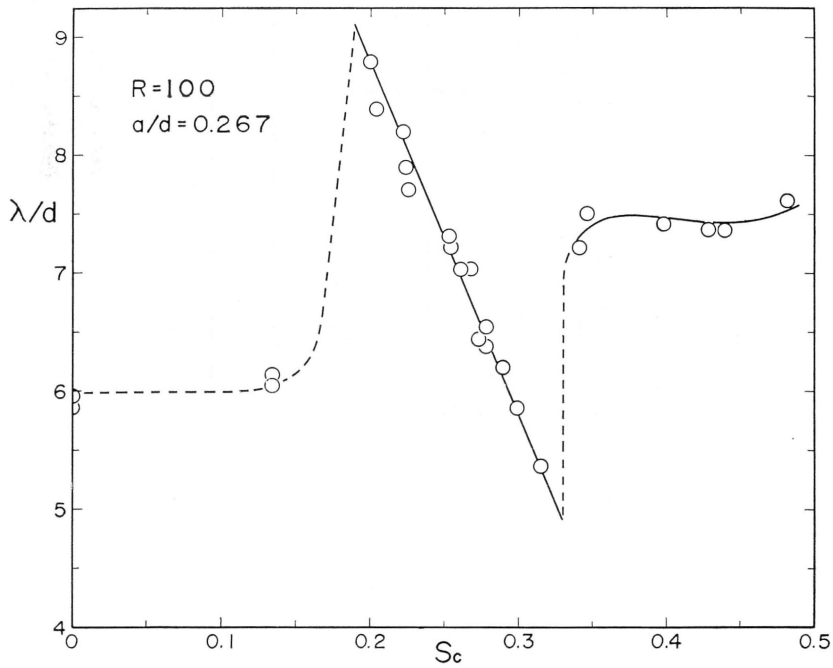


図 3 $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域における渦間隔
 $d=1.03\text{cm}$, $a=0.275\text{cm}$, $a/d=0.267$, $R=100$.

が見られた。一方同期領域の S_c の値の大きい方では逆に外側の渦に比べて、内側の渦の方が早く減衰する傾向にある。特に a/d が小さい場合にはこの傾向が著しい。このように、同期領域の pattern は初期の pattern がいつまでも維持されるのでなくて、減衰拡散を続け、円柱の十分後方では、内側または外側渦列のどちらかが他方の渦列へ巻き込まれていく。図 3 は主に、 $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域において、円柱後方渦列の流れ方向の渦間隔 (λ) を測定したものの一例である。 $a/d=0.267$ であり、測定は円柱後端から $20 \times d$ の付近で行なっている。この図から明らかなように、 $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域では、円柱振動数の増加とともに渦間隔は直線的に縮小している。

図 4 は 1 倍および $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域と a/d との関係を示したものである。図の $\circ$ は 1 倍の同期領域を表わし、 $\bullet$ は $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域を表わしている。図中の $- \cdot - \cdot -$ は定常円柱に関する Roshko⁸⁾ の実験における $R=100$ の点の Kármán 渦の Strouhal 数およびその 2 倍の値を示している。この図から明らかなように、1 倍の同期現象は a/d が小さい範囲では Kármán 渦の自然発生振動数の極く近傍で起り、その範囲は狭い。 a/d が大きくなるにつれて同期領域は広くなり、その下限および上限とも振動数の低い方へと移動する。一方 $\frac{1}{2}$ 倍の同期についても、その範囲は a/d が大きくなるにつれて振動数の低い方へと移行する。そして、 $a/d=0.544$ にまでなると、同期領域は Kármán 渦の自然発生振動数の 2 倍よりかなり低い位置にある。また $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域は $0.2 < a/d < 0.4$ の間に最大値があるようである。図 5 は、 a/d を一定にして、同期領域の Reynolds 数依存性を調べたものである。図中 $- \cdot - \cdot -$ は図 4 と同

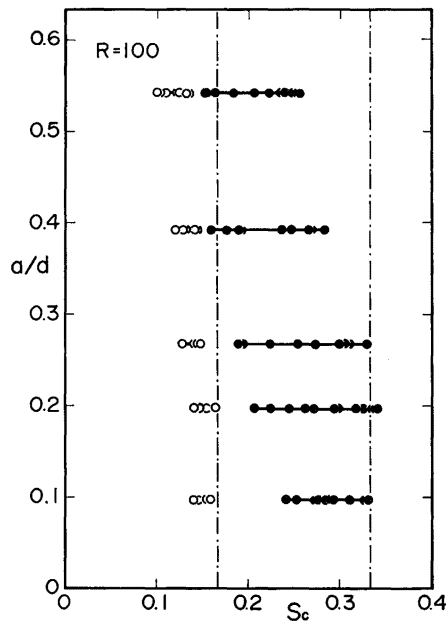


図 4 $R=100$ における a/d と同期領域との関係

$\circ$ は 1 倍の同期領域を、 $\bullet$ は $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域を示す。 $- \cdot - \cdot -$ は、定常円柱に関する Roshko の実験式 $0.212(1-21.2/R)$ で $R=100$ の場合の値、およびその 2 倍の値を示す。

じであり、 $\cdots\cdots\cdots$ は Roshko の $R=200$ に対応する Strouhal 数およびその 2 倍の値を示している。図から明らかなように、1 倍および $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域のどちらも Reynolds 数が大きい程広がっている。

以上 1 倍および $\frac{1}{2}$ 倍の同期現象について定性的な説明をした。これら 2 つの同期領域内においては、その渦発生周期および流れ模様は極めて規則的であるのに対して、同期の領域を上方または下方にわずかずれた S_0 に対しては渦列の振動周期およびその流れ模様はかなり不規則である。この渦発生の不規則な範囲は極く狭いものであって、 S_0 の値は同期の領域の上端および下端から、それぞれ次の規則的な渦模様の値へと不連続的に移行する。

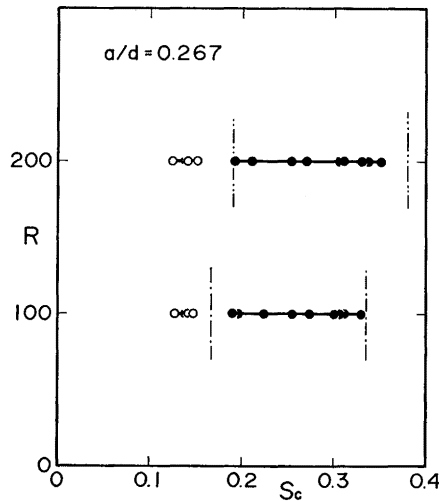


図 5 $a/d=0.267$ における R と同期領域との関係

○は 1 倍の同期領域を、●は $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域を示す。——は図 4 と同じ。 $\cdots\cdots\cdots$ は定常円柱に関する Roshko の実験式 $0.212(1-21.2/R)$ で $R=200$ の場合の値、およびその 2 倍の値を示す。

図 6 は一様流に関する Reynolds 数を 100 と固定し、円柱の強制振動数とその時の円柱後方渦列の振動数との関係をいろいろな a/d について調べたものである。縦軸は S_c/S_0 であり、図から明らかなように同期現象は $S_c/S_0=1, 2$ のところでしか現われない。写真 7 は $a/d=0.267$, $S_0=0.482$ の時の流れ模様である。 $\frac{1}{2}$ 倍の同期領域を越えて、 S_c の大きい範囲では、写真のように円柱の 1 振動毎に円柱の左右側面より 1 対の渦がはき出される。これら対称にはき出された渦列は安定なものでなく、後方に行くと、改めて大きな非対称渦列へと巻き込まれていく。この非対称渦列の振動数と円柱振動数との関係を調べたのが図 6 であって、同期領域を越えると、 S_c に対しては無関係で、 a/d の違いに応じて大体一定の f_0 が現われる。同様に写真 8 は $a/d=0.393$, $S_0=0.394$ の場合、写真 9 は $a/d=0.198$, $S_0=0.626$ の場合の流れ模様である。写真 8 からわかるように、 a/d が大きくなると、円柱振動毎にはき出される対称渦列は長く安定に存在し、平行に並んでいる。写真 9 は a/d の小さい場合の写真であって、剝離点は左右対称で、円柱の振動毎に前後に移動し、左右から対称に 1 対の渦がはき出されている。しかし、平行な渦の列を形成するまでに到らず、すぐに非対称渦列に巻き込まれていく。1 倍および $\frac{1}{2}$ 倍の同期現象におい

ては、円柱背部に接した wake が円柱振動にそれぞれ 1 倍および $\frac{1}{2}$ 倍に同期して左右に振動し渦をはき出すのであったが、写真 7～9 の場合には、非対称渦列はそれに先行して形成される対称渦列の不安定性に基づくものと考えられる。なお付記するならば、円柱後方に対称渦列が現われるのは範囲が限られ

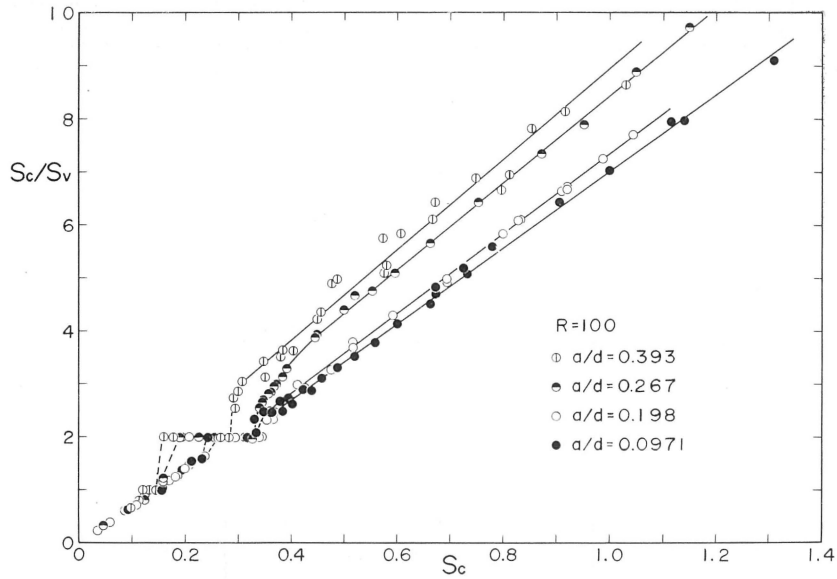


図 6 $R=100$ における S_c/S_v-S_c 関係

①は $d=0.700\text{cm}$, $a=0.275\text{cm}$. ●は $d=1.03\text{cm}$, $a=0.275\text{cm}$.
○は $d=0.506\text{cm}$, $a=0.100\text{cm}$. ●は $d=1.03\text{cm}$, $a=0.100\text{cm}$.

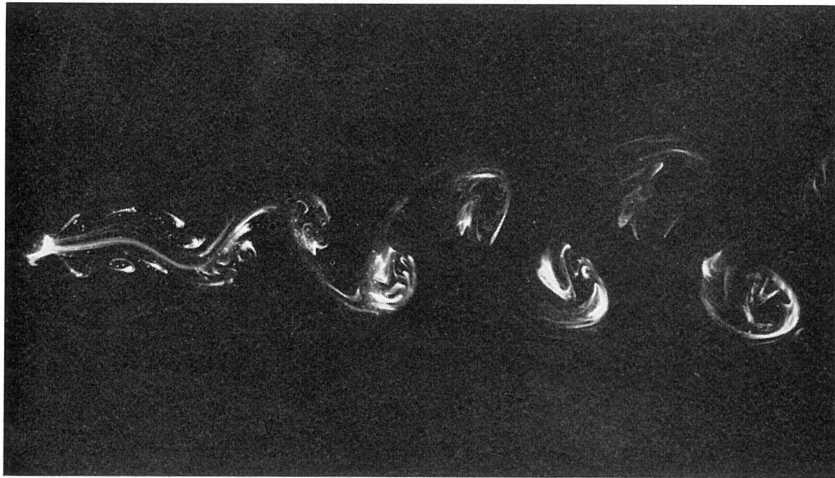


写真 7 同期領域を越えた S_c での渦模様
 $d=1.03\text{cm}$, $a=0.275\text{cm}$, $a/d=0.267$, $U=1.09\text{cm/s}$,
 $R=101$, $f_c=0.510\text{c/s}$, $S_c=0.482$.

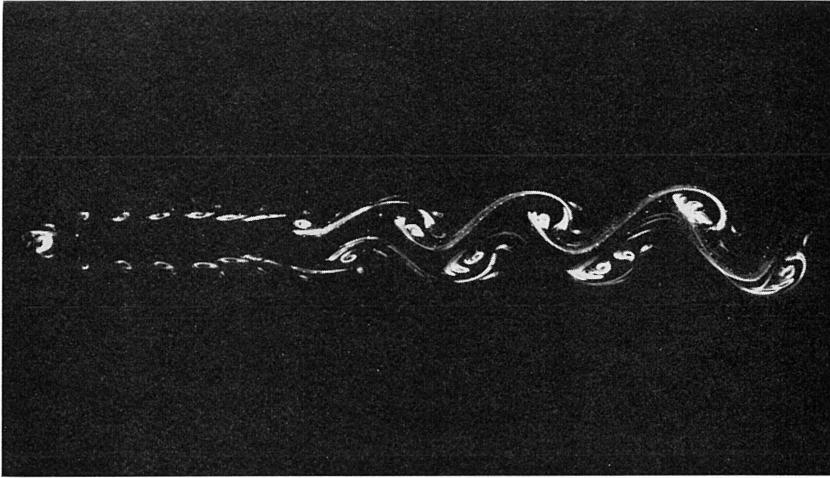


写真 8 同期領域を越えた S_c での渦模様
 $d=0.700\text{cm}$, $a=0.275\text{cm}$, $a/d=0.393$, $U=1.43\text{cm/s}$,
 $R=102$, $f_c=0.805\text{c/s}$, $S_c=0.394$.

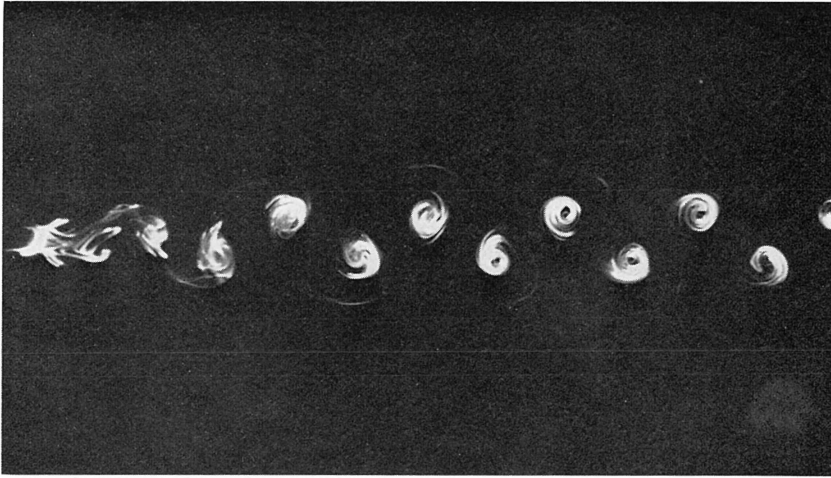


写真 9 同期領域を越えた S_c での渦模様
 $d=0.506\text{cm}$, $a=0.100\text{cm}$, $a/d=0.198$, $U=1.78\text{cm/s}$,
 $R=100$, $f_c=2.20\text{c/s}$, $S_c=0.626$.

ていて、 S_c がかなり大きくなると、円柱後方に対称渦列は形成されず非対称渦列のみが見られる。写真 10 は $a/d=0.393$, $S_c=0.734$ の場合の流れ模様である。これは円柱の振動数が大きくなって、円柱のまわりには、振動に基づく新しい境界が形成されているものと思われる。こうした範囲でも同期現象は現われなかった。

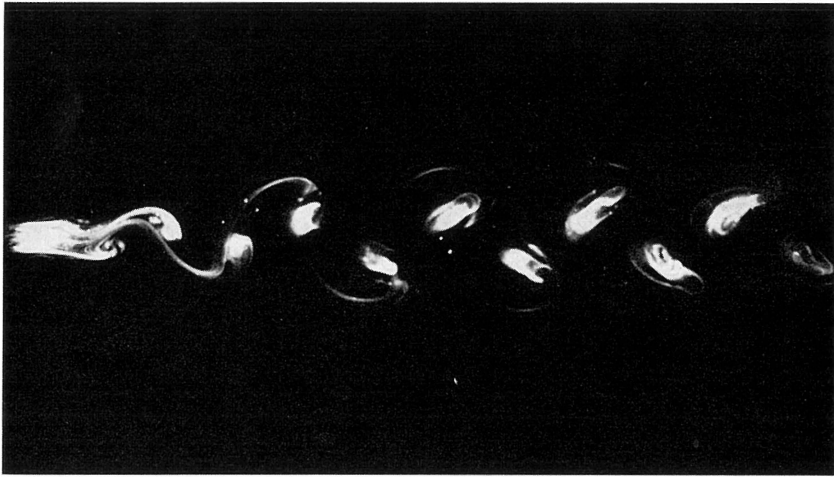


写真 10 同期領域を越えた S_c での渦模様
 $d=0.700\text{cm}$, $a=0.275\text{cm}$, $a/d=0.393$, $U=1.43\text{cm/s}$,
 $R=101$, $f_c=1.50\text{c/s}$, $S_c=0.734$.

4. 結 言

円柱を流れ方向に強制振動させたとき、円柱後方に形成される渦列と円柱振動との同期現象について実験的に調べた。定常円柱の Kármán 渦の自然発生振動数の近傍で円柱を強制振動させると、円柱振動に同期して渦がはき出される現象が見られる。この領域は振幅／円柱直径の値が大きくなる程大きくなり、振動数のより低い方で起るようになる。続いて円柱を Kármán 渦の自然発生振動数の 2 倍の付近で振動させると、円柱振動数の $1/2$ 倍に同期した渦列が形成される。この領域もまた a/d が大きくなるにつれて振動数のより低い方で起るようになる。この場合、渦列の 1 周期は 4 個の渦からなり、同一回転方向を持った 2 つの渦が対になっている。この同期領域を越えた振動数領域では、円柱振動毎に左右から対称な渦がはき出され、この平行な対称渦列がやがて非対称渦列を形成する。 $1/2$ 倍の同期領域を越えた範囲にはもはや同期現象は見られない。

謝 辞

この研究を示唆され、終始有益なご討論ご批判をいただいた種子田定俊教授に厚くお礼申し上げます。また、実験を通じて多くのご助力をいただいた石井幸治、高田三郎、岡世以子の各氏に対し深く感謝いたします。なお本研究は文部省科学研究費の援助を受けて行なわれた。

参 考 文 献

- 1) Koopman, G.H., The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds numbers, J. Fluid Mech., 28, 1967, p. 501.
- 2) 種子田定俊・本地弘之, 振動する円柱の後流渦, 応用力学研究所所報, 第29号, 昭43, 17.
- 3) Bishop, R.E.D. and Hassan, A.Y., The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid, Proc. Roy. Soc. A., 277, 1964, p. 51.

- 4) 船川正哉, 流れの中の弾性支持円筒の励振機構, 日本機械学会論文集, 35巻, 270号, 昭44, 303.
- 5) Lighthill, M. J., The response of laminar skin friction and heat transfer to fluctuations in the stream velocity, Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A, 224, 1954, p.1.
- 6) 森 康夫・徳田 仁, 振動する円柱からの非定常熱伝達 (第2報, 岐点後方), 日本機械学会論文集, 33巻, 255号, 昭42, 1826.
- 7) 日野幹雄・金子大二郎, 振動平板と後流渦の干渉, 土木学会論文報告集, 第193号, 昭46, 35.
- 8) Roshko, A., On the development of turbulent wakes from vortex streets, NACA Rep., 1191, 1954.
- 9) Tritton, D. J., A note on vortex streets behind circular cylinders at low Reynolds numbers, J. Fluid Mech., 45, Part 1, 1971, p. 203.
- 10) Taneda, S., Studies on wake vortices, Rep. Res. Inst. App. Mech., 1, no. 4, 1952, p. 131.
- 11) Taneda, S., Downstream development of the wakes behind cylinders, J. Phys. Soc. Japan, 14, 1959, p. 843.
- 12) Taneda, S., Experimental investigation of vortex streets, J. Phys. Soc. Japan, 20, 1965, p. 1714.
- 13) Tatsuno, M. and Taneda, S., Visualization of the unsteady flow past cylinders and plates decelerated from a steady speed, J. Phys. Soc. Japan, 31, 1971, p.1266.
- 14) 辰野正和, 電気分解による流体運動可視化の一方法, 応用力学研究所所報, 第36号, 昭47, 107.

(昭和46年10月30日 受理)