

振動翼からの剥離渦

お茶の水大理 大島 裕子
東大 宇宙研 夏目 明子

1. はじめに

流れの中に柱状物体を置くと、その背後には向きが異なる渦が交互に放出されて、いわゆるカルマン渦列を形成することはよく知られている。一方一様流と直角方向に振動する二次元翼から、振動の一周期に向きが異なる渦が放出されて同様な渦列を形成するが、これは振動に伴って起こされる剪断流によって強制的に渦が作り出されて後流に放出されるのであってカルマン渦列とはその性質を異にする。この振動翼の問題は古くから翼のフラッタやダイナミックストール等の現象と関連して多くの関心が寄せられているが、近年になり魚の推進機構や昆虫のはばたき運動も渦発生と関係深いことが知られ研究の対象となつて⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾いる。又建物や橋が自然の風により自励振動状態となつた時にも同様な現象が観測される。ここでは応用面はあくとして、可視化による流場の観測とレーザ流速計、ホフトフィルム流速計の測定より流れ場の概要と渦放

出の機構を中心として後縁直後の渦放出によるクワタの条件について考察してみる。

一方流れの可視化という実験方法についてはさまざまな論議がある。それは観測結果の解釈に対して観測者の意志が微妙に入り込む余地があるとともに、直接の物理量としての測定がなされないことか問題点と思われる。1980年9月から12月まで日本に滞在されたプリンストン大学の浜良助教授は、各地の講演会でこのことに関して例もあげて誤った判断をしやすい英と説かれた。その例は色毒源と流れに直角に振動させた時に見える色つき流線の模様であった。丁度ここで示す振動翼による流場の観測についてほぼ同様の流線模様が得られるので、実際の流場の測定と流れの可視化による流線模様との関係を知るよい例として示したいと思う。

ここで無次元のパラメーターとして無次元振動数 $K = \frac{\pi c}{T U}$ と無次元振中 $A = \frac{2\pi H}{T U}$ [c : 翼弦長, T : 周期, U : 一様流速, H : 振中] を定義する。

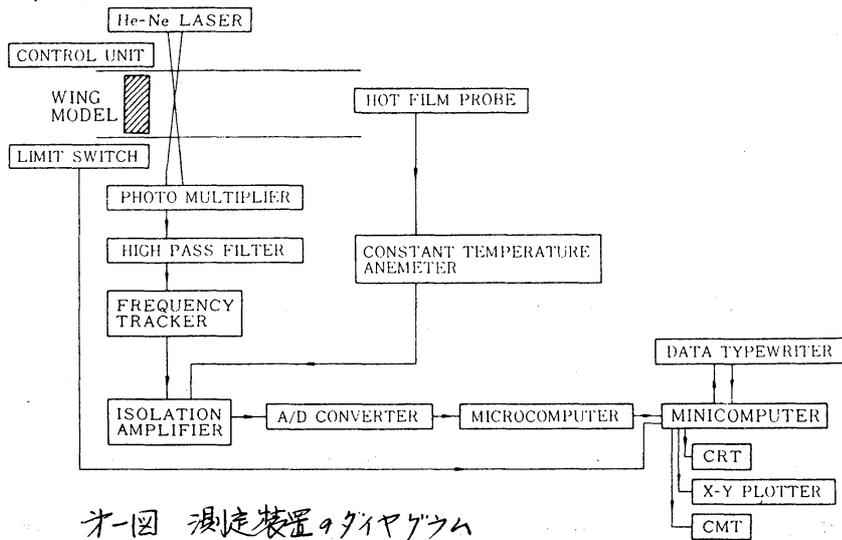
2. 実験装置

2-1 翼型 NACA 0012 の二次元翼型で前水路を $c = 8 \text{ cm}$, 後水路を $c = 4 \text{ cm}$ のものを使用。任意の振中と周期で駆動されるような振動装置にとりつけられる。

2-2 流れの可視化 幅10 cm, 深さ45 cm, 長さ600 cmの透明
 アクリル板で作られた測流部とモフ循環式閉水路をポンプ
 により水道水を循環させ, 色素注入法(ローダミンBの
 赤色とフロレフセナトリウムの黄緑色)による流れの可視
 化を行い写真撮影した。この水路の一例流速は22 cm/s, 乱
 れの強さは一例流の約4%である。この水路はレーザー流
 速計やホフトフィルム流速計の計測に用いられた。一方幅25
 cm, 深さ25 cm, 長さ180 cmの透明アクリル板で作られた
 成航水槽中で翼を振動させながら進行させ, 翼自身を陽極とし
 た電解法で可視化して翼の架名とともに移動するカメラで写真
 撮影した。これらの可視化写真は35 mmのモータードライブカ
 メラで時間間隔毎に記録する他, 8 mm 16 mmムービーで
 撮影した。

2-3 流れ場の計測

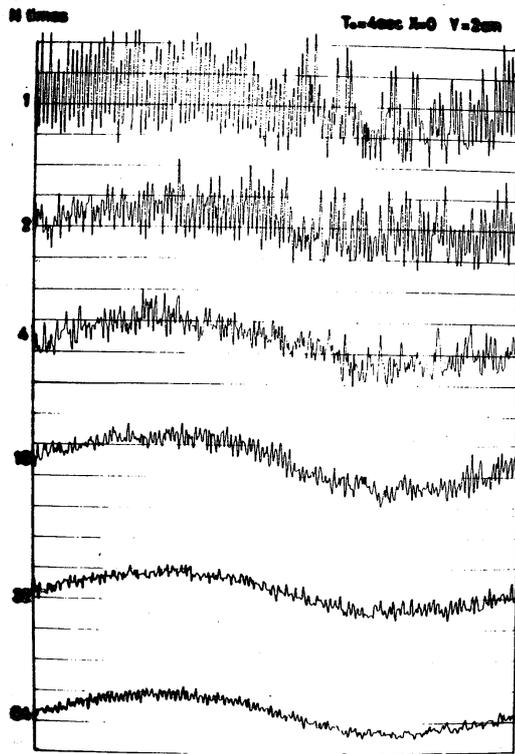
X型ホフト
 フィルム流速
 計を加熱比1.03
 で用いて翼の
 後流を翼端よ
 り17 cmまで
 の16断面にわ



オ-図 測定装置のダイヤグラム

たり振動の上下で 15cm の幅にわたり流速 U, W を測定した。測定具の移動にはミニコンピュータを用い、微動装置を自動的に制御した。また翼の振動によつてホフトフィルムが機械的に破壊されるおそれのある翼に近い領域ではレーザ流速計が用いられた。このばあいにも U, W 二成分をとるためにレーザ光の交叉平面を流れに対して $\pm 45^\circ$ 傾けてセットして測定を行った。しかしレーザ流速計のばあいには測定具をかえるために測定部をはさんで発光部と受光部とある光学系全体を同時に移動させるために一つの架台にのせてあるが、これ全体を自動的に制御するのは困難であるので手動で行った。これらの測定の出力は才1回に示すようなメルコム 70 ミニコンピュータを中心とするリアルタイムでの測定・制御・データ処理システムで処理された。すなわち振動翼が最上限に来た時の信号から1周期に5/2のデータとして出力を測定、16又は32周期分のデータを振動の各瞬間における測定値として集合平均値を求めた。これらのデータはオフシログラフで見るとともに記録計などにも出力する他、カセットテープに記録することによって後の流れ関数や渦度を再構成することに用いられる。なおこの集合平均の例として、一様流をよめた静止水中で翼を振動させた時における流速の分布をレーザ流速計の出力としてあらわしたのが才2回である。流速変化を平均回数

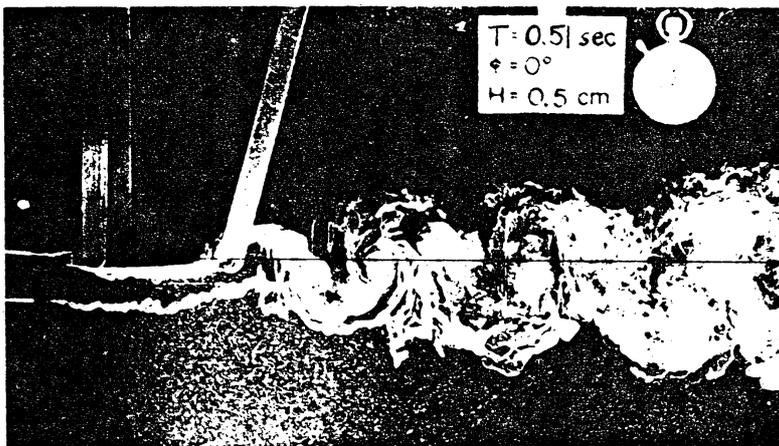
に対して示してあるが、回数と多くするにつれてランダムなノイズが減少して有意なデータとして使用し易くなるのが知れる。実際には振動周期によつて32回又は16回の集合平均が用いられる。



3 実験結果

色素注入法による可視化写真と才3図に示す。写真はカラー才2図 集合平均回数と出力の例。で撮られてくるので二色の混合の場合の渦のまき込む様子とはかなり鮮明に示されてくるが、ここでは白黒で示す。この写真からも向きが互いに異なる渦が次々と放出され、下流に拡

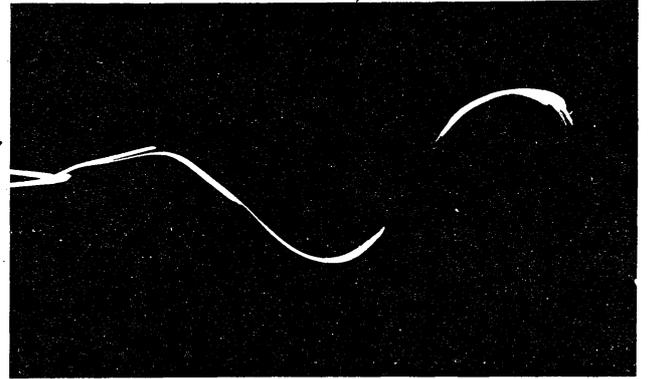
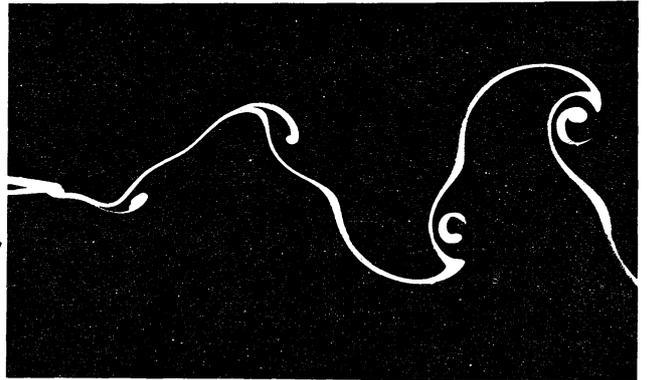
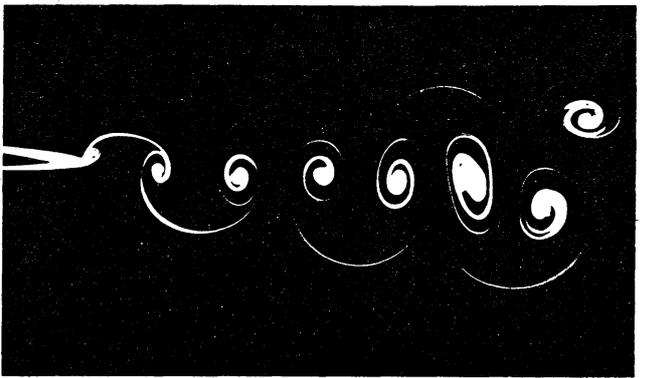
がってゆく様子がわかるであろう。振動振中は変化していかいにかかわる可振動によつて翼のまわりの流体が上向き下向き



才3図 色素による可視化 K=2.2

運動量を受けるとの下流へゆくに従って広がってゆくのであ
つて、この写一枚の写真又はその模式的な図を描かれた流線
の図だけでは見る者が誤った判断を下しやまいと云うことが
浜放射の可視化に対する指摘される点であろう。

次に飛行水槽で撮影され
た写真の例と才4図に示す。
交互にむきの異なる渦がパ
ラメータ K の増加ととむに
はつきりと判り、特に(c)で
は後流に渦が一直線状に並
んでゐる。又(a)では飛行速度
 U も速く、周期も大きいので渦
としては鮮明ではなく翼端
の蛇行のあととして示され
てゐるが才3図と同様下流
に広がってゐる。更に後縁
付近をよく見ると、いずれの
写真においても後縁をまわ
り込むように電解色素が放
去されてゐる。これは翼自
身を陽極とした電解法であ

(a) $K=1.03$ (b) $K=1.63$ (c) $K=3.27$

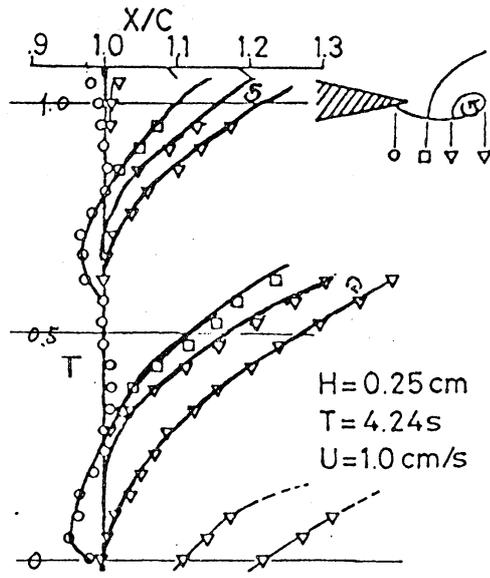
才4図 後縁側の放出渦

るため、翼の境界層の中から流み出しの色素で可視化である。これの渦の後縁での位置 X と 1 周期にわたる関係を才 5 図に示す。

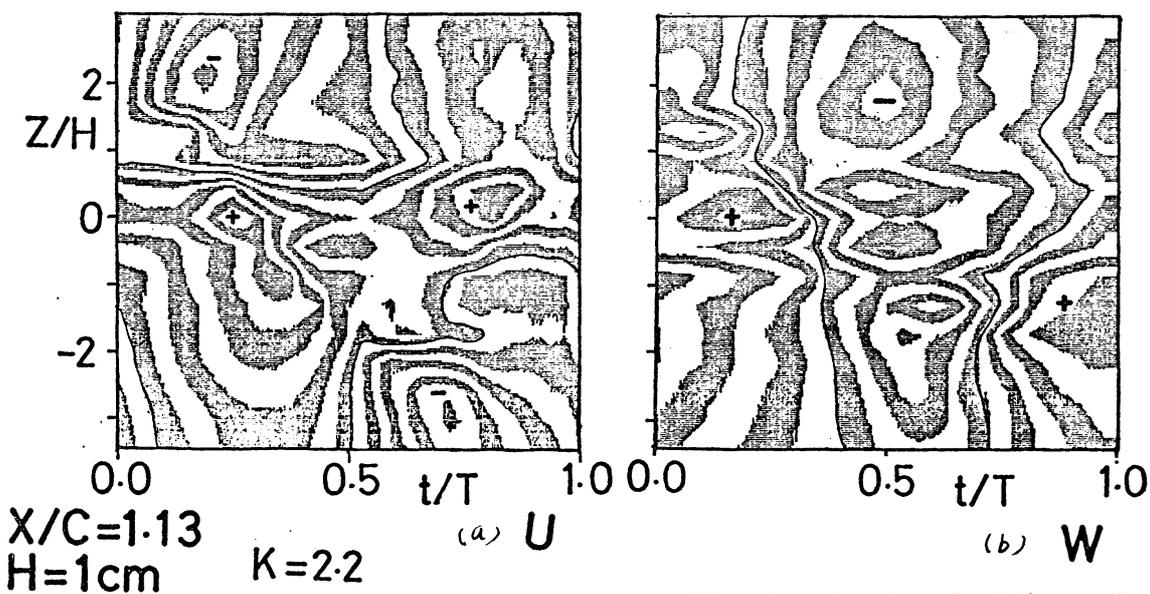
この図より渦は $1/4$ 周期後縁に停留した後、後流への放出が判る。これは 1 周期に 2 個の渦が各 $1/4$ 周期停留するが、半周期は渦の後縁にあることになる。この後にのべ

る一様流のない振動翼とは異なり、振動によって突効迎角が生じて振動方向とは逆側に後流を作るためその方にまわり込む流れをおこすものと考える。

次に測定結果の概略を 9 ページ、振動周期などをかえる種類の実験条件について測定を行ったが、^{(5)~(7)} ここでは振動 1cm 、 $K=2.2$ で $X/c=1.13$ の断面における流速 U と W の 1 周期にわたる変化を才 6 図に示す。図中の U は一様流を基準として、又 W については $W=0$ を基準として増加及び減少を示し、線は 2.3cm/s 毎に描かれている。すなわち U では全周期にわたって振動中心に速度増加がみられ、それも半周期ずれて極大値が測定されている。又 W では正負がはつきりと半周期ずつくり返されていることから、翼の振動につれて流れの



才 5 図 渦の $X-T$ タイヤグラム



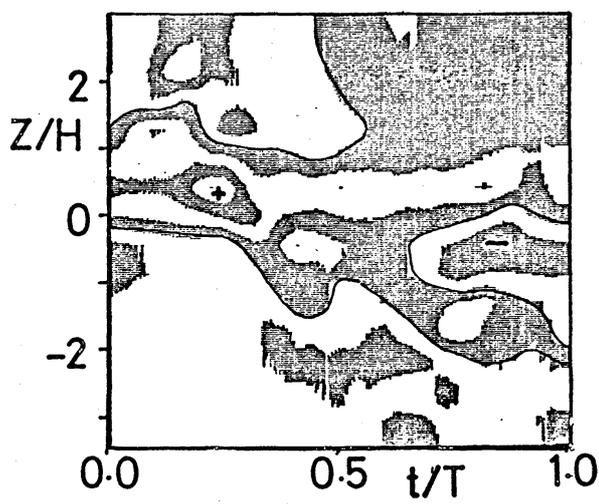
第6図 流速分布

垂直成分(振動方向成分)が
交互に流れ代り, その中心に
渦があることがわかる. 第7図

はこれらの測定をもとに

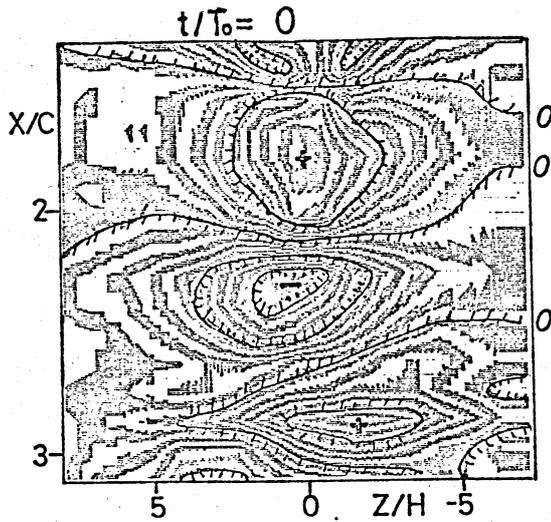
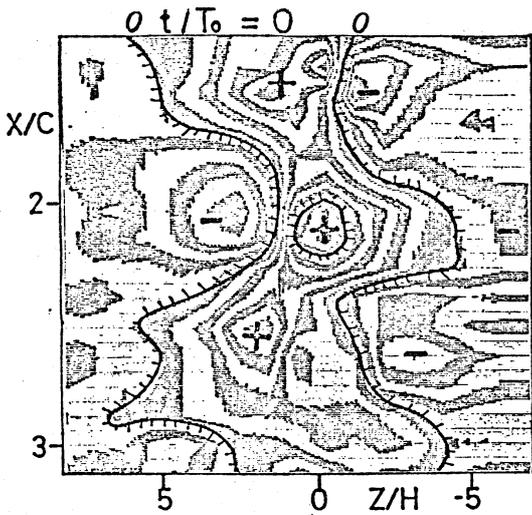
$$\omega = \frac{\Delta U}{\Delta Z} - \frac{\Delta W}{\Delta X} = \frac{\Delta U}{\Delta Z} - \frac{\Delta W}{U \Delta t}$$

として一周期に32個の測定に



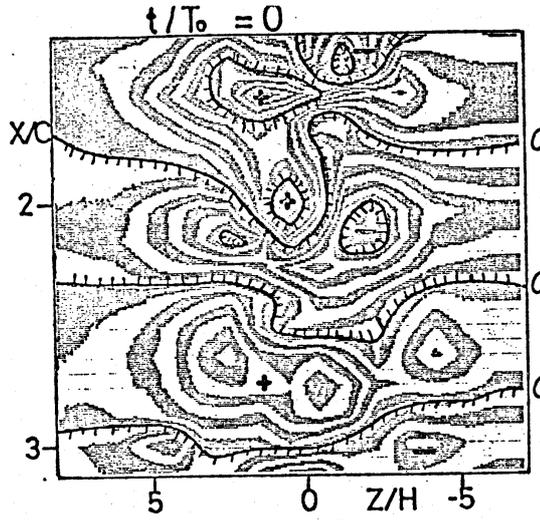
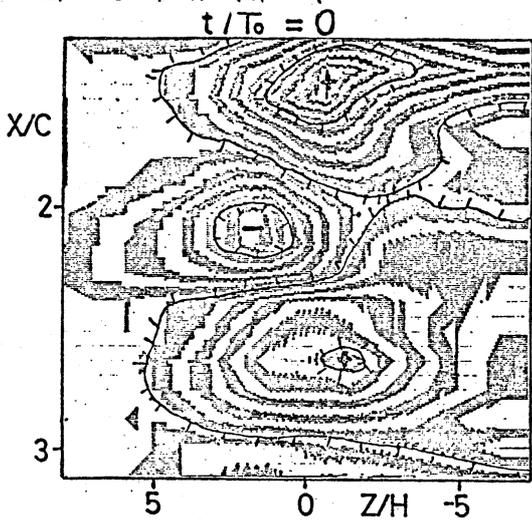
第7図 渦度分布 ω

対して $\Delta t = T/32$ として算出した等渦度分布である。渦度の
変動が翼端の軌跡に集中していることがわかる。次に同じ振
動条件において翼が最上限に来た瞬間における後流の等速度
分布をあらわしたのが、第8図で (a) U の分布, (b) W の分布と
示している。縦軸に流れの方向, 横軸に振動方向をとってあ
るが, やはりUでは翼端の軌跡に沿うような形の加速流が後



才8図 等速度線図 (a) U

(b) W

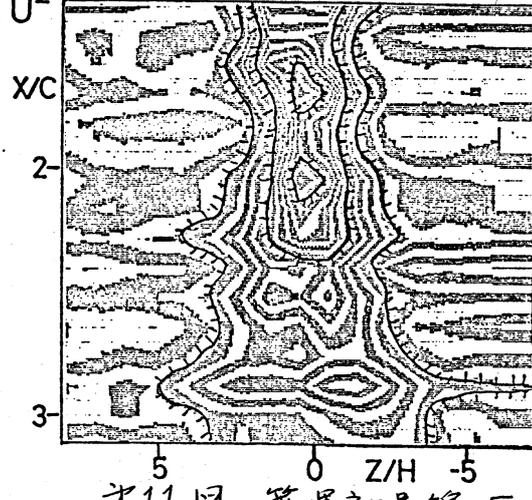


才9図 瞬間流線 ψ

才10図 等渦度線 ω

方針でも認められ、又 W では交互にきれる正負の領域が存在して渦がその中間にむきを逆にして存在することを顕著にあらわしている。才9図は流速の U 成分を Z 方向に積分して求めた

$$\sum_t U^2$$



才11図 等速度平方線 $\sum_t U^2$

流れ関数 $\Psi(x, y) = \sum (U - U_1) - U_B$ として求めたもの
 の等高線図があつて瞬間流線をあらわす。ここで U_1 は一様流
 U_B は対称性を考慮して z 方向に集積する誤差を補償する項で
 ある。平均流をさしひいた流れには回転のむきの異なる渦が
 順次作られて下流に流されていくことを示している。この図
 で示す $k=2.2$ のばあいの他に 才41図(a)(b) のような渦として
 鮮明にはみえない k の小さいばあいであつても、一様流をさ
 しひいた流線には回転がみられ、渦の放出があることが認め
 られた。才10図は才7図と同様な定義によつて U, W より構成
 した流れ場の渦度の等高線図であつて 1.4 毎の縞模様を示
 している。渦度の極大と極小が順次 z 軸上に並んでいる
 ことが認められる。才11図は $\sum U^2$ で構成した一様流方向の
 運動量の周期平均値の等高線であるが、振動する翼の振動よ
 りやや広い後流の領域に一様流よりも大きい運動量が現れて
 いる。すなわち翼の振動によつてこの部分の流体を加速する
 ことで、翼は推力を得ていることを示している。

さてこれまで一様流の中で振動する翼の放出する渦につい
 てのべたが、この一様流をとめて静止水の中での翼振動によ
 る流場及び渦生成の測定を試みたことについて記そう。すな
 わちこれまでは作られた渦は流されて後流にゆき渦列を形成
 したが、流されない渦が次第と一周期に二個、振動の上限と

下限で作られてゐるものと観測，測走した。まず才12図に一連の写真の例を示す。

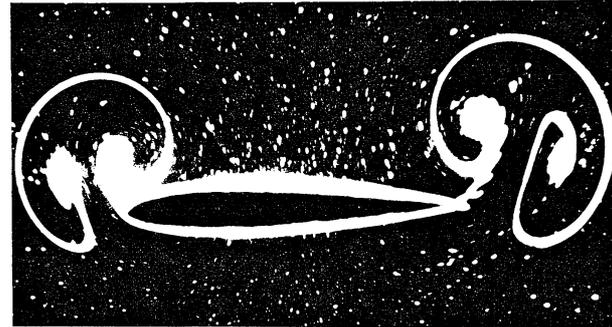
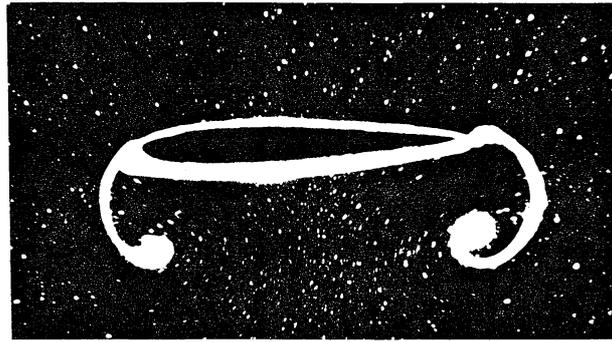
周期 $T_0 = 16$ 秒，上限から下限までの半周期の三枚を示してある。

電解法とアルミ粉末法を重ねしてあるが，露光時間が短かいため，アルミ流線は鮮明でないため。

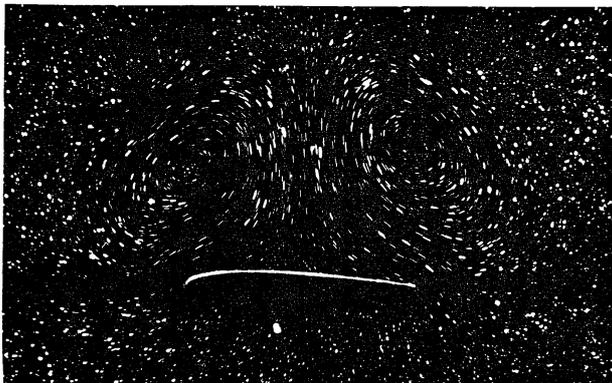
下限時のアルミ粉末のみが長い露光時間の写真で才13図に示す。更にこれより可視化写真より求めた渦中心の位置を一周期にわたり，

いくつかの周期の異なる振動について前縁(L.E.)と後縁(T.E.)で測走したのが才14図である。

図中実線は翼端の軌跡を示す。写真で示す通り翼と渦の相対的位置は変化するが，渦自身の位置



才12図 周期16秒 4秒毎 1/30秒露光



才13図 周期16秒 1/4秒露光

ほぼとんど教らす
しかも次の渦の生
成が行われる次周
期までにはある程
度減衰するが、

新しい渦は前の渦
と同じ場所で交替
するようになると、同様の

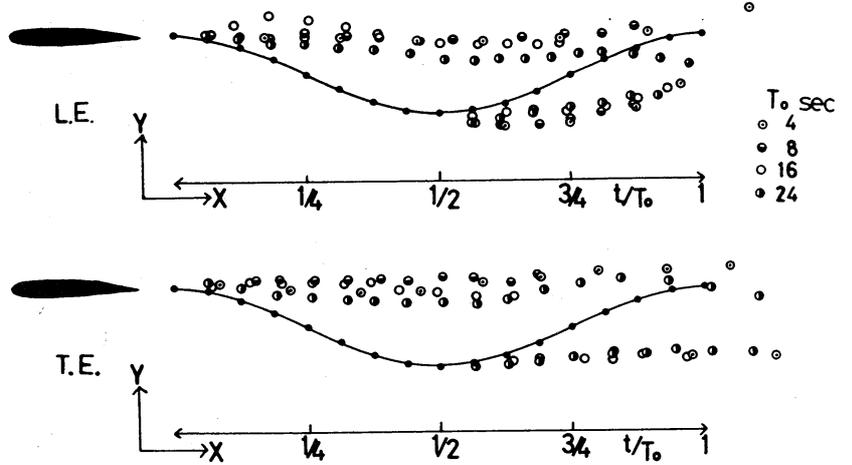
流れ場が形成される。電
解法で示される色つき流
跡線はその辺りに残り、

しかも渦の形にみえなか
ら渦中心とは異なる真に
存在することは、この写
真でも示す通りで、可視
化の写真の見方について
注意すべきことであらう。

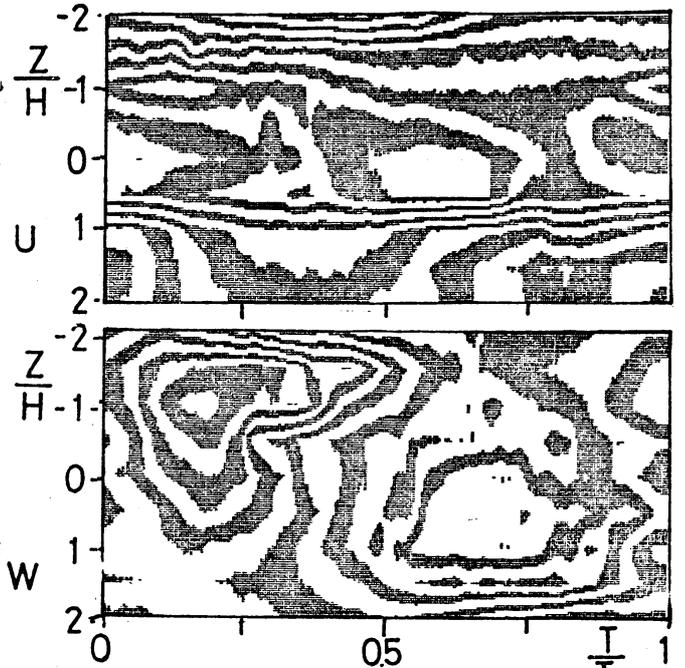
同じ場所に作られる渦につ

レーザー流速計で以前と同様の集合平均操作を行って流速の
測定を試みた。しかしこのばあいには一般流がなく、流速は
正負両方の値をもつ。そのためレーザー流速計の交叉する =

H=125 cm (elec)

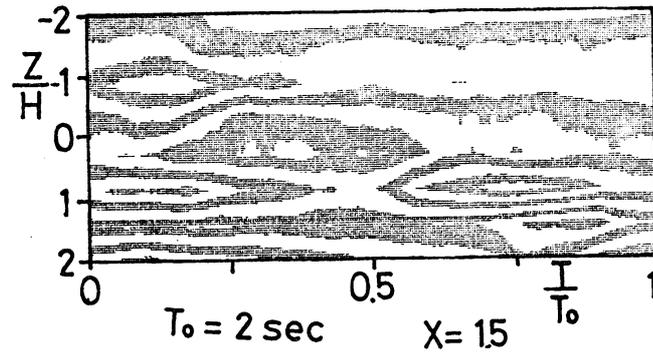


※14図 渦の位置



※15図 等流速線図

本のローマのうすの一方
を高周波振動させ、本力
を後調させてとりおす用
波数シフターを用いて測
定と行つた。才15図に翼
端Fリ1cm (= 1/8 c) はな



才16図 等渦度線図

れた断面での一周期にわたる速度分布の U, W 成分を示す。 U
では振動中心に、 W では流れ場全体にほぼ対称的に流れがく
り返されてあり、向きが異なる渦の存在を示している。更に渦
度分布と同様に算出すると才16図が得られる。測定真が粗い
のと翼端から距りがあることであまり鮮明ではないが、渦度
集中が振動翼端に周期的に認められる。

4. おわりに

最後に振動翼についてクワタの条件を考えてみよう。一般
にクワタの条件は後縁が鋭い物体のまわりの完全流体の定常
流でそのまわりの循環すなわち揚力を求めるのに用ゐられ、
1) 上下面をはなれる等しい流線 2) 翼の角の二等分線が流線
3) 後方流み真 4) 上下面の等圧力などがいわれる。非定常で
ある振動翼のばあいには勿論そのまの形で成り立たないこ
とは示された可視化写真及び測定からいえる。しかし後縁

のできる渦の層が循環を与えることは次のように言えることができる。すなわち翼の上面と下面に沿って流れる流管を考慮し拡張されたベルヌーイの式を適用すると、それぞれ

$$H = \frac{1}{2} V_E^2 + \frac{1}{\rho} P_E - \frac{\partial \varphi_E}{\partial t} \quad \text{上面}$$

$$H = \frac{1}{2} V_F^2 + \frac{1}{\rho} P_F - \frac{\partial \varphi_F}{\partial t} \quad \text{下面}$$

とかける。Hは無限上流での総圧、Pは静圧、 ρ は密度、 φ はポテンシャルをあらわす。この両式の差をとり $P_E = P_F$ とすれば

$$\frac{\partial (\varphi_E - \varphi_F)}{\partial t} = \frac{1}{2} (V_E + V_F)(V_E - V_F)$$

となる。 $\varphi_E - \varphi_F$ は循環 Γ と等しく、 $(V_E - V_F)$ は流れ出す渦層の強さ γ で $\frac{1}{2}(V_E + V_F) = \bar{V}$ は平均速度ととると

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = \bar{V} \gamma$$

となる。更に剥離を伴う時には V_E として剥離直前の速度を、 P_E には剥離領域の圧力を考えると、同様にして

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = \frac{\partial (\varphi_E - \varphi_F)}{\partial t} = \bar{V} \gamma + \frac{1}{\rho} (P_E - P_F)$$

が得られ、圧力差による効果で循環が増大し、定常流のときよりも大きな揚力を得ることもある。これらのことを考えると、翼後縁のみを拡大してその微細な流れの構造をみるよりも、後縁からのめずかなまわり込みもふくめて、その四角一

端を後縁とみなす巨視的な見方によって“後縁では流速が無
限大にならない”というクワツクの条件を非定常のばあいに
適用してよいのではなうであろうか。

なおこの実験はポテンシャル理論を基にした渦糸近似法に
よる数値計算と併せて進められ、速度場等についてはよー一
致をみている⁽⁸⁾。

参考文献

- (1) W.J.McCrosky; Some current research in the unsteady fluid flow, J.Fluid Eng. 99 1977.
- (2) J.Lighthill; Mathematical Biofluidynamics, Soc. Indust. and Appl. Math., Philadelphia, 1975.
- (3) W.R.Sears; Unsteady motion of airfoils with boundary-layer separation, AIAA J. 14 1976.
- (4) J.P.Giesing; Vorticity and Kutta condition for unsteady multienergy flows, J.Fluid Eng. 1969.
- (5) 夏目明子, 大島裕子; 振動翼後流の実験, 東大宇宙研報告 15 1979.
- (6) 大島裕子, 夏目明子; 非定常翼のクワツク条件について, 東大宇宙研報告 16 1980.
- (7) Y.Oshima and K.Oshima; Vortical flow behind an oscillating airfoil, 15th ICTAM Rep. 1980.
- (8) 小野清秋, 桑原邦郎; 渦糸近似による振動翼の数値計算, 京大数理研講義録 354 1979.