

衝撃的に運動を開始する橢円柱まわりの流れと、揚力・抵抗の測定

Lift and Drag of an Impulsively Started Elliptic Cylinder

泉 耕二*

Kouji IZUMI

I はじめに

適当な迎角をもつ橢円柱が衝撃的に運動を開始すると、橢円柱には非定常の揚力と抵抗が働く、その作用する力が時系列的にどのような過程を経て定常状態に至るのかという問題は、構造物や翼等の非定常運動を議論する上で極めて重要である。また、橢円柱がにぶい断面形状をもつ場合には、後流に周期的な渦放出を生じ、同時にはく離点が移動するために流れは一層複雑になり、過渡的な現象については大半が未知のまま残されている。

近年、迎角をもつ橢円柱まわりの流れに関する研究はいくつか行なわれている。Wang (1971) は、橢円柱後縁の Kutta の条件に注目して、はく離点の時系列的変化を詳しく計算し、失速が橢円柱の厚み比と迎角に大きく依存すること、また Reynolds 数にはほとんど依存しないことを示した。Lugt & Haussling (1971, 1974) は Navier-Stokes の方程式を数値的に解き、運動開始の瞬間に無限大の揚力と抵抗が現われ、その後の周期的な渦放出とともに、揚力、抵抗ともに変動することを示した。堀内 (1979) は高 Reynolds 数での出発流れを渦糸近似法により数値的に求め、過渡的な揚力の変動と抵抗を計算している。

一方 Honji (1972) は実験的に出発直後の橢円柱まわりの流れを観察し、運動開始の瞬間に po-

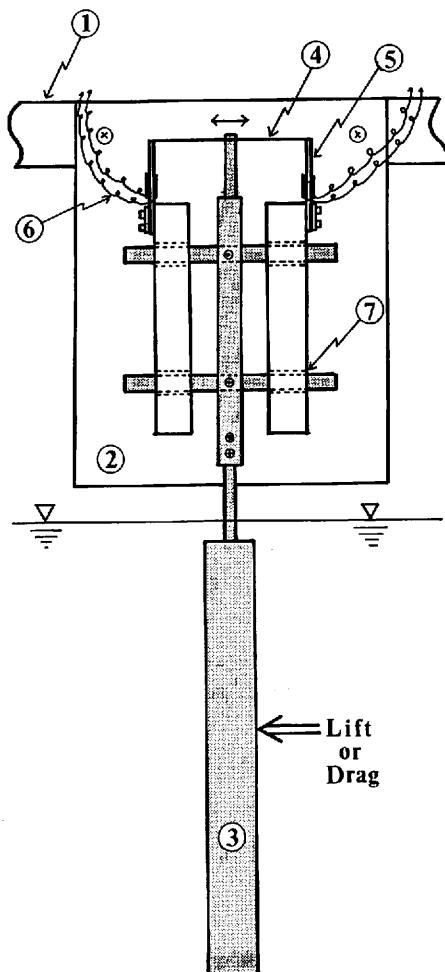
tential 流れが現われ、つづいて前・後縁から流れのはく離が始まり、やがて周期的な渦放出がおこることを示した。また、出発直後の揚力の測定は種子田、ほか (1972) によって行なわれ、運動開始直後に衝撃的に高い揚力が現われ、すぐに減少し、つづいて第 2 の揚力が最大値に達し、その後ゆるやかに減少しながらやがて定常状態に落ち着くことを示した、また同時に流れ模様の観察から、最初の揚力のピークは potential 流れによるもので、第 2 の揚力のピークは橢円柱後端付近の渦巻の発生に対応することが報告された。

以上のように、迎角をもつ橢円柱まわりの流れに関するいくつかの研究によって、運動開始から定常状態に至るまでの過渡的な流れについてはある程度明らかになっている。しかし、揚力、抵抗の定量値は全く得られておらず、その非定常性についても議論されていない。そこで本研究では非定常性を検討する意味で、迎角 45°、橢円柱の厚み比 2 : 1 の場合について、力の定量的な測定を試み、また同時に流れ場との対応を実験的に調べることを目的とした。

II 実験装置および実験方法

実験は幅 50cm、深さ 50cm、長さ 6m の水槽を用いて行なわれた。水槽の上方に設けられたレール上を台車が自走する方式で、モデルは台車に垂直に取り付けられている。台車の走行速度は 3 mm/sec ~ 100 cm/sec の範囲で、任意の速度を

* 筑波大学水理実験センター



第1図 力の計測装置

- ①台車フレーム ②力の計測装置基盤
 - ③橿円柱（木製） ④ピアノ線
 - ⑤板バネ ⑥歪ゲージとリード線
 - ⑦スライドベアリング
- 灰色部がスライド可能な部分。抵抗測定時には基盤を 90° 回転させて固定する。

選ぶことができ、本実験では $0.8\sim38\text{cm/sec}$ の範囲で測定を行った。さらに本装置では台車の速度の立ち上がり特性を良くするために、直流モーターの回転数が一定になった段階で電磁クラッチにより台車を駆動させる方式を採用した。最初の

加速に要する時間は約 0.25sec 以内で、台車はその後一定速度で走行する。

今回実験に用いた橿円柱は木製と黄銅製の2本で、力の測定には木製を、特に電解沈澱法による流れの可視化には黄銅製のモデルを使用した。橿円柱の大きさは長径 4cm 、短径 2cm 、長さ 35cm で、長・短径比は $2:1$ である。

出発直後の過渡的な流れを、アルミ粉末法による流線と、電解沈澱法による統合流脈膜(integrated streaksheet)(種子田, 1979)とによって可視化し、それらを 35mm カメラで撮影するとともに撮影時刻を記録した。

次に力の測定については、非定常の揚力と抵抗を歪みゲージを用いて測定した。運動開始直後の揚力と抵抗を完全に分離測定することは困難なので、第1図に示すような装置を試作した。橿円柱は直径 10mm の円柱により支持され、上部のスライド部を経て2枚の板バネに固定されている。特に、製作にあたってスライド部での摩擦が最小になるよう、スライドベアリングの油抜きなどの注意が払われた。本装置の特徴は、まず揚力と抵抗を別々のRunにおいてではあるが分離して測定できることである。第二に特に抵抗測定時にはモデルの慣性質量が小さくなければならないので木製のモデルを使用したが、本装置によれば、水中で生ずる浮力の影響も十分に取り除くことができる。

橿円柱に力が働くと2枚の板バネに歪みが生じ、その歪みは板バネにはられた4板の歪みゲージにより電圧変化に変換される。今回用いた板バネは幅 1cm 、長さ 5cm で、板厚は 0.5mm と 1mm の2種類である。また力の計測と同時に歪みゲージを利用した加速度変換器により台車の加速度を計測記録した。

III 実験結果

記号表示

- a ; 楕円柱の長径 (4 cm)
 b ; 楕円柱の短径 (2 cm)
 l ; 楕円柱の長さ (35cm)
 θ ; 迎角 (椭円柱の長軸と一様流のなす角)
 U ; 一様流の速度 (cm/sec)
 ν ; 水の動粘性係数 (cm²/sec)

Re ; Reynolds 数

$$Re = \frac{Ua}{\nu} \quad (\text{代表長さを長径 } a \text{とした})$$

ρ ; 水の密度

s ; 楕円柱の長径方向の断面積 (cm²)

$$s = a \times l$$

C_L ; 揚力係数

$$C_L = \frac{\text{Lift}}{\frac{1}{2} \rho U^2 s}$$

C_d ; 抵抗係数

$$C_d = \frac{\text{Drag}}{\frac{1}{2} \rho U^2 s}$$

t ; 運動開始からの経過時間 (sec)

τ ; 運動開始からの無次元経過時間

$$\tau = \frac{Ut}{a}$$

n ; 物体からの放出渦の周波数

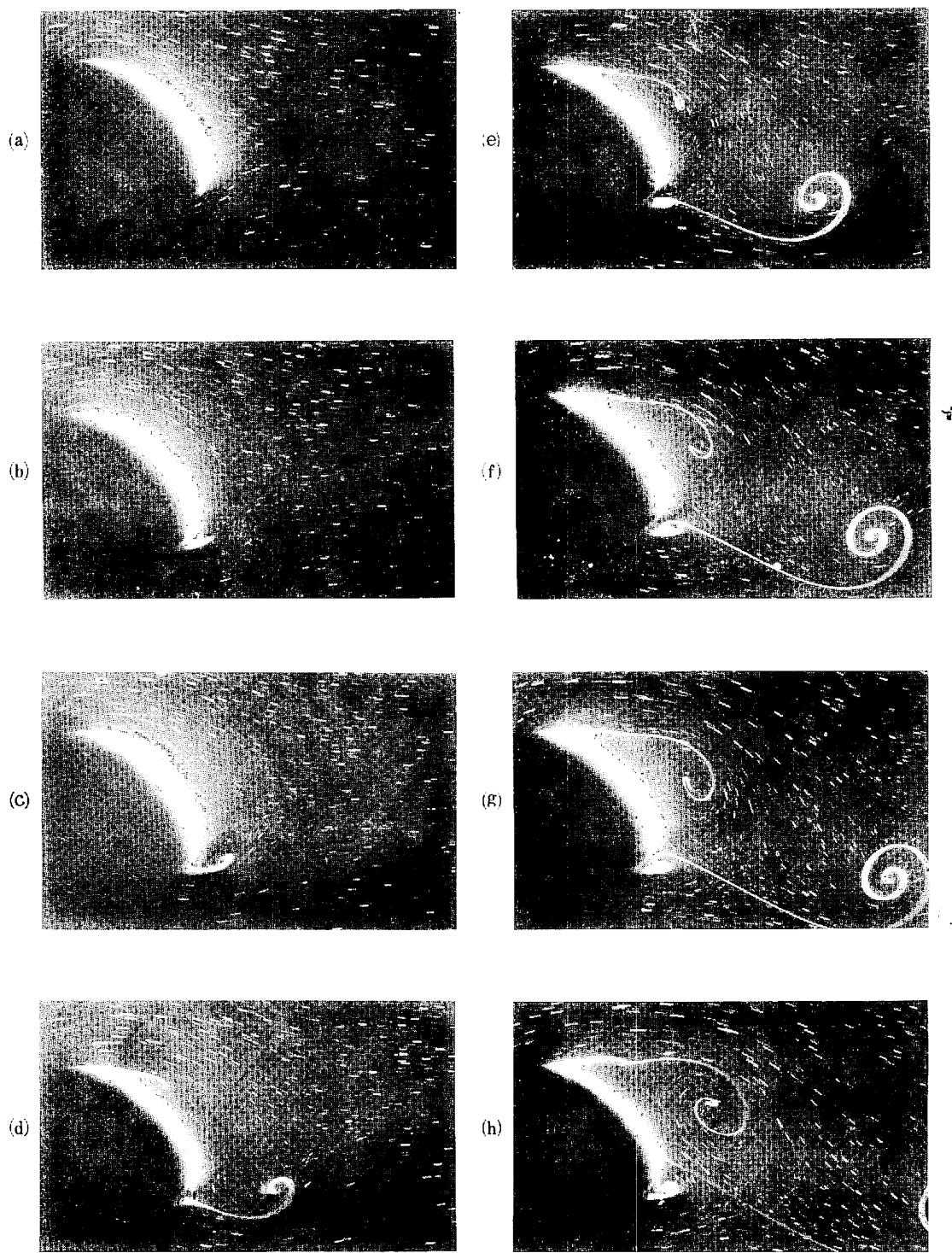
St ; Strouhal 数

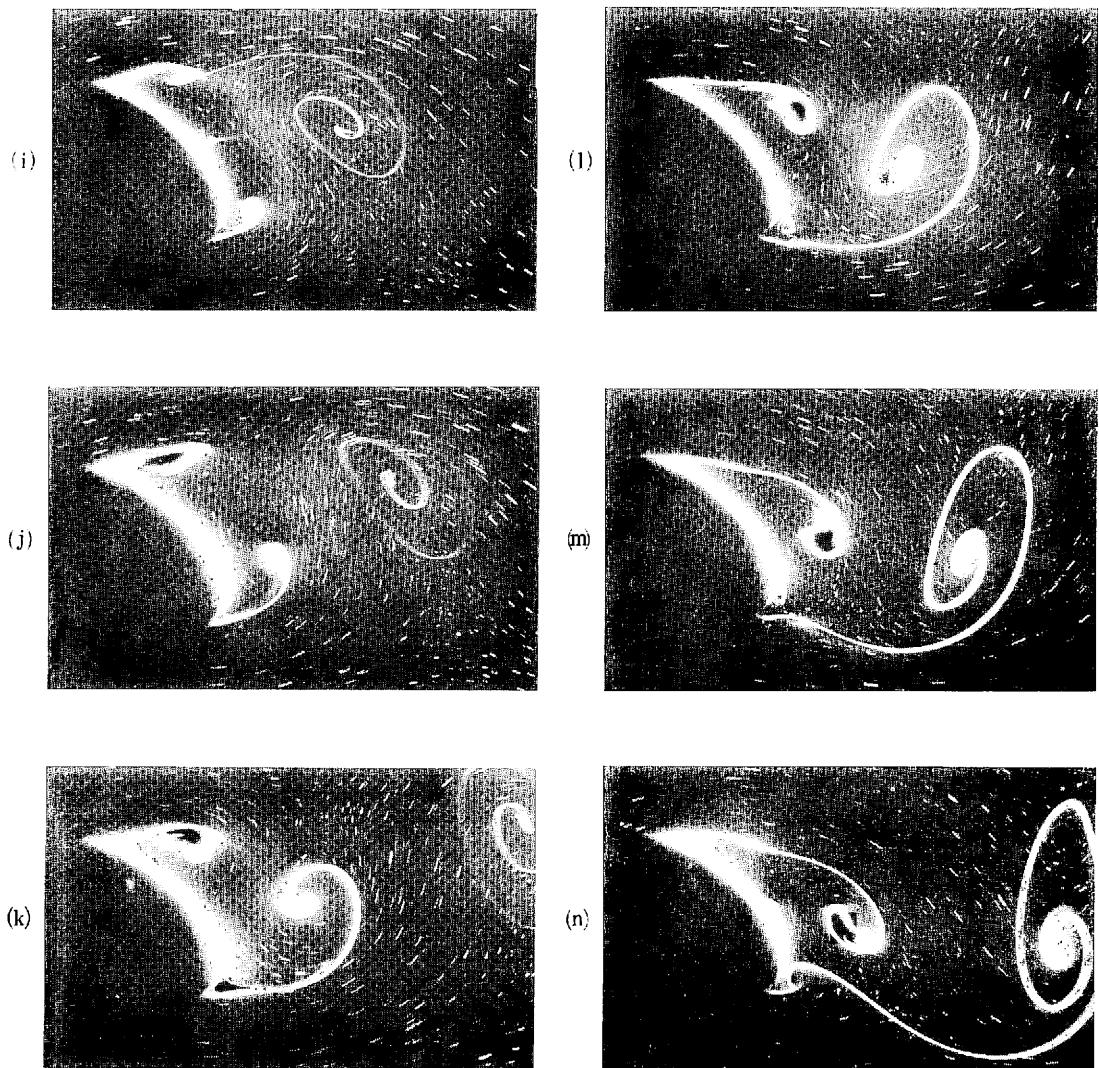
$$St = \frac{na}{U}$$

第2図に迎角 $\theta=45^\circ$, $U=0.8\text{cm/sec}$, Reynolds 数 340 の場合の流れ模様の変化を示した。流れはアルミ粉末法により流線が、また電解沈澱法により integrated streakline が可視化されている。写真はカメラを椭円柱に固定した座標で撮影した。写真 (a) は運動開始後 0.45sec 経過した時の流れで、無次元表示した τ で表わすと $\tau=0.09$ である。椭円柱の前・後縁ともに流れのはく離ではなく、後縁上部によどみ点がある。すなわち運動開始直後には、このように potential 流れができることがわかる、写真 (b), (c) はそれぞれ $\tau=0.52, 0.72$ で、前・後縁ともにはく離が

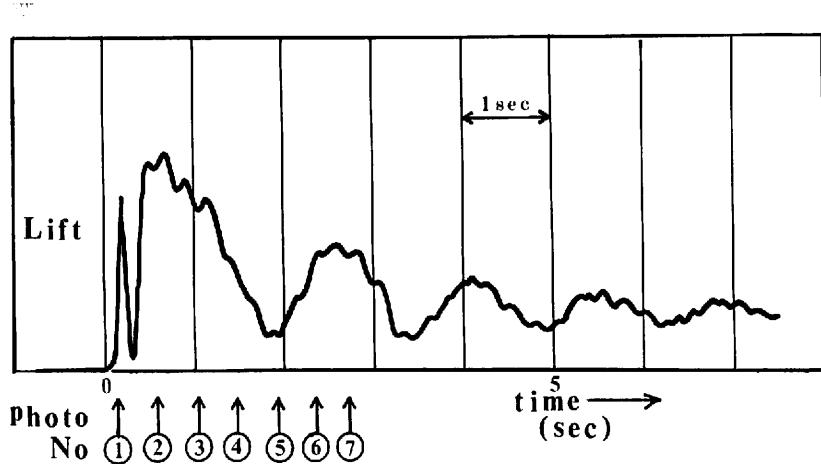
始まり、前縁ではく離した色素は椭円柱表面に沿うように流れ、背部に死水領域が発達していく。また後縁では小さな渦巻が現われ始め、渦巻は時間とともに成長し、やがて椭円柱から離れる。この渦巻の回転の向きは反時計まわりで、いわゆる出発渦 (starting-vortex) と呼ばれる渦である。後縁から離れた出発渦は後方へ流され、また同時に椭円柱背部の死水領域が急激に成長し、新たな渦巻が形成されている (写真 d)。この2番目の渦巻は時間とともに大きく成長しており、回転の向きは時計まわりである。同時に出発渦は後方へ流されながら、その中心位置を下向きに移動していく (写真 e, f, g)。一方、前縁からのはく離渦は背部で充分に発達したのち、物体から離れる (写真 h)。この時の τ は $\tau \sim 3$ である。同時に後縁では既に 3番目のはく離渦が現われ、その渦の中心は後縁から椭円柱背部に向かって上昇しながら成長していく (写真 i, j)。さらに時間がたつと、この3番目の渦は物体から離れ後方へ押し流される。この時の τ は $\tau \sim 5$ である。後縁付近の流れについてみると二次的な双子渦が現われている (写真 k, l)。3番目の渦巻はそれぞの渦巻の影響を受けて上下方向に伸びるように変形しつつ後方へ流されていく。また同時に、前縁からは4番目のはく離渦が成長している (写真 m, n)。このようにして前・後縁から交互に渦の放出がくり返され、やがて定常的な Kármán 渦列の流れになる。

一連の写真で、出発直後の過渡的な流れ模様を示した。注目すべきことは、前・後縁でのはく離の様子は前述のように明らかに異なっており、前縁では比較的スムーズにはく離するが、後縁付近でのはく離の様子は複雑で、時系列的にも大きく変化する。またはく離した渦巻の中心位置も、それぞれ複雑に変化しながら後方へ流されていくことがわかる。





第2図 過角45°の椭円柱まわりの出発流れ, $U=0.8\text{cm/sec}$, $R_e=340$. 流れは左から右に向っている。(a) $t=0.45\text{sec}$ ($\tau=0.09$) 流れは potential 流れ. (b) $t=2.6\text{sec}$ ($\tau=0.52$) 前・後縁からはく離が始まる. (c) $t=3.6\text{sec}$ ($\tau=0.72$) 後縁付近にはく離渦が発達し始める. (d) $t=6.45\text{sec}$ ($\tau=1.28$) 後縁のはく離渦は、椭円柱から離れ、背部に前縁からののはく離渦が発達する. (e) $t=9.6\text{sec}$ ($\tau=1.91$), (f) $t=11.65\text{sec}$ ($\tau=2.32$), (g) $t=12.65\text{sec}$ ($\tau=2.52$) はく離渦は後方へ流されつつ下向きに移動する. 背部のはく離渦はさらに発達する. (h) $t=14.8\text{sec}$ ($\tau=2.95$), (i) $t=18.45\text{sec}$ ($\tau=3.69$) 前縁からののはく離渦も椭円柱から離れる. (j) $t=21.2\text{sec}$ ($\tau=4.22$) 後縁のはく離渦が急速に発達する. (k) $t=25.35\text{sec}$ ($\tau=5.05$), (l) $t=28.0\text{sec}$ ($\tau=5.58$), 後縁からののはく離渦も椭円柱から離れ、後縁付近に三次的な双子渦が現われている. (m) $t=30.1\text{sec}$ ($\tau=6.0$), (n) $t=33.25\text{sec}$ ($\tau=6.63$)



第3図 過角 45° の梢円柱に働く揚力, $U = 12.12 \text{ cm/sec}$, $R_e = 5509$, 図の下部の数字は第4図の一連の写真的撮影時刻を示し、第4図の番号の順に対応する。

次に第3図は過角 $\theta = 45^\circ$, Reynolds 数 5509 の場合の揚力の測定結果で、運動開始直後の非定常性を示すものである。

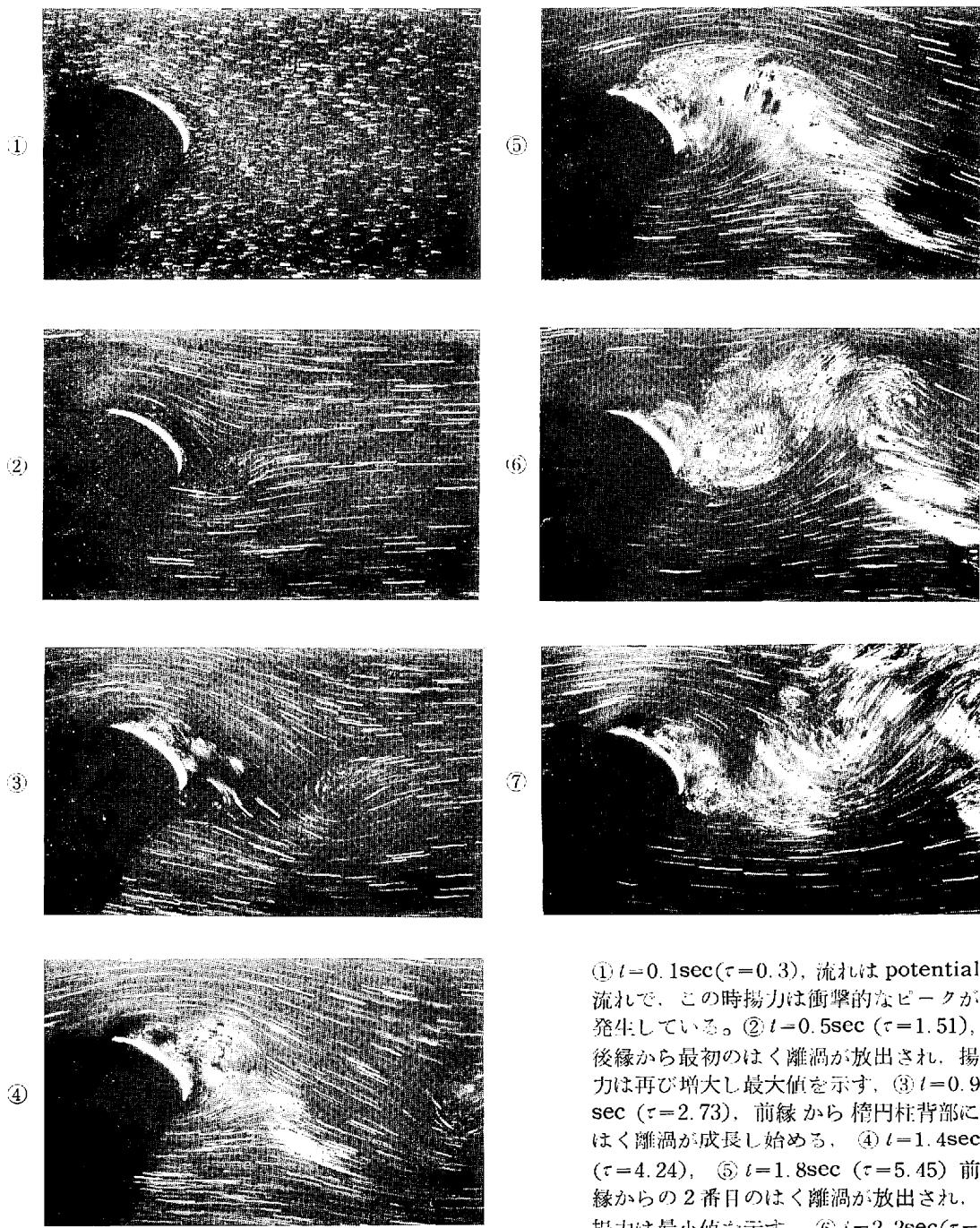
揚力の測定には前述の計測装置で 0.5mm 厚の板バネと歪ゲージを用い、木製の梢円柱を使って行なった。また、同時に流線模様の変化をアルミ粉末法により可視化し、その結果を第4図に示した。第4図の一連の写真的撮影時刻を第3図の下部に示す。その番号は第4図の写真的番号に対応する。第3図の揚力の変動をみると、出発直後に衝撃的に高い揚力が現われてすぐに消え、 $t \sim 0.25 \text{ sec}$ で再び急激に増大し、その後 $t \sim 0.7 \text{ sec}$ で最大値に達したのち、やがてゆるやかに減少し $t \sim 1.8 \text{ sec}$ で最小値となり、ひきつづき時間の経過とともに周期的に変動することがわかる。最初の衝撃的なピークが現われた後、およそ 5 周期にわたる揚力の変動が示されているが、注目すべきことは、それぞれの周期における揚力の最大値が時系列的に減衰していく傾向にあることである。

ここで流線模様と揚力の変動の対応をみると、第4図の写真(1)は運動開始から 0.1 sec 後 ($\tau = 0.3$) で、きれいな potential 流れがみられる。一方、揚力についてみるとこの時に衝撃的に揚力が発生し、すぐに減衰している。つづいて写真(2)

は $t = 0.5 \text{ sec}$ ($\tau = 1.51$) の時のもので、梢円柱の後縁からく離渦が放出されており、この時に揚力はほぼ最大値に達している。写真(3), (4)では前縁からく離が始まり、梢円柱背部に 2 番目のはく離渦が成長し、やがてこの渦も梢円柱から離れる(写真(5))。この時、揚力は最小値を示している。その後再び後縁から 3 番目のはく離渦が大きく成長し始め、やがて放出される(写真(6), (7))。このようにして、渦の放出が前・後縁より交互にくり返えされ、揚力もそれに対応して変動する。およそ 3 ~ 4 周期経過して定常な Kármán 渦列の状態に至る。定常状態の揚力についてみると、平均的な揚力に渦放出による変動成分が重畠しているのが認められる。

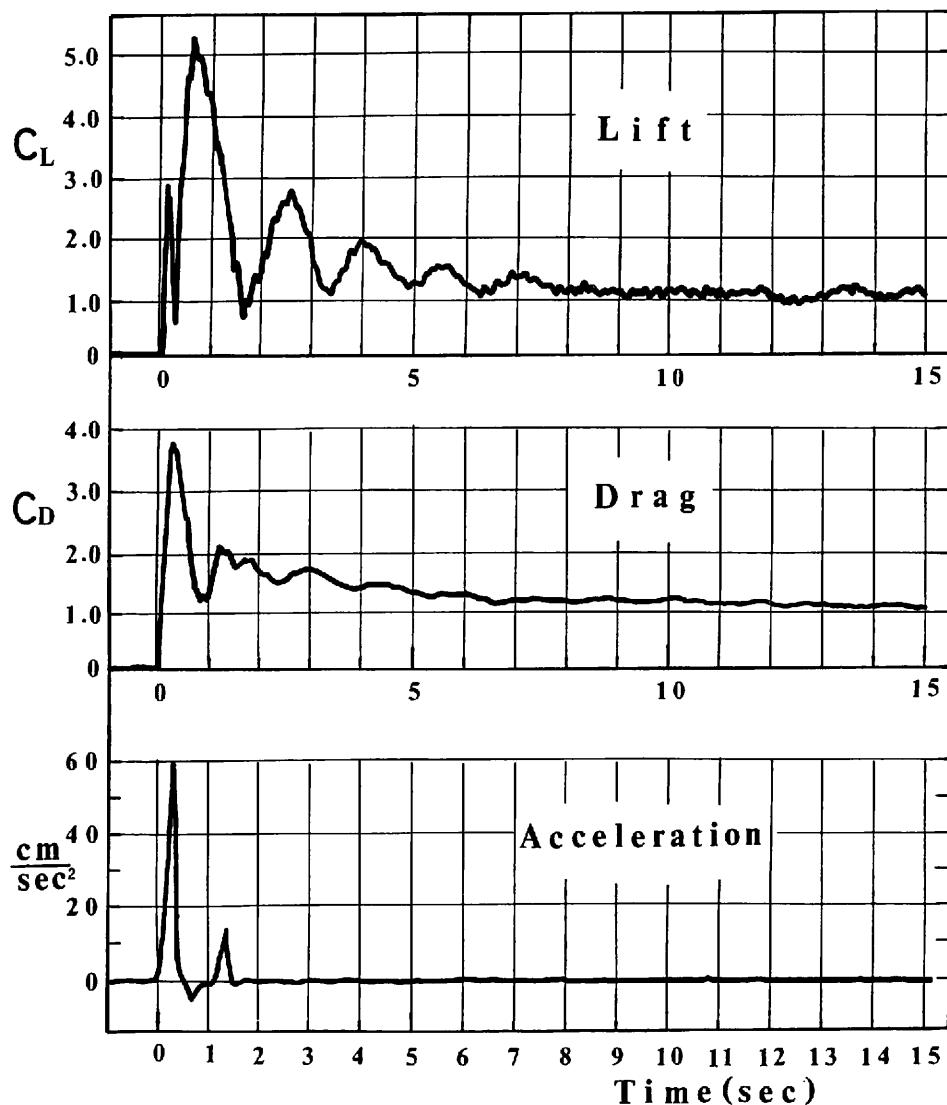
第5図は過角 45° , Reynolds 数 4979 の場合の揚力、抵抗、台車の加速度の測定結果である。たて軸にそれぞれ揚力係数、抵抗係数、加速度、よこ軸には運動開始からの経過時間を示した。

揚力の測定と、抵抗の測定は前述の力の計測装置を 90° 回転させて別々の Run で行なった。それぞれの Run での加速度の特性は変わらない。揚力、抵抗の信号には約 8 Hz の梢円柱の固有振動数が重畠しているが、測定には支障ない程度である。加速度の信号によると、台車の加速に要する



第4図 遷角 45° 、梢円柱まわりの出発流れ、
図3の揚力測定と同時に撮影し、流れ
は左から右に向っている。 $U = 12.12$
 cm/sec , $R_s = 5509$ 。

(1) $t = 0.1 \text{ sec}$ ($\tau = 0.3$)、流れは potential 流れで、この時揚力は衝撃的なピークが発生している。(2) $t = 0.5 \text{ sec}$ ($\tau = 1.51$)、後縁から最初のはく離渦が放出され、揚力は再び増大し最大値を示す。(3) $t = 0.9 \text{ sec}$ ($\tau = 2.73$)、前縁から梢円柱背部にはく離渦が成長し始める。(4) $t = 1.4 \text{ sec}$ ($\tau = 4.24$)、(5) $t = 1.8 \text{ sec}$ ($\tau = 5.45$) 前縁からの2番目のはく離渦が放出され、揚力は最小値を示す。(6) $t = 2.2 \text{ sec}$ ($\tau = 6.67$) 後縁に再び3番目のはく離渦が発達し、揚力は増大する。(7) $t = 2.6 \text{ sec}$ ($\tau = 7.88$) 後縁からののはく離渦は放出され揚力は再びピークを示す。



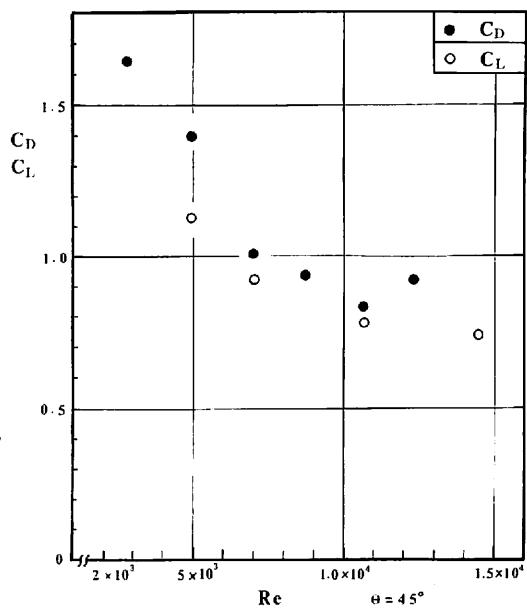
第5図 過角 45° の梢円柱に働く揚力、抵抗と台車の加速度。

$U = 12.82 \text{ cm/sec}$, $R_e = 4979$.

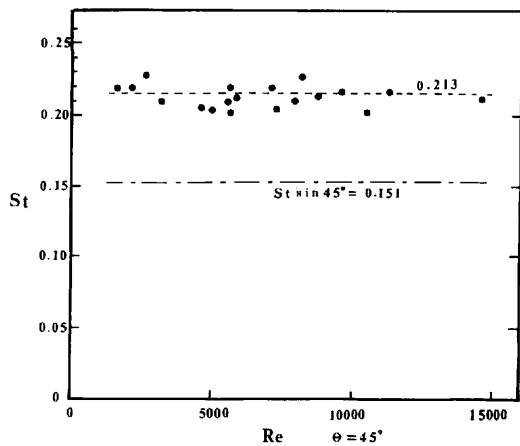
時間は約 0.25 sec である。

図からわかるように、運動開始直後に揚力、抵抗に衝撃的なピークが現われている。この時 ($t \sim 0.25 \text{ sec}$, $\tau = 0.8$) に抵抗は $C_D \sim 3.8$ となり最大値を示す。これは定常時のおよそ 3 倍の値である。また前述の流れ模様から判断するとこの時の流れは potential 流れの状態である。運動開始直後の流体の運動は、無次元化された Navier-

Stokes の方程式により、対流項と粘性項をほぼ無視できる。したがって加速度項が圧力項に等しくなり potential 流れが形成されることになる。同時に梢円柱の前面と背面では大きな圧力差が生じ、その結果、揚力と抵抗には衝撃的なピークが発生する。potential 流れが現われた後、梢円柱表面では流体の粘性のために境界層が発達し、やがて流れは物体表面から離する。梢円柱が流



第6図 定常状態での揚力・抵抗係数と Reynolds 数の関係、迎角 $\theta = 45^\circ$ 。



第7図 Strouhal 数と Reynolds 数の関係。

$$S_t = \frac{na}{U} \quad (n: \text{Kármán 湧の周波数})$$

迎角 $\theta = 45^\circ$ 。

れに非対称に置かれていることから、最初のはく離渦の放出は後縁側に限られ、この渦が放出される時、揚力は最大値 $C_L \sim 5.0$ ($t \sim 0.8 \text{ sec}$) を示し、定常状態の場合に比して約5倍の高い揚力が

現われている。つづいて前縁からはく離渦の放出があると、揚力は $C_L \sim 1.0$ まで落ちる。同様にして前・後縁から交互に渦放出がくり返される。渦放出がくり返される数周期の間、ピーク時の C_L は時間とともに減衰する傾向があり、ほぼ 4~5 周期（およそ $\tau = 20 \sim 25$ ）で定常の Kármán 湧列の状態になる。定常状態での揚力の変動成分は平均的な揚力の約 10% である。一方抵抗は $\tau \sim 20$ までゆるやかに減衰したのち、定常状態に落ち着く。

次に定常状態での平均的 C_L と C_D について、Reynolds 数との関係を第6図に示した。迎角 45° では、 C_L 、 C_D ともに Reynolds 数が大きくなるにつれて減少する傾向が認められる。

また同様に渦の放出周波数について、揚力の信号からその変動周期を読みとり、周波数を算出した。周波数を無次元表示するために梢円柱の長径を代表長さにとった Strouhal 数 ($S_t = \frac{na}{U}$) で整理し、その結果を第7図に示した。測定された Reynolds 数 1,500~15,000 の範囲では Strouhal 数はほぼ一定で、平均 $S_t = 0.213$ であり、また長径の斜影長を代表長さにとると、 $S_t \sin 45^\circ = 0.151$ となる。

IV おわりに

迎角 45° 、梢円柱の長径短径比 2 : 1 のモデルを用いて、衝撃的に運動を開始した後の梢円柱まわりの流れの観察と、梢円柱に働く揚力、抵抗の測定を行ない、その非定常性を明らかにした。

運動開始直後には梢円柱まわりに potential 流れができるおり、その時揚力と抵抗には鋭いピークが現われる。その後揚力、抵抗ともにすぐに減少し、つづいて物体表面には粘性の影響により境界層が発達しやがて梢円柱の前・後縁で流れははく離する。後縁では、はく離渦が成長しついには物体から離れ、後方に流される。この時、後縁でのはく離にともない揚力は増大し、はく離渦が放出される時最大値を示す。その後、前縁からのはく離渦の放出にともない揚力は減少する。このようにして後縁、前縁の順に交互に渦の放出がくり

返えされ、それに応じて揚力は周期的に変動し、やがて数周期を経た後、定常の Kármán 湧列の状態に落ち着く。

特に注目すべきことは、運動開始からはく離渦の放出の数周期の間にわたって、流れ、揚力ともに強い非定常性があることである。最初の出発渦の放出にともなう揚力の最大値は定常状態での平均値に比して数倍の大きさに達している、またその後揚力は数周期にわたって減衰する傾向にある。

揚力と抵抗の変動に大きな影響を与えるはく離の挙動は楕円柱の前後縁で大きく異なり、前縁では比較的スムースにはく離するのに比べ後縁でのそれは非常に複雑で、はく離点の位置も時間とともに大きく変化することが明らかにされた。

謝 詞

本実験を行なうにあたりいろいろとご教示いただいた、九州大学応用力学研究所種子田定俊教授、石井幸治氏に深く感謝致します。

また数々の助言と援助をいただいたお茶の水女子大学理学部の大島裕子博士、東京大学工学部の桑原邦郎博士、堀内潔氏に深く感謝いたします。

文 献

- 種子田定俊・大木 墓・石井幸治 (1972) : 静止から急に一定速度で動き出した楕円柱の揚力. 九州大学応用力学研究所報告第38号, 29-35.
- 種子田定俊 (1979) : 流れの可視化. 流体力学の展望. 3号, 1-43.
- 堀内 潔 (1979) : 漏糸近似法による楕円柱をすぎる流れの研究. 東京大学工学部修士論文.
- Honji, H. (1972) : Starting flows past spheres and elliptic cylinders. Rep. Res. Inst. Appl. Mech. Kyushu Univ., 19, 271-281.
- Lugt, H. J. & Haussling, H. J. (1970) : Laminar flow past a flat plate at various angles of attack. Presented at the 2nd Int. Con. on Numerical Methods in Fluid Dynamics. Univ. of California, Sep. 78-83.
- Lugt, H. J. & Haussling, H. J. (1974) : Laminar flow past an abruptly accelerated elliptic cylinder at 45° incidence. J. F. M., 65, 711-734.
- Wang, C. Y. (1967) : Separation and stall of an impulsively started elliptic cylinder. J. Appl. Mech., Dec. 823-827.