

一様流中で振動する円柱まわりの流れ

辰野, 正和
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/3560>

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 128, pp.23-30, 2005-03. Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :



一様流中で振動する円柱まわりの流れ

辰野正和*¹

(2005年1月27日受理)

Flow around an Oscillating Circular Cylinder in a Uniform Flow

Masakazu TATSUNO

E-mail of corresponding author: tatsuno@riam.kyushu-u.ac.jp

Abstract

A visual study has been made of the flow around a circular cylinder performing sinusoidal oscillations in a uniform flow. The frequencies of the cylinder have been changed from 10 to 30Hz.

When a cylinder has been oscillated normal to the uniform flow direction, the width of the wake behind the cylinder becomes large. As the result, the length of the twin vortices becomes large and the frequency of the vortex street in the wake becomes small.

On the other hand, when the cylinder has been oscillated in a uniform flow direction, the flow in the wake behind the cylinder was accelerated by the secondary flow induced by the cylinder and the separated wake region has been disappeared.

Key words : *A circular cylinder, Uniform flow, Oscillations, Secondary flows*

1. 緒言

流れの中に柱状物体がおかれた場合の流体力学的研究は古来多くなされてきた。特に、物体後方に形成される渦列の発生振動数と物体の固有振動数との相互作用については、実用的な問題として古くから調べられている。つまり、物体の固有振動数が、渦列の自然発生振動数(レイノルズ数に依存する)に近いと共振現象(lock-in or lock-on)が起こり、物体の固有振動数と同じ振動数で渦列が形成されると同時に、円柱は流れと直角方向に振動する。これは最も良く知られた渦励振である。この問題については、Koopman¹⁾, Taneda & Honji²⁾, 種子田・本地³⁾, Bishop & Hassan⁴⁾, Tanida et al.⁵⁾等の研究報告がある。次に、物体の固有振動数が渦列自然発生振動数の約2倍程度であると、第2の共振現象が起こる。この場合、円柱はその固有振動数で流れ方向に振動し(これを in-line oscillations と呼ぶ)、渦列は円柱の固有振動数の1/2の発生振動数を持つ。この問題に関しては、森・徳田⁶⁾, 辰野⁷⁾, Griffin & Ramberg⁸⁾, Tanida et al.⁵⁾等が、その特性の詳細について調べている。ついであるが、さらに円柱の固有振動数が大きい領域で、円柱の自励振動が起こることがある。

この場合、円柱の左右で対称に渦が放出される。このように、一様流中において、円柱と流れとの相互作用により3つのモードの振動があることが知られている。これらの振動では、いずれの場合も振動毎に円柱から渦が放出される。

ところで、流体中における円柱の振動運動でも、より大きな振動数での運動が考えられる。つまり、一回の振動毎に渦が放出されるのではなく、非線形性が強くなり、振動境界層が形成される場合である。こうした場合、物体まわりの流体運動には、振動成分と定常成分とが誘起されることが知られている。管内に空気流の定在波を作った時、定常な循環流が形成される、いわゆるクント管の実験は有名である。その後、基本的柱状物体である円柱の振動によって誘起される二次流れについては、Andrade⁹⁾, Schlichting¹⁰⁾, Andres & Ingard^{11,12)}, Holtmark et al.¹³⁾, Raney et al.¹⁴⁾, Tatsuno^{15,16)}等が詳細な研究を行い、正弦振動する円柱まわりには、内部循環流と外部循環流の二層構造を持った定常流れが形成されることが明らかになった。Fig.1にその例を示す。

ところで、一様流中で円柱が高い振動数で振動する場合、円柱のまわりにはどのような流れが形成されるのであろうか。こうした問題については、全く研究されていないようである。そこで、本研究の目的は、一様流中で、円柱が、一様流とは直角な方向、または一様流方向に高い振動数で振動する場合に、円柱まわりにいかなる流れが形成されるかを調べることで

*¹九州大学応用力学研究所

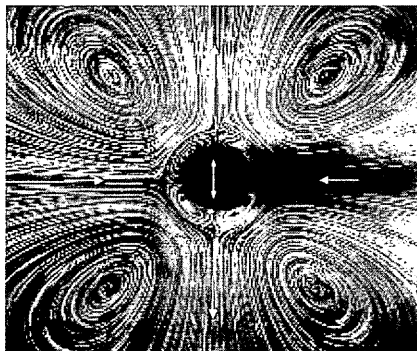


Fig.1 Circulatory streaming around an oscillating circular cylinder.

$d=0.60\text{cm}, f=60.0\text{Hz}, s=0.028\text{cm}, te=30\text{sec}.$

ある。

2. 実験装置と方法

実験は、幅 40cm、深さ 40cm、長さ 4m の曳航水槽でなされた。Fig.2 に示すような振動装置を台車に乗せ、モデル円柱を振動させながら一定の速度で曳航する。Fig.2 は、一様流方向に対して直角な方向に円柱を振動させる場合を示している。円柱と加振装置を結ぶ支持枠には加速度計を取り付け、その出力により振幅を求めた。振動数は、10~30Hz の範囲であった。

流れの可視化は、アルミ粉末法及び電解沈殿法によった。また、後流渦列の振動周期の測定は、手作りの熱線流速計を使用した。

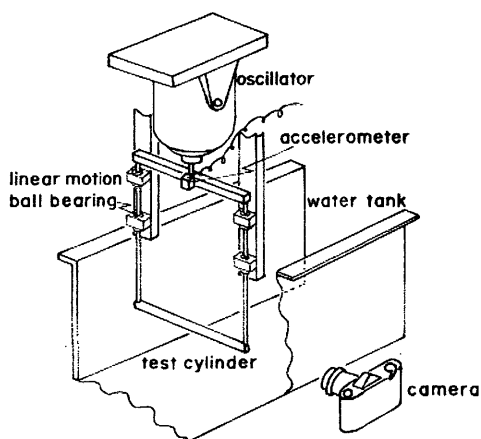


Fig.2 Schematic diagram of the apparatus.

3. 実験結果

3. 1. 一様流と直角な方向に振動させた場合

Fig.3 に、 $R=9.9$ の場合の流れの例を示す。ここで、 R は、一様流速度における定常流のレイノルズ数であり、 $R=Ud/\nu$ と定義する。 U は一様流速度、 d は円柱直径、 ν は動粘性係数である。また、 s は振幅、 te は露光時間である。Fig.3(a) は、円柱の振動なしの場合の流れ模様である。 $R=9.9$ であるので、円柱背後に形成される双子渦は小さい。Fig.3(b)~(d) は、振動数 $f=20\text{Hz}$ で円柱を一様流と直角方向に色々な振幅で振動させた場合の流れ模様である。いずれの流れも、円柱が運動を始めてから十分時間が経過し、定常な流れとなった場合を示している。円柱が、 $f=20\text{Hz}$ で振動するのであるから、円柱まわりには、基本的には、Fig.1 に示したような二次流れが誘起される。しかし、本実験の場合、円柱直径は $d=1.09\text{cm}$ と大きく、二次流れを支配する無次元量 $\omega d^2/\nu$ は 8×10^3 以上と非常に大きいため、内部循環流は非常に薄く、まわりの流れには外部循環流の効果が大きく働くこととなる。ここで、 $\omega=2\pi f$ である。この場合、円柱が一様流と直角方向に振動するので、Fig.1 から分かるように、進行方向とは直角方向に二次流れが吹き出すこととなる。そのため、円柱背後に形成される双子渦が大きくなる。振幅が大きくなるにつれて、誘起される二次流れも強くなるため双子渦も大きくなる。しかし、振幅がある範囲を越えると、Fig.3(d) で明らかなように双子渦も不安定となる。

Fig.4 は、 $R=30.1$ の場合の例である。このレイノルズ数の範囲では、静止円柱の背後に形成される双子渦は安定である。Fig.4(a) は、円柱の振動なしの場合である。かなり大きな双子渦が形成されている。Fig.4(b)~(d) は、 $f=30\text{Hz}$ で色々な振幅で円柱を振動させた場合の、それぞれ定常な流れ模様を示している。この場合も、振幅が大きくなると二次流れの効果で双子渦は大きくなる。しかし、Fig.4(d) で明らかなように、振幅がある値を越えると双子渦は不安定となり、いわゆるカルマン渦列へと変わっていく。

ここで、双子渦の長さの変化を計測してみた。Fig.5, 6, 7 は、それぞれ $R=9.9, 22.3, 30.1$ の場合の円柱の振動振幅と双子渦の長さとの関係を示している。ここで、 l は双子渦の長さであり、円柱背後から双子渦の後端までの距離である。また、 s は、円柱振動の片振幅である。Fig.5 の縦軸は 0 から始まっているけれども、Fig.6, 7 の縦軸は $l/d=1.0$ から始まっていることに注意されたい。いずれの場合も、振幅が同程度であれば振動数が大きい程双子渦の長さは長くなっている。一方、双子渦の長さが同程度であるためには振動数が小さい程大きな振幅が必要であることが分かる。こうしたことを考慮して、Fig.8, 9, 10 には、 l/d と $\omega sd/\nu$ との関係を示す。こ

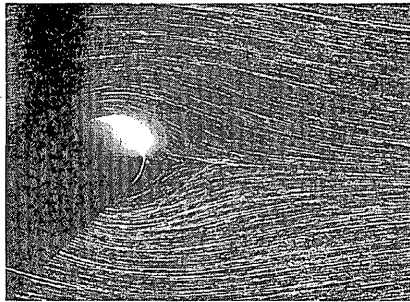
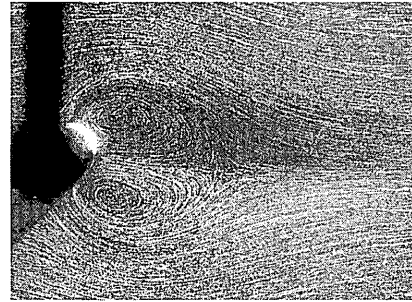
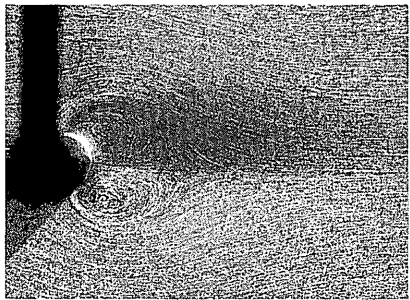
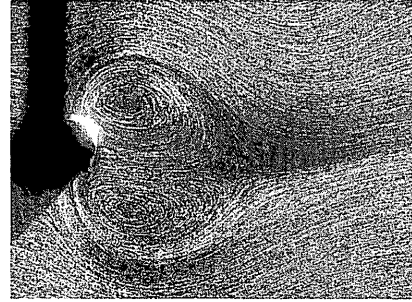
(a) 振動無し、 $te = 60\text{sec}$.(c) $s/d = 0.0295$, $te = 60\text{sec}$.(b) $s/d = 0.0251$, $te = 60\text{sec}$.(d) $s/d = 0.0414$, $te = 60\text{sec}$.

Fig.3 Flow around a cylinder oscillating normal to the uniform flow direction.

$d = 1.09\text{cm}$, $U = 0.0838\text{cm/s}$, $R = 9.9$, $f = 20.0\text{Hz}$.

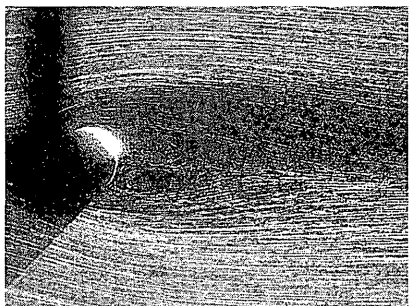
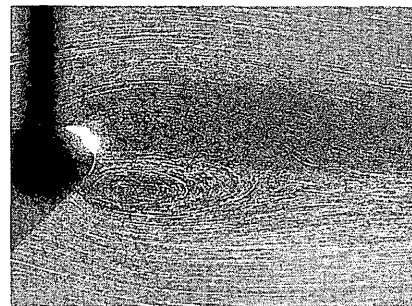
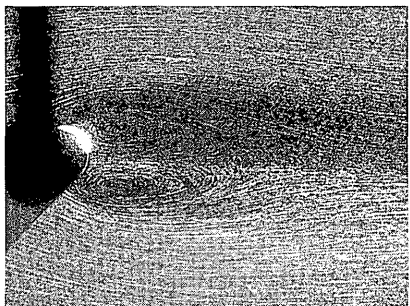
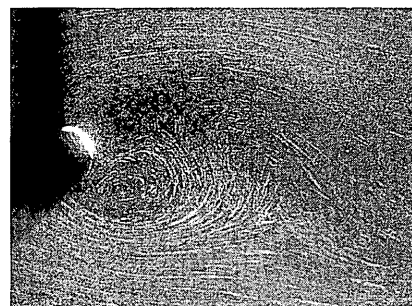
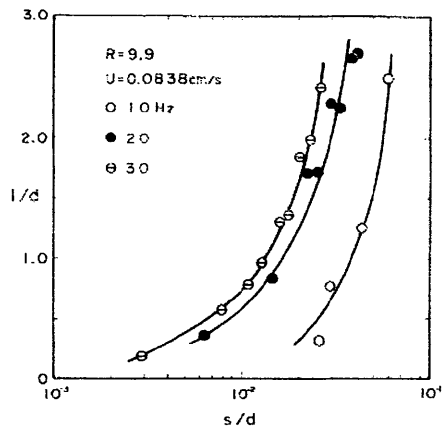
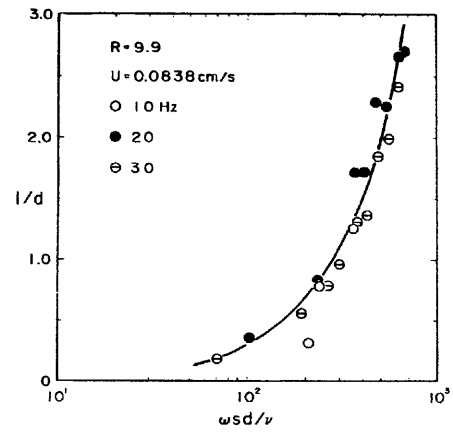
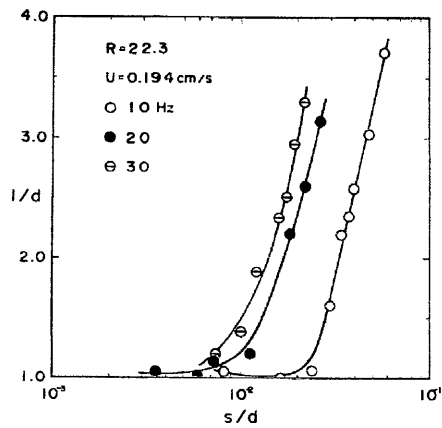
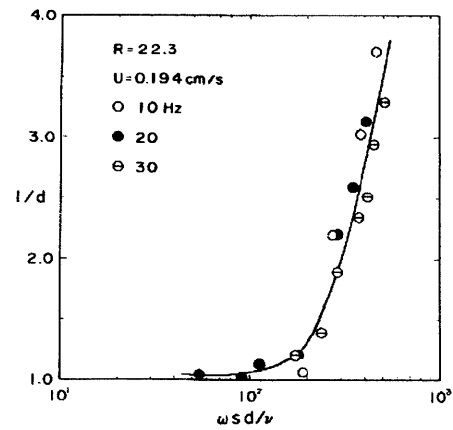
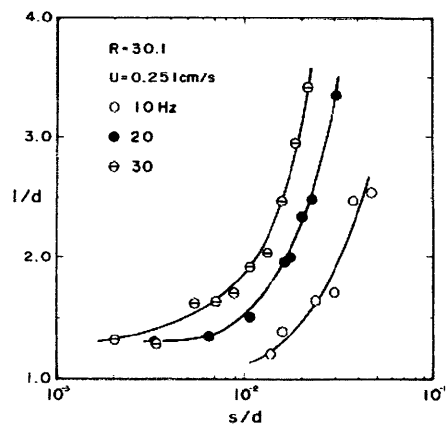
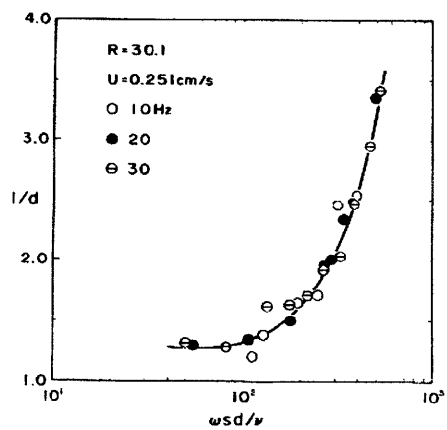
(a) 振動無し、 $te = 30\text{sec}$.(c) $s/d = 0.0216$, $te = 30\text{sec}$.(b) $s/d = 0.0189$, $te = 30\text{sec}$.(d) $s/d = 0.0266$, $te = 10\text{sec}$.

Fig.4 Flow around a cylinder oscillating normal to the uniform flow direction.

$d = 1.09\text{cm}$, $U = 0.251\text{cm/s}$, $R = 30.1$, $f = 30.0\text{Hz}$.

Fig. 5 Relationship between l/d and s/d at $R=9.9$.Fig. 8 Relationship between l/d and $\omega s/d/\nu$ at $R=9.9$.Fig. 6 Relationship between l/d and s/d at $R=22.3$.Fig. 9 Relationship between l/d and $\omega s/d/\nu$ at $R=22.3$.Fig. 7 Relationship between l/d and s/d at $R=30.1$.Fig. 10 Relationship between l/d and $\omega s/d/\nu$ at $R=30.1$.

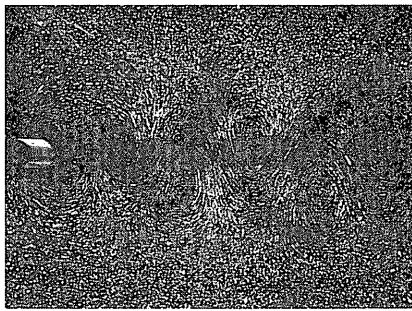
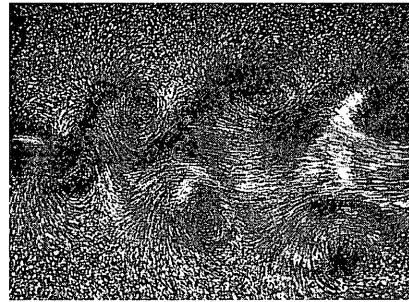
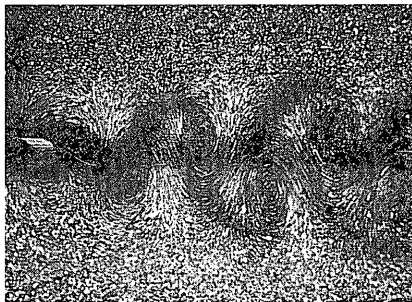
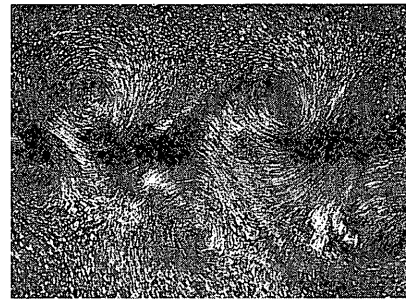
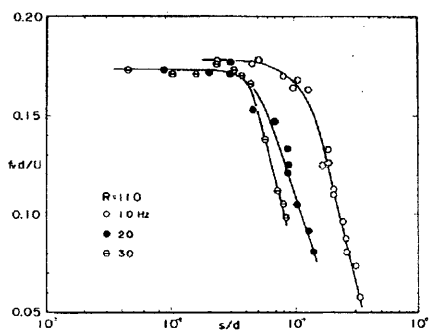
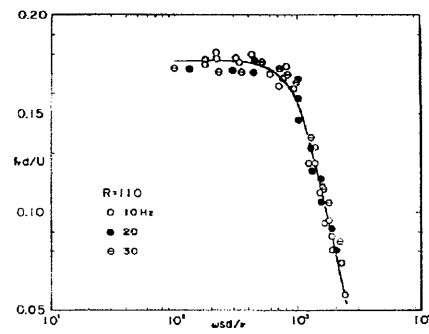
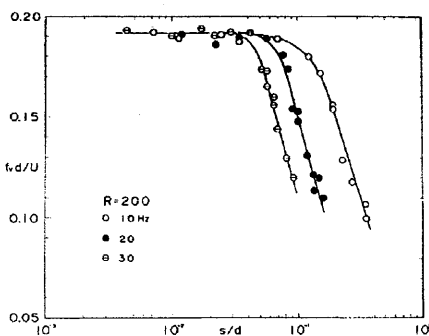
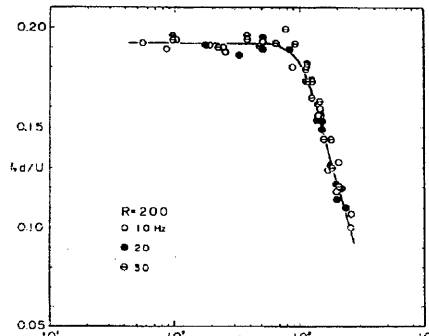
(a) 振動無し、 $te = 1\text{sec}$.(c) $s/d = 0.0745$, $te = 1\text{sec}$.(b) $s/d = 0.0284$, $te = 1\text{sec}$.(d) $s/d = 0.108$, $te = 1\text{sec}$.

Fig. 11 Flow around a cylinder oscillating normal to the uniform flow direction.

 $d = 1.09\text{cm}$, $U = 1.02\text{cm/s}$, $R = 104$, $f = 20.0\text{Hz}$.Fig. 12 Relationship between $f_v d/U$ and s/d at $R = 110$.Fig. 14 Relationship between $f_v d/U$ and $\omega s d / \nu$ at $R = 110$.Fig. 13 Relationship between $f_v d/U$ and s/d at $R = 200$.Fig. 15 Relationship between $f_v d/U$ and $\omega s d / \nu$ at $R = 200$.

で、 ωs は $2\pi fs$ であり、振動の速度振幅を意味する。つまり、 $\omega sd/\nu$ は、振動する円柱から吐出される流れのレイノルズ数とでもいべき量であるが、この無次元量によって、Fig.5, 6, 7の各場合の l/d の長さの変化はそれぞれ一つにまとめられることが分かる。

Fig.11 は、高いレイノルズ数、つまり $R=104$ で、通常カルマン渦が形成されている流れである。Fig.11(a)は、円柱静止の場合、Fig.11(b), (c), (d)は、円柱の振動振幅を大きくしていった時の流れ模様の変化を観察したものである。この場合も、円柱の振動により、一様流とは直角な方向に定常流が誘起される。そのため、振動振幅が大きくなるにつれて円柱後方の後流域が広がっているのが分かる。

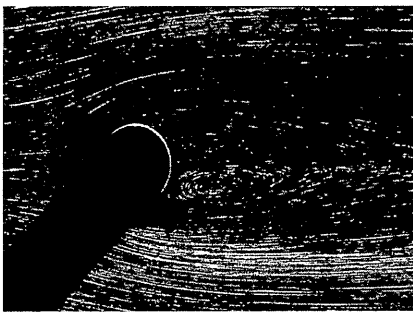
Fig.12, 13 は、円柱後方のカルマン渦の振動数を測定したものである。縦軸は $f_v d/U$ 、横軸は s/d である。ここで、 f_v は、渦列の振動数である。これらの図から明らかなように、 s/d の値がある値を越えると、後流の振動数 f_v は急激に小さくなる。つまり、後流の幅が急激に増大することを意味している。Fig.14, 15 には、 $f_v d/U$ と $\omega sd/\nu$ との関係を示している。前述の双子渦の長さ同様、後流の振動数も $\omega sd/\nu$ で一つにまとまる事が分かる。

3.2 一様流方向に振動させた場合

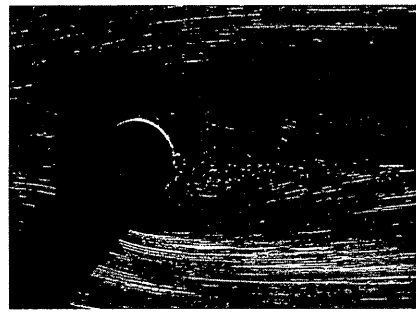
Fig. 16 に $R=35.4$ の場合の流れの例を示す。

Fig. 16(a)は、円柱の振動なしの場合であり、双子渦は安定に存在する。Fig. 16(b), (c), (d)は、円柱を一様流方向に $f=15.7\text{Hz}$ で振動させた場合である。(b)は振動振幅が小さいので、まだ双子渦は安定に形成されている。(c)では、振動振幅が大きくなり、双子渦領域が縮小している。(d)では、さらに振動振幅が大きく、円柱背後の双子渦は全く消えている。この場合、円柱が一様流方向に振動するため、一様流方向に振動による二次流れが誘起され、円柱の後流の流れが加速されるからである。

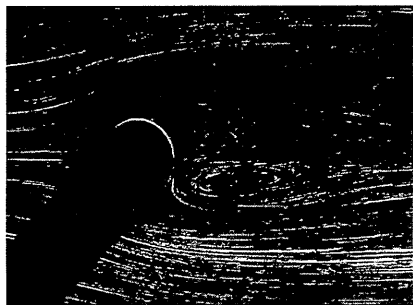
Fig. 17 には、 $R=222$ の場合の流れを示す。Fig. 17(a)は、円柱の振動なしの流れであり、円柱後方にはカルマン渦が形成されている。Fig. 17の(b), (c), (d)と円柱の振動振幅が大きくなる。この場合、円柱表面からも電解沈殿法の色素を出して流れを可視化しているが、(b)で円柱後端から白い色素の筋が出ているのが分かる。その後方には剥離後流域がある。(c)になると、円柱後端から出ていく筋の線は明瞭となり、閉じた後流域はかなり縮小している。(d)にな



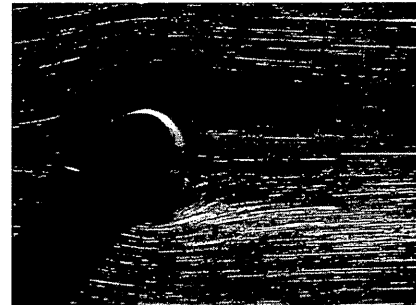
(a) 振動無し, $te=5\text{sec}$.



(c) $s/d=0.0120$, $te=10\text{sec}$.



(b) $s/d=0.0035$, $te=5\text{sec}$.



(d) $s/d=0.0447$, $te=5\text{sec}$.

Fig. 16 Flow around a cylinder oscillating parallel to the uniform flow direction.
 $d=1.09\text{cm}$, $U=0.410\text{cm/s}$, $R=35.4$, $f=15.7\text{Hz}$.

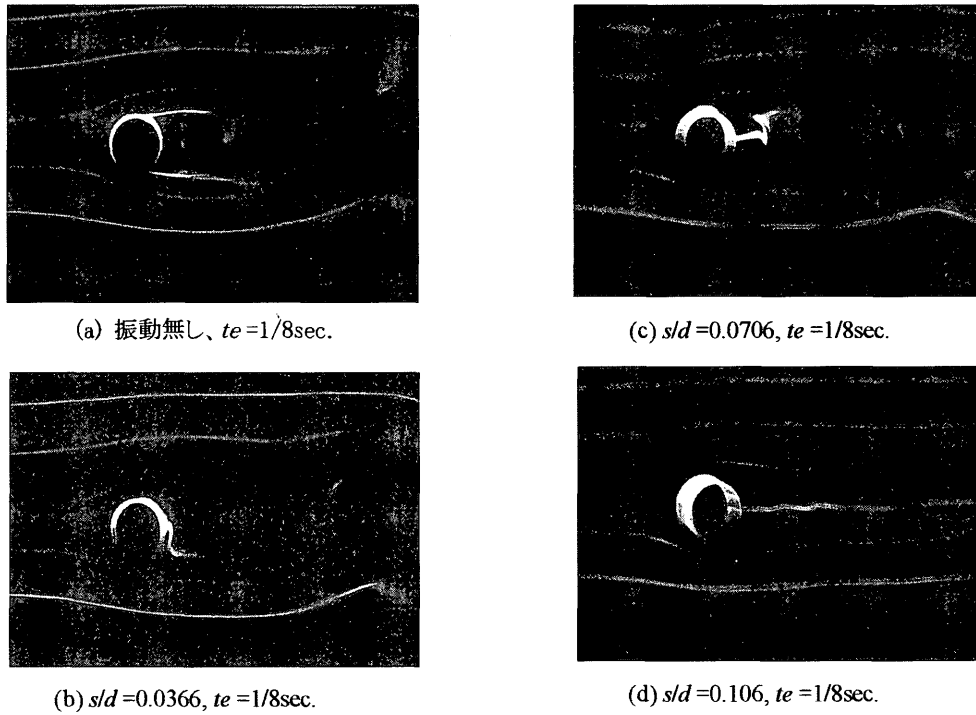
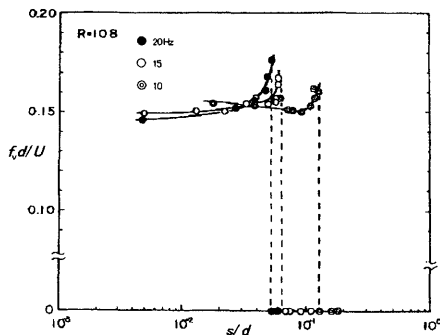
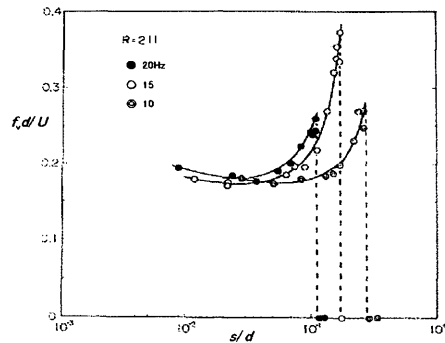


Fig. 17 Flow around a cylinder oscillating parallel to the uniform flow direction.

 $d = 1.09\text{cm}, U = 2.37\text{cm/s}, R = 222, f = 20.0\text{Hz}.$
Fig. 18 Relationship between $f_c d/U$ and s/d at $R=108$.Fig. 19 Relationship between $f_c d/U$ and s/d at $R=211$.

ると、もはや円柱後方の閉じた後流域は消失している。

Fig. 18, 19 は、カルマン渦が出来ているレイノルズ数領域での後流の振動数の変化を調べたものである。

Fig. 18, 19 は、それぞれ $R=108, 211$ の場合であるが、円柱の振幅をあげていくと、振動数は若干増大する。しかし、 s/d のある値で突然振動数0となる。つまり、Fig. 17(d)に示したように、周期的な流れが無くなる。この場合、振動数の変化を統一的に表す無次元量は見つけ出せなかった。

4. 結論

一様な流れの中にある円柱が振動二次流れを誘起する程の高い振動数で振動した場合の流れについて調べた。

一様流方向とは、直角な方向に円柱が振動した場合、一様流とは直角な方向の二次流れの形成により、円柱後方の後流域は増大する。つまり、双子渦は大きくなり、カルマン渦の振動数は低くなる。

一方、一様流方向に円柱を振動させた場合、一様流方向

前後への二次流れの形成により、円柱後方の流れは加速される。振動運動が強くなると、いわゆる剥離後流域は消滅する。

参考文献

- 1) Koopmann, G.H. : The vortex wakes of vibrating cylinders at low Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.* **28**, part 3 (1967)501-512.
- 2) Taneda, S. & Honji, H. : Determination of the drag on vibrating circular cylinders, *Rep. Res. Inst. Appl. Mech., Kyushu Univ.* **15** (1968)83-92.
- 3) 種子田定俊、本地弘之:振動する円柱の後流渦、九州大学応用力学研究所所報、**29** (1968)17-39.
- 4) Bishop, R.E.D. & Hassan, A.Y. : The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid, *Proc. Roy. Soc. London*, **A277** (1964)51-75.
- 5) Tanida, Y., Okajima, A. & Watanabe, Y. : Stability of a circular cylinder oscillating in uniform flow or in a wake, *J. Fluid Mech.* **61**, part 4 (1973)769-784.
- 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**, No.255 (1967)1826.
- 7) 辰野正和:流れ方向に振動する円柱後方の渦列、九州大学応用力学研究所所報、**36** (1972)25-37.
- 8) Griffin, O.M. & Ramberg, S.E. : Vortex shedding from a cylinder vibrating in line with an incident uniform flow, *J. Fluid Mech.* **75**, part 2 (1976)257-271.
- 9) Andrade, E.N. DA C. : On the circulations caused by the vibration of air in a tube, *Proc. Roy. Soc. London*, **A134** (1932)445-470.
- 10) Schlichting, H. : Berechnung ebener periodischer Grenzschichtströmungen, *Phys. Z.* **33**(1932)327-335.
- 11) Andres, J.M. & Ingard, U. : Acoustic streaming at high Reynolds numbers, *J. Acoust. Soc. Amer.* **25**, No.5 (1953)928-932.
- 12) Andres, J.M. & Ingard, U. : Acoustic streaming at low Reynolds numbers, *J. Acoust. Soc. Amer.* **25**, No.5 (1953)932-938.
- 13) Holtsmark, J. Johnsen, I., Sikkeland, T. & Skavlem, S. : Boundary layer flow near a cylindrical obstacle in an oscillating, incompressible fluid, *J. Acoust. Soc. Amer.* **26**, No.1 (1954)26-39.
- 14) Raney, W.P., Corelli, J.C. & Westervelt, P.J. : Acoustical streaming in the vicinity of a cylinder, *J. Acoust. Soc. Amer.* **26**, No.6 (1954)1006-1014.
- 15) Tatsuno, M. : Circulatory streaming around an oscillating circular cylinder at low Reynolds numbers, *J. Phys. Soc. Jpn.* **35**, No.3 (1973)915-920.
- 16) Tatsuno, M. : Secondary flow induced by a circular cylinder performing unharmonic oscillations, *J. Phys. Soc. Jpn.* **50**, No.1 (1981)330-337.