

非定常運動を行う楕円柱のまわりの流れの可視化

種子田, 定俊
九州大学応用力学研究所 : 教授

天本, 肇
九州大学応用力学研究所 : 助手

石井, 幸治
九州大学応用力学研究所 : 技官

高田, 三郎
九州大学応用力学研究所 : 文部技官

<https://doi.org/10.15017/4743548>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 45, pp.61-84, 1976-11. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :

非定常運動を行う楕円柱のまわりの流れの可視化[†]

種子田 定 俊* 天 本 肇**
石 井 幸 治*** 高 田 三 郎***

概 要

非圧縮粘性流体中で基本的非定常運動を行なう楕円柱のまわりの流れを可視化技術により調べた。主な結果は次のとおりである。(1) 静止から出発した場合、初期の流れの発達はお発からの距離のみによって定まり、加速度にはほとんど無関係である。(2) 定常な運動状態から他の運動状態へ急速に変化する時、剝離点の定義は困難に遭遇する。(3) 大振幅の振動運動を行なう場合、流れはヒステリシスを示す。(4) 一様流中で回転または回転振動を行なう場合、境界層は遠心力に支配され、死水は縮小し、揚力が発生する。

1. 緒 言

最近、非定常流の研究は急速に重要性を増大しつつあるが、非定常流の中でも特に剝離や遷移を含むものはきわめて複雑であり、一般的に言って、定常流の知識から推測することは不可能である。非定常剝離流を解析的に取扱うことはきわめて困難であるので、ごく僅かの場合だけしか解かれていない。最近では、電算機を使用していくつかの場合に対する数値解が得られるようになった。しかし、依然として非定常流の振舞はまだほとんど解明されていないと言っても過言ではない。

本研究は、代表的物体として2:1楕円柱をえらび、それが静止または一様流中で、速度変化、迎角変化、回転、振動など種々の基本的非定常運動を行なう場合の流れ模様を観察することにより、非定常流の一般的性質を明らかにしようとするものである。非定常流の場合、流れを理解するためには、流線模様と流脈模様の両方の時間的変化を同時に観察することが必要である。流線模様は速度場、物体表面からの流脈は渦層を指示する。本実験はすべて、幅50cm、深さ50cm、長さ600cmの水槽で行なわれた。使用された楕円柱は長径3cm、短径1.5cm、長さ30cmである。流線模様はアルミ粉法、流脈は電解沈澱法を使用して、35ミリカメラにより撮影された。

2. 静止からの出発

図1、図2は迎角 30° の楕円柱が静止から一定速度で動き出した場合の流線模様と流脈模様を示す。図の説明中、 t は出発後の経過時間、 d は楕円の長径、 R は長径でとったレイノルズ数を示す。流れ

[†] 日本物理学会第31回年会(1976年4月名大)において講演

* 九州大学教授、応用力学研究所

** 九州大学助手、応用力学研究所

*** 九州大学応用力学研究所文部技官

の発達の様子は前に本地¹⁾ や種子田²⁾ によって調べられた楕円柱の流れ（迎角，レイノルズ数が本実験と異なる）と本質的に同じである。写真からわかるように，楕円柱に固定した座標の流線模様で剝離泡が発達する速度は，流脈で渦巻形が形成される速度よりもはるかに大きい。流線模様で現われる大きな剝離泡の流体部分の中で，渦度が存在するのは流脈の短い線上のみであり，それ以外の部分は渦無し流

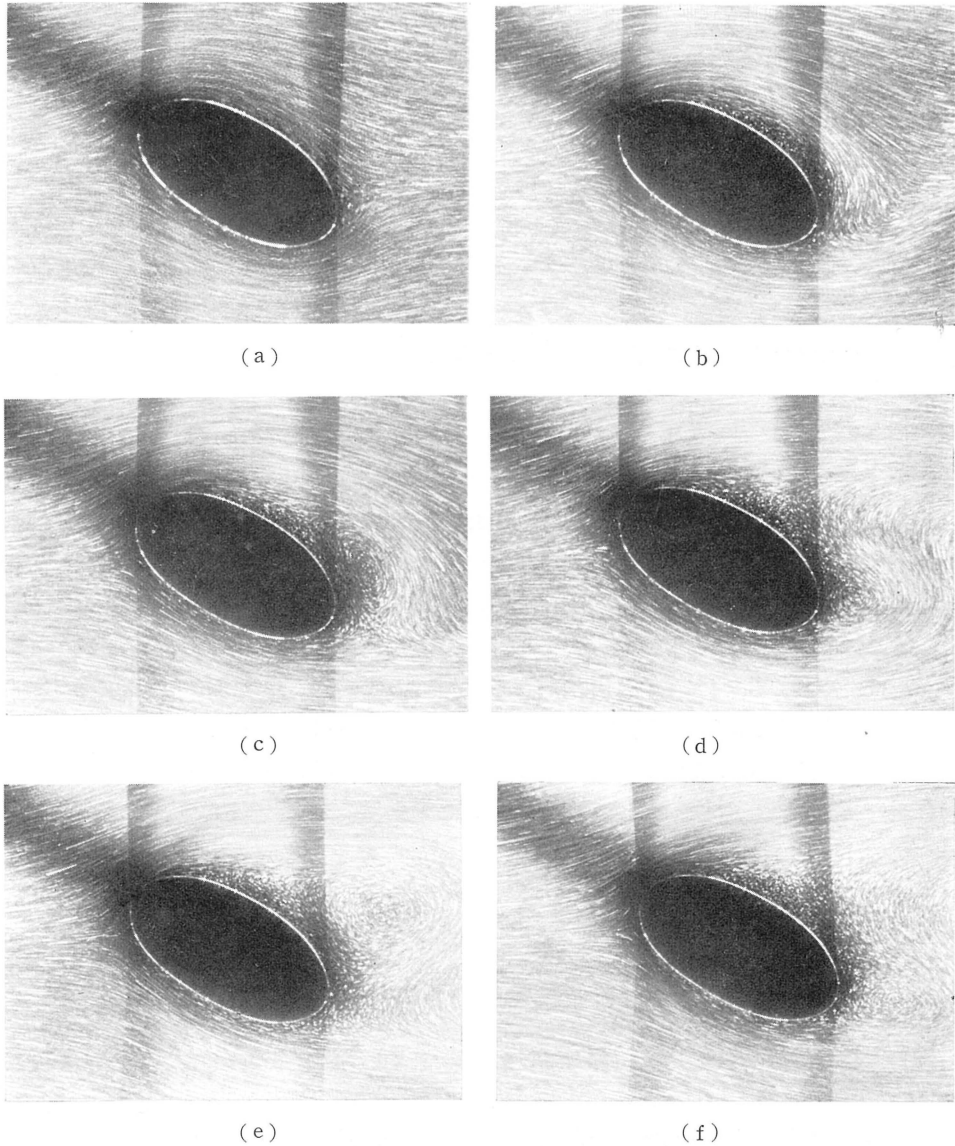


図1 静止からの出発〔流線〕

速度 $U=0.51\text{cm/s}$ ，レイノルズ数 $R=159$ ，迎角 $\alpha=30^\circ$

(a) $Ut/d=0.15$ ，(b) 0.83 ，(c) 1.56 ，(d) 3.26 ，(e) 5.90 ，(f) 7.87

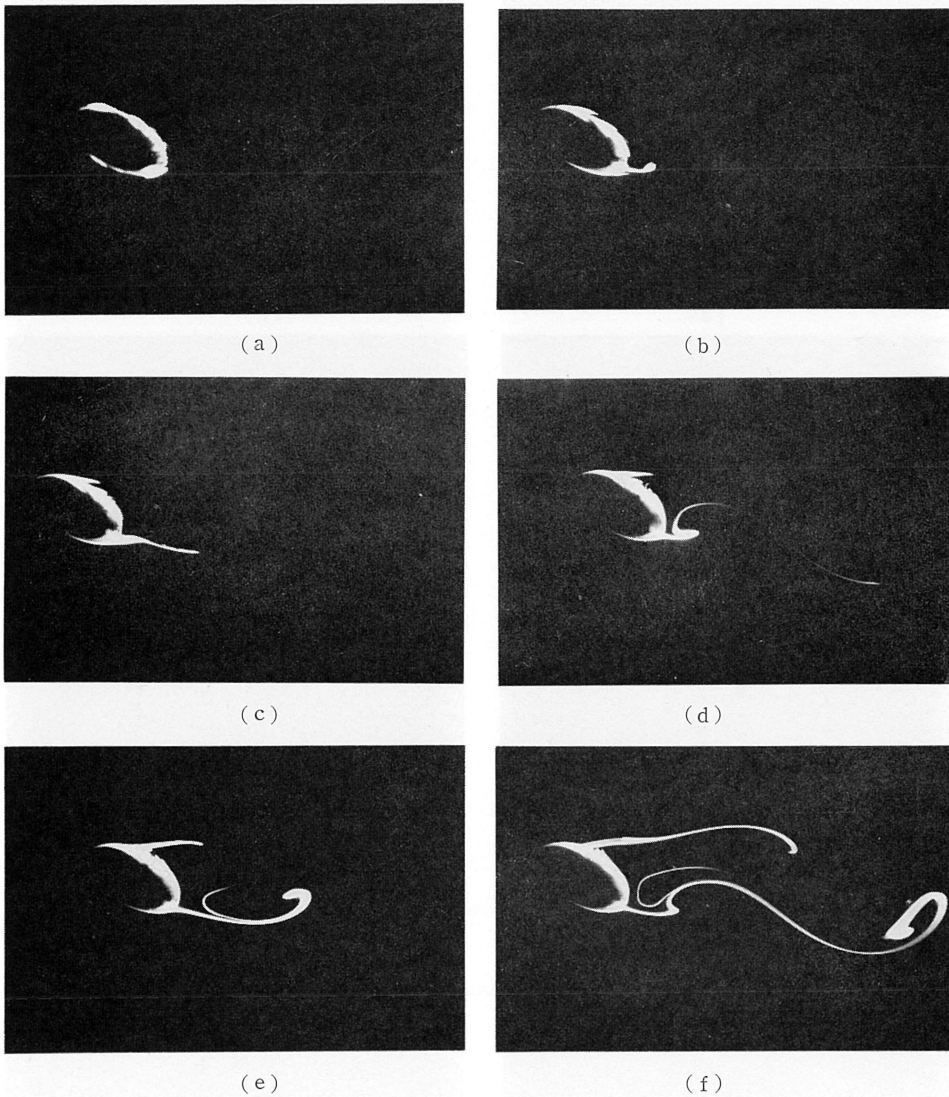


図 2 静止からの出発〔流脈〕
 $U=0.50\text{cm/s}$, $R=136$, $\alpha=30^\circ$
 (a) $Ut/d=0.075$, (b) 1.07, (c) 2.09, (d) 3.81, (e) 5.83, (f) 8.43

れである。また、初期における流れの発達には加速の仕方やレイノルズ数にほとんど無関係であり、出発点からの移動距離のみによって支配される。

3. 速度変化

一定の速度で進行中の物体が途中から急に速度を増加または減少させる場合には、最初の定常流にポテンシャル流が重畳されるので、剝離点の定義は非常に困難に遭遇する。

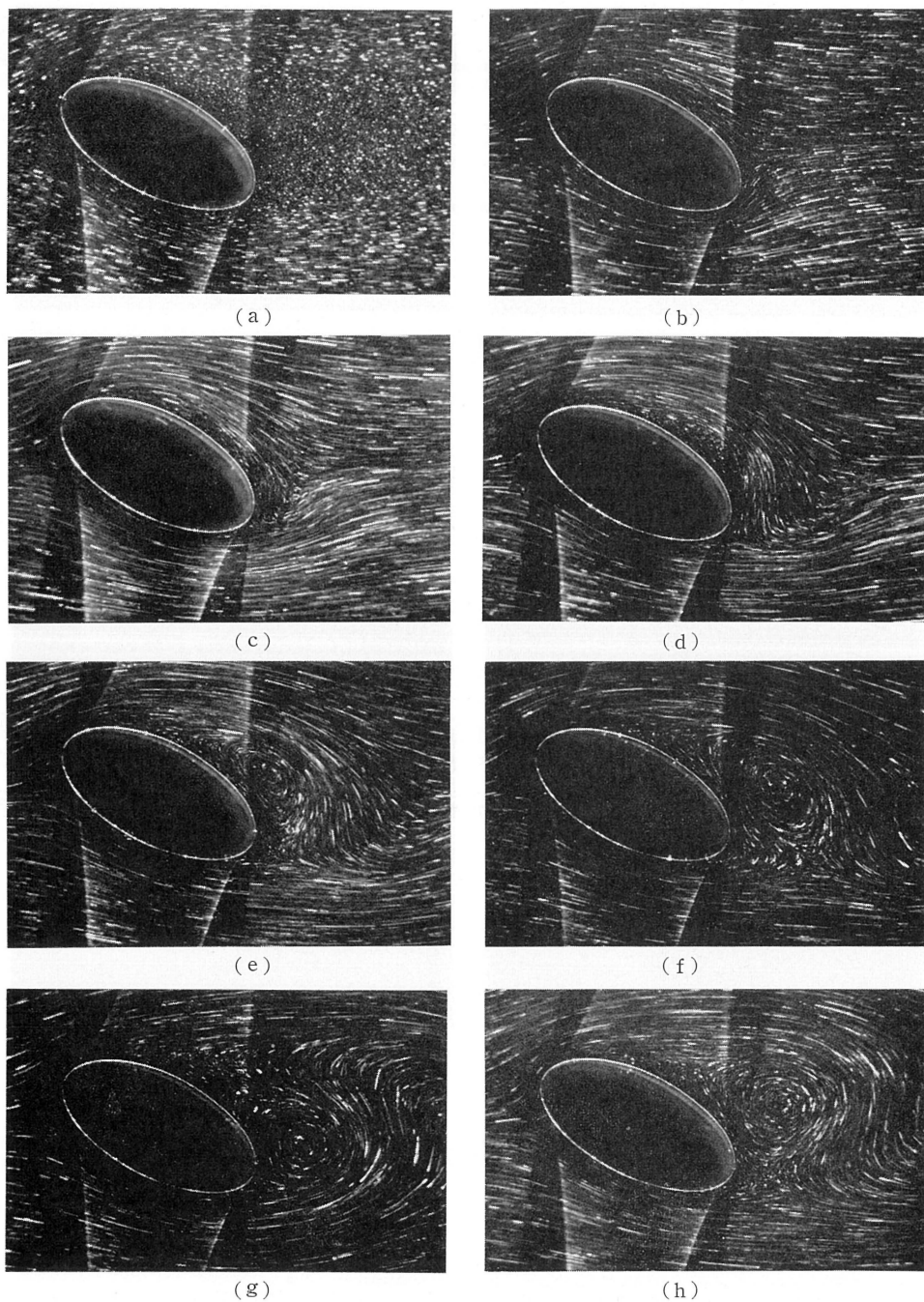


図3 一定速度からの加速〔流線〕
 最初の流速 $U_1=0.155\text{cm/s}$, $R_1=49$, 加速後の流速 $U_2=0.698\text{cm/s}$, $R_2=220$, $\alpha=30^\circ$
 (a) $U_2t/d=0$, (b) 0.056, (c) 0.56, (d) 1.07, (e) 1.6, (f) 2.1,
 (g) 3.6, (h) 5.6

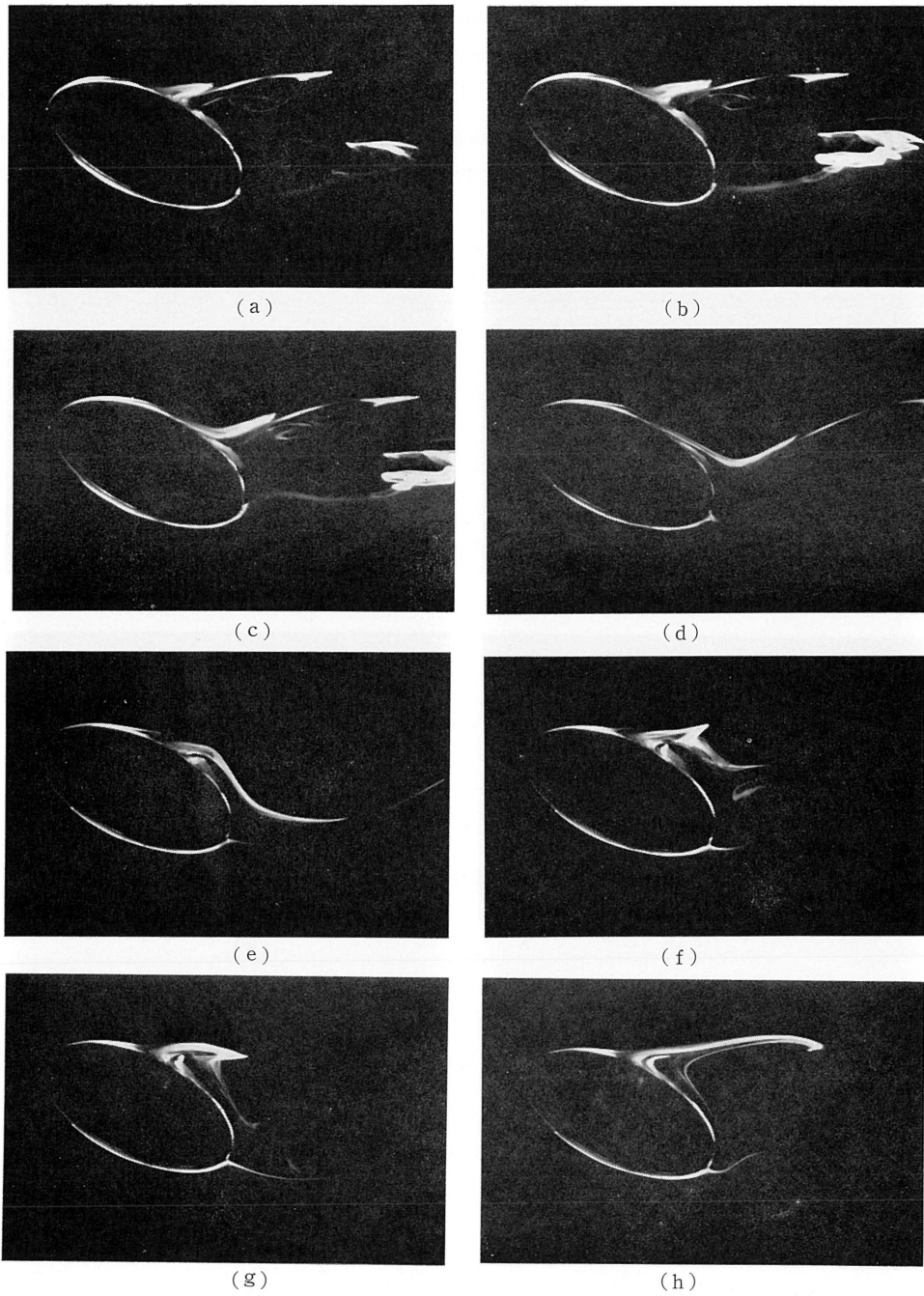


図4 一定速度からの加速〔流脈〕
 $U_1=0.15\text{cm/s}$, $R_1=45$, $U_2=0.51\text{cm/s}$, $R_2=153$, $\alpha=30^\circ$
 (a) $U_2 t/d=0$, (b) 0.07, (c) 0.35, (d) 1.00, (e) 2.18, (f) 3.43,
 (g) 5.15, (h) 7.02

図 3, 図 4 は増速, 図 5, 図 6 は減速の場合の流線模様と流脈模様を示す. 写真からわかるように, 増速の場合, 増速直後に流線模様では最初の剝離泡が消えるのに対して, 流脈にはほとんど変化が現われない. また, 減速の場合, 減速直後に流線模様では巨大な剝離泡が現われるのに対して, 流脈にはほとんど変化が現われない. このように, 一定速度から増速または減速する場合には, 流線と流脈とで剝離の様子が著しく異なる. 図 7, 図 8 は速度変化直後における物体表面近傍の速度分布を示し, 図 9 は速度変化の前後における流線模様と流脈模様の関係を示す. 図に示されるように, 加速の場合には順方向, 減

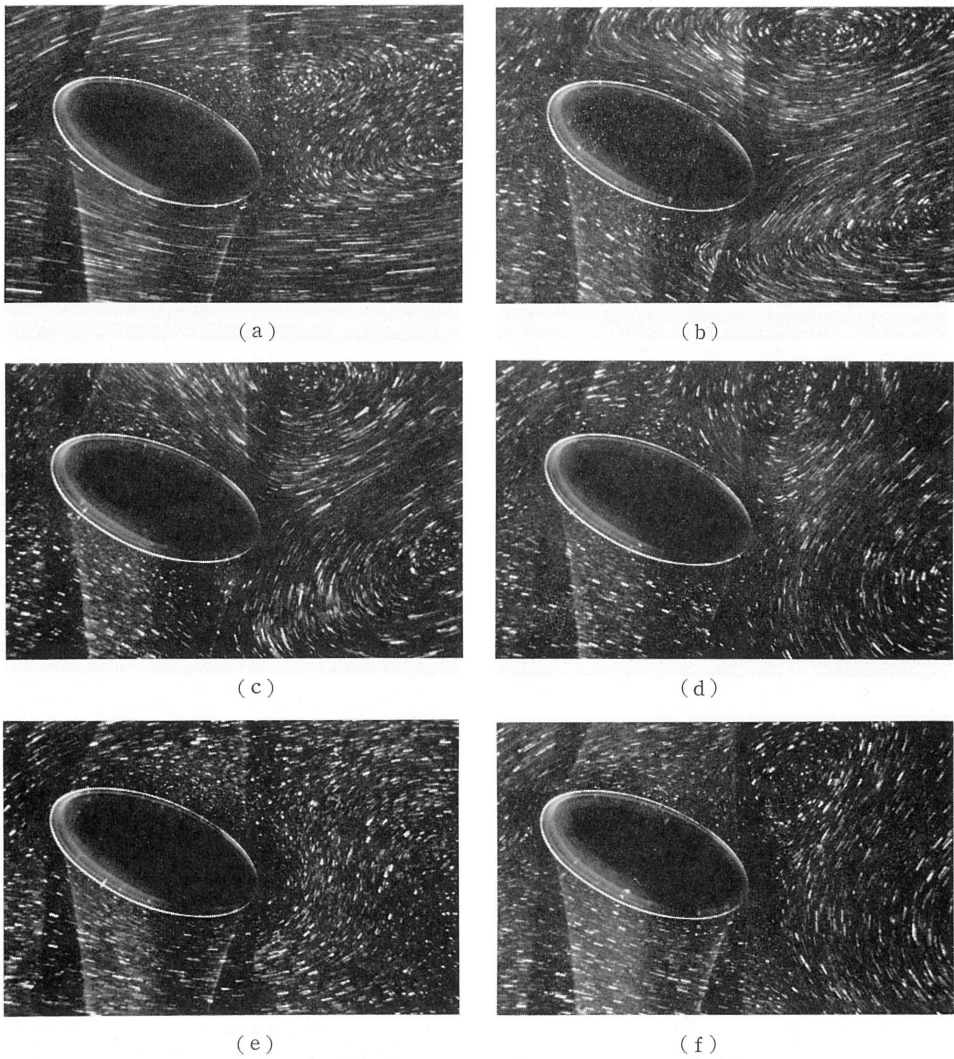


図 5 一定速度からの減速〔流線〕
 $U_1=0.51\text{cm/s}$, $R_1=149$, $U_2=0.14\text{cm/s}$, $R_2=42$, $\alpha=30^\circ$
 (a) $U_2t/d=0$, (b) 0.14, (c) 0.37, (d) 0.92, (e) 1.60, (f) 3.42

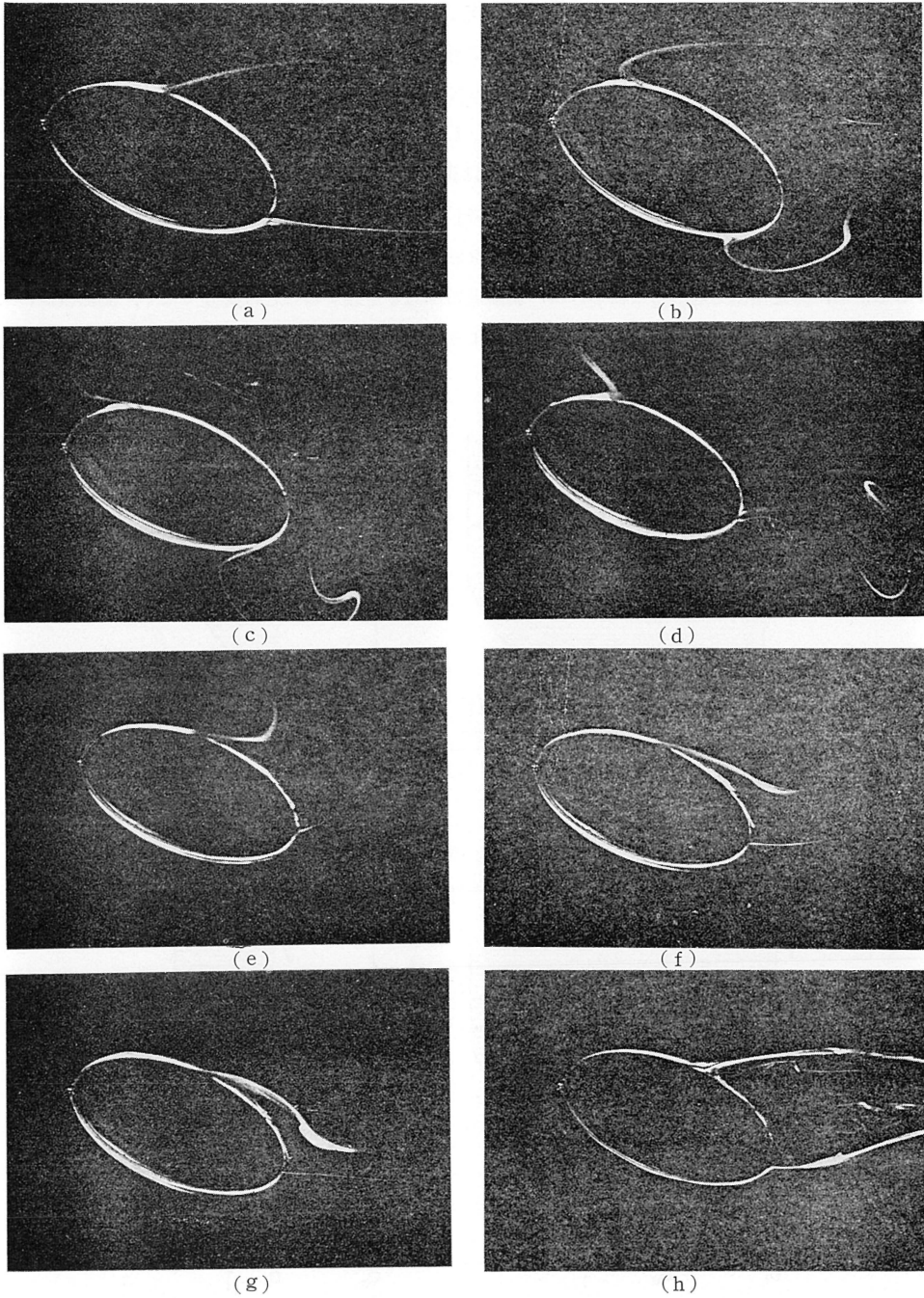


図6 一定速度からの減速〔流脈〕
 $U_1=0.50\text{cm/s}$, $R_1=149$, $U_2=0.15\text{cm/s}$, $R_2=45$, $\alpha=30^\circ$
 (a) $U_2 t/d=0$, (b) 0.14, (c) 0.42, (d) 1.07, (e) 1.90, (f) 2.65,
 (g) 3.50, (h) 29.0

速の場合には逆方向の流れが物体表面に現われ、新しく発生する第二の境界層の厚みは $\sqrt{\nu t}$ の程度である (ν は流体の動粘性係数, t は速度変化からの経過時間)。流れを支配する最も重要な物理量は渦度であり、渦層を示す流脈はすべての観測座標に対して不変に保たれるので、流脈が物体を離れる点を剝離点と定義するのが合理的であるように思われる。しかし、第二の境界層の厚みはきわめて薄いので、流脈が物体表面を離れる点を正確に測定することは困難である。非定常剝離点の定義については Moore, Rott, Sears, Telionis らにより種々議論が行なわれているが³⁾、どのように定義して見ても矛盾と曖昧さが残り、すべての非定常流に対して有効な剝離点の定義は完成していないように思われる。しかしながら、非定常流を理解するためには、剝離点の位置を定義することは必要でなく、流線模様および流脈模様の時間的変化を知ることが重要であるように考えられる。

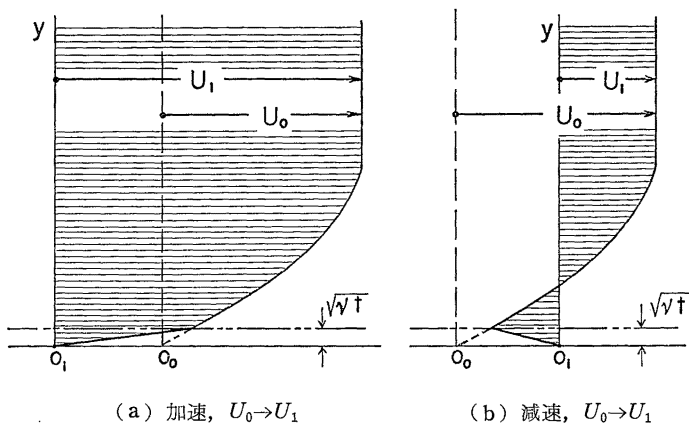


図 7 速度変化直後の速度分布 (非剝離流)

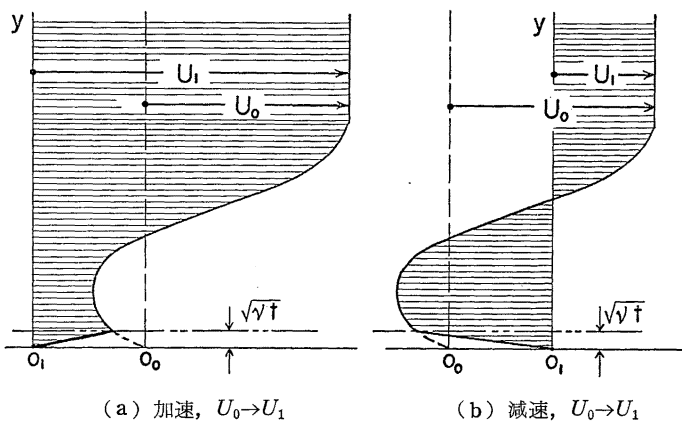


図 8 速度変化直後の速度分布 (剝離流)

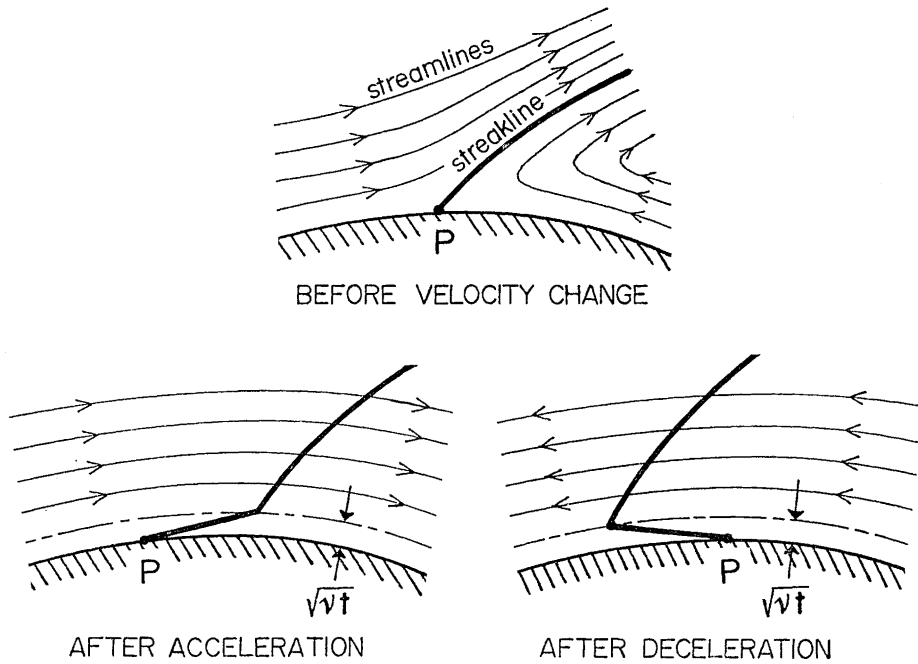


図 9 速度変化前後の流線と流脈

4. 一様流中の前後振動

前後振動は加速と減速の繰返しである。しかし、流れの様子は加速または減速が単独に行なわれる場合とはかなり異なる。それは、前の速度変化の影響が残っている間に次の速度変化が次々とおこるからである。

図 10～図 12 は迎角 30° の 2:1 楕円柱が前後振動する場合の流線模様（観測座標は物体の平均位置に固定）と流脈模様の例を示す。楕円柱が最前端に達したとき、流線では楕円柱の上面から下面にかけて大きな剝離泡が形成されるのに対して、流脈は後方へ押し流された状態にある。逆に楕円柱が最後端に達したとき、流線では明確な剝離泡が見られないのに対して、流脈は楕円柱の下面付近に大きな渦巻を形成している。流脈模様は観測座標によらないので流れを観察するのに適しているが、流脈が物体表面から離れる点を写真の上で決定することはきわめて困難である。

5. 迎角変化

図 13, 図 14 は 2:1 楕円柱の迎角を 0° から 60° へ急速に増加した場合、図 15, 図 16 は 60° から 0° へ減少させた場合の流線模様と流脈模様を示す。流線模様では迎角変化前の剝離泡が完全に消滅するのに対して、流脈では剝離泡は変形するのみで消滅することがなく、流線と流脈とはほとんど対応がつかない位異なることがわかる。一般的に言って、迎角が増加する場合の方が、減少する場合よりも定常に達するまでの時間遅れが大きい。なお、迎角変化の場合にも剝離点の定義は原理的な困難を含み、また、

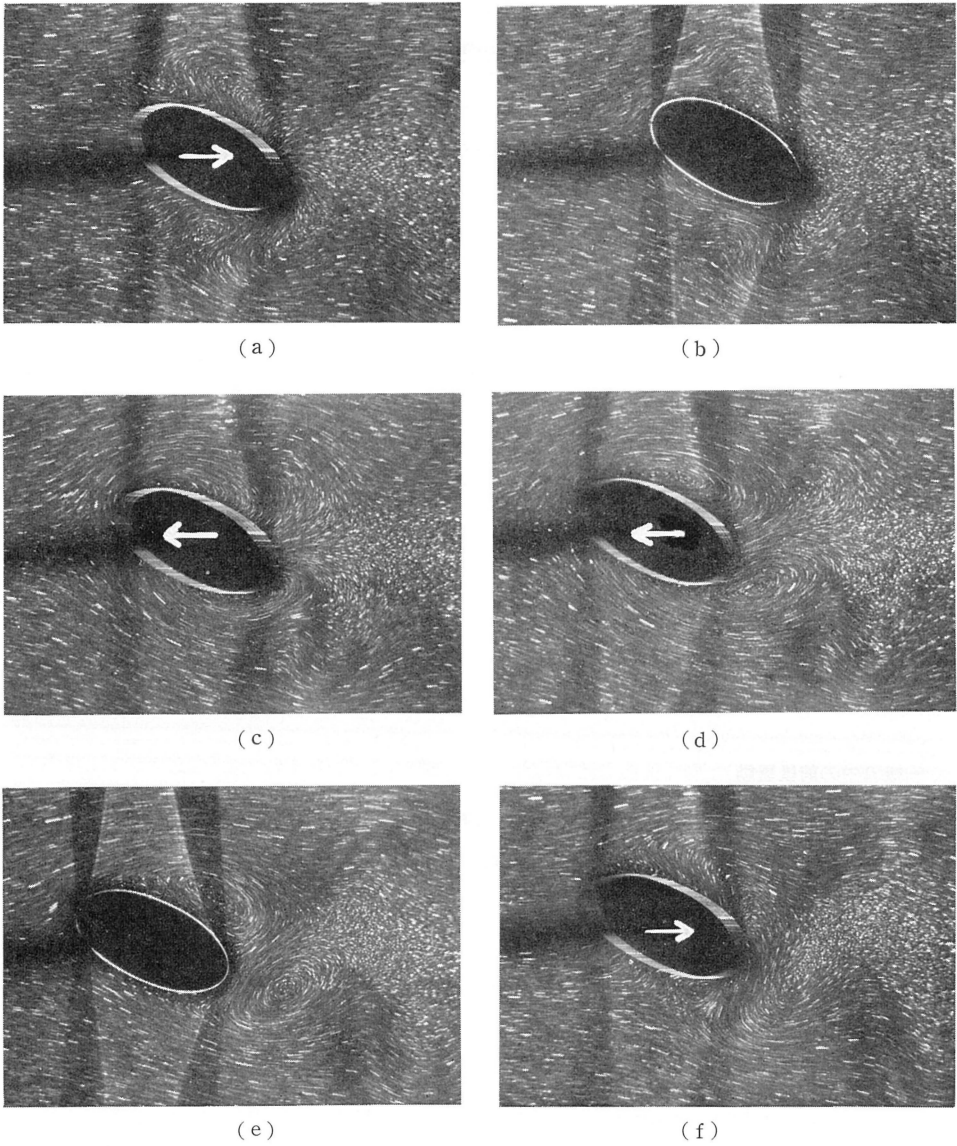


図10 一様流中の前後振動〔流線〕

$U=0.48\text{cm/s}$, 片振幅 $a=1\text{cm}$, 振動数 $N=0.1\text{Hz}$, $Nd/U=0.63$,
 $a/d=0.33$, 迎角 $\alpha=30^\circ$, 楕円柱の位置は平均位置から上流へ測って
 ξ で表す.

(a) $\xi=-0.36\text{cm}$, (b) -1.00cm , (c) -0.28cm , (d) $+0.36\text{cm}$,
 (e) $+1.00\text{cm}$, (f) $+0.36\text{cm}$

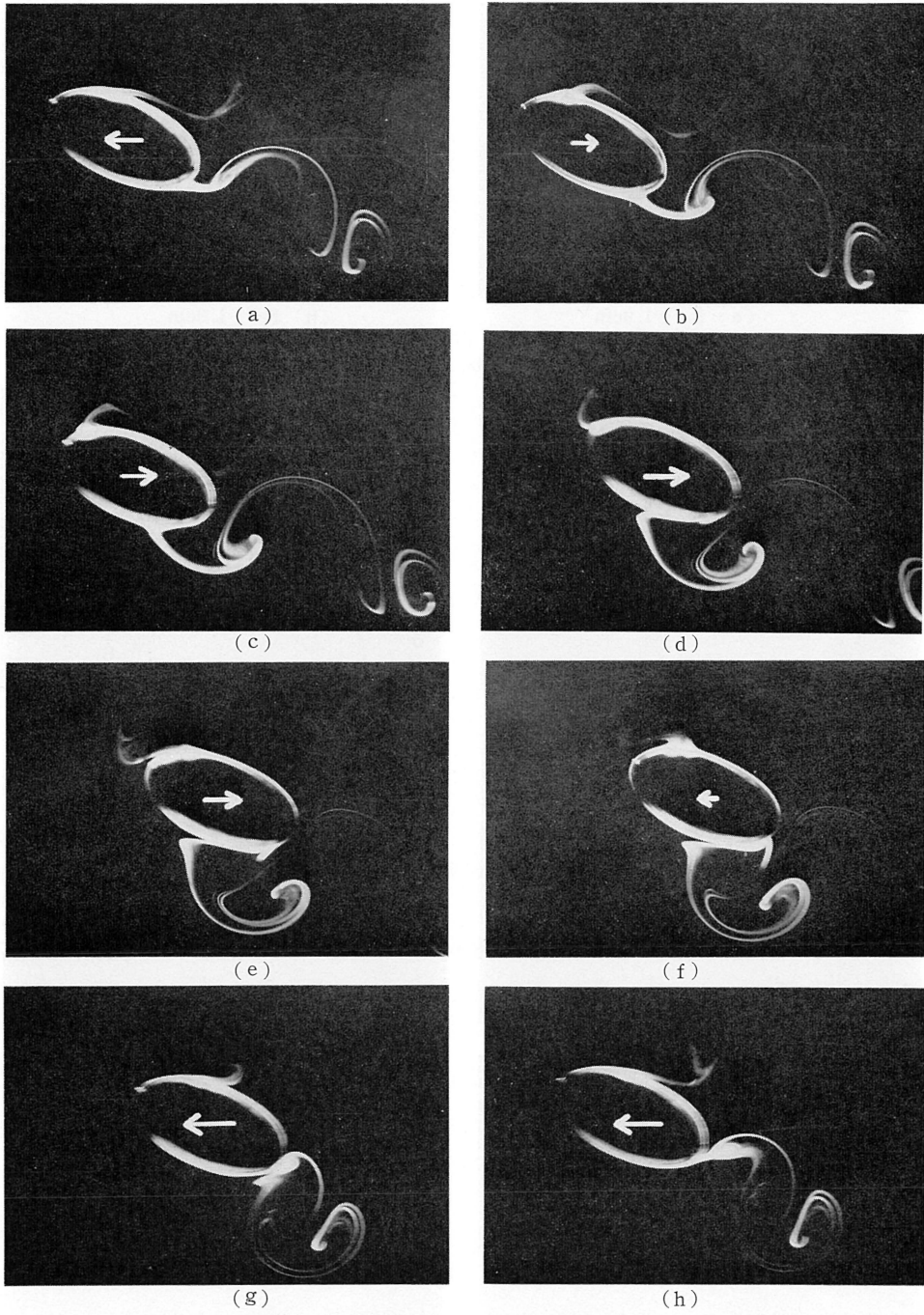


図 11 一様流中の前後振動〔流脈〕
 $U=0.48\text{cm/s}$, $a=1\text{cm}$, $N=0.1\text{Hz}$, $Nd/U=0.63$, $a/d=0.33$, $\alpha=30^\circ$
 (a) $\xi=+0.56\text{cm}$, (b) $+0.88\text{cm}$, (c) $+0.36\text{cm}$, (d) -0.16cm ,
 (e) -0.68cm , (f) -0.84cm , (g) -0.36cm , (h) $+0.12\text{cm}$

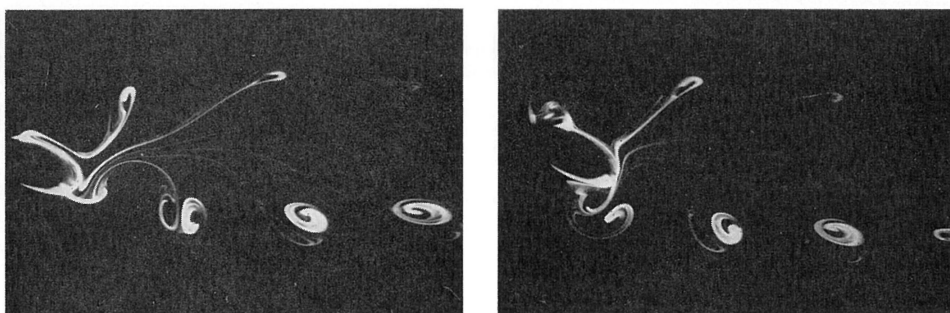
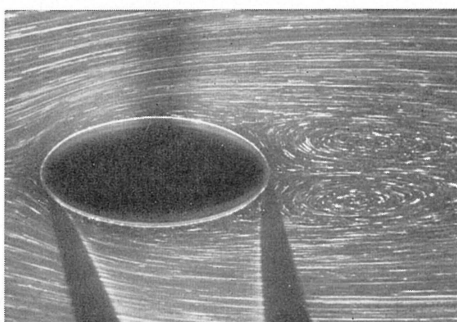
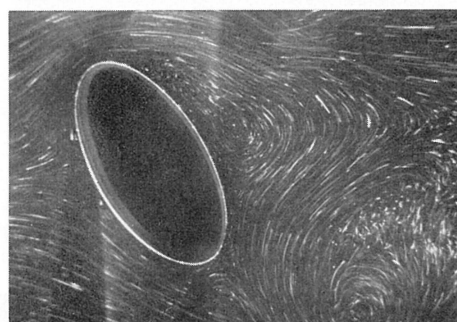
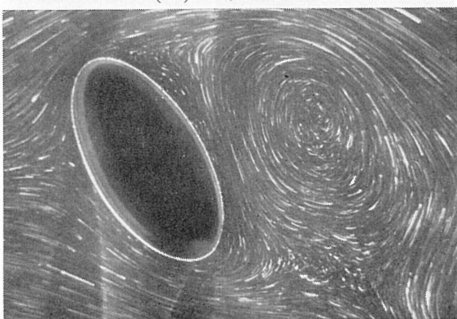
(a) $\dot{\xi}=+1.0\text{cm}$ (b) $\dot{\xi}=-1.0\text{cm}$

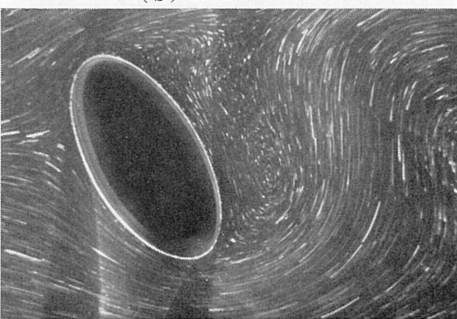
図12 一様流中の前後振動〔流脈〕
 $U=0.48\text{cm/s}$, $a=1\text{cm}$, $N=0.1\text{Hz}$, $Nd/U=0.63$, $a/d=0.33$, $\alpha=30^\circ$

(a) $Ut/d=0$ 

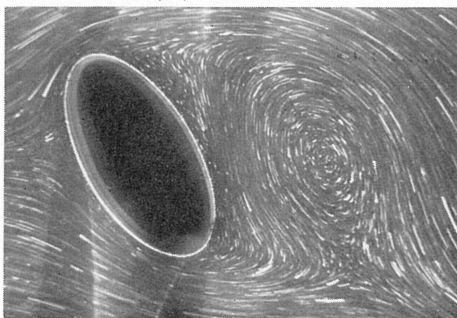
(b) 0.52



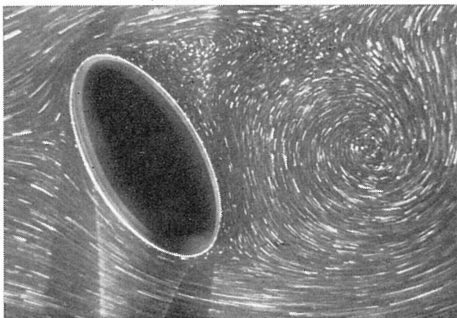
(c) 1.48



(d) 2.89

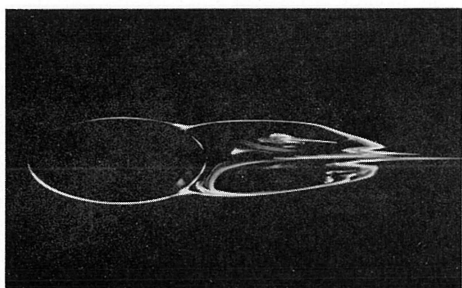


(e) 5.71

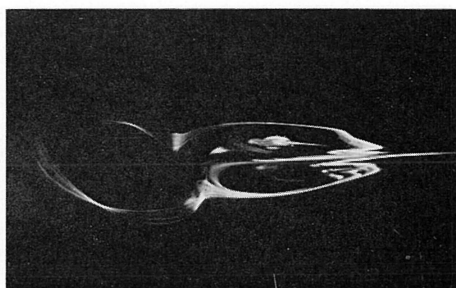


(f) 12.8

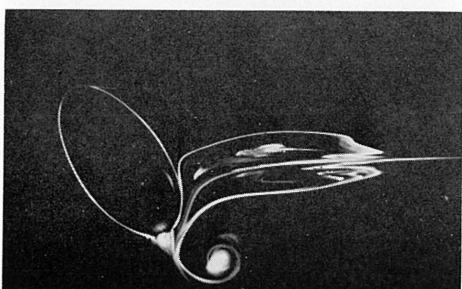
図13 迎角増加〔流線〕 $U=0.51\text{cm/s}$, $R=152$, $\alpha=0^\circ \rightarrow 60^\circ$



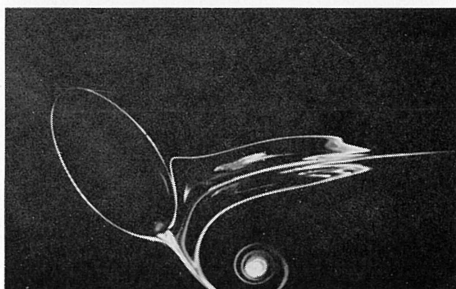
(a)



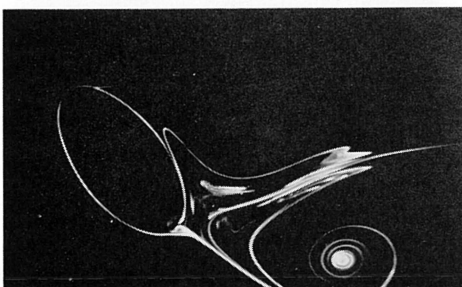
(b)



(c)



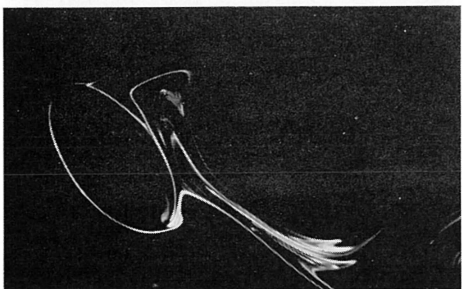
(d)



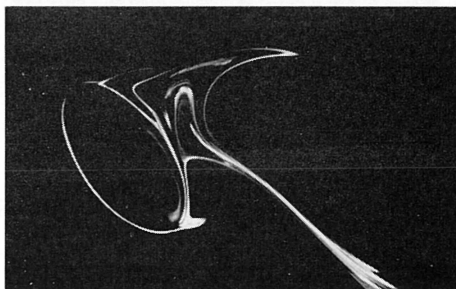
(e)



(f)



(g)



(h)

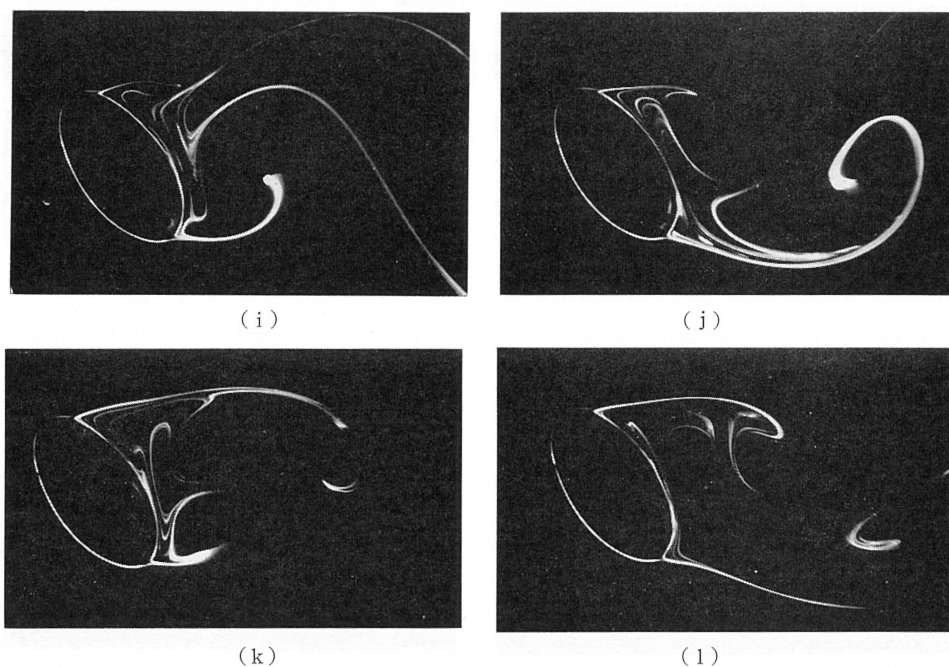


図 14 迎 角 増 加〔流脈〕

$U=0.50\text{cm/s}$, $R=135$, $\alpha=0^\circ \rightarrow 60^\circ$

(a) $Ut/d=0$, (b) 0.017, (c) 0.28, (d) 0.53, (e) 1.04, (f) 1.54,
 (g) 2.05, (h) 2.61, (i) 3.71, (j) 5.09, (k) 7.15, (l) 10.2

流線および流脈が物体から離れる点を写真から決定することもほとんど不可能である。

6. 一様流中の回転

図 17～図 20 は 2 : 1 楕円柱がその中心を軸にして、一様流中で、一様回転する場合の流線模様と流脈模様を示す。ただし、流線模様は円柱の中心に固定した非回転座標により観察されている。一回転中の流れを平均的に見れば、後流が傾き、物体は揚力を受けていることがわかる。物体近傍の流体は物体とともに回転するので、流れは物体背部までまわり込み、死水は縮小する。これらの効果は回転数が高いほど著しい。

7. 一様流中の回転振動

図 21～図 24 は 2 : 1 楕円柱が一様流の中で楕円の中心を軸にして迎角 $\pm 30^\circ$ の正弦的振動を行なう場合の流線模様と流脈模様を示す。ただし、流線模様は円柱の中心に固定した非振動座標により観察されている。流れの様子は振幅および振動数によって大幅に変化する。流脈模様からわかるように、振動数が比較的に小さい場合 ($Nd/U \sim 0.3$, N は振動数, d は楕円長径, U は一様流の速度) には境界層は後端付近の一点から流れ出し、すぐに 2 本に分れてせまい間隔で並びながら後方へのびている。一方、

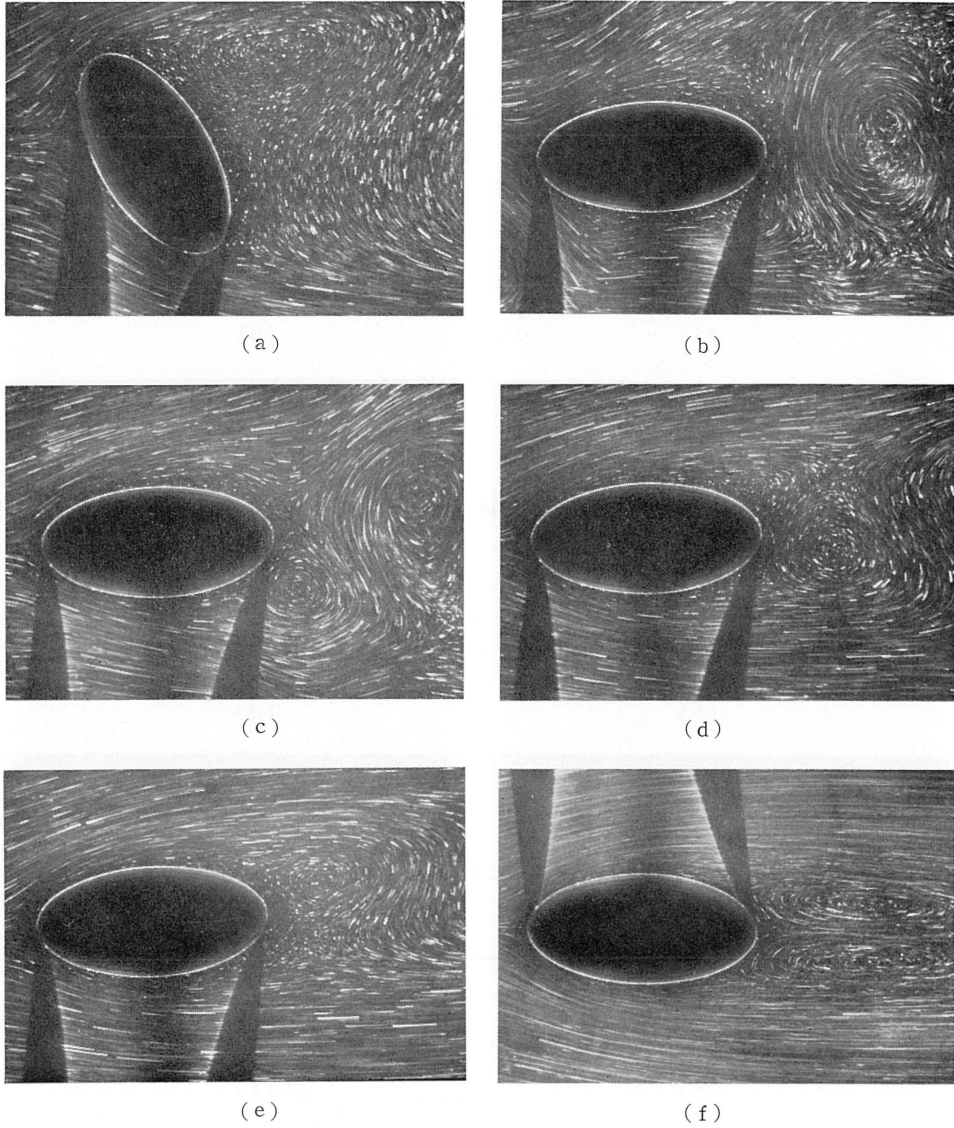


図 15 迎 角 減 少 [流線]
 $U=0.51\text{cm/s}$, $R=152$, $\alpha=60^\circ \rightarrow 0^\circ$
(a) $Ut/d=0$, (b) 0.60, (c) 1.48, (d) 2.86, (e) 4.68, (f) 17.0

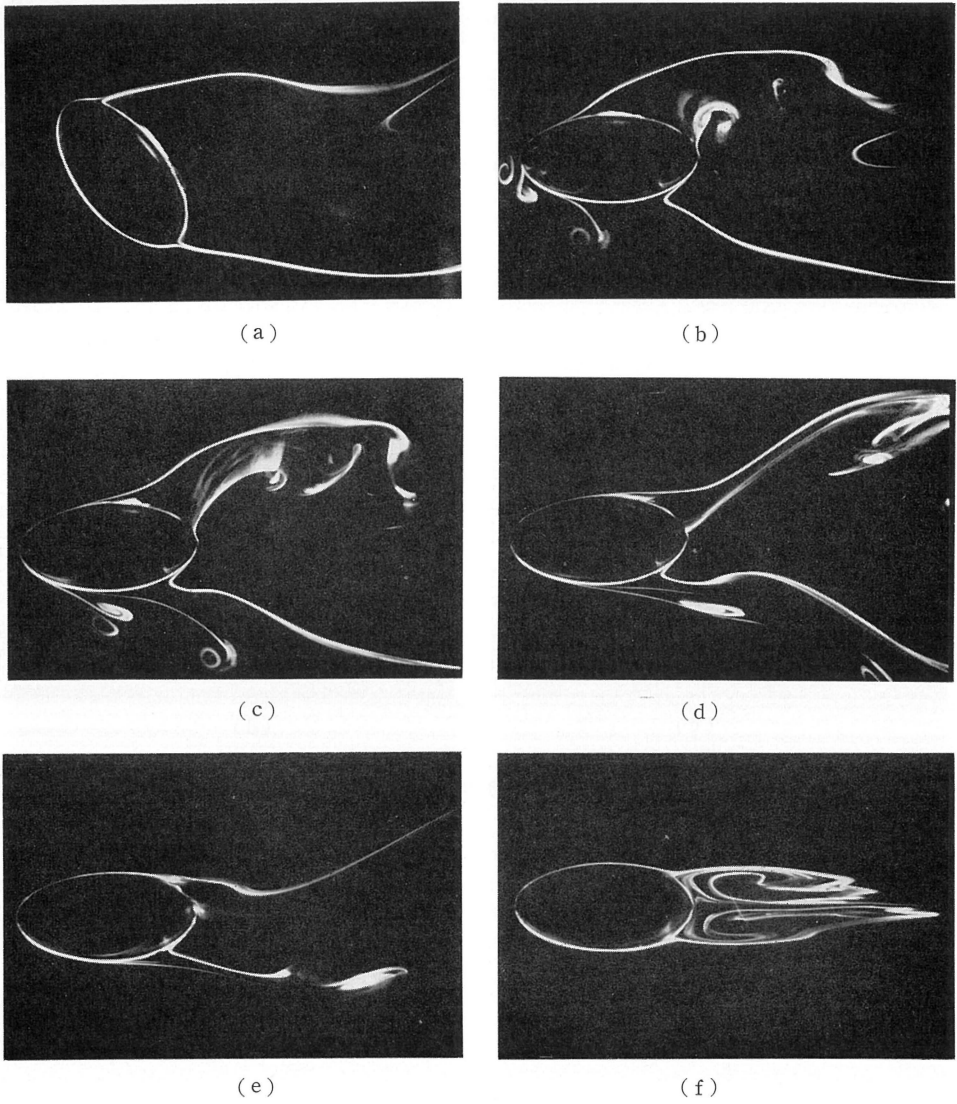


图 16 迎 角 減 少〔流脈〕

$U=0.50\text{cm/s}$, $R=135$, $\alpha=60^\circ \rightarrow 0^\circ$

(a) $Ut/d=0$, (b) 0.55, (c) 1.32, (d) 2.45, (e) 4.28, (f) 45.1

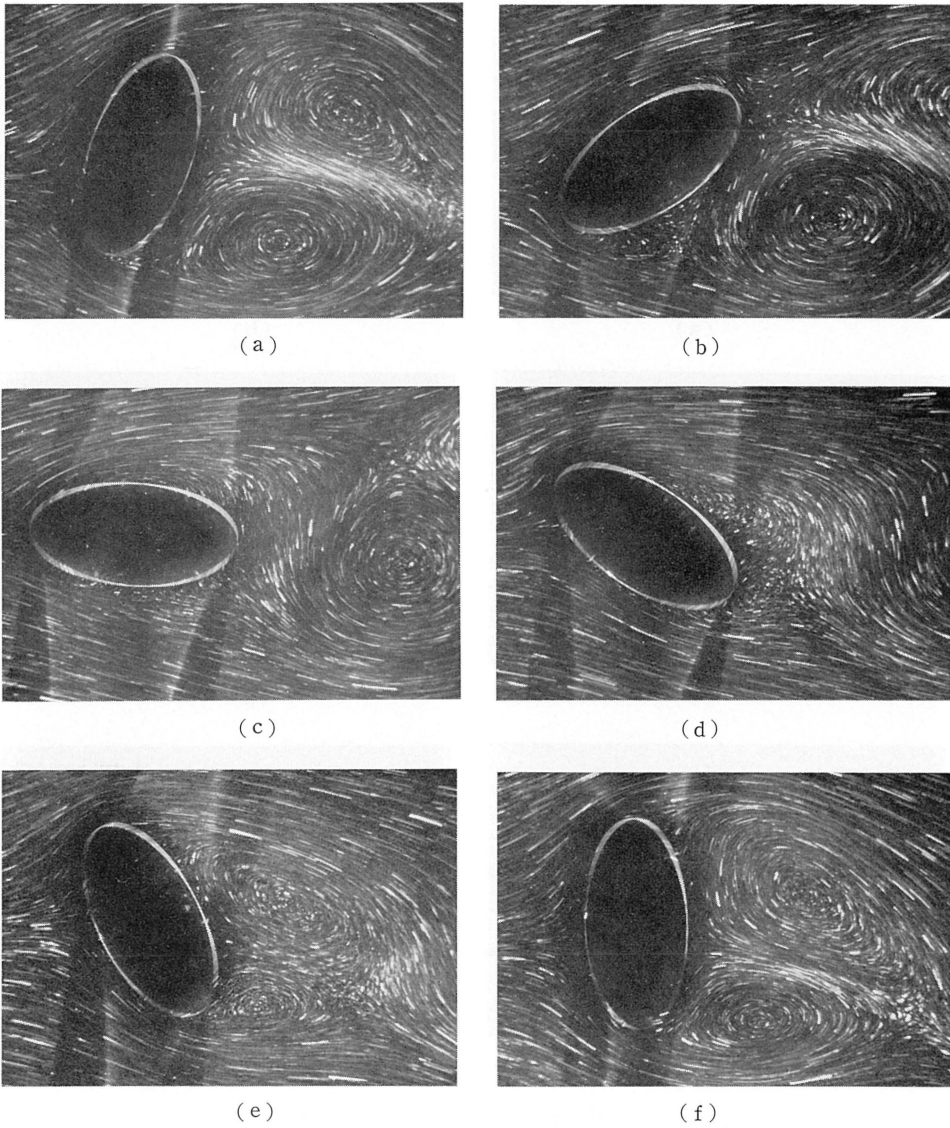


図 17 一様流中の一様回転〔流線〕
 $U=0.50\text{cm/s}$, $R=140$, 回転周期 $T=60\text{s}$, $d/UT=0.10$, 時計まわり
(a) $\alpha=110^\circ$, (b) 145° , (c) 5° , (d) 35° , (e) 63° , (f) 85°

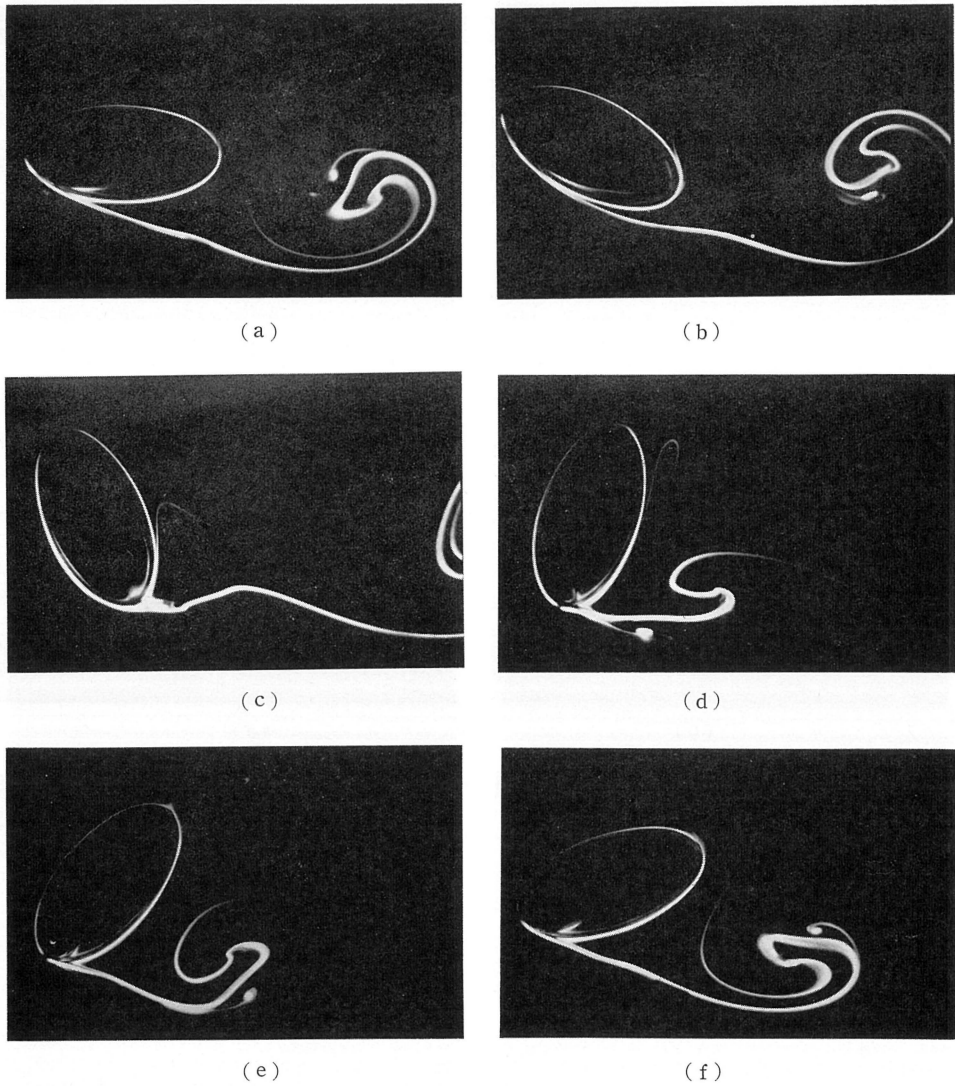


図18 一様流中の一様回転〔流脈〕
 $U=0.50\text{cm/s}$, $R=128$, $T=60\text{s}$, $d/UT=0.10$, 時計まわり
 (a) $\alpha=2^\circ$, (b) 28° , (c) 67° , (d) 108° , (e) 130° , (f) 159°

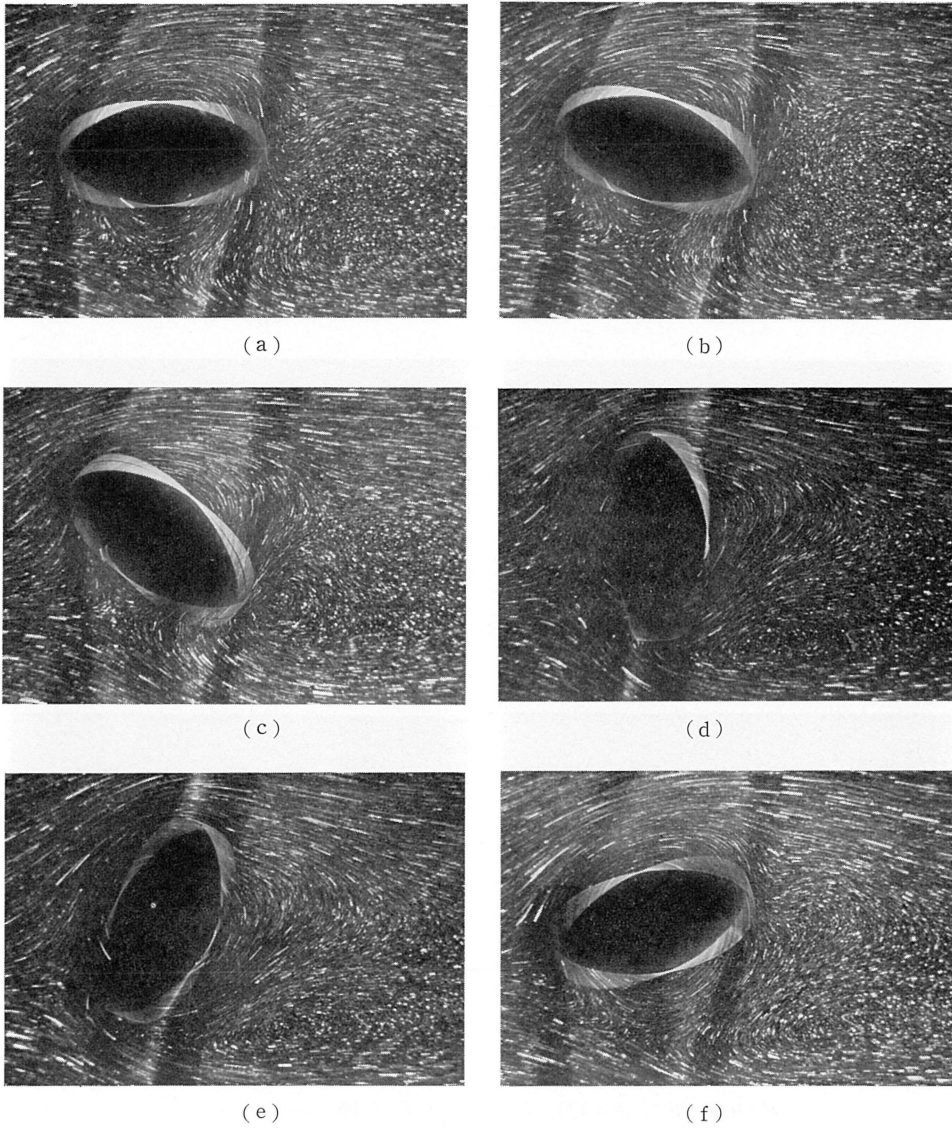


図19 一様流中の一様回転〔流線〕
 $U=0.15\text{cm/s}$, $R=41.2$, $T=60\text{s}$, $d/UT=0.33$, 時計まわり
(a) $\alpha=178^\circ$, (b) 17° , (c) 39° , (d) 90° , (e) 110° , (f) 162°

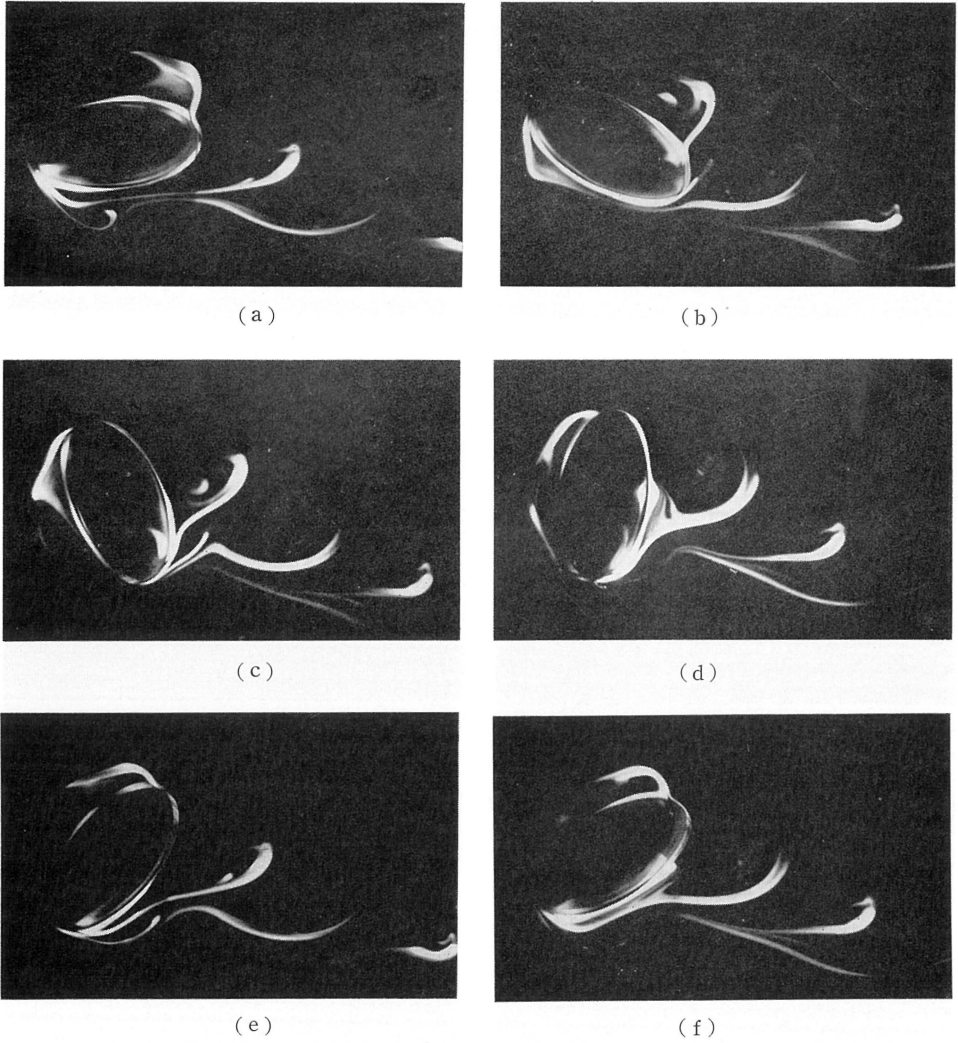


図20 一様流中の一様回転〔流脈〕
 $U=0.51\text{cm/s}$, $R=129$, $T=6\text{s}$, $d/UT=0.98$, 時計まわり
 (a) $\alpha=171^\circ$, (b) 27° , (c) 65° , (d) 98° , (e) 127° , (f) 146°

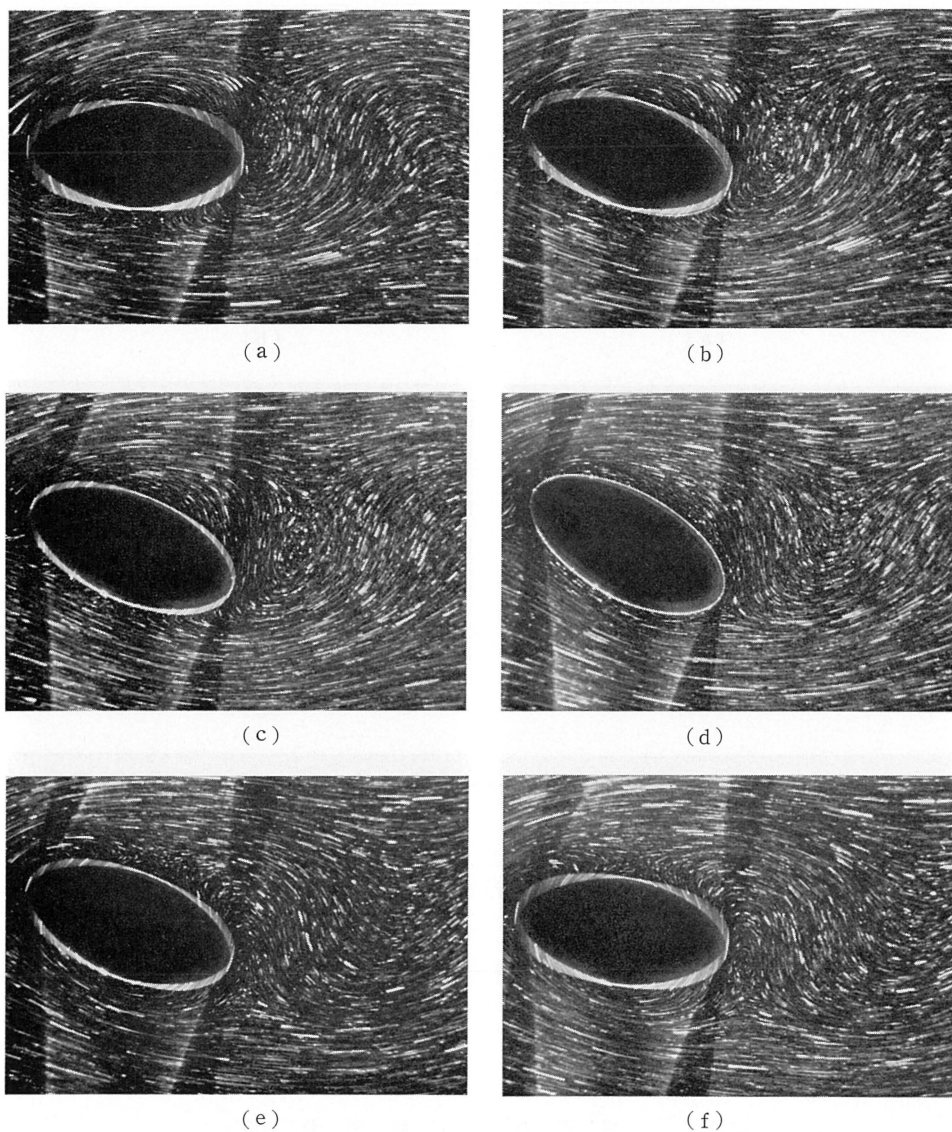


図 21 一様流中の回転振動〔流線〕
 $U=0.15\text{cm/s}$, $R=40.5$, $N=1/60\text{Hz}$, $Nd/U=0.33$, $\alpha=\pm 30^\circ$
 (a) $\alpha=0^\circ$ (時計まわり), (b) 12° (時計まわり), (c) 20° (時計まわり),
 (d) 30° , (e) 19° (反時計まわり), (f) 8° (反時計まわり).

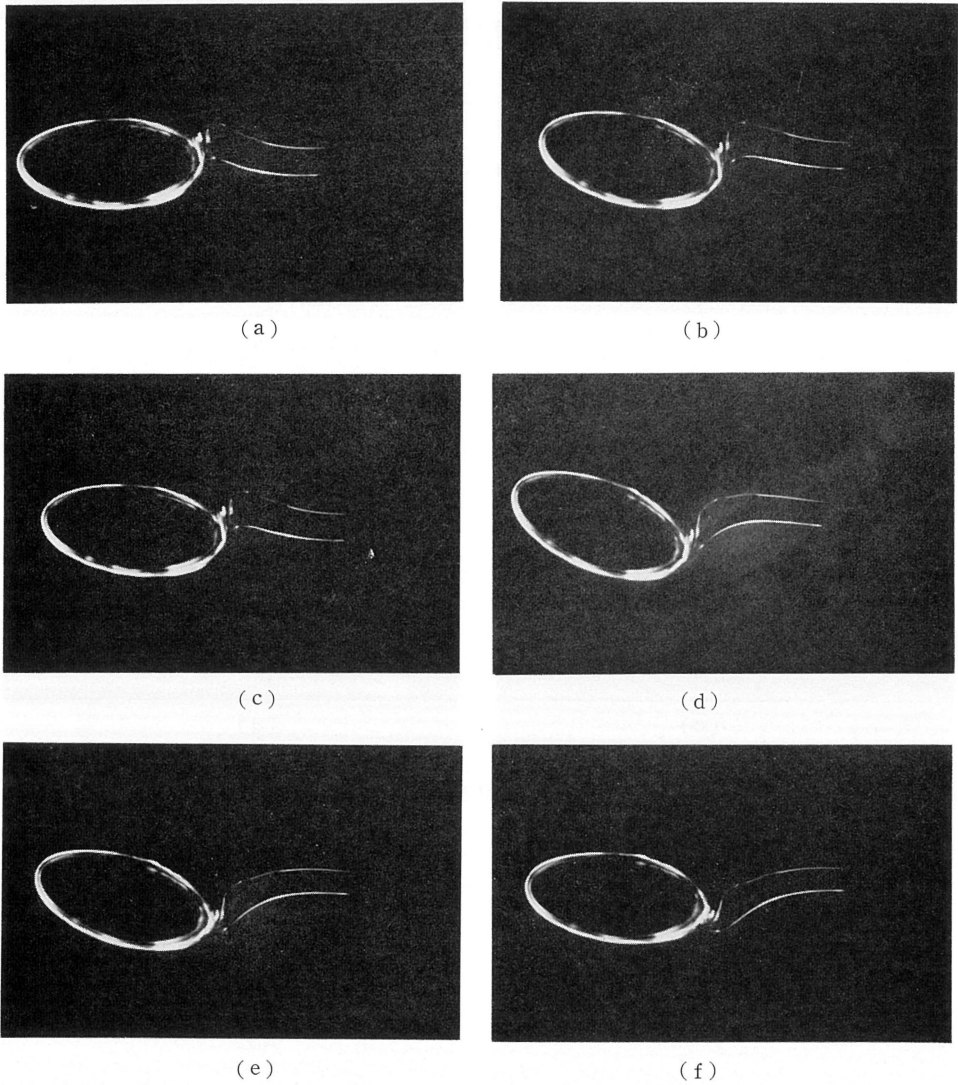


図 22 一様流中の回転振動〔流脈〕
 $U=0.16\text{cm/s}$, $R=43.0$, $N=1/60\text{Hz}$, $Nd/U=0.31$, $\alpha=\pm 30^\circ$
 (a) $\alpha=0^\circ$ (時計まわり), (b) 10° (時計まわり), (c) 18° (時計まわり),
 (d) 30° , (e) 21° (反時計まわり), (f) 11° (反時計まわり).

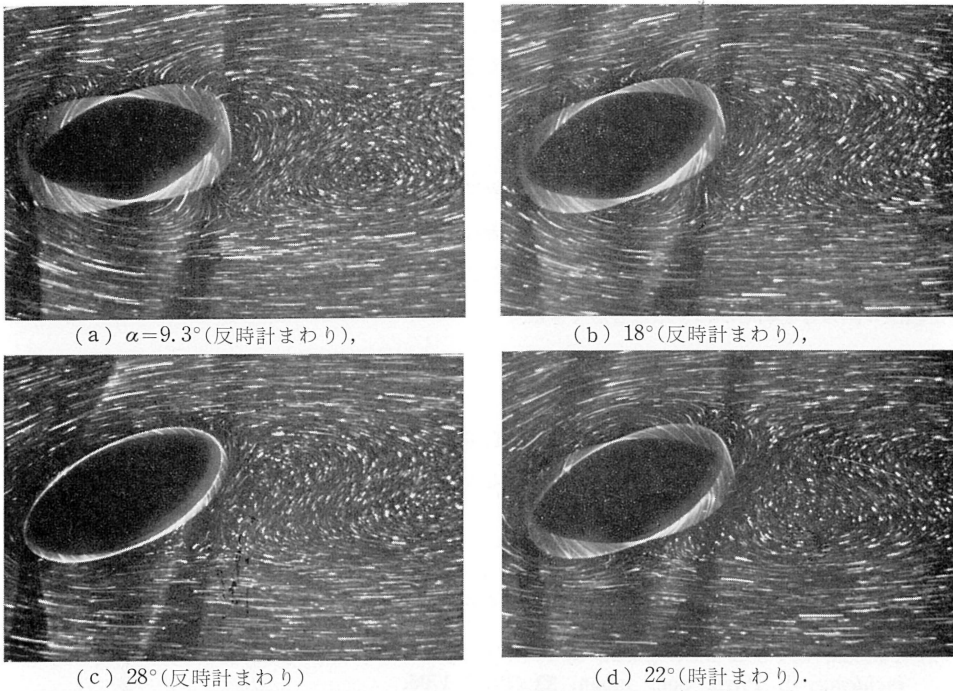


図23 一様流中の回転振動〔流線〕
 $U=0.51\text{cm/s}$, $R=138$, $N=0.17\text{Hz}$, $Nd/U=0.99$, $\alpha=\pm 30^\circ$

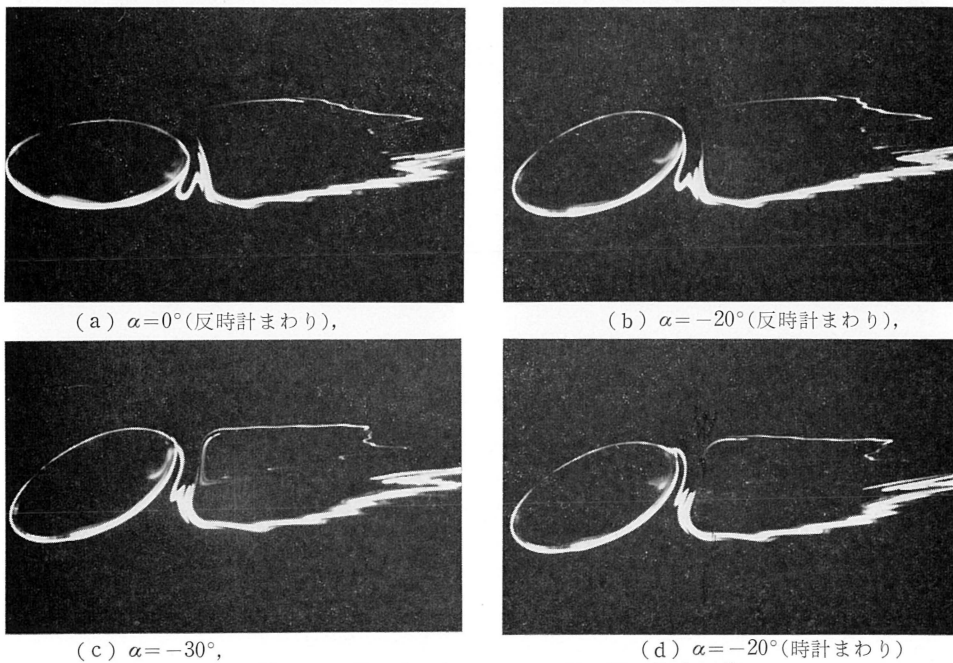


図24 一様流中の回転振動〔流脈〕
 $U=0.51\text{cm/s}$, $R=128$, $N=0.17\text{Hz}$, $Nd/U=0.99$, $\alpha=\pm 30^\circ$

振動数が高い場合 ($Nd/U \sim 1.0$) には、一本の流脈が後端付近の一点から流れ出し、楕円柱から少し離れた後方で大きな閉じた流体部分（死水領域）を形成する。

8. 結 言

剥離を含む非定常流のメカニズムを解明するために、2:1楕円柱が種々の基本的非定常運動を行なう場合の流線模様および流脈模様の時間的変化を流れの可視化技術により観察した。得られた多数の写真から、定常流の場合からは想像することもできないような種々の特異な流れの振舞と、非定常剥離点の定義法の困難さを明らかにすることができた。

謝 辞

本研究は文部省科学研究費ならびに三菱財団学術研究助成金の援助により行なわれたものである。なお、原稿の作製については泉耕二君と石村京子さんのお世話になった。

文 献

- 1) Honji, H.: *Starting flows past spheres and elliptic cylinders*, Rep. Res. Inst. Appl. Mech., **19** (1972) 271.
- 2) Taneda, S.: *The development of the lift of an impulsively started elliptic cylinder at incidence*, J. Phys. Soc. Japan, **33** (1972) 1706.
- 3) Sears, W.R. and Telionis, D.P.: *Unsteady boundary layer separation*, Recent Research on Unsteady Boundary Layers, (Laval University, 1972) Vol. 1, 404.

(昭和51年5月27日 受理)