

楕円柱の自励回転の実験

大島 裕子*

(1981年1月6日受理)

Studies of Autorotation of an Elliptic Cylinder

By

Yuko OSHIMA

Abstract : Studies of autorotation of an elliptic cylinder are carried out experimentally using a changeable-pressure wind tunnel. The number of rotations per unit time increases with velocity, but it keeps constant in non-dimensional form. The flow field around the cylinder are surveyed using a hot-wire anemometer together with flow visualization technique by smoke wire method. Drag, lift and momentum of the cylinder in rotation are measured by a strain gauge balance at various cases of velocity and pressure. The results of the measurements are compared with numerical simulations by discrete vortex method.

概 要

厚み比 15% の楕円柱の自励回転現象につき変圧風洞を用いて実験を行った。自励回転数は風速の増加とともに増えるが、無次元化するとほぼ一定となる。スモークワイヤ法で流れ場の可視化を行うとともに、X型熱線流速計で後流の流速及び流速変動の測定がなされた。種々の風速及び圧力状態で抵抗、揚力、モーメントの計測を三分力計を用いて行なった。抵抗係数は圧力、風速によらずほぼ一定値をとるが、揚力係数は風速にはよらないものの圧力の減少につれて減少する。渦糸近似法での数値計算の結果と比較された。

* お茶の水大学理学部

1. はじめに

風の中に舞う木の葉，高所から散らされる紙片がひらひらと回転するさまは自然の中での自励回転として日常目にふれる現象である。このように全く自由に空間におかれたばあいには，木の葉又は紙片は三方向とその回転の六つの自由度をもつが，一方向に回転しながら変位するのが目にとまる現象である。また風車や風盃型風力計は流れの中での応用として，自励回転を持続する器械であることはよく知られている。これらの風車は風の力により動力を得，風力計は風の強さを回転数からはかるように作られている。ここではそのままでは自励回転はしない対称物体である楕円柱を用い，変位せずにその中心母線を軸として回転させるばあいについて，回転方向を変化させての測定，後流での流速分布の測定及びスモークワイヤ法での可視化により，流れ場の考察，自励回転の特性を考える。この問題は古くから多くの研究者によって，主に自然状態での回転を対象とした研究が行なわれて来たが，風の中での自励回転の継続によるエネルギーの採取，更には宇宙空間の飛翔体が大気圏への再突入の際の自励回転などは新しい問題として考察の対象となる。ここでは基礎的な流れ場についての実験を主に行ったが，減圧状態での実験も試みた。

2. 実験装置及び方法

○風洞

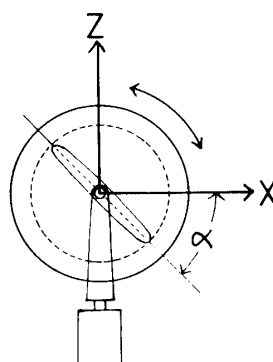
宇宙科学研究所の測定部径 1.6 m の変圧風洞を一樣流速 $U_0=6\sim 35$ m/s で使用した。測定は常圧のもとで詳細に行なわれたが，一部 1/5 気圧までの数ケースについて，減圧状態での実験も行った。この風洞の乱れの強さは，20 m/s までは 0.6% 以下，20~30 m/s で 0.7%，30 m/s で 1% 程度で一樣流の増加とともにいく分乱れも増加する。

○座標

模型の回転中心を原点とし，中心線をスパン方向に Y，流れ方向に X，流れと垂直に Z をとる。二次元流れであるので Y 方向の変化はないものとする。

○模型

コード長 $c=15$ cm，スパン 45 cm で厚みはコード長の 15% の 2.25 cm の木製楕円柱模型をその中心母線を軸として，ボールベアリングを使用して自由に回転出来るような支持



第1図 模型概略図及び座標

台にとりつけた。両端には直径 20 cm のアクリル製円板を端板としてとりつけた。この模型を風路の中においても回転はおこらないでそのままの状態を保つが、わずかに回転を与えると以後流速と対応した自励回転を継続する。測定者からみて時計方向を正回転、反時計方向を負回転とし、楕円の長径が水平の時から迎角 α を正回転方向に増加するようとする。

○自励回転数の測定

一様流速の増加につれて自励回転数も増加する。両端板を通して一方に光源を、他方にフォトマルをセット、模型の回転による光の遮断のパルスを周波数カウンタで測定した。

○流れの可視化

長さ 40 cm, 0.2 mm ϕ のニクロム線を Z 方向に 5 cm ずつ隔てて Y 軸と平行に 9 本、模型の前方 $X = -30$ cm の平面に並べ、流動パラフィン塗布、9 本に並列に電圧をかけて加熱して煙を発生させる、いわゆるスモークワイヤ法により流れ場を可視化した。流れによる自励回転と同期したストロボで下流より照明、 α が 30° 毎の流れ場を可視化、写真撮影した。すなわち撮影された写真は、連続回転している楕円柱のある角度条件の時の流れ場の多重露光写真であって、条件付サンプリングされた写真である。なお煙の持続時間は一様流速にもよるが、1 回の流動パラフィンの塗布で 1 秒前後である。そのため可視化での撮影可能な流速は 12 m/s までで、それ以上の時には露光に十分な繰り返し回数の時間持続されない。

○熱線流速計

I 型及び X 型熱線流速計を加熱比 1.4 にて作動、後流内の 1 断面 ($X = 160$ mm) をトラバース、平均流速及び流速変動を線型化増幅器を通して測定するとともに記録計に記録した。

○三分カバランス

支持棒を X 方向 (抵抗)、Z 方向 (揚力) 及びモーメントを示す三分カバランスに接続、抵抗変換ブリッジにて電圧として出力、あらかじめ較正してある曲線によりそれぞれの成分を換算して求める。

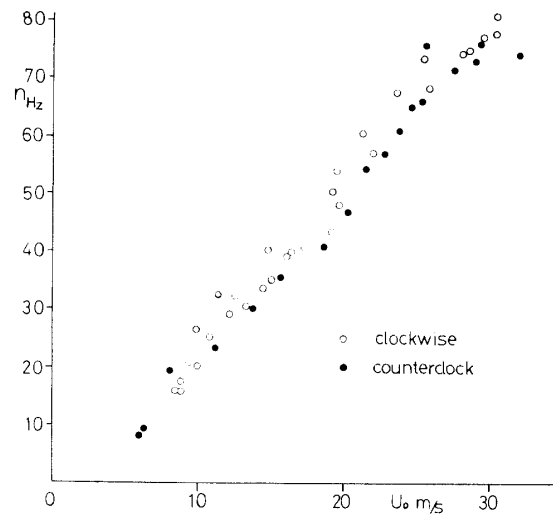
○マイクロコンピュータシステム

自励回転数、三分カバランスの読みよりの較正、熱線流速計の X, Z 成分の分離合成、実験時の気温・気圧の変化に対するマンメータの読みからの速度の算出及びそれらデータの収録としてマイクロコンピュータ・アップル II とディスクットを利用、データ処理を行なうのに使用した。

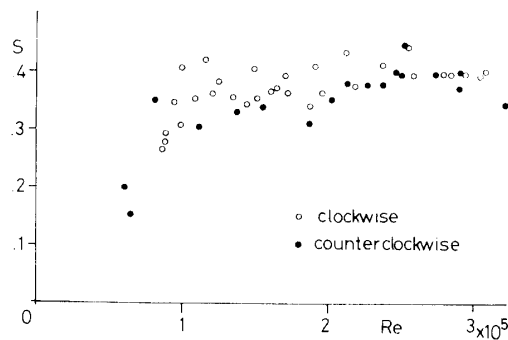
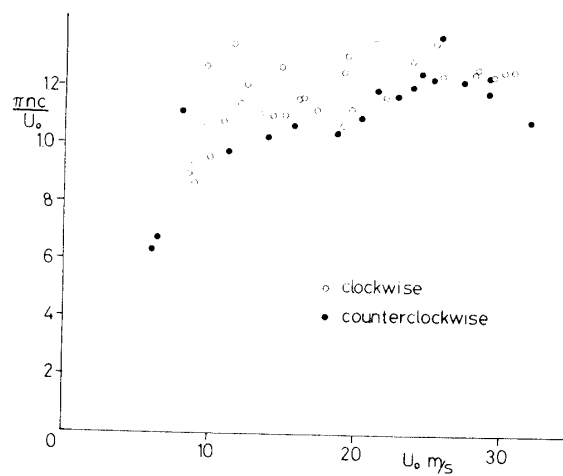
3. 実験結果及び考察

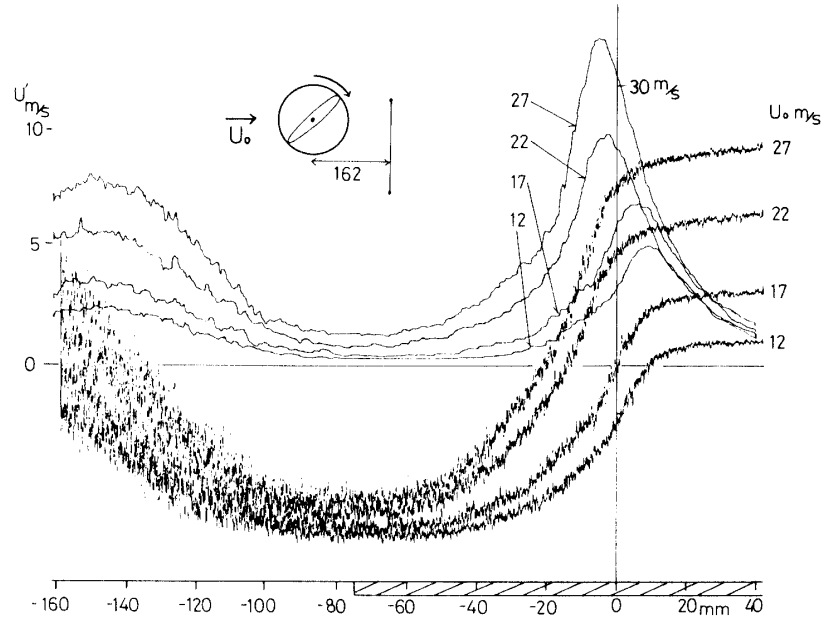
○自励回転数

一様流速 U_0 の変化に対する自励回転数 n の変化を第 2 図に示す。 n は正負の回転方向にはほとんどよらず、 U_0 の増加とともにほぼ単調に増加する。これを無次元回転数 $S = \frac{nc}{U_0}$ とレイノルズ数 $Re = \frac{U_0 c}{\nu}$ (ν は動粘性率) としてプロットしたのが第 3 図である。流速の低いところを除いては、ばらつきはあるものの一定値 0.38 程度の値を示す。これはいわゆる鈍い柱状体が流れの中でその後流に放出するカルマン渦のストロハル数 0.22 と比較

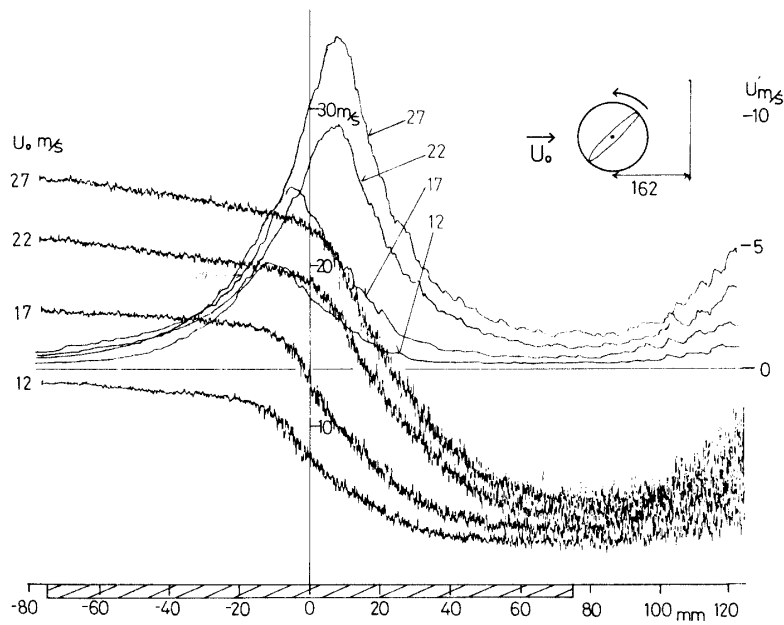


第2図 風速～自励回転数の関係

第3図 Re 数～無次元化回転数の関係第4図 楕円先端速度と U_0 の比～ U_0 の関係

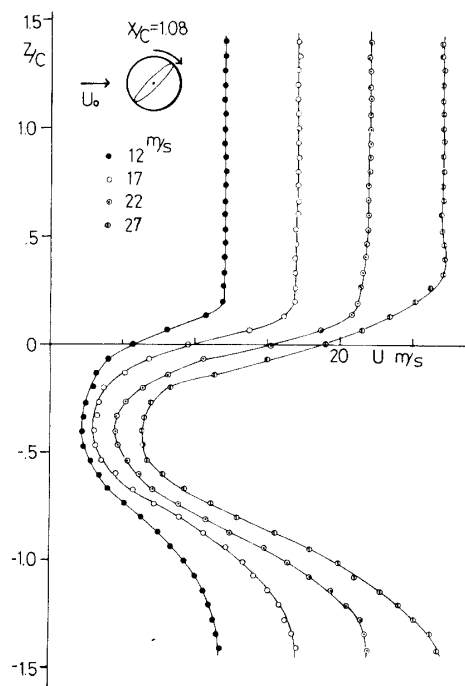
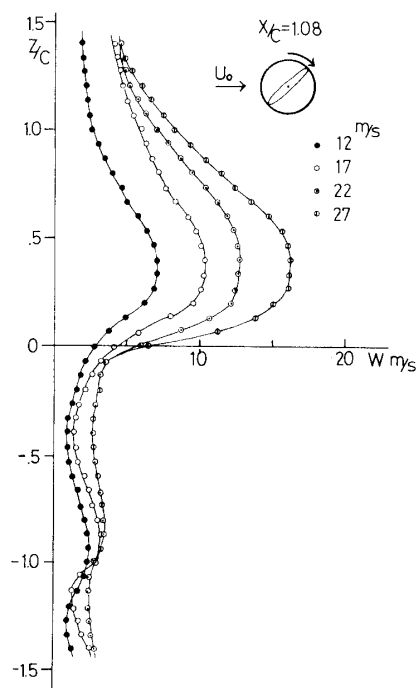


(a) 正回転



(b) 負回転

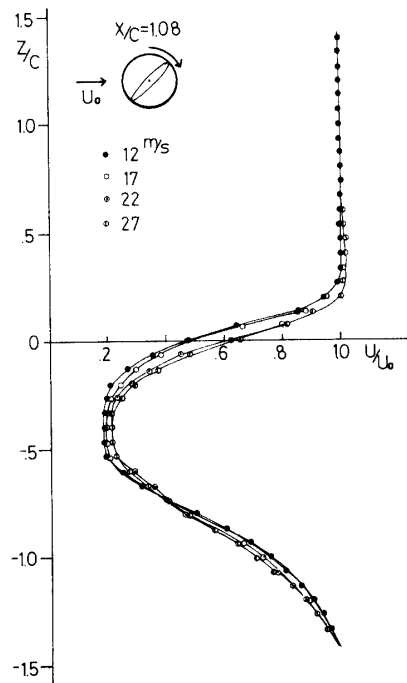
第5図 流速及び流速変動の記録

第6図 平均流速 U 分布第7図 平均流速 W 分布

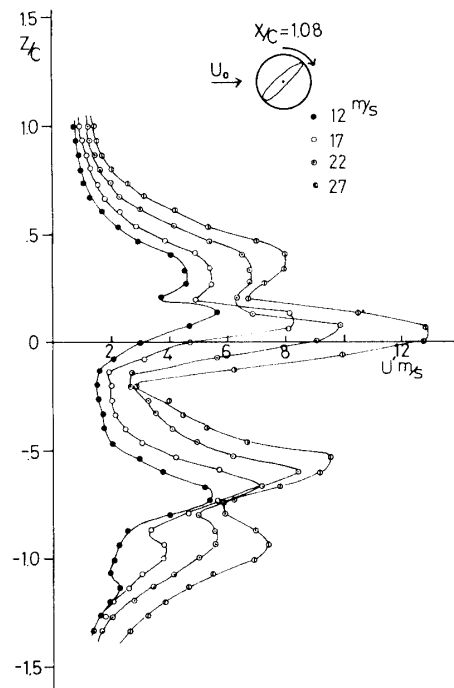
すると1.7倍であり、回転の自由度が加わったことでの増加といえる。なおこのばあいでも自励回転に同期して両端から渦を交互に後流に放出するが、渦の大きさ、強さは後の可視化写真でみるように異っている。

○流速測定

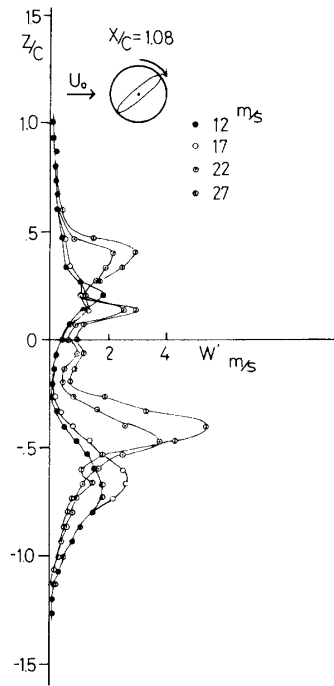
回転に伴う楕円柱の先端の速度と一様流速の比 $\pi nc/U_0$ を流速に関してプロットしたのが第4図である。 U_0 の増加につれていく分増す傾向にあるが、約1.2すなわち楕円柱の半コードの80%程—先端から少し内側で、正回転のばあい上側が、負回転のばあい下側が一様流と同速度で回転し、その反対側では流れ方向と楕円柱の回転方向が逆となるので一様流を阻止する。すなわち正方向に自励回転している楕円柱は回転中心より上側で流れを助長、下側で阻止するため後流は下に偏る。このことは熱線流速計による平均速度分布より明らかである。第5図(a)(b)は自励回転している楕円柱の後方 $X=160\text{ mm}$, $X/c=1.08$ の断面でのI型熱線流速計により平均流速及び流速変動の記録の一例で(a)正回転、(b)負回転の各々につき U_0 を4通りに変えて記録したものである。この図が示すように正負の回転の方向によってX軸に対して左右に同じように偏っていることだけで、本質的には全く同じ流れ場を示していることから、回転の方向による差異はないものと言える。そのため以後は正回転のばあいの結果を示す。第6図と第7図はX型熱線流速計によって測定した $X/c=1.08$ の断面での平均流速 U と W を、 U_0 を変化させて示してある。 U においては楕円柱の回転によって上側ではそれ程変化がないのに、下側では減速がはげしく、後流全体が回転方向に偏っており、しかも流速の増加とともに偏りも大きくなる。また W におい



第8図 無次元流速 U/U_0 分布



第9図 流速変動 u' 分布



第10図 流速変動 w' 分布

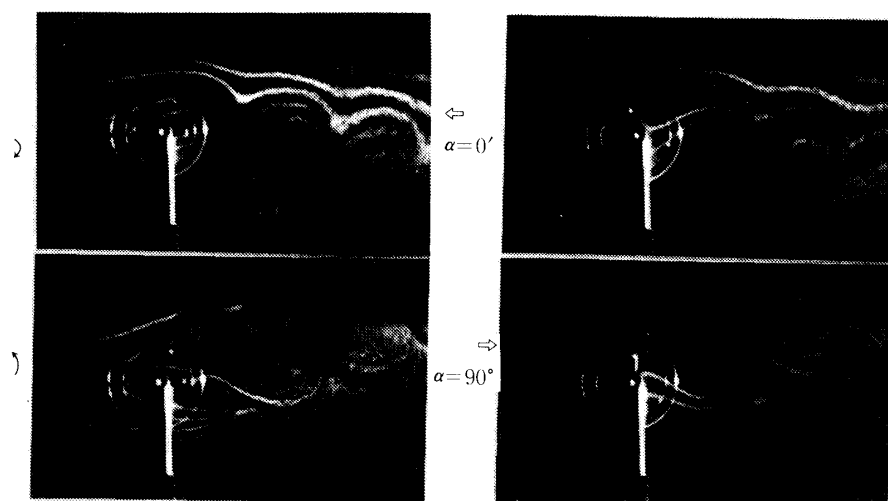
では楕円柱の回転につれて下むきの流れがおこり、楕円柱の先端がすぎる内側近くで最大が $1/2U_0$ 程度となる。そして U の減少につれて W も減少し、 U が回復するあたりでわずかにふえるが大きな値は示さない。第8図には U の分布を U/U_0 の無次元化して示してあるが、風速によって後流の形は偏りがわずかに異なるだけである。流速変動 u', w' を第9図、第10図に示したが、 u' については第5図の記録が示すようにいずれの流速においても、平均流が急に減速する肩の部分で最大値を示している。これは回転による周期的変化の各位相の流れについて集合平均されたものであるから、楕円柱が流れに与える影響の少ない迎角 $\alpha=0^\circ$ の時から一番大きな後流を示す 90° までの変化を含めているので、その影響の大きな領域で変動成分が大きく示される。そのような意味で変動の最大値を示す点は、一様流速の増加につれて偏りが大きくなる。再び後流から外の一様流に回復する肩のところでやはり最大値を示すが、前のものと比較すると大きくはない。後流の内部では流速が小さくなるため変動 u', w' も小さくなるが偏っている中心部では混合による速度変動が大きく示されている。

○流れの可視化

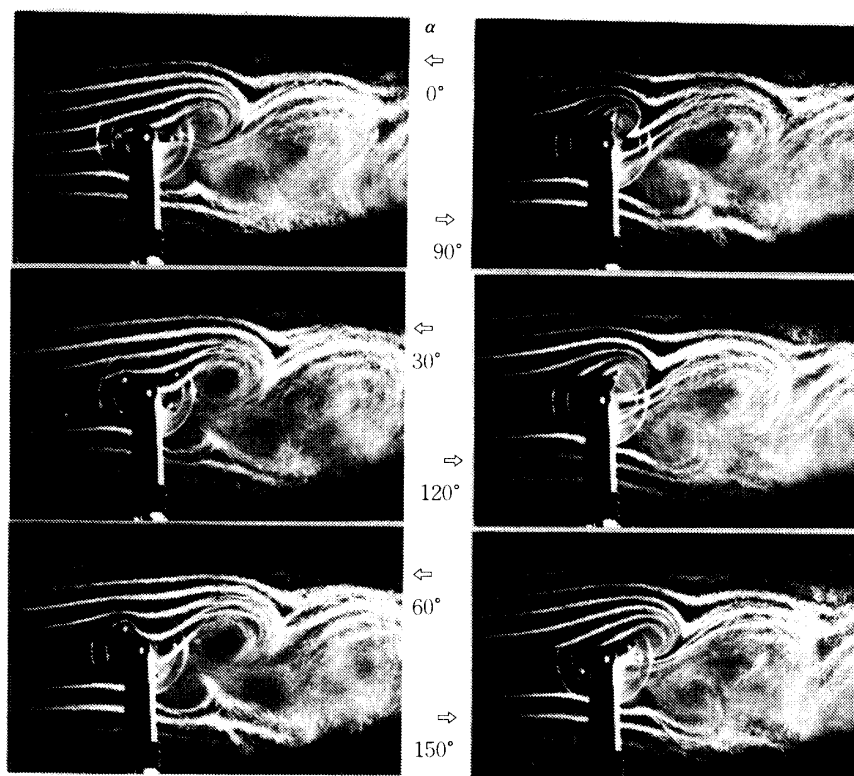
これまでは自励回転している楕円柱まわりの流れ場についての平均的な測定結果について述べたが、今度は回転の各位相についての流れ場をスモークワイヤ法で可視化した写真を示そう。第11図、第12図は回転に同期して1回転に2度の割合でストロボ照射を行なって多重露光した、いわゆる条件付サンプリング法での写真である。第11図は $U_0=10$ m/sで $\alpha=0^\circ, 90^\circ$ で正負回転の例を示してある。すなわち回転の方向を変えても上下への偏りが逆となるだけで、流れそのものについて両者の変りはないことは、熱線流速計の測定でも示されたが、この写真でも明らかである。この可視化法では大きな一様流速では煙の持続時間が短かく、また薄くなるのでよい写真が得にくい。多重露光でも鮮明なところは、その状態での変化が少なく、乱れの大きいところは特長的な線としては示されずに一様に混合されて露光される。第12図に $U_0=6$ m/sで $\alpha=0^\circ$ から 30° 毎の正回転のばあいの一連の写真を示す。前述のように何回かの発光による多重露光であるが後流の混合領域を除いては煙がきれいな線を描いていること、第11図と比較して後流全体の偏りが少ないことなどがわかる。 $\alpha=0^\circ$ から順を追ってみると、 α が増すにつれて上側では正方向の渦を楕円柱の後方に形成するのに対して、下側でも流れと逆むき（負方向）の渦をつくる。結果として1回転で上下で方向の異なる渦を各々2個ずつ放出する。そしてその渦は回転という混合のはげしい非定常な流れであるので、その内部では煙は混合して下流に流されてはゆくものの、楕円柱に近いところでは1つの渦の塊とみなせる領域をはっきりと境界づけている。

○力の測定

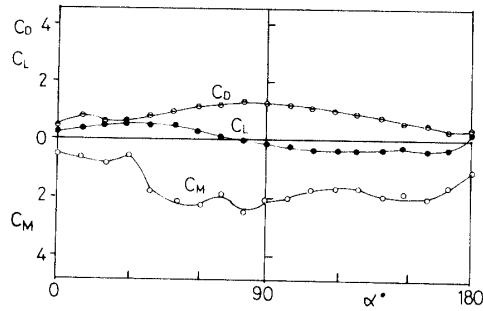
自励回転している楕円柱の力の三分力計での測定の前に、回転していない状態で迎角を変化させて $U_0=12$ m/sでの抵抗、揚力、モーメントの係数を第13図に示す。ここで基準面積としてコード長 c ×スパンをとる。なおモーメントは回転の正方向を正としたが、図では下むきにとってある。抵抗は迎角の増加に対して 90° までは増加、その後減少するが、これは流路の中での実効的な面積と関係して 90° を境としてほぼ対称である。これに対し揚



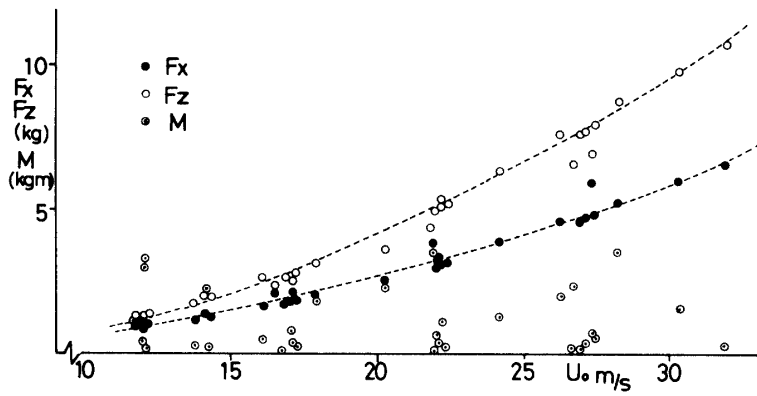
第11図 スモークワイヤ法による可視化写真 $V_0=10$ m/s,
回転方向による変化



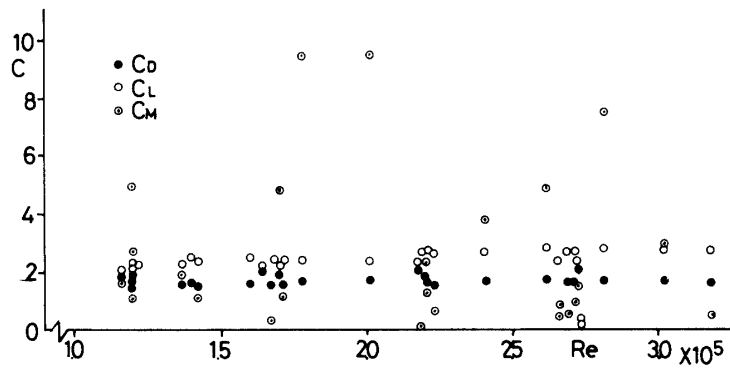
第12図 可視化写真 $U_0=6$ m/s, 迎角による変化



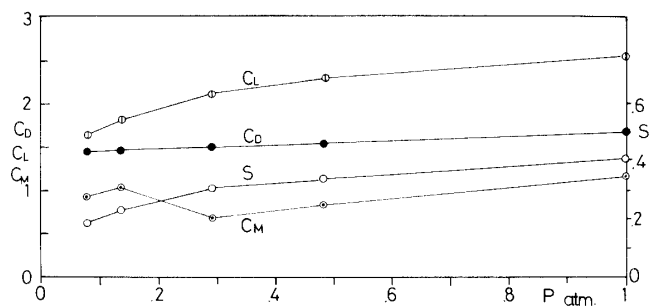
第13図 静止状態での迎角の変化に対する力



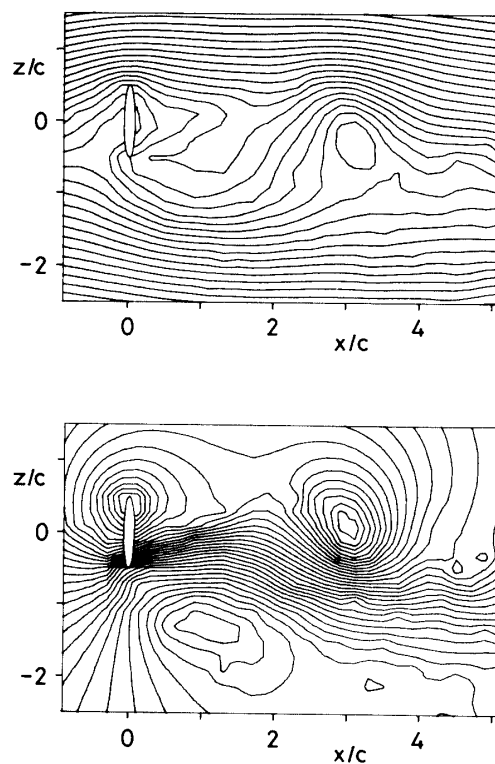
第14図 風速に対する抵抗, 揚力, モーメントの関係



第15図 Re 数～抵抗係数, 揚力係数, モーメント係数の関係



第16図 圧力変化に対する抵抗係数，揚力係数，モーメント係数，無次元回転数の関係



第17図 渦糸近似による流線模様

$U_0 = 10 \text{ m/s}$, 回転数 = 23.3 Hz, $S = 0.35$

動き出してから 2.5 回転した瞬時流線

(a) 一様流こみ (b) 一様流分をさしひいたもの

力では $\alpha=70^\circ$ で正負の符号が変化し、全体として負の揚力を示すが、本来ならば 90° で0となりそこを境として反対称となるべきであるが、いくぶん負の領域が広がっている。モーメントは角度についてばらつきを示すが、全体として正の回転を助長する傾向を示している(図では他と区別しやすくするために C_M を下むきにとってある)。このような楕円柱の自励回転状態での抵抗、揚力、モーメントを流速変化に対してとったのが、第14図であるが、各角度を平均したもので抵抗より揚力が大きく示される。全体に F_x, F_z とも風速の増加につれて、点線で示すように増加を示しているのに対し、モーメント M は明瞭な傾向も示さず、またばらつきも大きい。これは正ならば回転を助長、負ならば阻止することから考えて、一定角速度で回転しているときは0となるはずのものである。更にこれを抵抗係数 C_D 、揚力係数 C_L 、モーメント係数 C_M であらわしたのが第15図で、モーメント係数を除きほぼ一定値を示す。

更にいくつかの減圧状態で力の測定を行った結果を無次元回転数 S とともに第16図に示す。 C_D, C_M はそれ程変化しないのに、 C_L, S は減圧に対して減少を示している。

4. 数 値 計 算

この問題についての数値計算を有限要素法と渦糸近似法で解いた。いずれも楕円柱に回転を与え一様流中においた時のモーメントを求めその正負によって自励回転となるかを判別するものである。有限要素法のばあいには Re 数は100までであるので、この実験の Re 数とはかけ離れている。その点物体表面の境界層を渦糸におきかえ、他はポテンシャル流とする渦糸近似法では Re 数は実験と同じ程度にすることができる。ここでは実験と同じ $c=15$ cm、厚み比15%の楕円を一様流10 m/s、回転数23.3 Hz、 $S=0.35$ で正回転しているばあいで、動き出してから2.5回転数の瞬間流線を第17図(a)(b)に示す。(a)は一様流のあるばあい、(b)は一様流をさしひいた時の図である。後流の偏りや渦の放出がきれいに再現されている。

5. お わ り に

自励回転をする楕円柱まわりの流れ場についての実験の報告をしたが、自励回転の限界などの諸条件を検討したく、更に低い Re 数などでの水槽実験も試みているので、以後も数値計算の比較とともに続行する予定である。

最後にこの研究は、宇宙科学研究所の大島耕一教授をはじめ、同研究室の徳永好志、Ho Phung、加藤潤司、井筒直樹の諸氏との協力により行なわれていることを付記しておく。

参 考 文 献

- E. H. Smith; Autorotating wings: an experimental investigation, J. F. M. 50 (1971) 513.
- H. J. Lugt; Autorotation of elliptic cylinder about an axis perpendicular to the flow, J. F. M. 99 (1980) 817.
- J. D. Iversen; Autorotating flat-plate wings: the effect of the moment of inertia, geometry and Reynolds number, J. F. M. 92 (1979) 327.