

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られ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。ここでは応用面はおくとして、可視化による流場の観測とレーザ流速計、ホ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フ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が問題点と思われる。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と説かれた。その例は色光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。丁度ここを示す振動翼による流場の観測についても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 の二次元翼型で用水路では $c = 8 \text{ cm}$, 通航水槽では $c = 4 \text{ cm}$ 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ている。

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定部とひとつ循環式閉水路を二台の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浅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ムービーなどで撮影した。

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
 後流と翼端よ
 り17 cmまで
 の16断面にわ

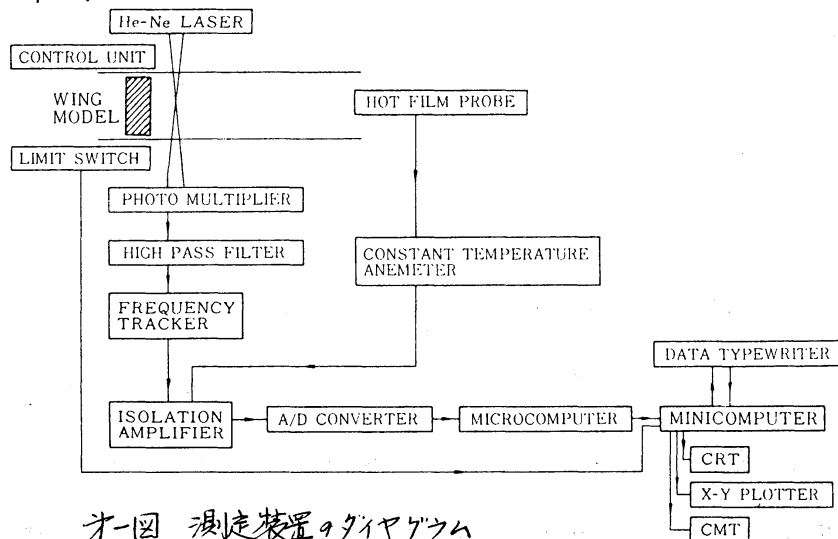
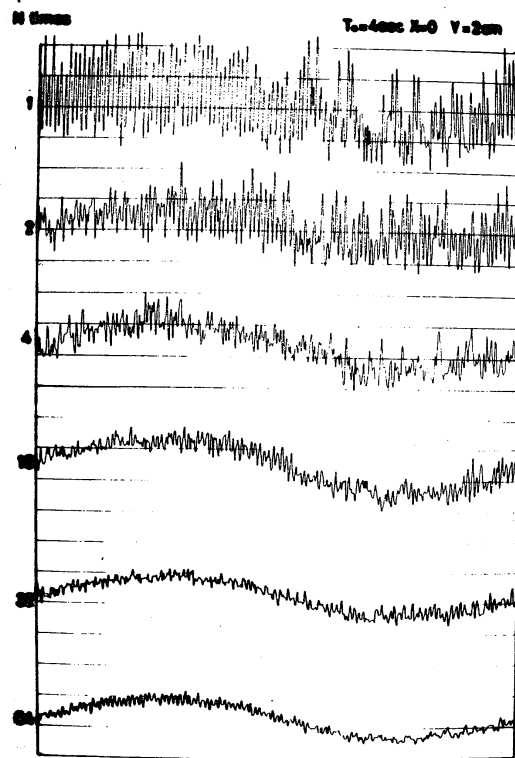


図1 測定装置のダイアグラム

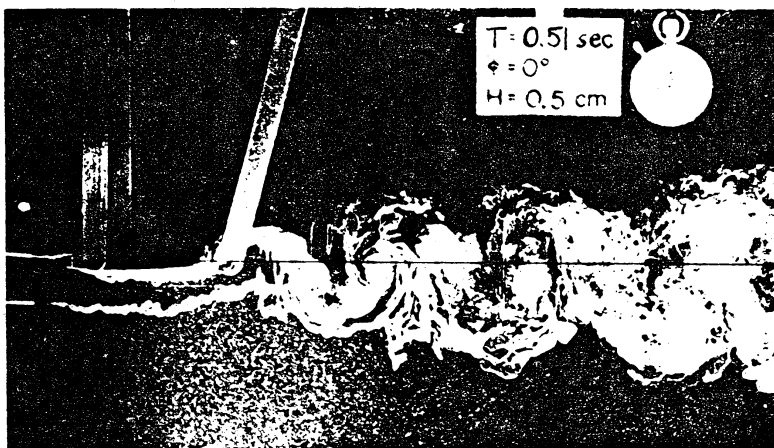
たり振動の上下で 15cm の幅にわたり流速 U , W を測定した。測定具の移動にはミニコンピュータを用い、微動装置を自動的に制御した。また翼の振動によつてホフトフィルムが機械的に破壊されるおそれのある翼に近い領域ではレーガー流速計が用いられた。このばあいにも U , W 成分をとるためにレーガー光の交叉平面を流れに対して $\pm 45^\circ$ 傾けてセフトして測定を行つた。しかしレーガー流速計のばあいには測定具をかえるために測定部をはさんで発光部と受光部とある光学系全体を同時に移動させるために一つの架台にのせてあるが、これ全体を自動的に制御するのは困難であるので手動で行つた。これらの測定出力は才1図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、カセフ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、一様流としてみれば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ガー流速計の出力としてあらわしたのが才2図である。流速変化を平均回数

に対して示してあるが、回数を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

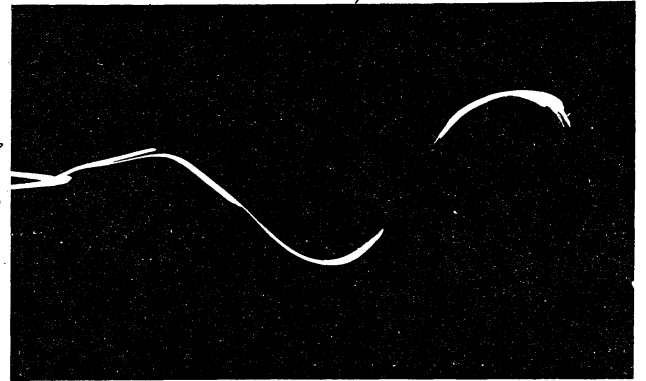
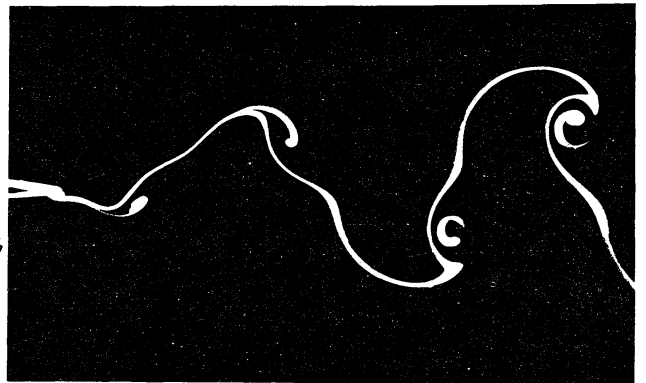
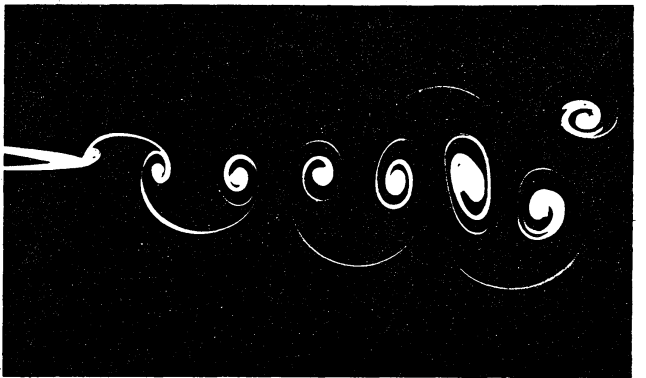
色素注入法による可視化写真と才3図に示す。写真はカラー才2図 集合平均回数と出力の例。で撮られてゐるが二色の混合の具合、渦のまき込む様子などより鮮明に示されてゐるが、ここでは白黒で示す。この写真からも向き、互いに異なる渦が次々と放出され、下流に拡がってゆく様子が見えるであろう。振動振中は変化してゐないにかかれうす振動によつて翼のまわりの流体が上向き、下向きの



才3図 色素による可視化 $K=2.2$

運動量を受けるための下流へゆくに従って広がってゆくであ
つて、この写一板の写真又はその模式的な図で描かれた流線
の図だけでは見る者が誤った判断を下しやうないうことが
流線放の可視化に対する指摘される点であらう。

次に曳航水槽で撮影され
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 の増加ととも
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)では曳航速度
 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
り込むように電解気素が放
出されてゐる。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 後縁からの放出渦

るため、翼の境界層の中かう浸み
出した色事で可視化である。こ
れが渦の後縁での位置 X と 1 周
期にわたる関係を示す図に示す。

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

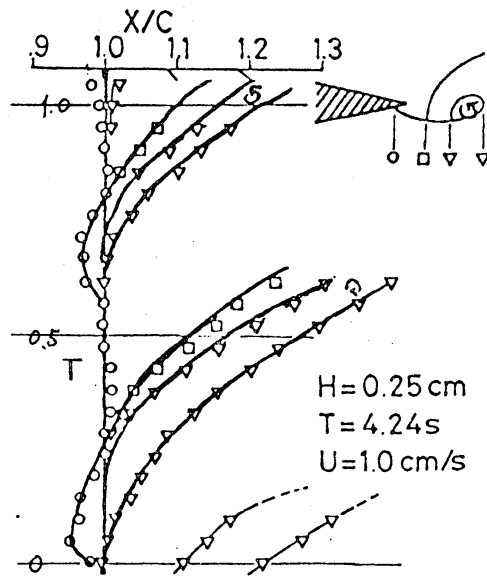
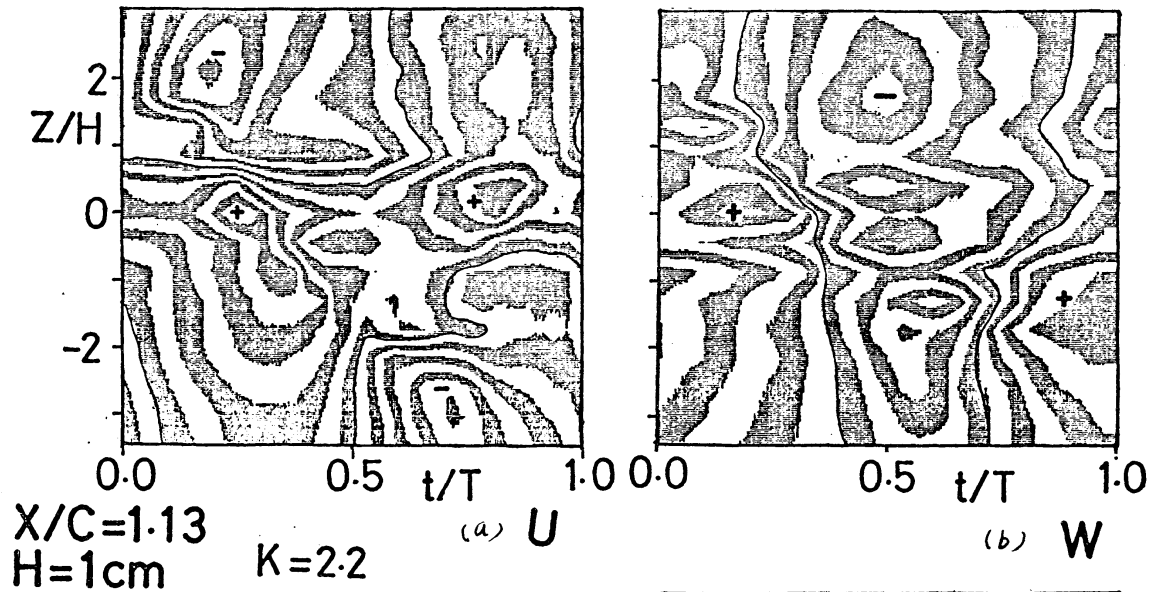


図5 渦の X - T タイヤグラム

る一様流のない振動翼とは異なり、振動によって実効迎角が
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らる。

次に測定結果の概略を述べよう。振動周期などをかえ、種
々の実験条件について測定を行ったが、ここでは振動 1 cm 、
 $K=2.2$ で $X/C=1.13$ の断面における流速 U と W の一周期にわた
る変化を示す図に示す。図中の U は $U=0$ を基準として一様流を基
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 2.3 cm/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

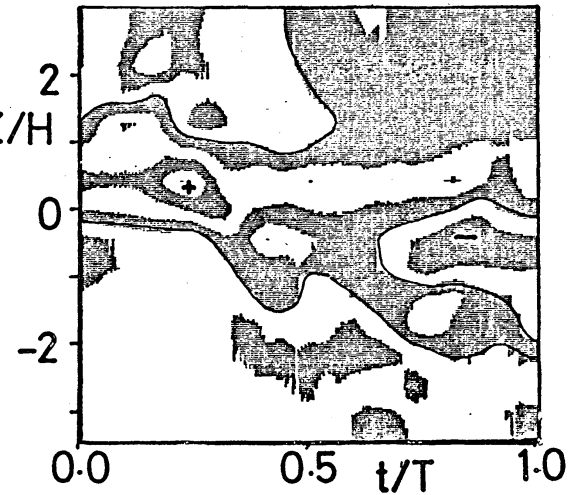


第6図 流速分布

垂直成分（振動方向成分）が
交互にいい代り，その中心に
渦があることがわかる。第7図
はこれらの測走をもとに

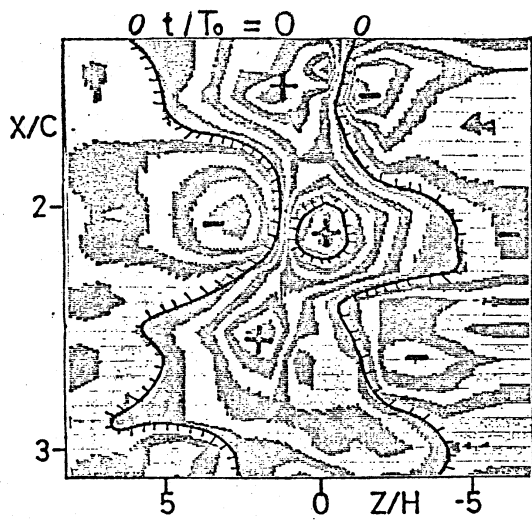
$$\omega = \frac{\Delta U}{\Delta Z} - \frac{\Delta W}{\Delta X} = \frac{\Delta U}{\Delta Z} - \frac{\Delta W}{U \Delta t}$$

として一周期に32個の測走に

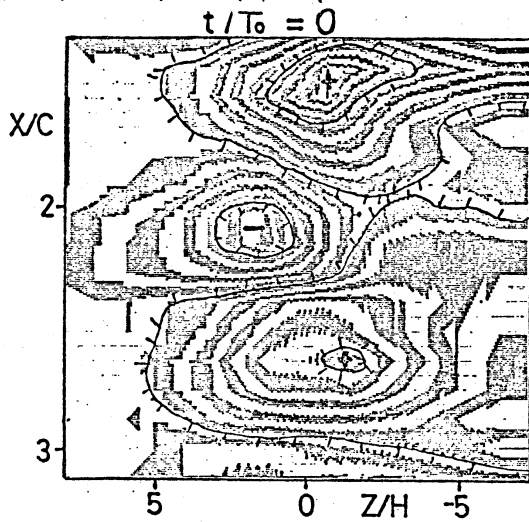
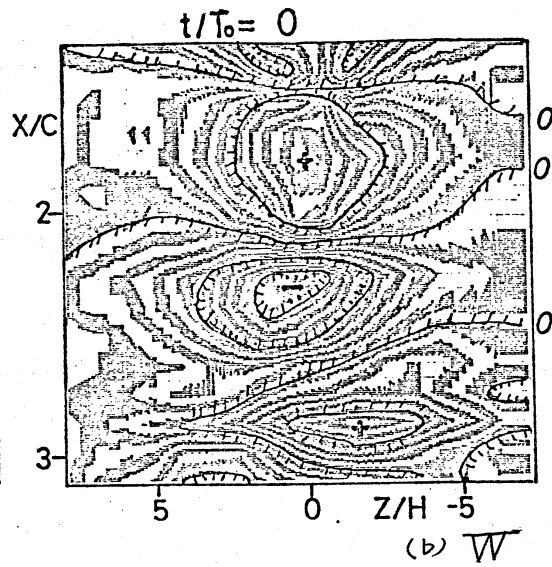


第7図 渦度分布 ω

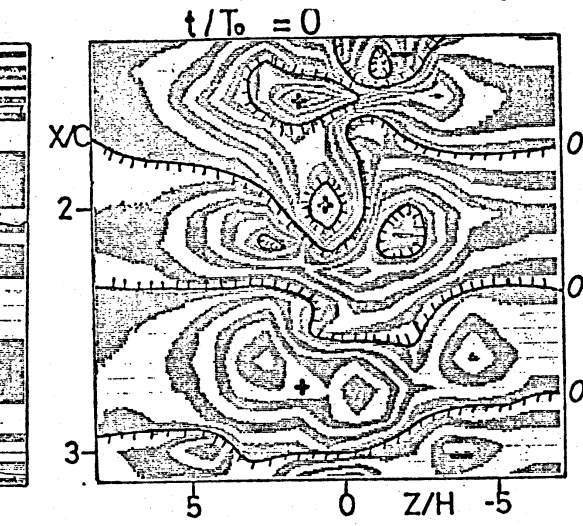
対して $\Delta t = T/32$ として算出した等渦度分布である。渦度の
変動が翼端の軌跡に集中していることがわかる。次に同じ振
動条件において翼が最上限に来た瞬間における後流の等速度
分布をあらわしたのが，第8図で (a) U の分布，(b) W の分布を
示している。縦軸に流れの方向，横軸に振動方向をとってあ
るが，やはり U では翼端の軌跡に沿うような形の加速流が後



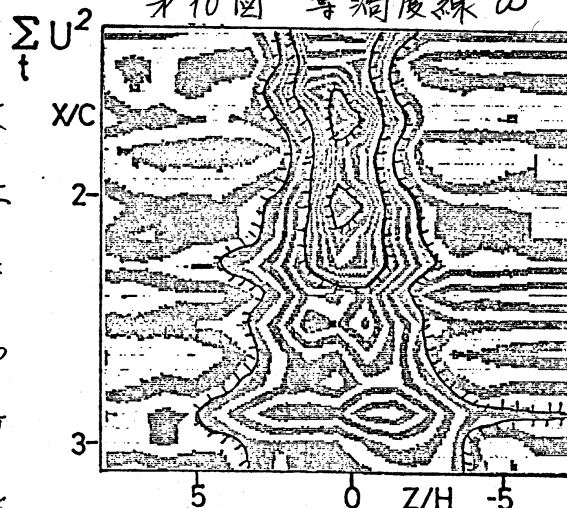
才8図 等速度線図 (a) U



才9図 瞬間流線 ψ



才10図 等渦度線 ω



才11図 等速度量線 $\sum_t U^2$

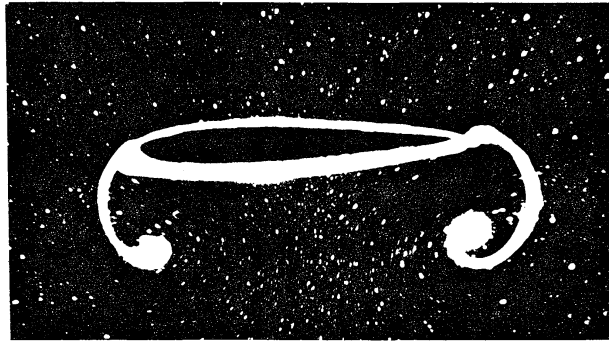
方子でも認められ、又 W では交
互にきれいな正負の領域が存在
して渦がその中間にむきを逆に
して存在することを顕著にあら
わしている。才9図は流速の U
成分を Z 方向に積分して求めた

流れ関数 Ψ $\Psi(x, y) = \sum (U - U_1) - U_B$ 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、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ほぼ X 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ゝ、翼は推力を得ていることを示している。

さてこれまでも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。すなわちこれまでもは作られた渦は流されて後流にゆき渦列を形成したが、流されない渦が次々と一周期に二個、振動の上限と

下限で作られてゐるものと観測、測走した。才12図に一連の写真の例を示す。

周期 $T = 16$ 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。更にこの二枚の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

ほとんど教えず
しかも次の渦の生
成が行われる次周
期までにはある程
度減衰するので、

新しい渦は前の渦
と同じ場所で交替
するようにおき、同様の

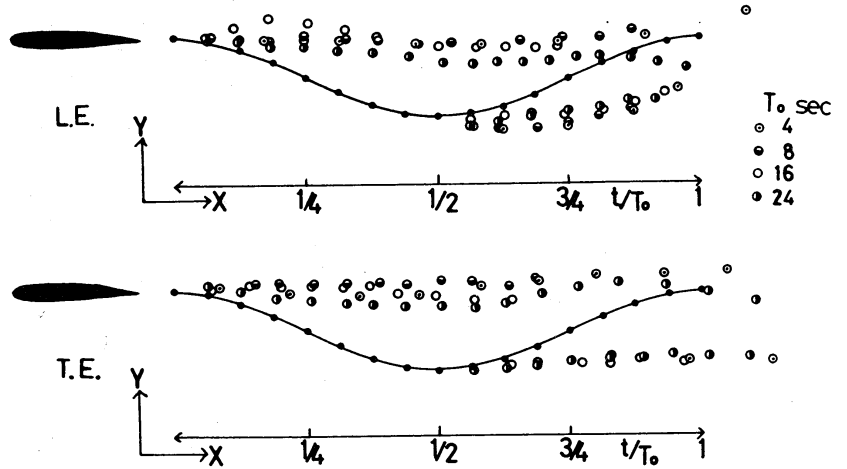
流れ場が形成される。電
解法で示される色つき流
跡線はその辺りに残り、

しかも渦の形にみえなが
ら渦中心とは異なる点に
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。

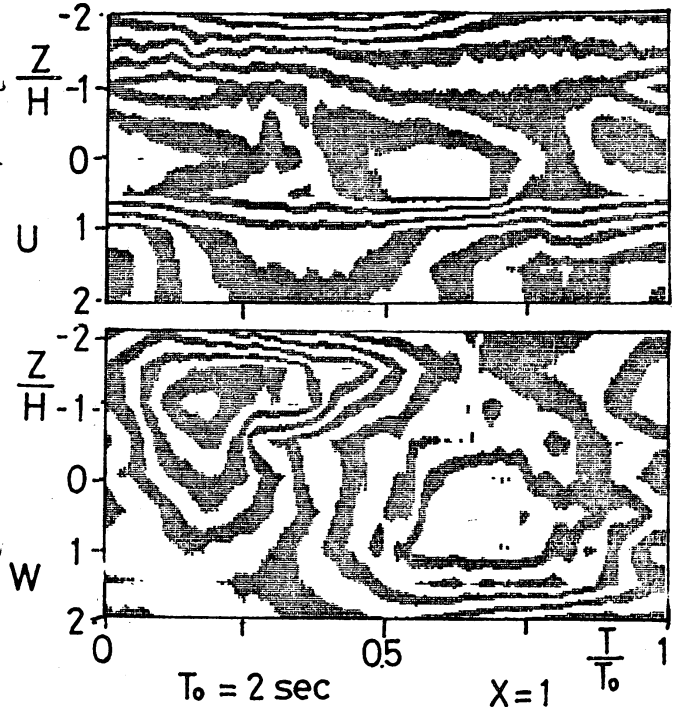
同じ場所に作られる渦について

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＝

$H=125\text{ cm (elec)}$

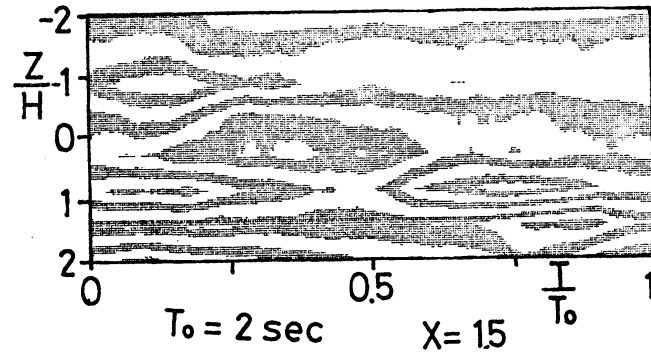


才14図 渦の位置



才15図 等流速線図

本のビームのうちの一方向を高周波振動させ、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回に翼端より 1 cm ($=1/8\text{ c}$) はな



才16回 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おり、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回が得られる。測定誤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フタの条件を考えてみよう。一般にクフ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いられ、
 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) 後方流れなし 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わり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云える。しかし後縁

でできる渦の層が循環を与えることは次のように言うことが出来る。すなわち翼の上面と下面に沿って流れる流管を考えた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 として剥離点直前の速度を、 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

端も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”というクフツ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い一
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; 非定常翼のクフツの条件について, 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) 小野清林, 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.