

振動角柱による二次流れ

辰野, 正和
九州大学応用力学研究所 : 助手

<https://doi.org/10.15017/4743526>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 41, pp.1-12, 1974-02. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



振動角柱による二次流れ

辰野正和*

概 要

円筒形水槽内で正四角柱を正弦的に振動させた場合に生じる二次的循環流を実験的に調べた。角柱を辺に平行に振動させた場合、流れ模様は無次元量 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ と s/r_0 によって3つのタイプに分類される。ここで、 r_0 は正方形断面の一辺の長さの1/2、 ω は角振動数、 ν は動粘性係数、 s は振動振幅である。特に、振幅が小さい範囲では、流れ模様は $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ によって決まる。 $r_0\sqrt{\omega/\nu} < 1$ では、流れの場全体は、振動軸に沿って角柱に向かい、振動軸に直角に角柱から遠ざかる対称な4つの循環流によって占められる。 $5 > r_0\sqrt{\omega/\nu} > 1$ の範囲では、角柱の角で剝離が起り、振動軸に平行な辺の上に先端で閉じた双子渦が形成される。 $r_0\sqrt{\omega/\nu} > 5$ では、閉じた形での双子渦はなくなり、各辺の上に互いに逆の回転方向を持った二つの循環流が形成される。さらに $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ が大きくなると、角柱に接した循環流は縮小し、その外側に4つの外部循環流が現われる。角柱に接した循環流の回転中心の位置は、振幅が小さい範囲においては、振幅に依存せず、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ によってのみ決まる。

角柱を対角線方向に振動させた場合、振動軸上の角の前方に双子渦が形成される。

1. 緒 言

静止流体中で物体を正弦振動させた場合、あるいは一定方向に振動している流体中に物体を置いた場合、流体の非線形効果によって、物体のまわりに二次的流れが生じることはよく知られている。Andrade¹⁾ は、Kundt's tube を使い、円柱および球に関する詳細な実験的研究を行ない、物体のまわりに生じる二次の流れは、振動軸に直角に物体に向かい、振動軸に沿って物体から遠ざかる循環流であると報告した。一方、Carrière²⁾ は、振動軸に沿って物体に向かってくる循環流があることを報告した。このように彼らによって報告された循環流は、流れ模様としては似ているけれども、流れの方向が逆であった。Schlichting³⁾ は最初に理論的研究を行ない、円柱まわりに生じる二次流れは、二重構造を持っていることを報告した。つまり、円柱のすぐ外側には、Carrière の報告した型の内部循環流が存在し、その外側には Andrade の報告した流れ方向を持った外部循環流が存在する。その後、円柱に関しては、West⁴⁾、Westervelt⁵⁾、Holtmark et al.⁶⁾、Raney et al.⁷⁾、Skavlem and Tjøtta⁸⁾、Olsen⁹⁾、Bertelsen et al.¹⁰⁾ および Tatsuno^{11, 12)} らによって理論および実験両面の詳細な研究がなされ、

*九州大学助手、応用力学研究所（種子田定俊 紹介）

Schlichting の理論的予言が実証されると同時に、流れの特性がかなり明らかになった。一方、球のまわりに生じる二次流れに関しては、Lane¹³⁾、Wang¹⁴⁾、Riley¹⁵⁾ および 遠藤¹⁶⁾ らによって研究されており、定性的には、円柱の場合に類似した二次的定常流の形成されることが明らかにされている。このように、現在まで報告されているのは、ほとんど円柱および球の場合に限られている。

本研究は、円柱、球と違い、角のある物体が流体中で正弦振動した場合、形成される二次流れのうち、内部循環流はどのような流れ模様となるかを調べる目的で行なわれた。物体として正四角柱を採用し、辺に平行に振動させる場合、および対角線方向に振動させる場合の二つの実験を行なった。

2. 実験方法

写真 1 に実験装置を示す。実験に使用した角柱は、正方形断面の一辺の $1/2$ の長さが 0.104 cm 、 0.202 cm の二種類の鉄製正四角柱であった。長さは、ともに 4.5 cm であった。試験角柱を振動させる装置としては、大型スピーカー ($30\text{ cm}\phi$) を採用した。垂直におかれた角柱は、ジュラルミン製の支持棒を介してスピーカー・コーンに固定されている。この支持棒上には、2 個のピンホールを開けた薄いアルミ箔を張った棒が固定されている。ピンホールの背後に光源、前方にカメラを配置して、フィルムに写ったピンホールの軌跡から振動振幅を測定した。アクリル製の円筒形水槽は、半径 6.1 cm 、深さ 4.1 cm であり、実験にあたっては、角柱の中心軸と円筒形水槽の中心軸とを一致させるよう留意した。角柱の振動運動の一様性は、振動方向にはピンホールの軌跡により、垂直方向については、角柱を振動させる発振器とは独立なストロボスコープによって片揺れなどないことを確めた。写真 2 は角柱の軸に平行な断面を見たものである。写真から明らかなように水面近くおよび角柱の端付近を除いて、流れは十分二次元性が満足されているので、流体運動観察は、角柱の正弦運動と同期させたストロボスコープによって、写真に点線で示したように、角柱の中央よりやや下方の水平な面を照射し、水槽の下方から上向きに置いたカメラによって行なった。流れの可視化の方法はアルミ粉末法による。液体としては、水とグリセリンとを混合し、 0.0097 から $5.25\text{ cm}^2/\text{s}$ までの範囲で動粘性係数をいろいろ変えた。測定にあたっては、温度差による対流の影響をできるだけ抑さえ、また振動運動開始後定常流が

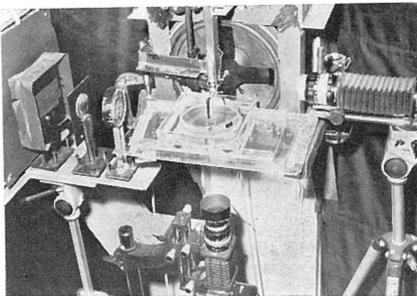


写真 1 実験装置

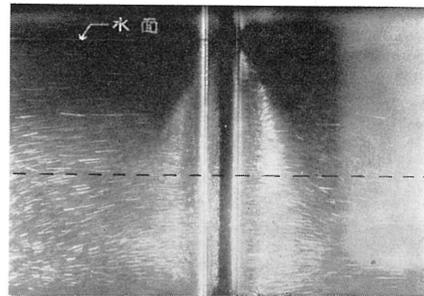


写真 2 角柱の中心軸に平行な断面の写真
 $r_0=0.202\text{ cm}$, $f=47.8\text{ Hz}$,
 $r_0v/\omega/\nu=11.1$, 露光時間 $t_e=10\text{ s}$.

得られるまで十分時間をおくよう注意した。

3. 実験結果

3.1. 辺に平行に振動させた場合

一般に、角柱近傍の流れ模様は、 r_0 , ω , s , ν および R_0 という物理量によって特徴づけられる。ここで、 r_0 は正四角柱断面の一辺の長さの1/2、 ω は角振動数、 s は振幅、 ν は動粘性係数および R_0 は円筒形水槽の半径である。これらの物理量の間の次元解析を行うと、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$, s/r_0 および R_0/r_0 という3つの独立な無次元量が得られる。ところで、辰野等の研究によって、 $R_0/r_0 > 8$ では流れ模様は R_0/r_0 によらないということが明らかにされている。本研究の場合、二種類の角柱について R_0/r_0 の値はそれぞれ58.7 および30.2であるので、結局、流れ模様は2つの無次元量 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$, s/r_0 によって特徴づけられる。多くのデータを検討した結果、流れ模様は3つのタイプに大別されることがわかった。 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ および s/r_0 による流れ模様の分類を図1に示す。

写真3, 4は、無次元量 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ の非常に小さい場合に生じる定常的な循環流の写真であり、図1の分類におけるタイプIに該当するものである。写真は、角柱の運動と同期させたストロボスコープに

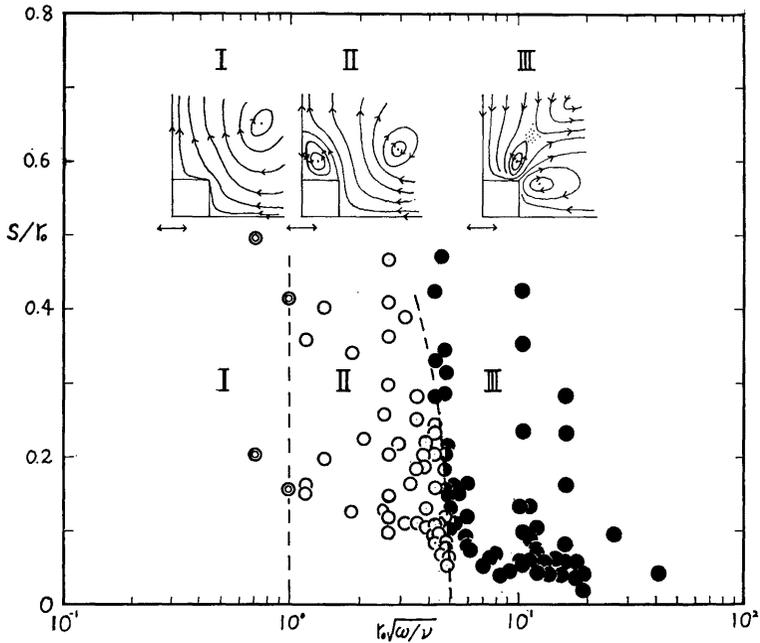


図1 流れ模様の分類

よって、運動のほぼ中央で光学的に停止させて撮影したものである。写真中、 \leftrightarrow は角柱の振動方向を、 \rightarrow は流れの方向を示す。写真3, 4 から明らかなように、物体の正弦的な運動に対し、流体は非線型効果によって、定常的な循環流を形成する。流れは、振動軸に沿って角柱に向かい、振動軸に直角に角

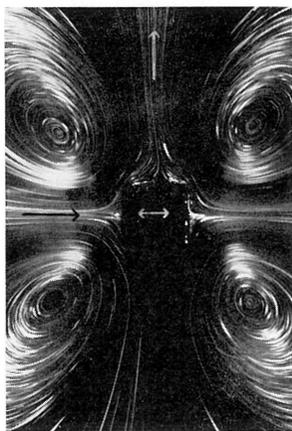


写真 3 $r_{0v}\sqrt{\omega/\nu}=0.705$ での流れ模様
 $r_0=0.202\text{cm}$, $f=10.2\text{Hz}$,
 $\nu=5.25\text{cm}^2/\text{s}$, $s=0.100\text{cm}$,
 $s/r_0=0.495$, $t_e=120\text{s}$.

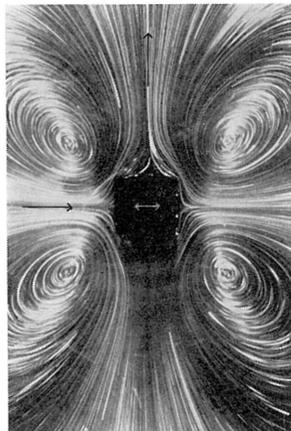


写真 4 $r_{0v}\sqrt{\omega/\nu}=0.978$ での流れ模様
 $r_0=0.202\text{cm}$, $f=19.6\text{Hz}$,
 $\nu=5.25\text{cm}^2/\text{s}$, $s=0.0316\text{cm}$,
 $s/r_0=0.156$, $t_e=120\text{s}$.

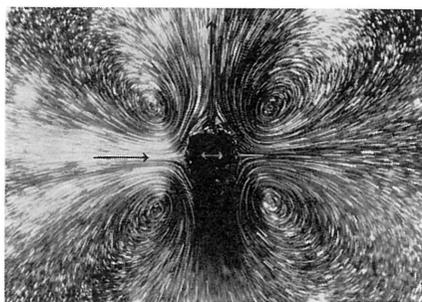


写真 5 $r_{0v}\sqrt{\omega/\nu}=1.17$ での流れ模様
 $r_0=0.202\text{cm}$, $f=17.5\text{Hz}$,
 $\nu=3.28\text{cm}^2/\text{s}$, $s=0.0302\text{cm}$,
 $s/r_0=0.150$, $t_e=20\text{s}$.

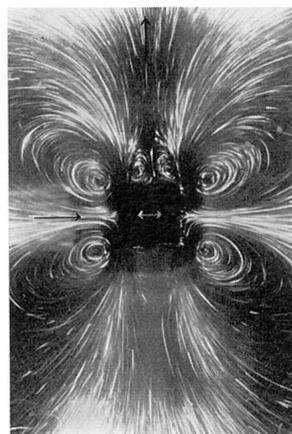


写真 6 $r_{0v}\sqrt{\omega/\nu}=2.55$ での流れ模様
 $r_0=0.202\text{cm}$, $f=12.8\text{Hz}$,
 $\nu=0.51\text{cm}^2/\text{s}$, $s=0.0258\text{cm}$,
 $s/r_0=0.128$, $t_e=180\text{s}$.

柱から遠ざかる循環流であり、振動軸および振動軸に直角な軸に対して対称である。また写真 3, 4 においては、角柱の辺に沿って流体は運動し、剥離は起っておらず、実験した境界条件 $R_0/r_0 = 30.2$ の範囲内では、流れの場全体を 4 個の対称な循環流のみで占める。写真 5 は、 $r_{0v}\sqrt{\omega/\nu} = 1.17$ の場合の流れ模様である。写真 3, 4 の場合と異なり、流れは、角柱の角で剥離を起し、振動軸に平行な辺の上に小さな bubble を生じている。こうした現象は、写真 6 によってさらに明瞭になる。ここで、 $r_{0v}\sqrt{\omega/\nu} = 2.55$ である。振動軸に平行な辺の上に先端で閉じた形の一对の双子渦が形成されている。しかし、この双子渦の領域を除いた流れの場は、写真 3, 4, 5 と同様の循環流によって占められている。写真 7

は、 $r_0\sqrt{\omega/\nu} = 4.48$ の場合の流れ模様を示している。これらが図1に示したタイプIIの流れである。こうした剝離に基づく双子渦が存在する範囲は図1に示したとおりである。特に $s/r_0 < 0.15$ の場合、 $1 < r_0\sqrt{\omega/\nu} < 5$ の範囲で現われる。双子渦の大きさは、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ の値あるいは振動振幅の増大に伴って大きくなる。この様子を図2に示す。

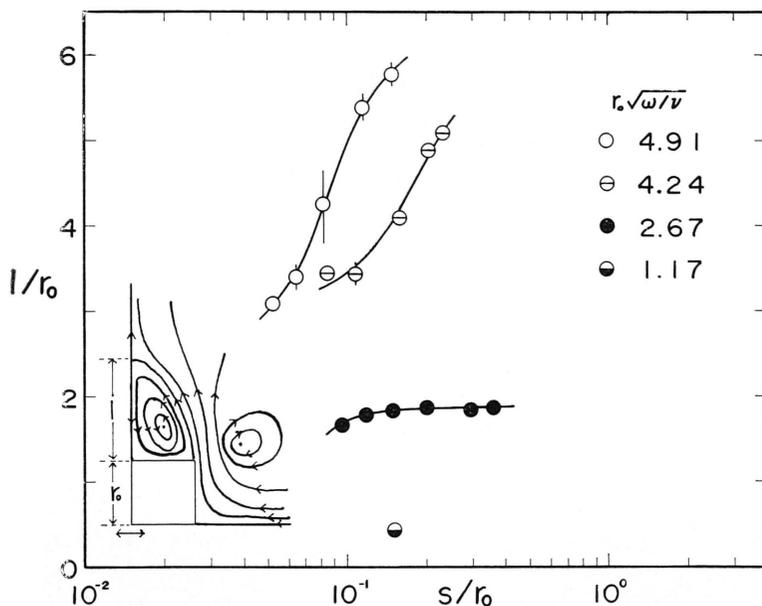


図 2 l/r_0 と s/r_0 との関係

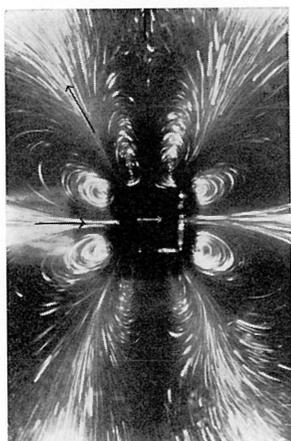


写真 7 $r_0\sqrt{\omega/\nu} = 4.48$ での流れ模様
 $r_0 = 0.202$ cm, $f = 39.9$ Hz,
 $\nu = 0.51$ cm²/s, $s = 0.0195$ cm,
 $s/r_0 = 0.0965$, $t_e = 60$ s.

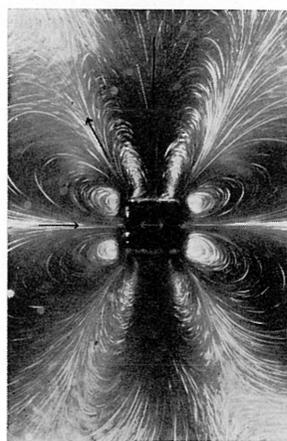


写真 8 $r_0\sqrt{\omega/\nu} = 5.47$ での流れ模様
 $r_0 = 0.202$ cm, $f = 39.9$ Hz,
 $\nu = 0.342$ cm²/s, $s = 0.0305$ cm,
 $s/r_0 = 0.151$, $t_e = 120$ s.

写真 8 は $r_{0v}/\omega/\nu = 5.47$ の場合の流れ模様であり、流れの場を 8 個の循環流が占めているのがわかる。これが、タイプ III の流れ模様である。流れは、写真で明らかなように、角柱の各辺の中心に向か

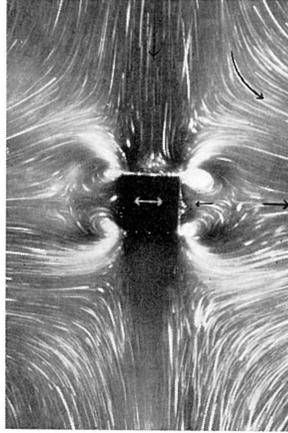
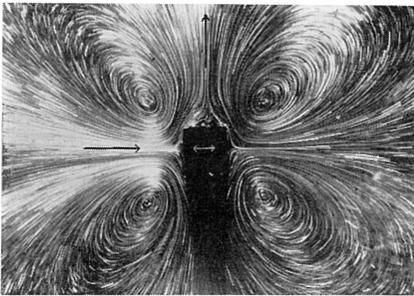
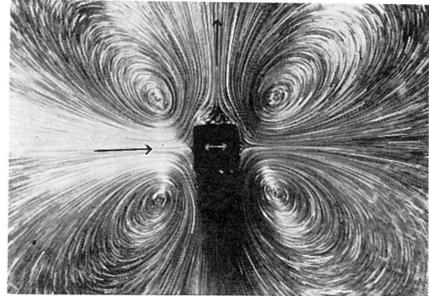


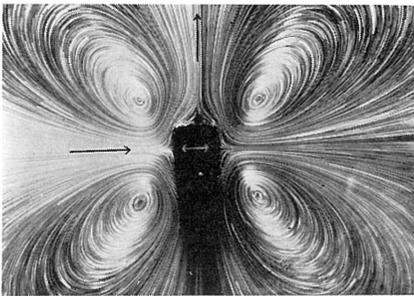
写真 9 $r_{0v}/\omega/\nu = 19.1$ での流れ模様
 $r_0 = 0.202$ cm, $f = 80.1$ Hz, $\nu = 0.056$ cm²/s,
 $s = 0.00803$ cm, $s/r_0 = 0.0399$, $t_e = 30$ s.



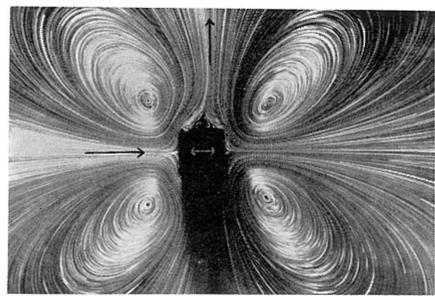
(a) $s/r_0 = 0.150$, $t_e = 60$ s.



(b) $s/r_0 = 0.162$, $t_e = 60$ s.



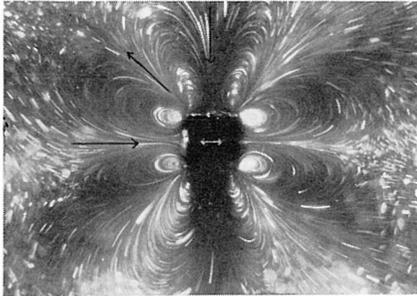
(c) $s/r_0 = 0.358$, $t_e = 30$ s.



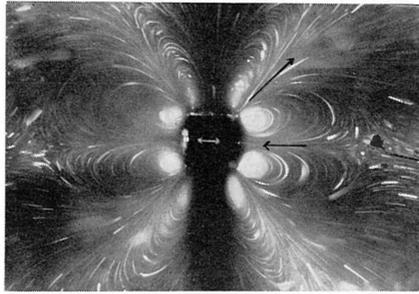
(d) $s/r_0 = 0.589$, $t_e = 30$ s.

写真 10 $r_{0v}/\omega/\nu = 1.17$ での流れ模様の変化
 $r_0 = 0.202$ cm, $f = 17.5$ Hz, $\nu = 3.28$ cm²/s.

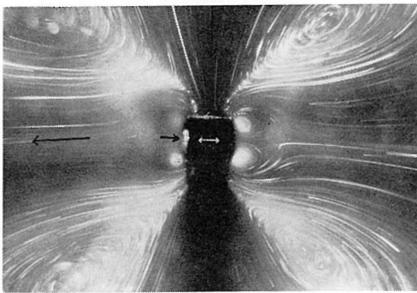
い、角柱の角から対角線の方へと遠ざかる。各辺の上の一对の循環流は、対称であるが流れ方向は逆である。このように、角柱のまわりに形成される内部循環流は、各象限に1個の内部循環流を持っている円柱および球の場合と異なり、極めて複雑である。 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ がさらに大きくなると、角柱の各辺に接した内部循環流は縮小し、その外側に外部循環流が明瞭に見られるようになる。こうした流れの例を



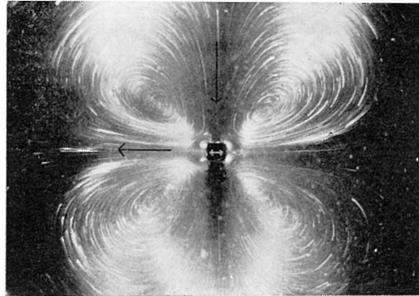
(a) $s/r_0=0.0752, t_e=10 \text{ s.}$



(b) $s/r_0=0.116, t_e=10 \text{ s.}$



(c) $s/r_0=0.220, t_e=10 \text{ s.}$



(d) $s/r_0=0.263, t_e=10 \text{ s.}$

写真 11 $r_0\sqrt{\omega/\nu}=11.9$ での流れ模様の変化
 $r_0=0.202\text{cm}, f=80.0 \text{ Hz}, \nu=0.145 \text{ cm}^2/\text{s.}$

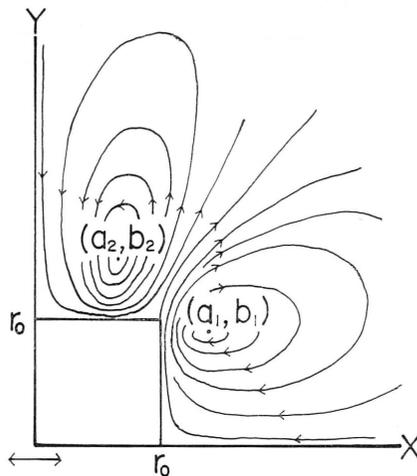


図 3 内部循環流の中心位置の定義

写真 9 に示している。

写真 10, 11 の一連の写真は、振幅増大に伴う流れ模様の変化を示したものである。振幅が増大すると、循環流の速度が増大していくが、写真 10 で明らかなように、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ が小さい場合は、流れ模様の変化はゆっくりしている。しかし、写真 11 のように $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ の大きな場合は、振幅増大に伴う流れ模様の変化は激しく、振幅が増大するにつれて、角柱の各辺に接した内部循環流は縮小し、外部循環流が大きくなる。こうした振幅増大に伴う流れ模様の変化の様子は、円柱の場合と同様である。

ここで、内部循環流の回転中心の位置を測定した。流れは、振動軸およびこれに直角な軸に対して対称であるので、これらの回転中心の位置を図 3 のように定義する。図 4, 5 は、それぞれ $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ をパラメーターとして、 a_1/r_0 , b_1/r_0 の値を s/r_0 に対してプロットしたものである。同様に、図 6, 7 は、それぞれ a_2/r_0 , b_2/r_0 と s/r_0 との関係を示したものである。これらの測定結果から明らかなように、内部循環流の回転中心の位置は、ある程度の振幅増大に対して不変であり、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ のみによって決まることがわかる。図 8 は、回転中心の位置が振幅によらない範囲内で、 a_1/r_0 , b_1/r_0 と $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ との関係を示したものである。この図から明らかなように、 a_1/r_0 の値は、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ の増大に伴って、単調に減少している。しかし、 b_1/r_0 の値は、 $7 < r_0\sqrt{\omega/\nu} < 10$ の間に極小値を持っている。同様に図 9 は、 a_2/r_0 , b_2/r_0 を $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ に対してプロットしたものである。 a_2/r_0 の値が、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ の増大に対して、単調に増大していくのに対して、 b_2/r_0 の値は、1.4 から 1.8 の間にばらついていて大きな

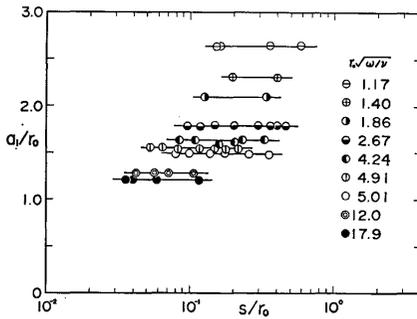


図 4 a_1/r_0 と s/r_0 との関係

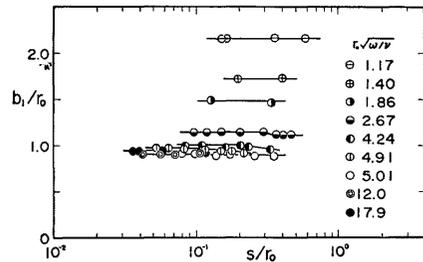


図 5 b_1/r_0 と s/r_0 との関係

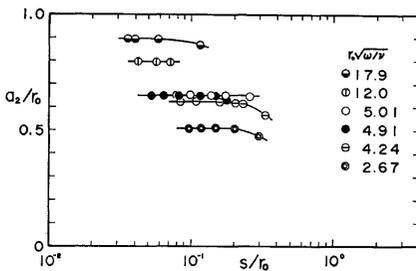


図 6 a_2/r_0 と s/r_0 との関係

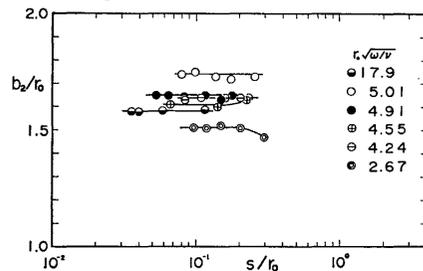


図 7 b_2/r_0 と s/r_0 との関係

変化はない。図10は、 a_1/r_0 対 b_1/r_0 、 a_2/r_0 対 b_2/r_0 の関係を示したものである。この場合、パラメータは $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ である。図には、角柱の 1/4 およびその振動方向が示してある。 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ が增大するにつれて、各回転中心は \rightarrow で示した方向へと移動する。

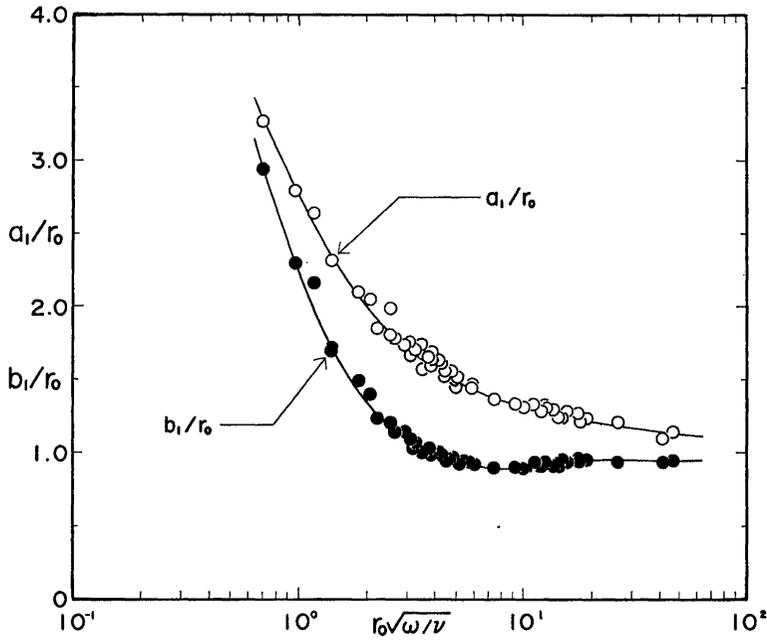


図 8 a_1/r_0 , b_1/r_0 と $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ との関係

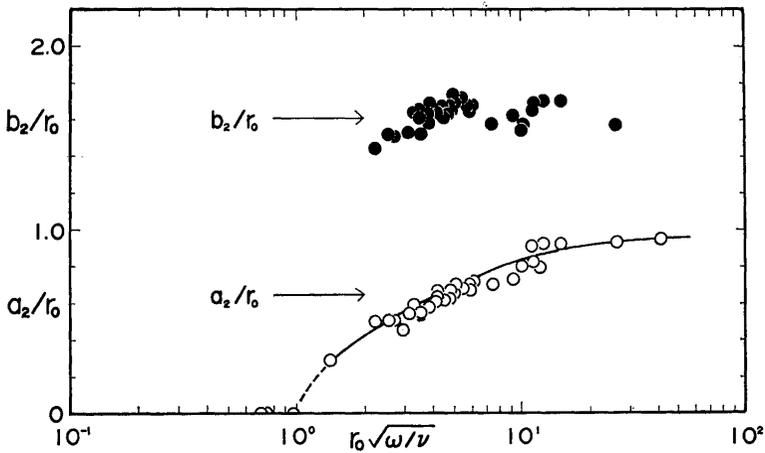


図 9 a_2/r_0 , b_2/r_0 と $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ との関係

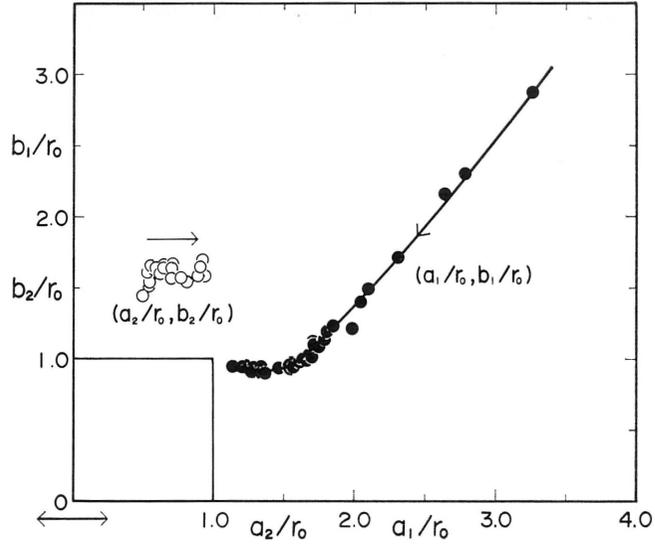
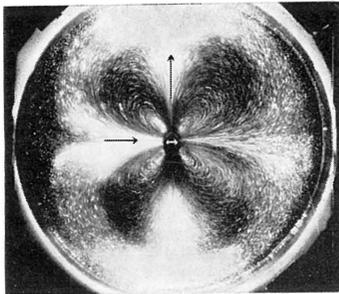


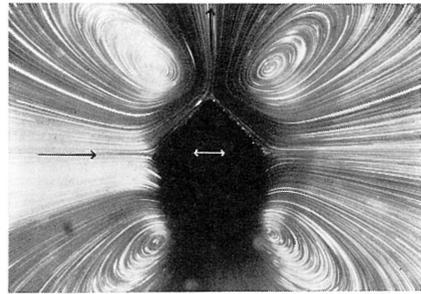
図 10 $a_1/r_0-b_1/r_0$ および $a_2/r_0-b_2/r_0$ の関係

3.2. 対角線方向に振動させた場合

写真12は、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}=1.77$ の場合に生じる循環流である。12(a) は流れ場全体の写真であり、12(b) は、角柱近傍の拡大写真である。このように、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ が小さい場合、振動軸に沿って角柱に向かい、振動軸に直角に角柱の角から遠ざかる循環流が流れ場全体を占めている。写真13は、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}=5.41$ の場合の流れであるが、振動軸に沿って、角柱に向かってきた流れが、角柱の角の近傍で、左右に少しふくらんでいるのがわかる。これは、角柱の角の正弦的な振動運動に対し、流体が非線型的な対応をなしたものである。この現象は、写真14によってより明瞭になる。この場合、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}=10.4$ であり、



(a) $t_e=30$ s.



(b) $t_e=60$ s.

写真 12 $r_0\sqrt{\omega/\nu}=1.77$ での流れ模様
 $r_0=0.202$ cm, $f=29.4$ Hz, $\nu=2.40$ cm²/s,
 $s=0.0323$ cm, $s/r_0=0.160$.

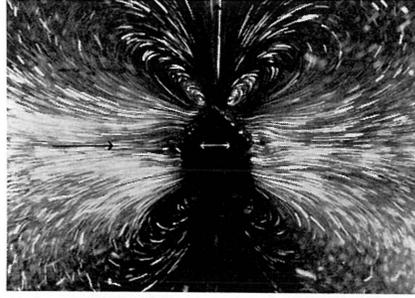
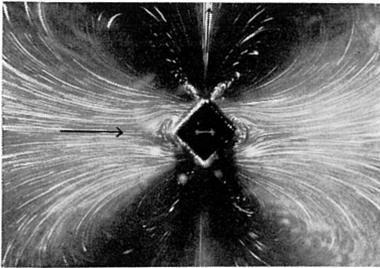
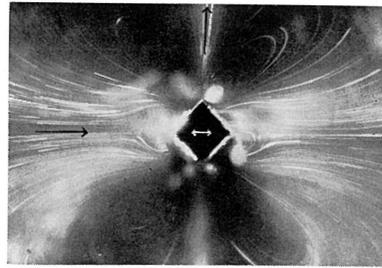


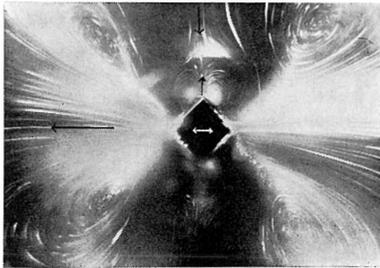
写真 13 $r_0\sqrt{\omega/\nu}=5.41$ での流れ模様
 $r_0=0.202$ cm, $f=69.8$ Hz, $\nu=0.610$ cm²/s,
 $s=0.00936$ cm, $s/r_0=0.0463$, $t_e=30$ s.



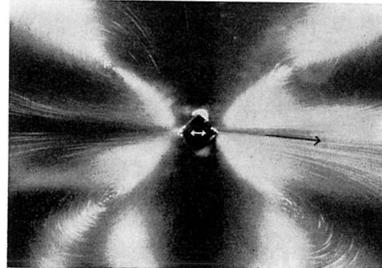
(a) $s/r_0=0.0584$, $t_e=60$ s.



(b) $s/r_0=0.171$, $t_e=15$ s.



(c) $s/r_0=0.231$, $t_e=15$ s.



(d) $s/r_0=0.381$, $t_e=10$ s.

写真 14 $r_0\sqrt{\omega/\nu}=10.4$ での流れ模様の変化
 $r_0=0.202$ cm, $f=93.5$ Hz, $\nu=0.221$ cm²/s.

明らかに、振動軸上の角の前方に、一対の渦が生じている。このように、角柱を対角線方向に振動させた場合、辺に平行に振動させた場合と異なり、振動軸上に渦対が形成される。写真 14 の一連の写真は、振幅を増大していった場合の流れ模様の移り変わりを示したものである。振幅が増大するにつれて、振動軸上の角のまわりに形成された渦対は大きくなっていく。振幅がある臨界値に達すると、振動軸に沿って角柱に向かい、振動軸に直角に角柱から遠ざかるいわゆる内部循環流は縮小し、かわりに、振動軸に沿って、角柱から遠ざかる外部循環流が流れ場の大勢を占めるようになる。こうした流れは、写真 14 (c) で見る事ができる。写真 14 (c) では、振動軸に直角な軸上の角のまわりに一対の渦が形成されている。これは、写真 14 (b) まで、流れ場を占めていた内部循環流の縮小したものである。さらに振幅が

増大すると、内部循環流はさらに縮小し、外部循環流が流れ場のほとんどを占めるようになる。

4. 結 言

静止流体中で、正四角柱を正弦的に振動させた場合、角柱のまわりに定常的な循環流が形成される。角柱を辺に平行な方向に振動させた場合、内部循環流は、3つのタイプの流れ模様に分類されることが明らかになった。特に、振幅が小さい範囲では、この分類は $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ のみによってなされる。つまり、 $r_0\sqrt{\omega/\nu} < 1$ では、流れ場を4個の内部循環流が占める。 $1 < r_0\sqrt{\omega/\nu} < 5$ の範囲では、角柱の角で剝離が起り、双子渦が形成される。 $r_0\sqrt{\omega/\nu} > 5$ では、内部循環流は、8個の循環流からなる。また循環流の回転中心の位置は、振幅が小さい範囲内では、振幅によらず、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ によって決まる。

角柱を対角線方向に振動させた場合、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ が大きくなると、振動軸上の角のまわりに渦対が生じる。

おわりに、この研究に多大の関心を示され、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御礼申し上げます。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) Andrade, E.N. DA C., On the circulations caused by the vibration of air in a tube, Proc. Roy. Soc. L., Ser. A, 134, 1931, p.445.
- 2) Carrière, M. Z., Analyse ultramicroscopique des vibrations aèriennes, J. Phys. et radium, 10, 1929, p. 198.
- 3) Schlichting, H., Berechnung ebener periodischer Grenzsichtströmungen, Phys. Z., 33, 1932, p. 327.
- 4) West, G. D., Circulations occurring in acoustic phenomena, Proc. Phys. Soc., Ser. B, 64, 1951, p. 483.
- 5) Westervelt, P. J., Acoustic streaming near a small obstacle, J. Acoust. Soc. Am., 25, 1953, p. 1123.
- 6) Holtsmark, J., Johnsen, I., Sikkeland, T. and Skavlem, S., Boundary layer flow near a cylindrical obstacle in an oscillating, incompressible fluid, J. Acoust. Soc. Am., 26, 1954, p. 26.
- 7) Raney, W. P., Corelli, J. C. and Westervelt, P. J., Acoustical streaming in the vicinity of a cylinder, J. Acoust. Soc. Am., 26, 1954, p. 1006.
- 8) Skavlem, S. and Tjøtta, S., Steady rotational flow of an incompressible, viscous fluid enclosed between two coaxial cylinders, J. Acoust. Soc. Am., 27, 1955, p. 26.
- 9) Olsen, T., Rotational flow of a viscous fluid, J. Acoust. Soc. Am., 28, 1956, p. 313.
- 10) Bertelsen, A., Svardal, A. and Tjøtta, S., Nonlinear streaming effects associated with oscillating cylinders, J. Fluid Mech., 59, 1973, p. 493.
- 11) 辰野正和, 振動円柱による二次流れ, 応用力学研究所報, 38号, 昭和47年, p. 1.
- 12) Tatsuno, M., Circulatory streaming around an oscillating circular cylinder at low Reynolds numbers, J. Phys. Soc. Japan, 35, 1973, p. 915.
- 13) Lane, C.A., Acoustical streaming in the vicinity of a sphere, J. Acoust. Soc. Am., 27, 1955, p. 1082.
- 14) Wang, C.Y., The flow field induced by an oscillating sphere, J. Sound Vib., 2, 1965, p. 257.
- 15) Riley, N., On a sphere oscillating in a viscous fluid, Quart. J. Mech. and Applied Math., 19, 1966, p. 461.
- 16) 遠藤一夫, 平野晴望, 液中で振動する球, 円板近傍における流れの挙動, 粉体工学研究会誌, 7, 1970, p. 346.

(昭和48年10月23日 受理)