

振動円柱による二次流れ

辰野, 正和
九州大学応用力学研究所 : 助手

<https://doi.org/10.15017/4743486>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 38, pp.1-9, 1972-08. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



振動円柱による二次流れ†

辰 野 正 和*

概 要

静止流体中で物体を振動させると、そ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。ここでは、振動物体として円柱を選び、そのまわりに生じる外部循環流の振動振幅に対する依存性を実験的に調べた。外部境界として円筒を選び、円筒半径と円柱半径との比を 19.1 と固定した。

実験結果によると、振動振幅が増大するにつれて、外部循環流の中心は、円柱から遠ざかり、振動軸に接近するように移動する。円柱半径、振動数、動粘性係数によって構成される無次元量 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ が大きい程、小さな振幅変化に対しても、この移動の程度は大きい。なお、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ が非常に小さい場合において、振幅が小さい範囲内では、円柱の振動軸に沿って円柱に向い、振動軸に直角に円柱から遠ざかる循環流のみが流れの場を占める場合が観察された。

1. 緒 言

静止流体中で物体が正弦的に振動運動する場合、または、一定方向に振動運動する流体中に物体がおかれた場合に、物体近傍には周期性のない一定方向の流れが生じる。こうした振動運動による二次の流れを acoustic streaming と呼び、古くから多くの研究がなされている。Andrade¹⁾ は Kundt's tube を使い詳細な実験的研究をしている。一方、Schlichting²⁾ は無限平板が面内で単振動する場合のストークス問題に対する解を円柱に適用するという方法で理論的研究を最初に行なった。その後、Westervelt^{5),7)}, Ingard⁴⁾, Skavlem^{6),8)}, Holtsmark⁶⁾ などによって理論および実験両面の研究がなされた。それらの報告によると、円柱近傍には、円柱振動軸に沿って円柱に向い、振動軸に直角に円柱から遠ざかる、いわゆる DC boundary layer と呼ばれる定常な内部循環流が存在し、その外側には逆向きの流れが生じる。しかし、これらの報告は、振幅が小さい場合であって、ほとんど内部循環流の研究で占められている。

本実験は、外部境界を指定して、振動振幅を増大させていった場合、流れの場、特に外部循環流が振幅にいかに関係しているかを調べることを目的として行なわれた。

2. 実験方法

写真1に実験装置の写真、図1にその概略図を示す。垂直におかれた振動円柱③は半径 0.131 cm、長さ 7.6 cm の鉄棒であり、図に見るように水平な支持棒を介して振動装置であるスピーカー①のコー

* 九州大学助手、応用力学研究所（種子田定俊紹介）

† 日本物理学会春の分科会（1972年4月5日）において講演

ン②に固定されている。使用したスピーカーはパイオニア製の 30 cm 低音用スピーカーであり、前面が垂直になるように鉄アングル製の枠にはめ込み、定盤上に固定している。④はアクリル製円筒形水槽で、内径 5.0 cm、深さ 6 cm である。実験にあたっては、円柱の中心軸と円筒水槽の中心軸とを一致させるように留意した。

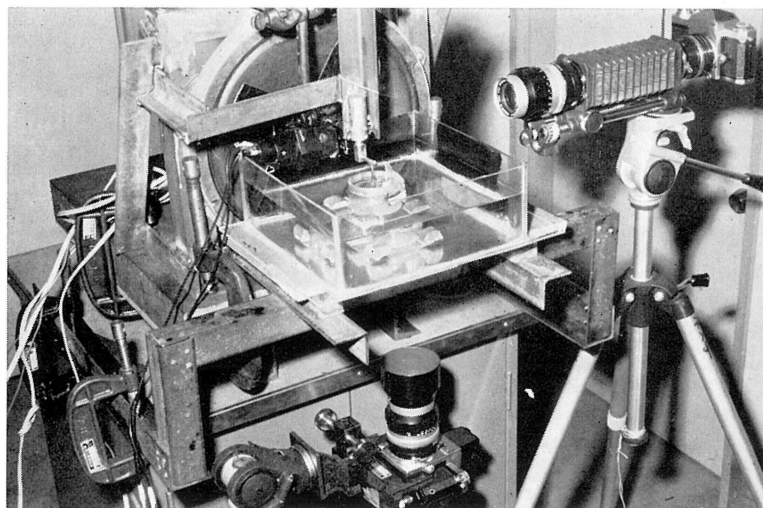


写真 1 実 験 装 置

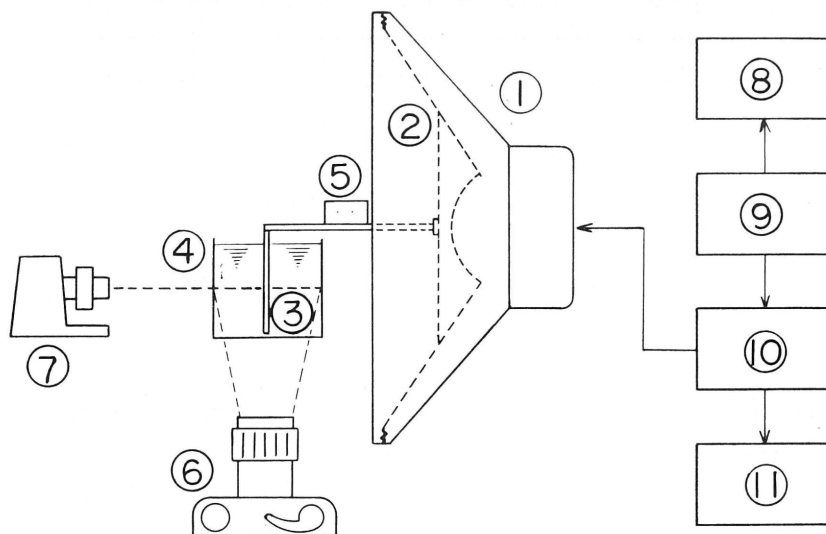


図 1 実 験 方 法 概 略 図

- ①低音用スピーカー ②スピーカー・コーン ③振動円柱
 ④円筒形水槽 ⑤ピンホールのあるアルミ箔 ⑥カメラ
 ⑦プロジェクター ⑧周波数カウンター ⑨低周波発振器
 ⑩交流増幅器 ⑪ブラウン管オシロスコープ

円柱の振動振幅は、図1に示すように、円柱とスピーカーを結ぶ支持棒上に2個のピンホールをあけた薄いアルミ箔を張った枠⑤を固定させて直接測定を行なった。ピンホールの後方に光源、前方にカメラを置き、往復運動するピンホールの軌跡を測定することによって円柱の振幅が求められる。

円柱の振動数としては、発振器⑨からの出力を周波数カウンター⑥で読みとった値を採用した。実験を行なった振動数の範囲は28~61 c/sであった。

円柱の振動運動の一様性は、振動軸方向にはピンホールの軌跡により、垂直方向については、円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。

⑦は流れ模様観察のための光源であって、その前面にスリットを備えており、水槽中央部の水平面のみを照射する。⑧は流れ模様撮影のためのカメラであり、水槽の下方に上向きに配置されている。撮影のための露光時間は1~40秒であった。流れの可視化の方法はアルミ粉末法によった。

液体としては、水とグリセリンを適当に混合して、0.01から0.49 cm²/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、振動運動開始後定常流が得られるまで十分時間をおくよう注意した。特に、振動数、振幅が共に小さい場合には、数十分間運動を継続させた後測定するようにした。

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。

r_0 : 円柱の半径 [cm]

f : 円柱の振動数 [c/s]

$\omega : 2\pi f$ [c/s]

a : 円柱の振動振幅 [cm]

ν : 動粘性係数 [cm²/s]

r : 外部循環流中心の円柱中心からの距離 [cm]

θ : 外部循環流中心と円柱中心とを結ぶ軸が振動軸に対して張る角度

R_0 : 水槽の内側半径 [cm]

t : 写真撮影のための露光時間 [sec]

外部循環流の流れ模様の振動数および振幅による変化を調べるために、外部循環流の中心の位置の移動を測定した。上に定義した r , θ は、次のような物理量によって関係づけられる。 $r = F_1(r_0, \omega, a, \nu, R_0)$, $\theta = G_1(r_0, \omega, a, \nu, R_0)$ 。これらの関係は、それぞれ4個の独立な無次元量の間の関係として表わせる。 $r/r_0 = F_2(a/r_0, r_0\sqrt{\omega/\nu}; R_0/r_0)$, $\theta = G_2(a/r_0, r_0\sqrt{\omega/\nu}; R_0/r_0)$ 。本実験においては R_0/r_0 を一定の値に固定し、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ をパラメーターとして、 r/r_0 および θ と a/r_0 との関係調べた。

写真2は、 $r_0\sqrt{\omega/\nu} = 3.60$ の場合の流れ模様である。写真の中央に見えるのが円柱の断面であり、いずれも横方向の軸内で振動運動している。(1)~(3)は、振動軸に沿って円柱に向い、振動軸に直角に円柱から遠ざかる流れが現われている場合である。写真から明らかなように、各象限には1つの循環流しか存在しない。また、振幅が増大していても、循環流の中心は円柱の極く近傍の、振動軸から45°の

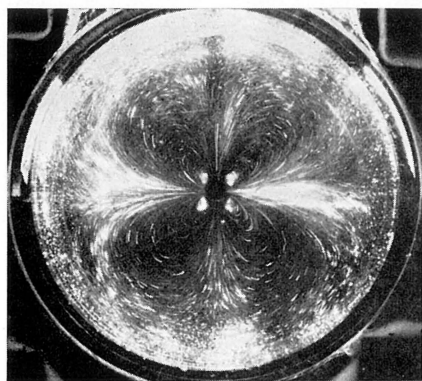
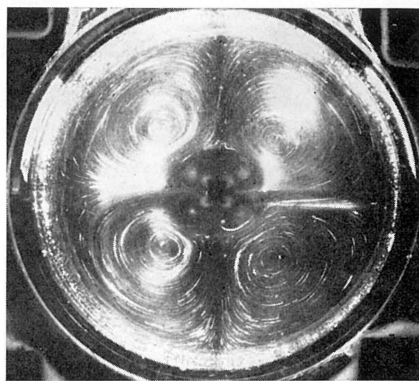
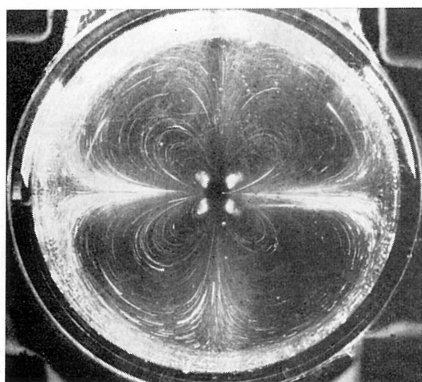
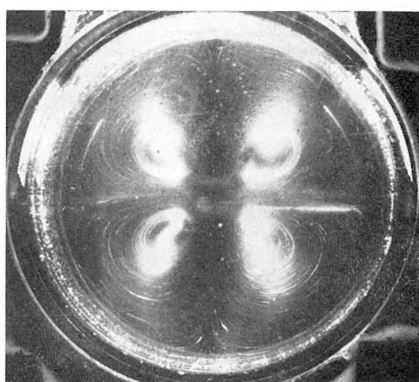
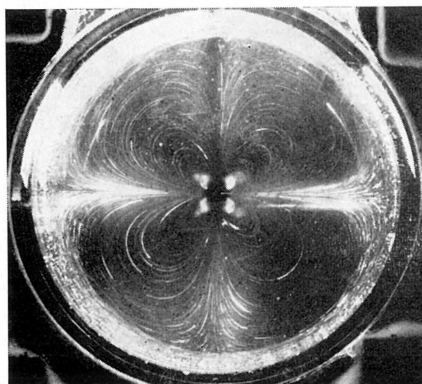
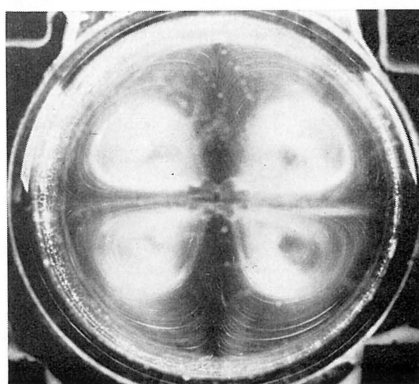
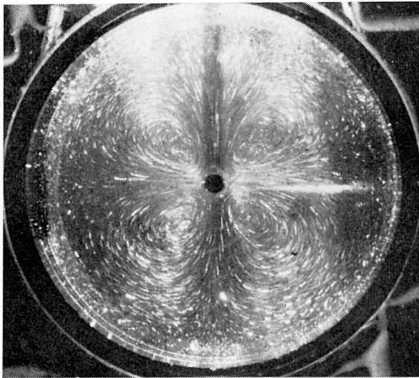
(1) $a/r_0=0.155$, $t=20\text{s}$ (4) $a/r_0=0.927$, $t=20\text{s}$ (2) $a/r_0=0.403$, $t=20\text{s}$ (5) $a/r_0=1.45$, $t=10\text{s}$ (3) $a/r_0=0.541$, $t=20\text{s}$ (6) $a/r_0=2.30$, $t=3\text{s}$

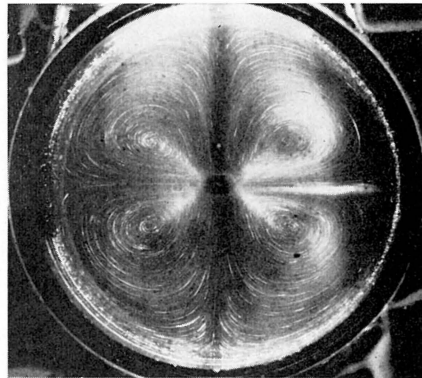
写真 2 $r_0\sqrt{\omega/\nu}=3.60$ での流れ模様
 $r_0=0.131\text{cm}$, $R_0=2.5\text{cm}$, $f=59.6\text{ c/s}$, $\nu=0.49\text{cm}^2/\text{s}$

線上にあってほとんど移動しないようである。(4)はさらに振幅を増大した場合であり、一象限内にそれぞれ回転方向が逆の2つの循環流が現われる。つまり、円柱近傍には、振動軸に沿って円柱に向い、振動軸に直角に円柱から遠ざかる内部循環流が存在する。これが、いわゆる DC boundary layer と呼ばれるものである。その外側には、逆向きの回転方向を持った外部循環流が現われる。(3)のような流れ場から(4)の流れ場への遷移は不連続的な現象のようである。さらに振幅を大きくしていくと、(5)、(6)のように、内部循環流は縮小し、流れ場のほとんどを外部循環流が占めるようになる。この外部循環流は、もし外部境界が存在しなかったならば、振動軸に沿って無限遠に流れ去り、直角方向無限遠から流れ込んで来るはずであるが、今の場合外部境界が存在するため定常流が得られる。振動振幅が大きくなるにつれて、外部循環流の中心は円柱から遠ざかり、振動軸に近づくように移動する。

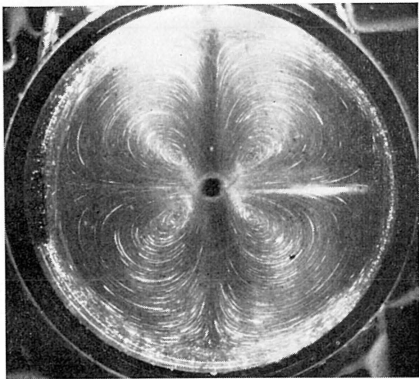
写真3は、 $r_0/\sqrt{\omega/\nu}=8.91$ の場合の流れ模様の移り変りである。 $r_0/\sqrt{\omega/\nu}$ が大きくなると、写真2の(1)~(3)に見るような振動軸に沿って円柱に向かってくる流れは見ることができなかった。これは、装置



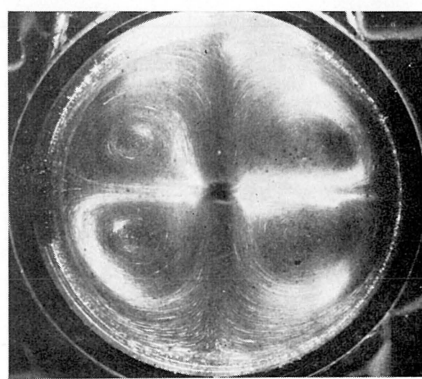
(1) $a/r_0=0.155$, $t=10s$



(3) $a/r_0=0.679$, $t=10s$



(2) $a/r_0=0.418$, $t=10s$



(4) $a/r_0=0.935$, $t=10s$

写真3 $r_0/\sqrt{\omega/\nu}=8.91$ での流れ模様

$r_0=0.131cm$, $R_0=2.5cm$, $f=60.8c/s$, $\nu=0.082cm^2/s$

も含めて実験方法に原因があったのか、あるいは本質的なものなのか明らかでない。写真では、外部循環流が流れの場のほとんど全てを占めていて内部循環流は見る事ができない。この場合も、振幅を増していくと、振動軸に沿って円柱近傍から出ていく流れの速度は大きくなり、それにつれて、循環流の中心は円柱から遠くへ離れ、振動軸に接近するように移動する。この間の二次元性は極めて安定に保たれる。

図2に振幅増大にともなう流れ模様の変化をまとめて示す。(a)は $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ が小さい場合に明瞭に見られた流れであり、振幅増大とともに、流れ模様は(b)→(c)→(d)と移り変わる。ところが、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ が大きな値の場合、(b)の流れに先行して(a)の流れが存在するのかどうかは、今回の実験では明らかにできなかった。

図3は、いろいろな $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ に関して、 r/r_0 と a/r_0 との関係を測定した結果である。●、○は $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ の値が小さな場合であり、写真2に示すように、外部循環流に比べ無視できない程の内部循環流が存在する。振幅の増大とともに内部循環流は縮小し、同時に外部循環流の中心も円柱に近づいていく。しかし、内部循環流が縮小し、ほとんど見えなくなってしまうと、振幅の増大と共に外部循環流の中心は逆に円柱から離れていく。●から○までは、計測の初期から外部循環流が流れの場をほとんど

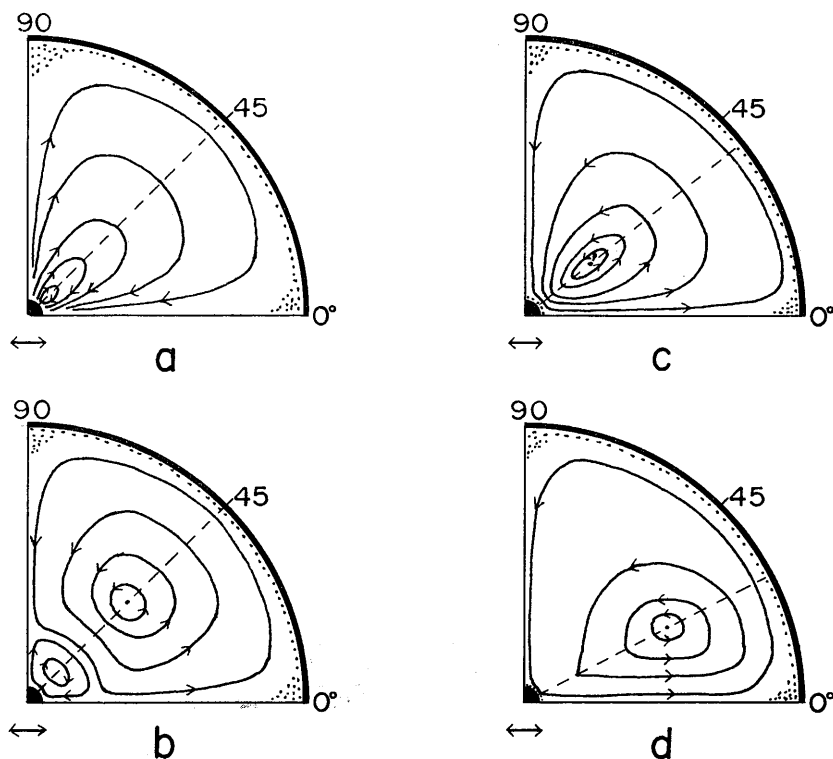


図 2 振幅増大に伴う流れ模様の変化
↔は振動方向を示す。

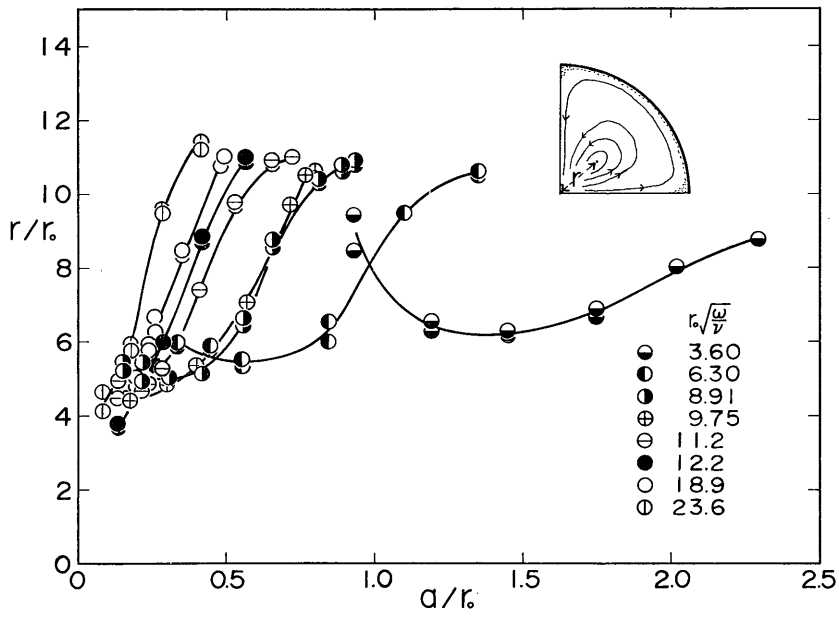


図 3 r/r_0 と a/r_0 と の 関 係

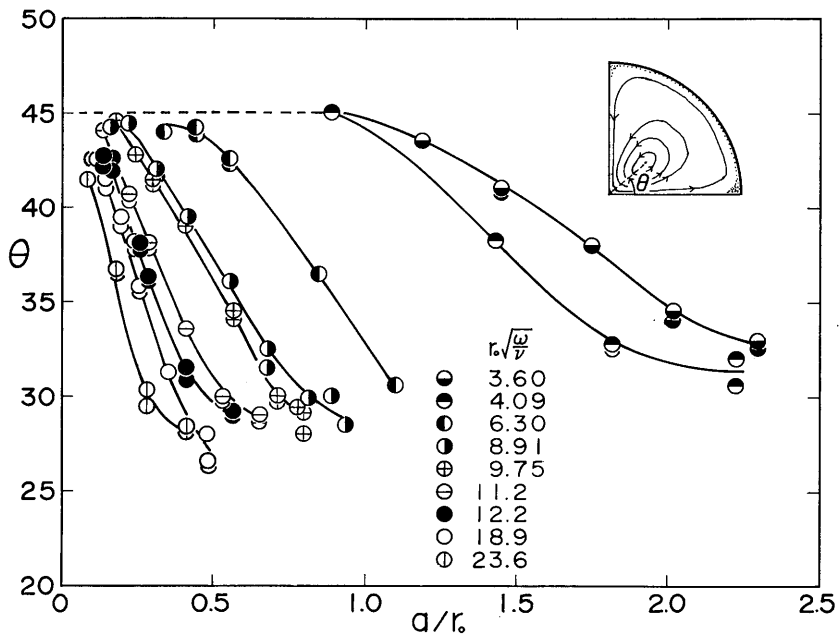


図 4 θ と a/r_0 と の 関 係

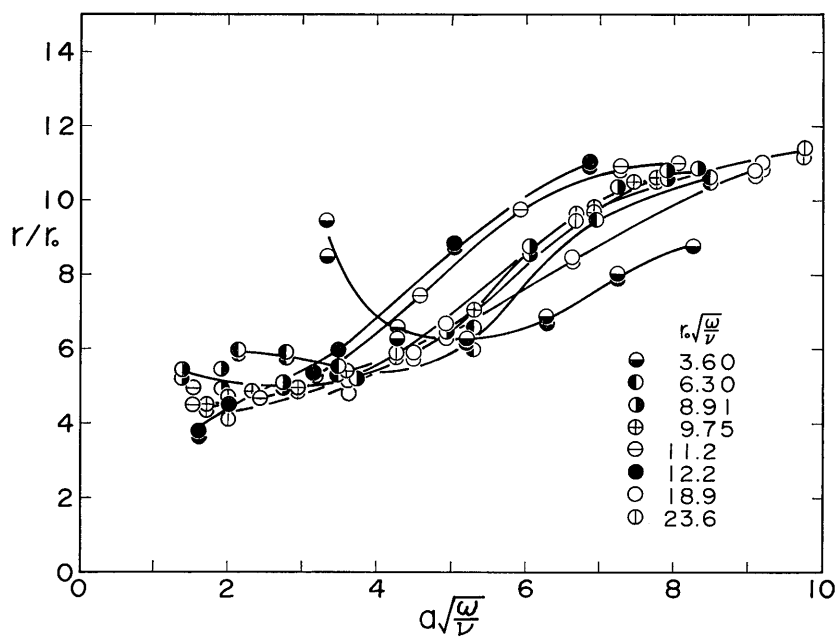


図 5 r/r_0 と $a\sqrt{\omega/\nu}$ と の 関 係

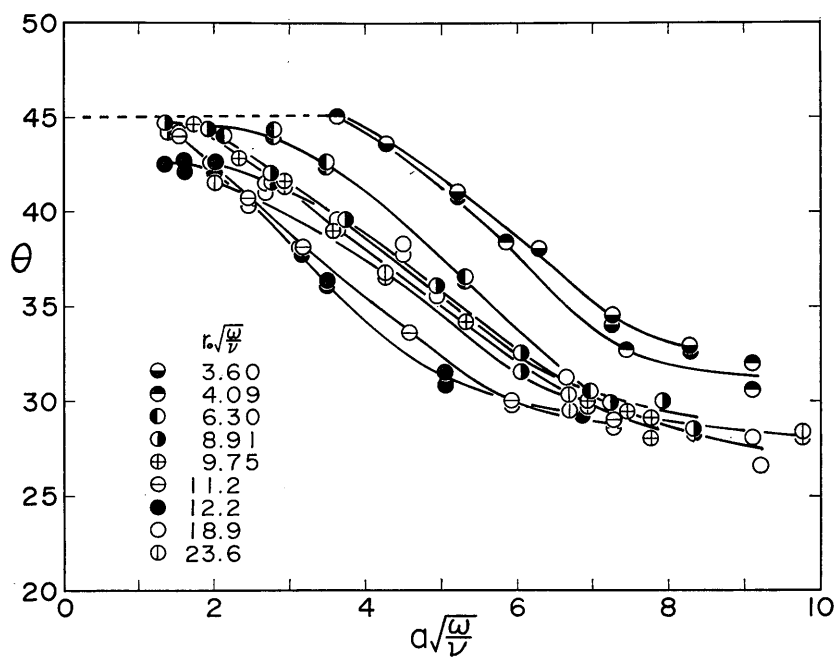


図 6 θ と $a\sqrt{\omega/\nu}$ と の 関 係

占めていた場合である。図4は、 θ と a/r_0 との関係を示したものである。これらのグラフからわかるように、外部循環流の中心の位置は、振幅の増大とともに単調に移動する。また、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ が大きい程、小さな振幅変化に対して、外部循環流の中心位置の変動が大きい。

図5、図6は、 $a\sqrt{\omega/\nu}$ と r/r_0 , θ との関係調べたものである。これらの図から明らかなように、 r/r_0 , θ の変化には、図3、図4に見られたようなパラメーターによる系統的な変化は見られず、ばらつきは大きいけれども、大体一定の傾向を持っているようである。

4. 結 言

静止流体中で、円柱を正弦的に振動させた場合、円柱のまわりには一定の方向を持った流れが生じる。外部境界半径と円柱半径との比が19.1の条件の下で実験を行なった。外部循環流は各象限毎に生じるが、その中心の位置は、振動振幅の増大とともに円柱から遠ざかり、振動軸に近づくように移動する。この変化の割合は、 $r_0\sqrt{\omega/\nu}$ の値が大きい程大きい。

$r_0\sqrt{\omega/\nu}$ が極く小さい範囲で、振動軸に沿って円柱に向かい、振動軸と直角に円柱から遠ざかる流れのみが流れの場全体を占める場合のあることが観察された。

おわりに、本実験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お礼申し上げます。

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) Schlichting, H., Berechnung ebener periodischer Grenzschichtströmungen, Phys. Z., 33, 1932, p. 327.
- 3) West, G. D., Circulations occurring in acoustic phenomena, Proc. Phys. Soc., Sec. B, 64, 1951, p. 483.
- 4) Andres, J. M. and Ingard, U., Acoustic streaming at high Reynolds numbers, J. Acoust. Soc. Am., 25, 1953, p. 928.
- 5) Westervelt, P. J., Acoustic streaming near a small obstacle, J. Acoust. Soc. Am., 25, 1953, p. 1123.
- 6) Holtmark, 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) 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47年5月27日 受理)