

振動流による水槽底面上のridgesのまわりの二次流れ

辰野, 正和
九州大学応用力学研究所 : 助教授

<https://doi.org/10.15017/4743694>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 58, pp.1-10, 1983-02. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



振動流による水槽底面上の ridges の まわりの二次流れ

辰 野 正 和*

概 要

流体を正弦的に振動させる水槽の底面に、円柱、平板あるいは、波面板をおき、そのまわりに誘起される二次流れの構造を可視化して調べた。

単独円柱、単独平板の場合、いわゆる内部循環流、外部循環流の他に、ridge の左右の水槽底面近くに新たな循環流が誘起される。 $R_h = \omega h^2/\nu$, $R_s = \omega s^2/\nu$ が大きくなると、三次元的構造が現れる。特に、平板の場合、顕著に現れる。ここで、 ω は振動流の角振動数、 h は ridge の水槽底面からの高さ、 ν は流体の動粘性係数、 s は、流体振動の振幅である。

複数個の円柱又は平板が等間隔で並んで ridges を形成している場合、ridges の隙間は、 R_h が小さい場合、二個の内部循環流で、 R_h が大きい場合は、二個の外部循環流で満たされる。

波面板上にも、内部循環流、外部循環流の二重構造が形成される。

Key words: Oscillatory flow, Boundary layer, Ridges, Secondary flow

1. ま え が き

一方向に正弦的に振動している広い流体中におかれた円柱、四角柱、三角柱、球等のまわりに誘起される二次流れについては、かなり調べられている。その場合、一般に、二次流れは、内部循環流と外部循環流との二重構造を持っている。二次流れを特徴づける無次元量は、 $R_h = \omega h^2/\nu$ と $R_s = \omega s^2/\nu$ である。 R_h は、物体の代表長さと振動境界層の厚さとの比であり、 R_h が大きいと振動境界層は相対的に薄く、内部循環流も極く薄くなる。一方、 R_h が小さいと、その逆で、内部循環流の存在する領域も厚くなる。 R_s は、二次流れの速度場を特徴づける量である。

ところで、海水の周期的運動による sand ripples の形成とか、パイプの中に音の定在波をつくる、いわゆるクント管内の管壁上にコルク粒子の ridges が形成されるなど、振動境界層内で引起される複雑な現象がある。ここでは、こうした現象と二次流れとの関係を調べるために、基礎的な実験を行った。本研究では、まず、振動流底面に ridges がある場合、そのまわりの流れはどうなるかということ調べる立場で、単独の円柱、平板、および複数の円柱、平板、ならびに波面板を水槽の底に固定し、可視化技術により流れ模様を調べた。この場合、水槽の底および ridges まわりに振動境界層が形成さ

* 九州大学助教授、応用力学研究所

れるのであり、そこに誘起される二次流れは複雑なものであると思われる。

2. 実験方法

実験は、図1に示すように、断面 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ の透明アクリル樹脂製の水槽中の流体をピストンにより正弦的に振動させて行った。水槽のテストセクションの底面に、円柱、平板または波面板を固定した。円柱等は、長さ 15 cm であって、振動流を横切るように配置されている。使用した円柱は、直径 1.53 cm , 1.05 cm の二種類であるが、前者は、水槽底面に固定する部分を一部削っているため、水槽底面からの高さは 1.27 cm である。後者は、削らず、水槽底面からの高さも 1.05 cm である。平板は、厚み 0.105 cm で水槽底面に垂直に立てて固定した。その高さは、 1.05 cm であり、先端は鋭角に削られている。波面板は、ジュラルミン製で、波高 0.9 cm 、波長 9.7 cm の5波長からなっている。

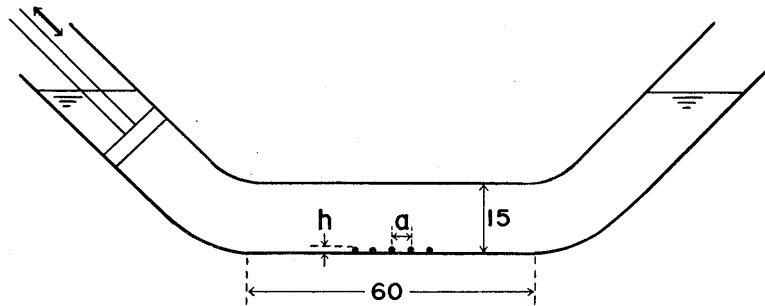


図1 実験水槽概略図
 $15\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ の正方形断面

作業流体は、水または水とグリセリンとの混合液を使用した。振動数が高くなると、水槽の構造に由来する二次流れが顕著となるので、その影響を避けるため、実験を行った流体の振動数は、 1.5 Hz 以下、振幅は、 1.6 cm 以下であった。

流れの可視化のために、流体中には、アルミ粉末が混入されている。流れの任意の断面を観察するために、スリット光源を利用した。また、二次流れのみを観察するために、光源として使用したスライドプロジェクターの前方にシャッターを設け、これを流体を振動させるピストンの運動と同期させて電氣的に開閉させ、流体の一振動毎に一回、流体の振動運動の変位のほぼ中央位置で流れに光があたるようにしている。カメラを一定時間開放にして、フィルム上に流体運動の二次的流れのみを記録する。なお、一部電解沈澱法でも流れの運動を観察した。

3. 実験結果

各物理量を次のように定義する。

h : ridges の水槽底面からの高さ (cm)

a : ridges の中心間の距離 (cm)

f : 流体振動の振動数 (Hz)

ω : $2\pi f$

s : 流体振動の振幅 (cm)

w : 平板製 ridges の厚み (cm)

ν : 流体の動粘性係数 (cm^2/sec)

R_h : $\omega h^2/\nu$

R_s : $\omega s^2/\nu$

3.1. 円柱製 ridges の場合

まず、始めに、一本の円柱の場合について述べるが、この場合も、無限振動流体中におかれた一本の円柱の場合と同様、 R_h によって流れのパターンは変化する。

図 2 に R_h の小さい場合の流れの典型的な例を示す。図 2(a) は、連続光の下で撮影したものであって、3 秒という短い露出時間の間のアルミ粉末の運動そのままを示している。円柱近傍の軌跡が一振動毎に少しずつずれているのが見られるが、これは、粘性流体の振動境界層内での非線型効果に基づくものであり、流体粒子の二次的移動を示すものである。図 2(b) は、全く同じ流れを流体の一次的な振動運動に光源の照射を同期させて撮影したものであり、二次流れのみを見たものである。この場合 R_h が小さいので、いわゆる内部循環流が大きく張り出している。この流れは、矢印で示すように、ridge の頂点から上向きに ridge から遠ざかり、底面近くを ridge に向ってくる循環流である。この場合の大きな特徴は、大きな内部循環流と底面との間に、もう一つの小さな循環流が誘起されることである。この循環流は、無限流体中では現れないものである。

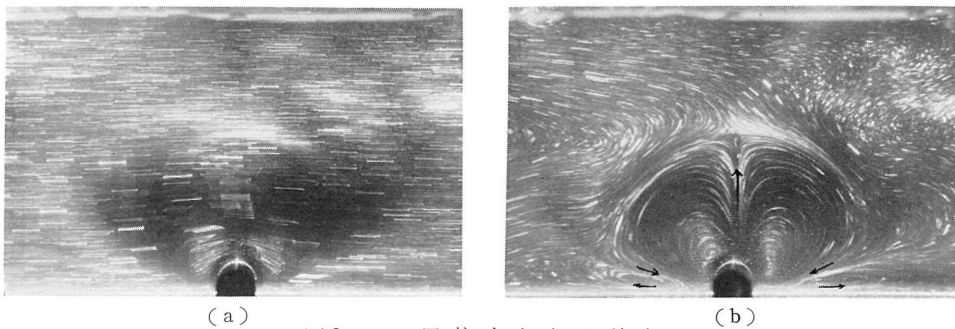


図 2 一円柱まわりの流れ

$h=1.27 \text{ cm}$, $f=1.38 \text{ Hz}$, $s=0.40 \text{ cm}$, $\nu=0.618 \text{ cm}^2/\text{s}$, $R_h=22.6$, $R_s=2.25$

(a) 連続光, 露光時間 $t_e=3 \text{ sec}$, (b) ストロボ光 $t_e=120 \text{ sec}$.

図 3 は、 $R_h=114$ であって、円柱近傍には、円柱を取り巻いた内部循環流があり、その外側には、逆向きの流れ方向を持った外部循環流が現れ、振動二次流れの二重構造が明瞭に見られる。この場合も、無限流体中と異なり、外部循環流と底面との間に、第三の循環流が誘起されている。

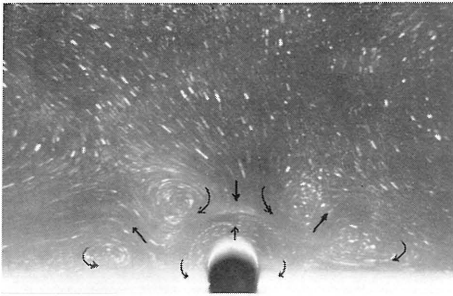


図3 一円柱まわりの二次流れ

$h=1.27$ cm, $f=0.849$ Hz, $s=0.50$ cm,
 $\nu=0.0755$ cm²/s, $R_h=114$, $R_s=17.7$,
 $t_e=120$ sec.

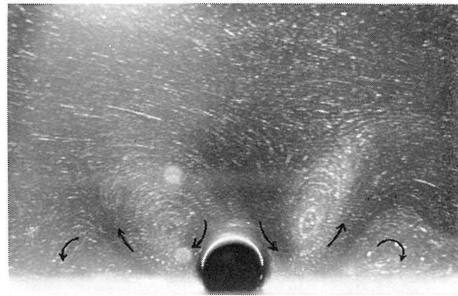


図4 一円柱まわりの二次流れ

$h=1.27$ cm, $f=0.505$ Hz, $s=0.45$ cm,
 $\nu=0.0115$ cm²/s, $R_h=445$, $R_s=55.8$,
 $t_e=60$ sec.

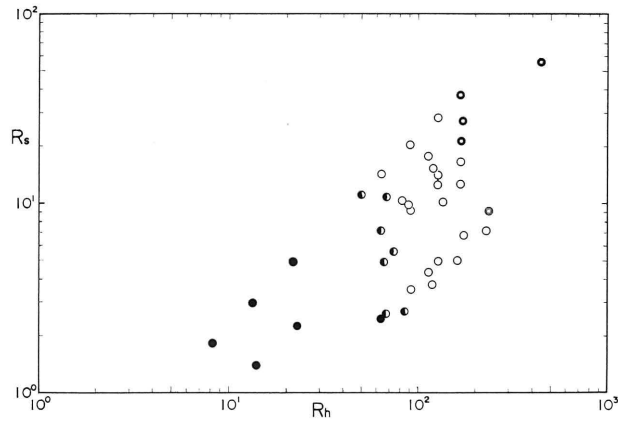


図5 一円柱まわりの流れ模様の分類

●: 内部循環流強し, ○: 内部循環流, 外部循環流ともに
 明瞭に観察される, ◎: 外部循環流強し

図4は, $R_h=445$ であって, 振動境界層の厚さ $\sqrt{\nu/\omega}$ は極めて薄い. そのため, 内部循環流も薄く, ほとんど目に見ることは出来ず, 外部循環流が大きく誘起されている. この場合も, 外部循環流と底面との間に第三の循環流が見られる.

このように, ridge のまわりに誘起される二次流れは, 基本的には, 内部循環流, 外部循環流, 第三の循環流の三つから成っているが, R_h の値によって, それぞれの流れの強さ, 大きさが異なり, 結果として, 流れ模様に変化する. 図5に, 大まかな流れ模様の分類を示す. ●は, 図2に示したような内部循環流が大きく張り出した流れ模様, ○は, 図3に示したように, 内部循環流と外部循環流とがともに明瞭に観察される流れ模様, ◎は, 図4に示したように, 内部循環流の層が非常に薄く, 流れ場のほとんどを外部循環流が占めているような流れ模様が観察された実験点である. 但し, 各流れ模様の境界は厳密には決められない.

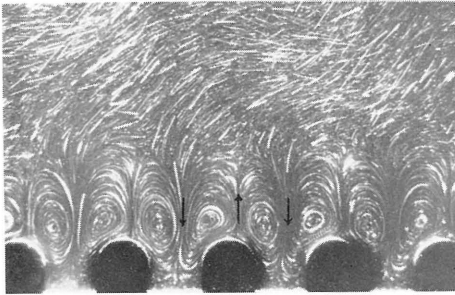


図6 円柱群まわりの二次流れ

$h=1.05$ cm, $a=2.10$ cm, $a/h=2.0$, 9本,
 $f=0.545$ Hz, $s=0.15$ cm, $\nu=0.16$ cm²/s,
 $R_h=23.5$, $R_s=0.48$, $t_e=240$ sec.

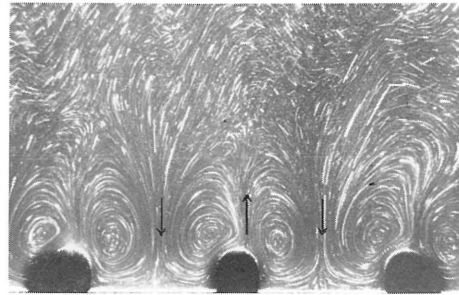


図7 円柱群まわりの二次流れ

$h=1.05$ cm, $a=4.20$ cm, $a/h=4.0$, 5本,
 $f=0.505$ Hz, $s=0.15$ cm, $\nu=0.155$ cm²/s,
 $R_h=22.5$, $R_s=0.459$, $t_e=180$ sec.

図6は、9本の円柱が、円柱の直径に相当する距離だけの隙間をあけて並んでいる場合である。写真には、中央部の5本のまわりの流れだけを示している。 R_h の小さい場合の例であって、各円柱周りには内部循環流のみが明瞭に形成されており、各円柱間の隙間は、この循環流で満たされている。

図7は、 $a/h=4.0$ の場合である。実験は、5本の円柱を並べて行われたが、写真には、このうち中央部の三本が写っている。この場合も、 $R_h=22.5$ であって、内部循環流が形成されている。少なくとも $a/h < 4$ では、隙間は、内部循環流のみで満たされており、単独円柱の場合のような第三の循環流は現れない。

図8は、 $a/h=4.0$ で、 $R_h=185.6$ の場合である。この場合、内部循環流の層は薄く、その外側の外部循環流が大きく張り出している。隣り合った外部循環流が隙間の中心部でぶつかり合い上方に延びている。この場合は、隙間は外部循環流で満たされている。

結局、図7と図8に示すように、 R_h の値の大小によって、隙間を満たす流れの向きは逆となる。

3.2. 平板製 ridges の場合

平板の場合も、そのまわりに誘起される二次流れの模様は、基本的には、円柱の場合と同様であるが、主流が振動毎に平板の先端で剝離しているために特有な現象が現れる。

図9は、一枚の平板の場合で、 $R_h=5.49$ であり、内部循環流が大きく張り出している。図10は、 $R_h=74.7$ であり、平板を囲む内部循環流、その外側の外部循環流および底面近くの第三の循環流も見ることができる。これらの流れ模様は円柱の場合と同様である。

図11は、 $R_h=641.6$ の場合である。これは、平板および底面の一部をハンダメッキして、電解沈澱法とアルミ粉末法との二つの手法を同時に使って可視化したものである。写真で平板を囲む半円形の大きな白い領域が見られるが、これは、電解沈澱法により平板表面上で生成された物質が、平板上端から上方へ追し流され、左右に分かれた後、循環して平板底部へ向っている流れを示している。この場合、振動境界層の厚さ $\sqrt{\nu/\omega}$ は薄く、 R_h の値も大きい。もし、剝離の起らない円柱の場合だと、内部循環流はほとんど見ることができない条件である。ところが平板の場合、平板の先端で剝離が起り、

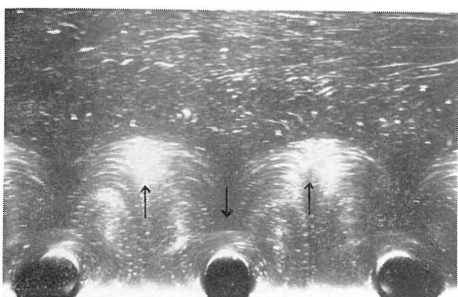


図8 円柱群まわりの二次流れ

$h=1.05$ cm, $a=4.20$ cm, $a/h=4.0$, 5本,
 $f=0.913$ Hz, $s=0.50$ cm, $\nu=0.034$ cm²/s,
 $R_h=185.6$, $R_s=42.1$, $t_e=240$ sec.

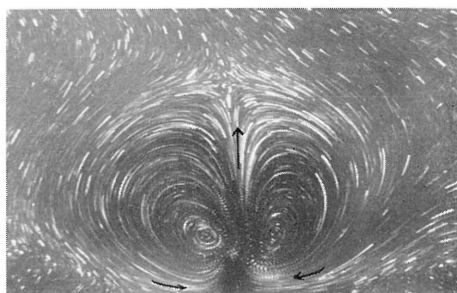


図9 一平板まわりの二次流れ

$h=1.05$ cm, $w=0.105$ cm, $f=0.495$ Hz,
 $s=0.25$ cm, $\nu=0.624$ cm²/s, $R_h=5.49$,
 $R_s=0.311$, $t_e=120$ sec.

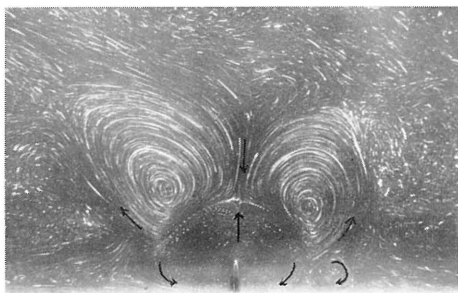


図10 一平板まわりの二次流れ

$h=1.05$ cm, $w=0.105$ cm, $f=0.859$ Hz,
 $s=0.25$ cm, $\nu=0.0795$ cm²/s, $R_h=74.7$,
 $R_s=4.25$, $t_e=180$ sec.

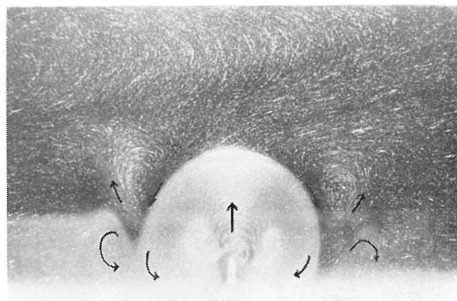


図11 一平板まわりの二次流れ

電解沈澱法, $h=1.05$ cm, $w=0.105$ cm,
 $f=0.973$ Hz, $s=0.13$ cm, $\nu=0.0105$ cm²/s,
 $R_h=642$, $R_s=9.83$, $t_e=120$ sec.

R_h が大きいとその剝離も激しく起っている。振動流であるため、剝離に基づく流体移動は平板先端から上方に向うことになり、この流れが循環流を形成するのである。図12は、電解沈澱法による場合で、平板上端より1.5 cm上の水平断面を水槽上方から観察したものである。中央部の縦の細い線が平板であり、それを取巻く白い帯状の部分が電解沈澱による生成物が拡がった領域である。流れは、二次元性を満足している。

結局、平板のように、剝離の起る ridge の場合、ridge 上端から上方へ向う循環流が、ridge の数倍の大きさの領域に常に存在する。これは、剝離のない ridge の場合と大きく異なることである。

図13は、17枚の平板をその高さに相当する距離をおいて平行に並べたものである。ridges 群の両端に大きな二個の循環流が形成されているが、それ以外の平板のまわりには、小さな循環流が二個ずつ形成されている。

図14は、 $a/h=2.1$ の場合の中央部付近を拡大して見たものである。各平板まわりには、一対の循環流が形成されており、これらが平板間の隙間を満たしている。図15は、同様に、 $a/h=4.1$ の場合である。 $a/h \leq 4.1$ の場合、各平板間には、逆向きの二個の循環流のみが存在する。

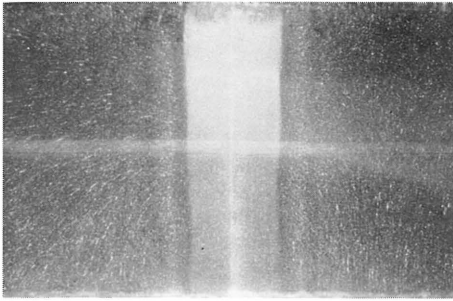


図 12 一平板まわりの二次流れ

電解沈澱法, 平板上端より 1.5 cm 上方の
水平断面, $h=1.05$ cm, $w=0.105$ cm,
 $f=0.830$ Hz, $s=0.13$ cm, $\nu=0.0105$ cm²/s,
 $R_h=547$, $R_s=8.38$, $t_e=120$ sec.

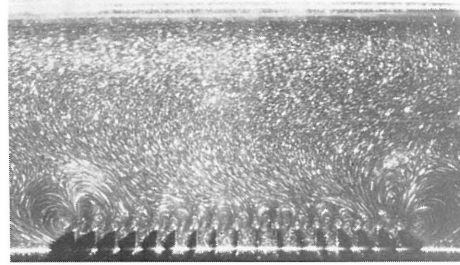


図 13 平板群まわりの二次流れ

$h=1.05$ cm, $w=0.105$ cm, $a=1.16$ cm,
 $a/h=1.1$, 17 枚, $f=0.517$ Hz, $s=0.25$ cm,
 $\nu=0.193$ cm²/s, $R_h=18.5$, $R_s=1.05$,
 $t_e=60$ sec.

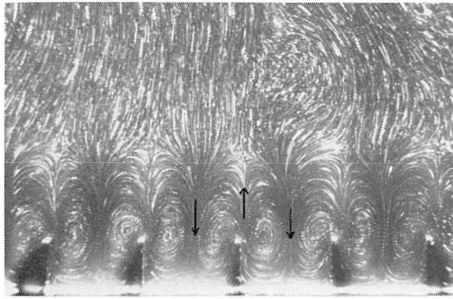


図 14 平板群まわりの二次流れ

$h=1.05$ cm, $w=0.105$ cm, $a=2.21$ cm,
 $a/h=2.1$, 9 枚, $f=1.01$ Hz, $s=0.12$ cm,
 $\nu=0.183$ cm²/s, $R_h=38.1$, $R_s=0.499$,
 $t_e=180$ sec.

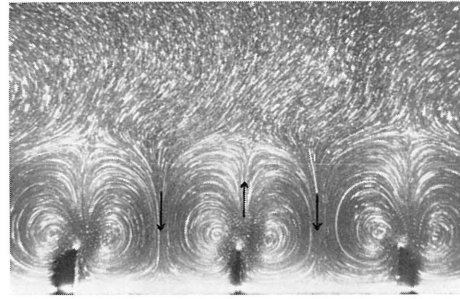


図 15 平板群まわりの二次流れ

$h=1.05$ cm, $w=0.105$ cm, $a=4.31$ cm,
 $a/h=4.1$, 5 枚, $f=0.545$ Hz, $s=0.15$ cm,
 $\nu=0.184$ cm²/s, $R_h=20.5$, $R_s=0.417$,
 $t_e=240$ sec.

以上は、流れがほぼ二次元性を満足している範囲内での現象である。ところが、流れの速度場を特徴づける無次元量 R_s が大きくなると、三次元性が現れる。円柱の場合より、平板の場合が三次元性が現れやすいということは、剝離もその原因の一つであろう。いま一つは、平板の両端が水槽の側壁で囲まれているための壁面付近での特異性によるのであろう。図 16(a)は、一枚の平板の場合で、三次元性が現れた流れの振動軸に沿った中央垂直断面を示す。図 16(b)は、同じく、側壁から約 3 cm の位置の垂直断面の様子である。図 17 は、主流の振動方向に直角であり、ridge である平板を含む垂直断面を観察したものである。これらの写真からわかるように、平板中央部付近で強い噴出流が現れ、側壁に近づくにつれて流れが弱くなっている。つまり、平板の長さ方向に流れが一様でなくなる。そのため、噴出流の外側の流れも三次元的な循環流となる。図 18 は、こうした流れの水平断面を示す。写真の中央部が、平板の中央部付近からの強い噴出流のある領域である。その外側には、写真で見られるような三次元的な循環流が現れる。

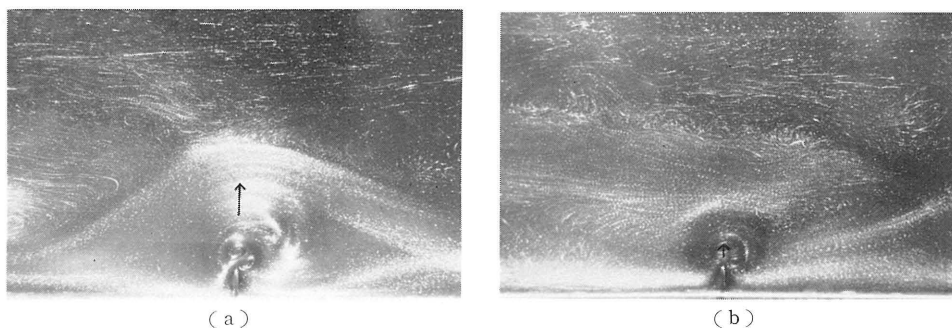


図16 一平板まわりに起る三次元流れ

$h=1.05$ cm, $w=0.105$ cm, $f=0.495$ Hz, $s=0.25$ cm, $\nu=0.0112$ cm²/s, $R_h=306$, $R_s=17.3$, (a) 平板中央垂直断面, $t_e=120$ sec, (b) 水槽側壁より約 3 cm の垂直断面, $t_e=60$ sec.



図17 一平板まわりに起る三次元流れ
主流に直角で, 平板を含む垂直断面
 $h=1.05$ cm, $w=0.105$ cm, $f=0.533$ Hz,
 $s=0.40$ cm, $\nu=0.0106$ cm²/s, $R_h=348$,
 $R_s=50.5$, $t_e=5$ sec.

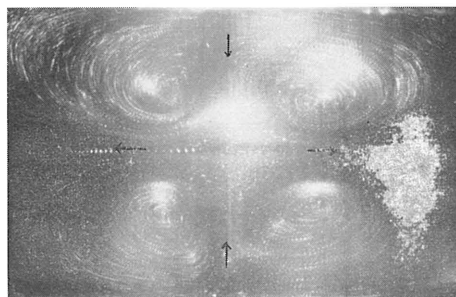


図18 一平板上方に起る三次元循環流
平板上端より 2.5 cm 上方の水平断面,
 $h=1.05$ cm, $w=0.105$ cm, $f=0.843$ Hz,
 $s=0.40$ cm, $\nu=0.083$ cm²/s, $R_h=70.3$,
 $R_s=10.2$, $t_e=60$ sec.

3.3. 波面板の場合

ゆるやかな波面板上にも, 振動流によって二次流れが形成される.

図19は, R_h の値を適当な大きさにした場合であって, 循環流の二重構造が明瞭に見られる. 但し, ここで h として波高をとっている. 波面に接した循環流が内部循環流であり, その外側に誘起されているのが外部循環流である. この現象については, Hino & Fujisaki (1977) と Kaneko & Honji (1979) に詳しい.

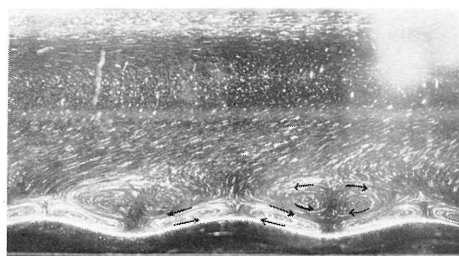


図19 波面板上の二次流れ
波高 $h=0.9$ cm, 波長 9.7 cm, 5 波長,
 $f=1.21$ Hz, $s=0.25$ cm, $\nu=0.0191$ cm²/s,
 $R_h=32.3$, $R_s=2.49$, $t_e=120$ sec.

図20は, クント管内に誘起される二次流れである. 矩形断面の管を管軸が水平になるように配置

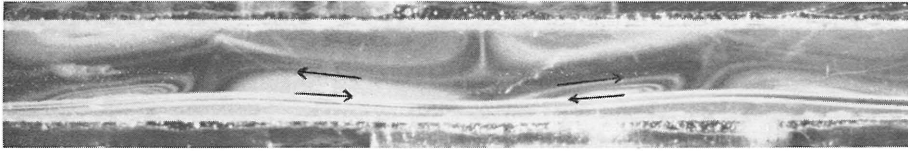


図20 クント管内の二次流れ

一辺 1.73 cm の正方形断面で長さ 99.2 cm のアクリル管，燈油深さ約 0.4 cm，たばこの煙， $f=1803$ Hz，音速 348.9 m/s，音の定在波の波長 19.4 cm， $\sqrt{\nu/\omega}=0.00374$.

し，その管内に数 mm の深さに燈油を入れ，管の一端を閉じ，他の端にスピーカーを固定して適当な周波数で管内の気柱に音の定在波を作る．そうすると，音の定在波の管軸に沿った圧力分布に従って，燈油の液面が変形する．この変形は定在的なものであり，ほぼ正弦的な変形である．この場合の液面上部の空気中に誘起される二次流れがたばこの煙で可視化されている．音による振動であるので，管内の空気の運動は，管軸に沿って，音の節で振幅 0，音の腹の所で振幅最大である．そのため，側壁が全て平面壁であっても振動境界層内における非線型効果によって二次流れが誘起されるが，今の場合，管内の空気は下方で変形した液面に接しているため，誘起される二次流れも変形したものとなる．なお，音の一波長の中に，液面変形は二波長，二次的循環流は四個できる．図 20 は管の中央部断面の写真である．この場合， R_h の値は不明であるが， $\sqrt{\nu/\omega}=0.00374$ cm と振動境界層は非常に薄いので，内部循環流は目に見えず，外部循環流に相当する二次流れのみが可視化されている．

4. ま と め

振動流水槽の底面に，円柱，平板等で ridges を作り，そのまわりに誘起される二次流れを可視化して調べた．流れのパターンは， R_h の値によって変化する．

一本の円柱の場合，内部循環流，外部循環流の他に底面近くに第三の循環流が現れる．

複数の円柱を並べた場合，円柱間の隙間は， R_h の値によって，二個の内部循環流又は，二個の外部循環流で占められる．

一枚の平板の場合，平板の先端での流れの剥離があり， R_h が大きくても内部循環流に相当する循環流が平板を取巻いている．四方を壁で囲まれた水槽中では， R_h が大きくなると三次元的な流れが起る．

複数の平板の場合，平板間の隙間は，平板先端から上昇し，隙間中央部で下降する二個の循環流で占められる．

正弦的な波面の上にも，内部循環流，外部循環流の二重構造をもった二次流れが誘起される．

謝 辞

本研究は，応用力学研究所海底土床力学部門の振動流水槽を使用して遂行されたものである．大事な装置を心よくお貸し下さった同部門の本地弘之教授，金子新助教授，白石洋二技官に厚くお礼申し上げます．

本研究は，科学研究費の援助によって行われたものである．

参 考 文 献

- 1) Tatsuno, M.: *Circulatory streaming around an oscillating circular cylinder at low Reynolds numbers*, J. Phys. Soc. Japan **35**, 3 (1973) 915.
- 2) Tatsuno, M.: *Circulatory streaming in the vicinity of an oscillating square cylinder*, J. Phys. Soc. Japan **36**, 4 (1974) 1185.
- 3) Tatsuno, M.: *Circulatory streaming in the vicinity of an oscillating triangular cylinder*, J. Phys. Soc. Japan **38**, 1 (1975) 257.
- 4) Hino, M. and Fujisaki, H.: *Flow visualization of an oscillatory fluid motion in glycerine tank*, *Proc. Int. Symp. on Flow Visualization, Tokyo* (1977) 229.
- 5) Kaneko, A. and Honji, H.: *Double structures of steady streaming in the oscillatory viscous flow over a wavy wall*, J. Fluid Mech. **93**, 4 (1979) 727.

(昭和 57 年 10 月 21 日 受理)