

渦輪の運動の動的計測

お茶の水大学

大島裕子 (Yuko Oshima)

宇宙科学研究所

井筒直樹 (Naoki Izutsu)

はじめに

渦輪の運動において、その渦度の分布の時間的な変化を実験的に知ることは、渦輪自身およびその干渉の過程の構造の解明に役立つばかりでなく、解析的または数値的解との関係を知る上で好都合なことである。一般に円形の渦輪は、その平面に対して垂直方向に渦輪の半径と与えられた循環によって決まるほぼ一樣の速度で進行する。それに対して楕円のような非円形の渦輪は、1図に示すように局所的にその曲率が違い渦輪各所の速度と法線方向が異なるため、前後および長短軸の交換という振動を繰り返しながら、渦輪全体の占める平面に垂直の方向に進行する。この際、長短径の比 (AR) が大きくなると、長径に近い部分は急速に中心に向かうため、互いにぶつかるようになり、その結果渦糸の繋ぎ替えをして、2個の渦輪に分割される。更に大きな比の場合には、3個ないしはそれ以上の渦輪に分裂することが煙による可視化によって観測されている。ここでは、近年開発したパーソナルコンピュータを用いた渦度の測定システムを用いて、 $AR = 2, 3, 4$ の楕円形の渦輪の運動について時間的な測定を行った結果を報告する。座標系としてはオリフィス中心を原点にとり、長径を X 軸に、短径を Y 軸に、両軸に垂直の方向に Z 軸をとってある。ここで、無次元化をするに際しては代表長さとして面積相当円の半径を、速度として出口近くの中心の最大速度を用い、これによるレイノルズ数はほぼ 6000 であった。

実験装置および方法

実験全体の概要を2図に示す。 X 型熱線流速計による流れ場の速度の測定において、初期較正や測定間隔と時間間隔の設定を含むデータの採取とメモリーへの蓄積、およびディスクへの書き込みという第一段階、そのデータの時間と空間

での並べ換えと渦度の算出の第二段階、さらにその渦度から種々の物理量の算出および渦度分布の画像化とアニメーション化という三段階に分けられるが、これらの課程はコンピュータPC-9801の制御によって行われる。測定段階のブロックダイアグラムを3図に示す。渦輪はスピーカーの前面に取り付けられた楕円形オリフィスから、スピーカーに加えられる電圧パルスによって放出されるが、このパルスは全ての測定の時間の基準として用いられる。そして各点での測定データは時間固定されたデータの集積としてディスクに納められる。オリフィスは、開口面積が同じで長短径比 $AR = 2, 3, 4$ の3種類で、その大きさを表1に示した。この測定は、一点での時間的測定を場所を変えて繰り返し測定することで全流れ場の時間的な変化を求めるのであるから、測定点の数を増やすことは精度をあげるために必要である。しかし記憶容量、測定時間などの点から、表2に示すように直交する二平面については比較的細かい間隔で、立方格子上の三次元測定では空間、時間ともに粗い間隔でという二種類の測定を行った。この測定は現象の異なる事象の積み重ねより、全体の現象を把握するのであるから、その再現性が厳しく要求されるが、速度の波形や可視化による現象の再現性の検証を行い、それらが一応満足される実験条件が選ばれて測定が行われた。

一方、測定とともに、炭酸ガスを用いたシュリーレン法によって流れ場の可視化を行った。それは基準パルスからの遅延回路によってストロボを発光させ、渦輪の運動の時間的な変化を、長径と短径に沿う二方向からの写真撮影およびCCDカメラによるビデオテープへの収録という形で記録した。また透過光によるシュリーレン法では前面の映像は撮影出来ないので、煙注入によって可視化を行い、側面と前面の同時写真で記録した。

実験結果

4図に長径比 $AR = 3$ のオリフィス近傍のX軸とY軸上での速度分布の時間変化を示す。上半分に長軸、下半分に短軸に沿う同時刻のものであって、全平面についての、このような速度分布から得られた渦度分布の例を5図に示す。同図は右側半分だけを等渦度線として描いてある。またこれに対応するシュリーレン写真を6図に示す。これらの図からわかるように、渦輪を構成する各部分はそれぞれの曲率にしたがって異なる方向に異なる速度で進行する。この場合においては、

渦度分布、写真ともに $t = 24 \text{ ms}$ では渦は二つに分離するかに見えるが、その後再び一つの乱れた渦の塊となる。これらの過程を模式的に表したのが7図である。すなわち最初に長径であった部分が、近づいて繋なぎ替えをするのであるが、渦輪を構成している渦糸の全部が一度に繋なぎ替えをするのではなく、接触した部分から繋なぎ替えをして二つの渦輪になる。このとき繋なぎ替えをしたその部分から乱流に遷移して、渦輪に沿って急速に伝播し、全体を一つの乱れた渦の塊とした後に減衰する。このため、一つの円形の渦輪が進行する場合にはその形を保ちながらゆっくりと減衰するのに対して、繋なぎ替えをする場合には急速に減衰が進行する。

長短径比の異なる渦輪について直交する二平面での渦度の重心を示したのが8図で、直線で結んだ白（初期に長径であった部分）と黒（短径であった部分）の丸は同時刻のものを示している。いずれの場合にも長軸の速度が短軸のものに比べて大きい。 $AR = 2$ の繋なぎ替えをしない場合には単純な交換であるのに対して、長短径比が大きくなると複雑に交差して渦輪の形がゆがんで進んでいることがうかがわれる。このような渦輪について敷居値を越える渦度を立体的に現したのが9図であって、下から順に時間の変化を表している。さらにこれに対応する前面図を10図に示す。この図では比較的高い敷居値をとったので、繋なぎ替えは示されていないが、低い敷居値をとると渦の中ほどに橋を渡したように渦度が分布していることがわかる。しかし、この繋なぎ替えでできた渦度は比較的低い値であるので、その敷居値を設定した図を描くと両側の部分が非常に太くなって二つの渦輪とは見えず、一つの塊としか認められない。また長短径比での比較をすると、 $AR = 4$ の場合には繋なぎ替えの影響で乱流への遷移がより強く起こるために、渦度の減衰が激しく、そのため同じ敷居値で示すと細くなっている。

次の11図は直交する二断面について、それぞれ右半分の循環 Γ の時間的变化を示した。ここで Γ_+ と Γ_- は時計回りと反時計回りの循環をそれぞれ現す。 Γ_- は長短径形を大きくすると増加するが、渦の繋なぎ替えによって生じたものである。そして、循環の総和 ($\Gamma_+ + \Gamma_-$) は繋なぎ替えをするまでは、ほぼ一定に保たれるが、繋なぎ替えが起こると反対向きの渦度が局所的に相殺するために、徐々に減衰する。この間に渦輪は繋なぎ替えをしたところを源として、渦輪に沿って乱れが伝播し、全体が一つの乱流塊となってしまう。

インパルス P 、エンストロフィー E の二つの断面における時間的変化を 12 図、13 図に示してある。すなわち、直交する二面では P 、 E ともに、長短径の交換をする渦の変形に連れて、増加と減少を交互に行う。しかも繋なぎ替えをする長短径比の大きいものでは減衰を示すのに対して、 $AR = 2$ では元の値まで回復する。これらの物理量を全空間にわたって積分をしたものを 14 図と 15 図に示す。断面では激しく変化していた量も、全空間を積分した値は繋なぎ替えをするまでは、長短径比に関わらずほぼ一定となり、その後徐々に減衰する。

おわりに

非円形の渦輪の時間的な運動の過程計測により、渦輪の構造として次のようなモデルを考えた。渦輪を構成している要素は、連続的であるが一つの硬い個体としてではなく、いくつかの渦糸の束であって、それが相互に影響しながら全体の運動を決定する。そのため、渦糸相互の位置関係が変わることが断面の変形を表す。また、異なる向きの渦糸が近付いて繋なぎ替えをする際には、非常に接近したそれぞれの渦糸ごとに繋なぎ替えがなされるので、全体が分割されるためには全部の要素が繋なぎ替えをしなければならない。しかし、いつも全部の渦糸が繋なぎ替えをする必要はなく一部でも可能であるため、計測されたような事例が起こるものと想像される。三次元渦糸近似法²⁾によって、このようなモデルについて数値計算でシミュレーションをした。7本の渦糸によって構成された $AR = 3$ の渦輪の運動の時間的な変化を 16 図に示す。渦糸間の距離、循環の大きさなどの条件が異なるためか、前後の変形と長短径の交換のみで繋なぎ替えは起こらなかった。実験的にみても、小さな長短径比では繋なぎ替えは起こらず、 $AR = 3$ に近いところに、臨界値があるように思われる。測定と数値計算の対応および条件を変化させての試行は、渦の相互作用を解明する上で今後の課題であろう。

参考文献

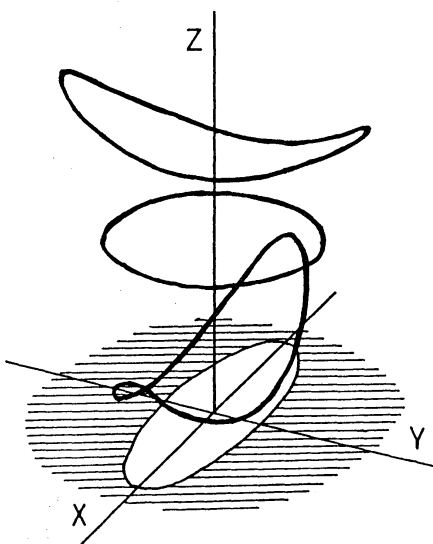
- 1) N.Izutsu, K.Oshimia, Y.Oshima: Experimental study of interacting vortex rings, ISAS Rep. SP5 (1986) pp.3-13.
- 2) Y.Oshima, T.Noguchi, K.Oshima: Numerical study of interaction of two vortex rings, Fluid Dyn.Research (1986) 1, pp.215-227.

	aspect ratio		
orifice	2:1	3:1	4:1
major diameter(cm)	5.1	6.5	7.2
minor diameter(cm)	2.6	2.1	1.9
area (cm ²)	10.4	10.9	10.7
effective radius(cm)	1.8	1.8	1.8

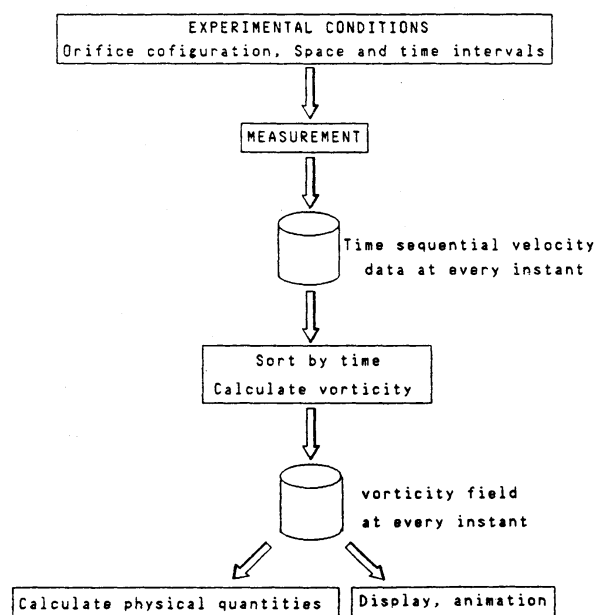
表1 オリフィスの大きさ

Case	Aspect ratio	T (ms)	Δt (ms)	Δx (mm)	Δy (mm)	Δz (mm)	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1	2:1	51	0.2	-	1.5	1.5	-	-3~54	1.5~144
		51	0.2	1.5	-	1.5	-3~54	-	1.5~144
2	3:1	51	0.2	-	1.5	1.5	-	-3~54	1.5~144
		51	0.2	1.5	-	1.5	-3~54	-	1.5~144
3	4:1	51	0.2	-	1.5	1.5	-	-3~54	1.5~144
		51	0.2	1.5	-	1.5	-3~54	-	1.5~144
4	2:1	39.6	0.6	2.6	2.6	2.6	0~39	0~39	1.5~123.7
5	3:1	39.6	0.6	2.8	2.8	2.8	0~42	0~42	1.5~119.1
6	4:1	39.6	0.6	3.0	3.0	3.0	0~45	0~45	1.5~118.5

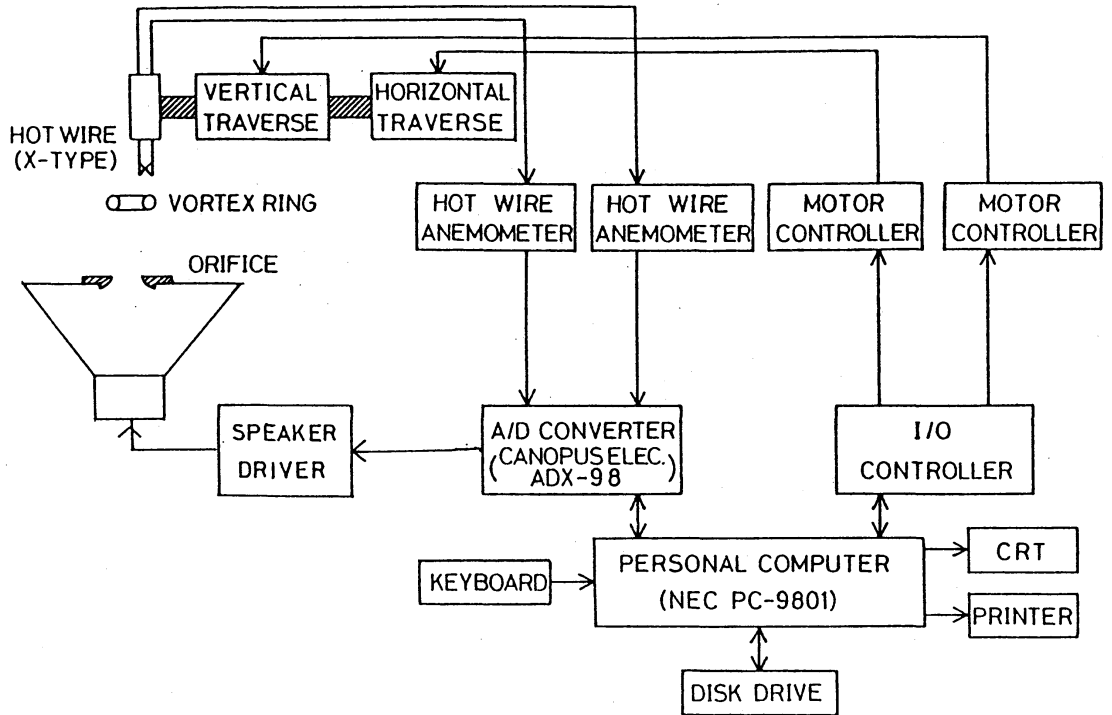
表2 測定条件



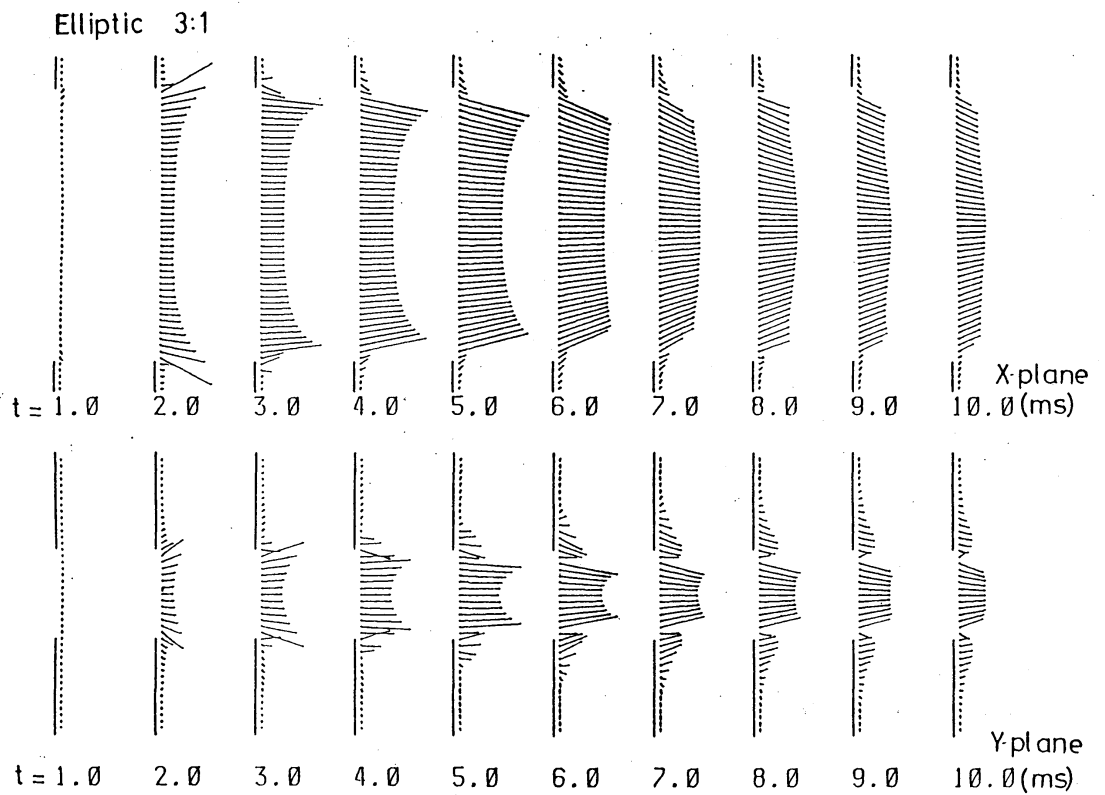
1図 楕円渦輪の運動と座標系



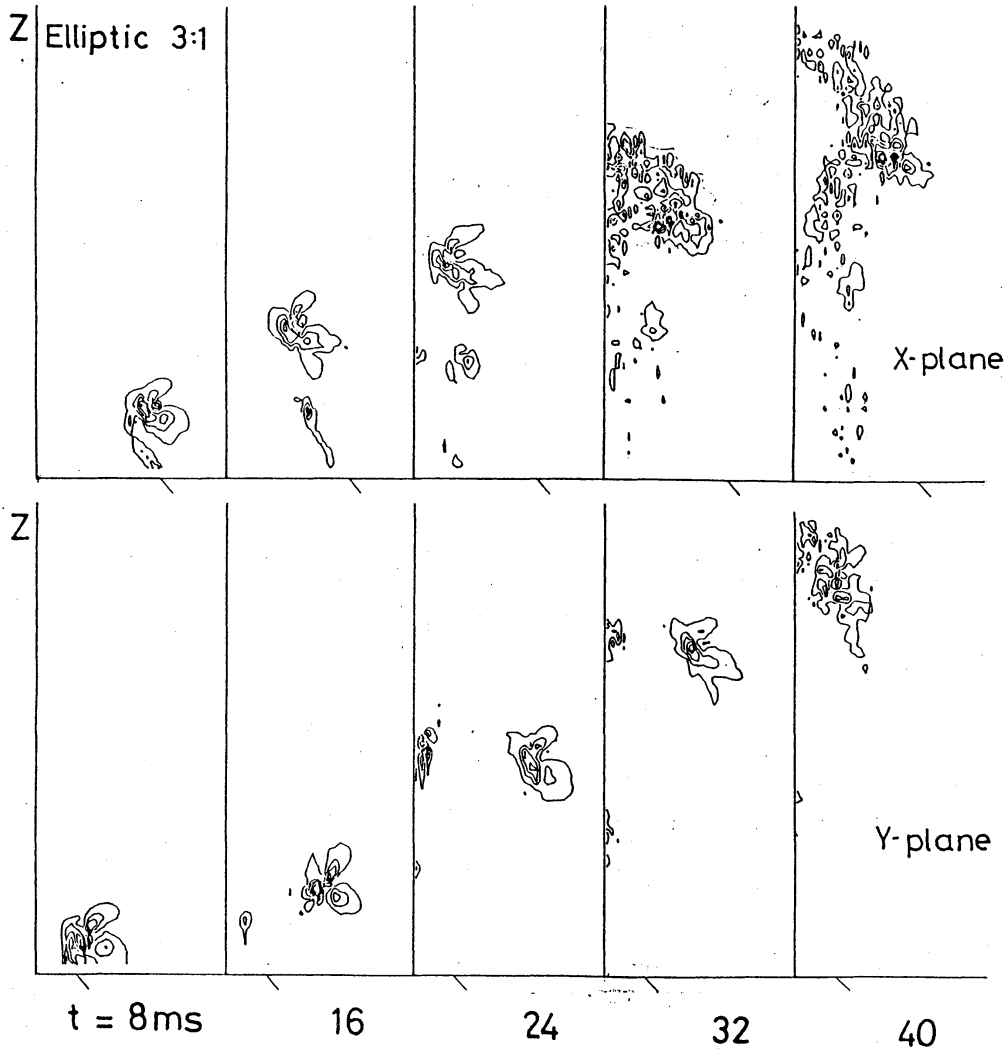
2図 実験の概要図



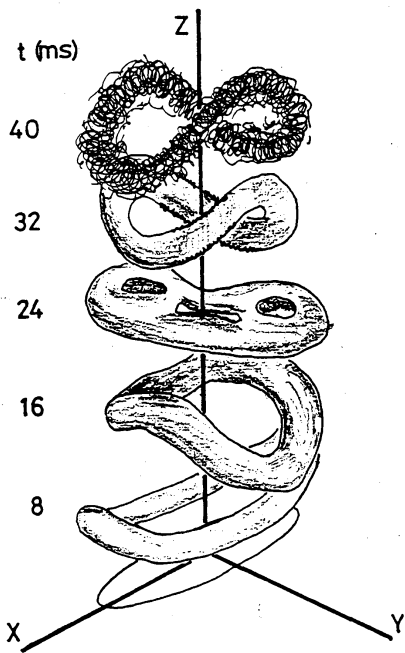
3 図 測定装置のブロックダイヤグラム



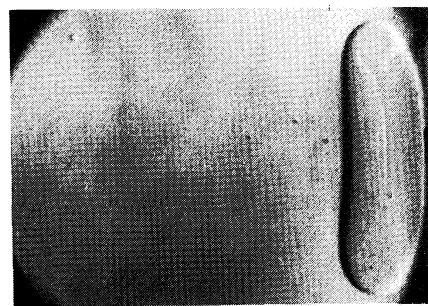
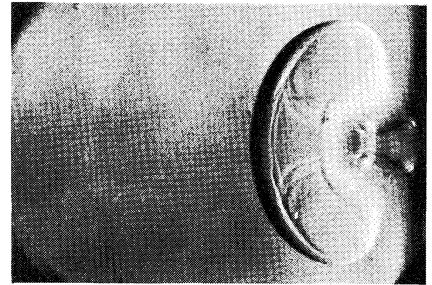
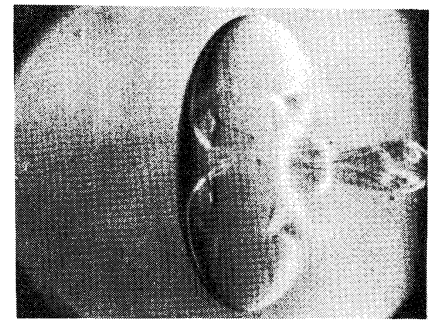
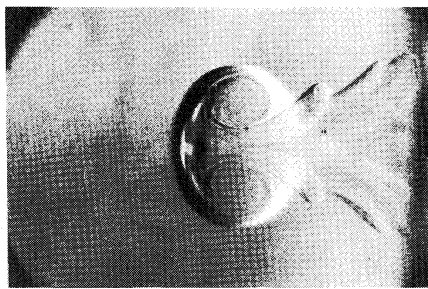
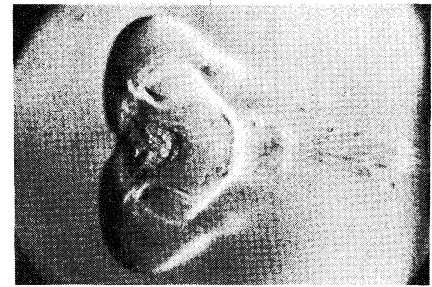
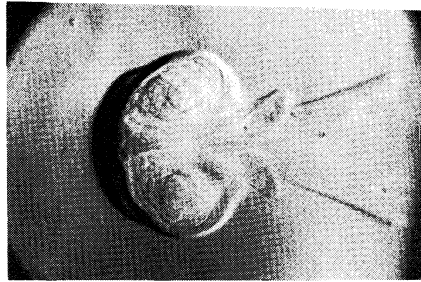
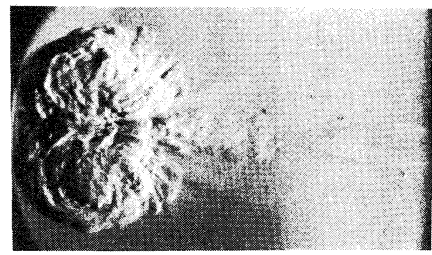
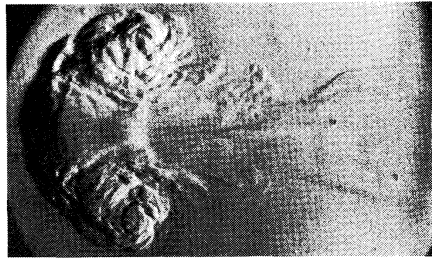
4 図 オリフィス付近の速度分布の時間変化



5 図 $AR = 3$ の渦輪の等渦度線



7 図 $AR = 3$ の渦輪の時間変化の様式図



42 ms.

32,

24,

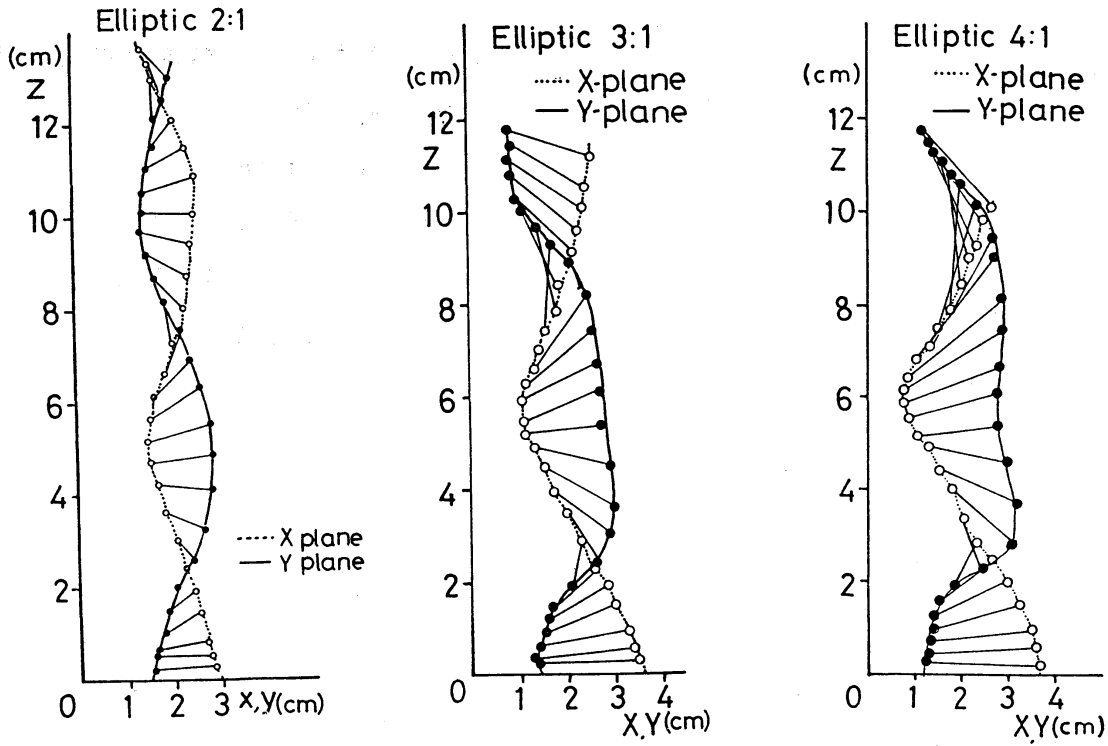
16,

t = 8,

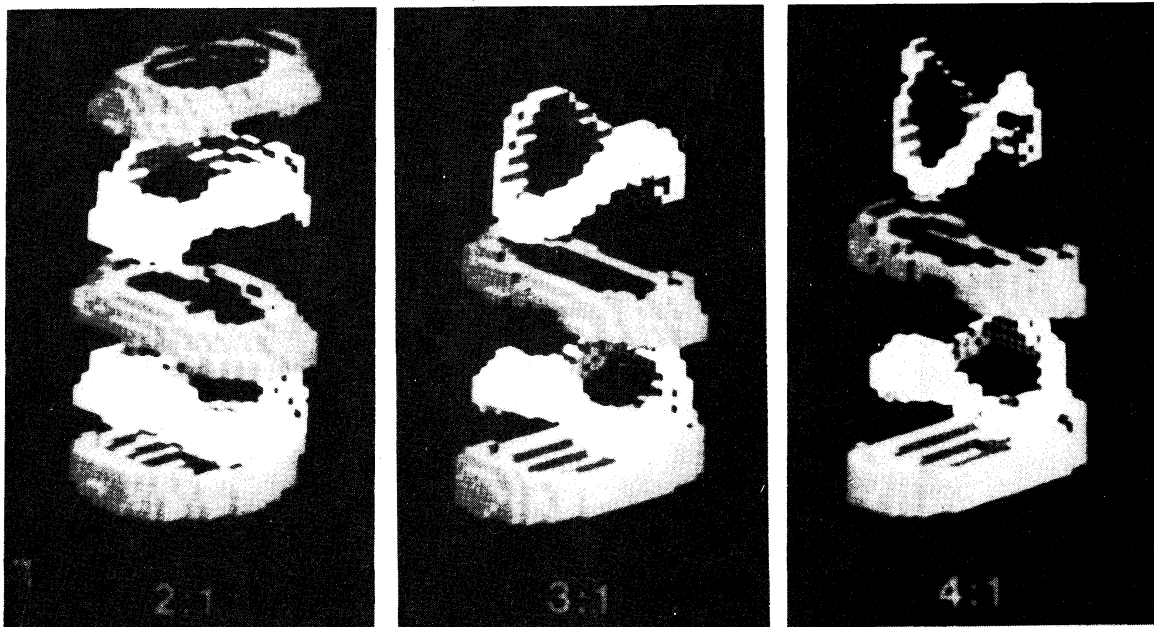
X - plane

Y - plane

6 図 シュリーレン写真



8 図 直交する二断面における渦度重心の変化



9 図 敷居値 1.5 の渦度の分布図 鳥瞰図

下より無次元時間

$t=1.5, 3.5, 5.4, 8.4, 10.9$ $t=1.6, 4.2, 7.1, 10.6$ $t=1.5, 4.1, 6.8, 10.7$

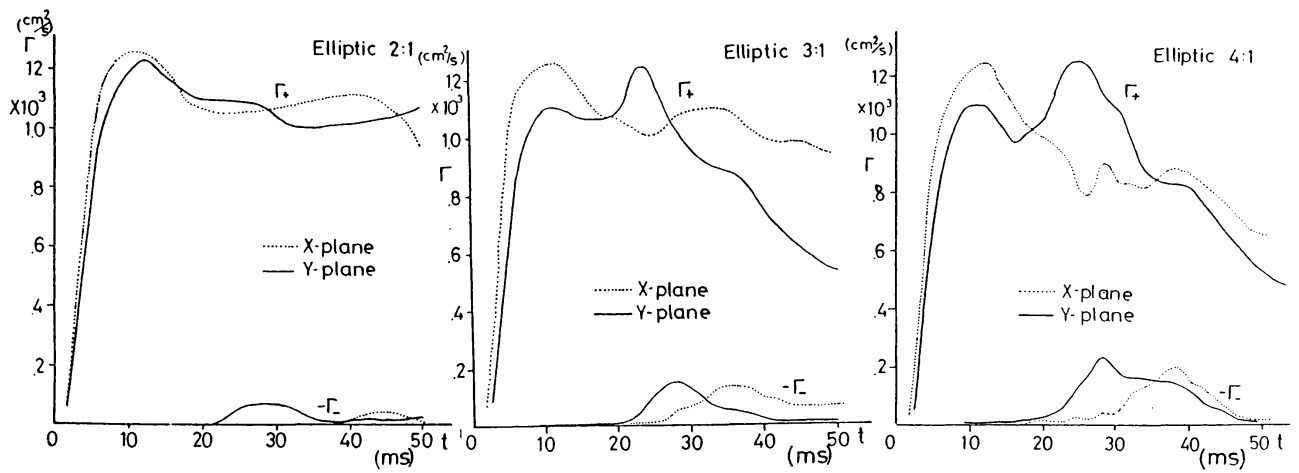
10図 数居値 1.5の渦度の分布図
前面図

無次元時間

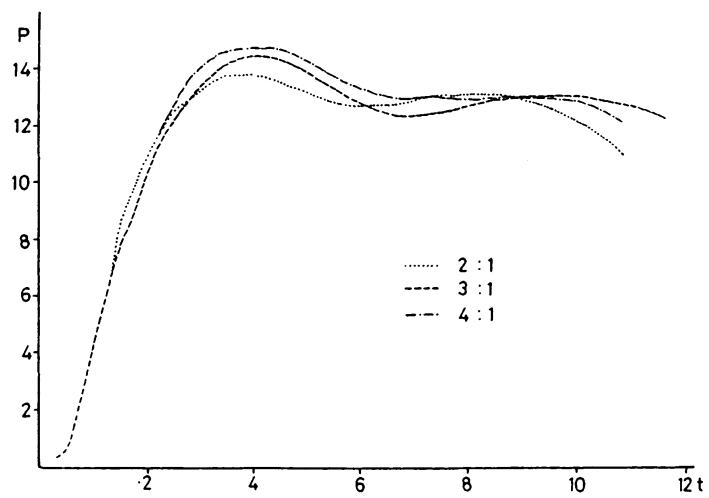
AR=2 t=1.5, 3.5, 5.4

AR=3 t=1.6, 4.2, 7.1

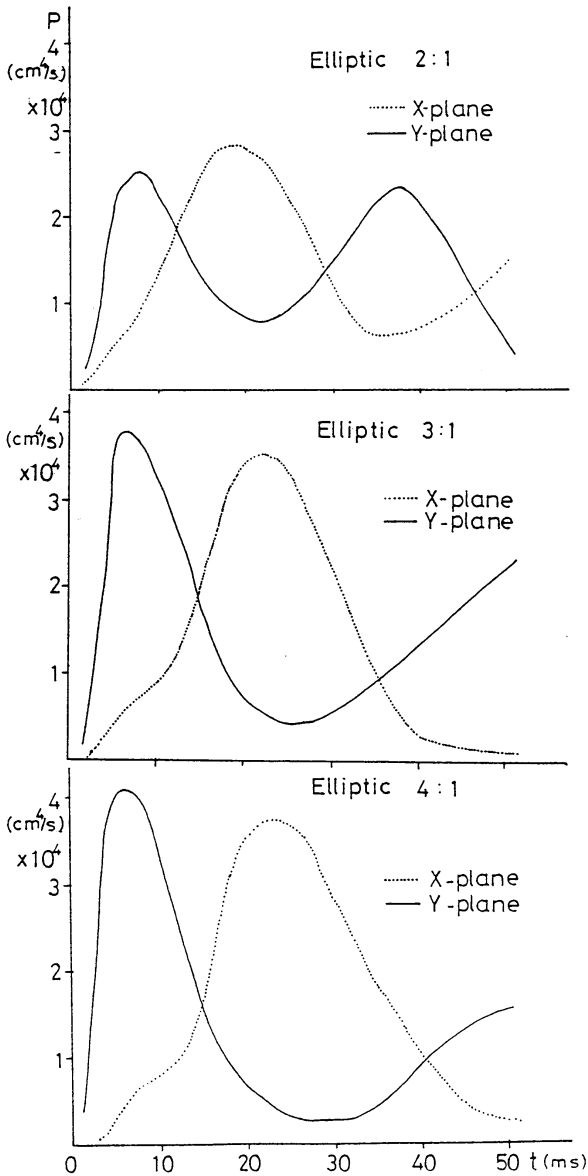
AR=4 t=1.5, 4.1, 6.8



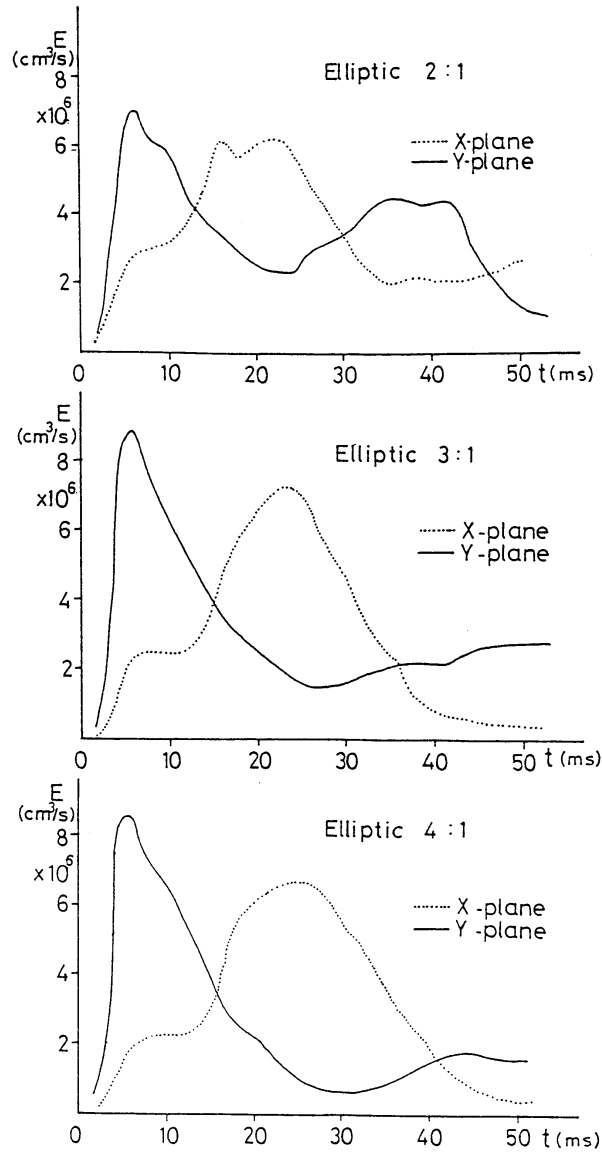
11図 直交する二断面における循環の時間変化



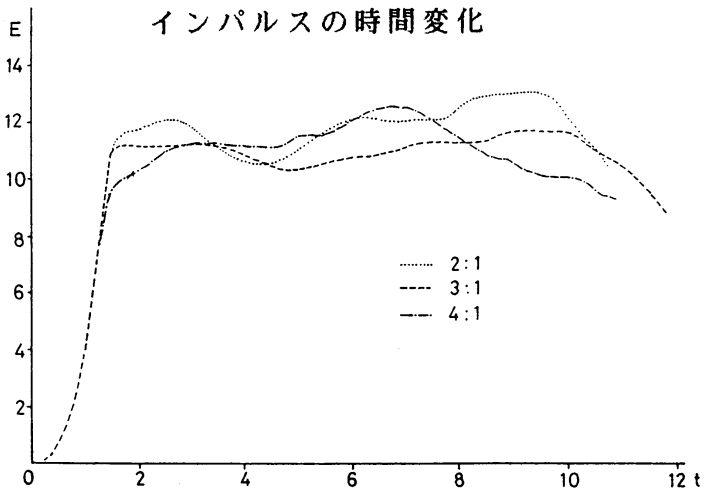
14図 測定領域のインパルスの時間変化



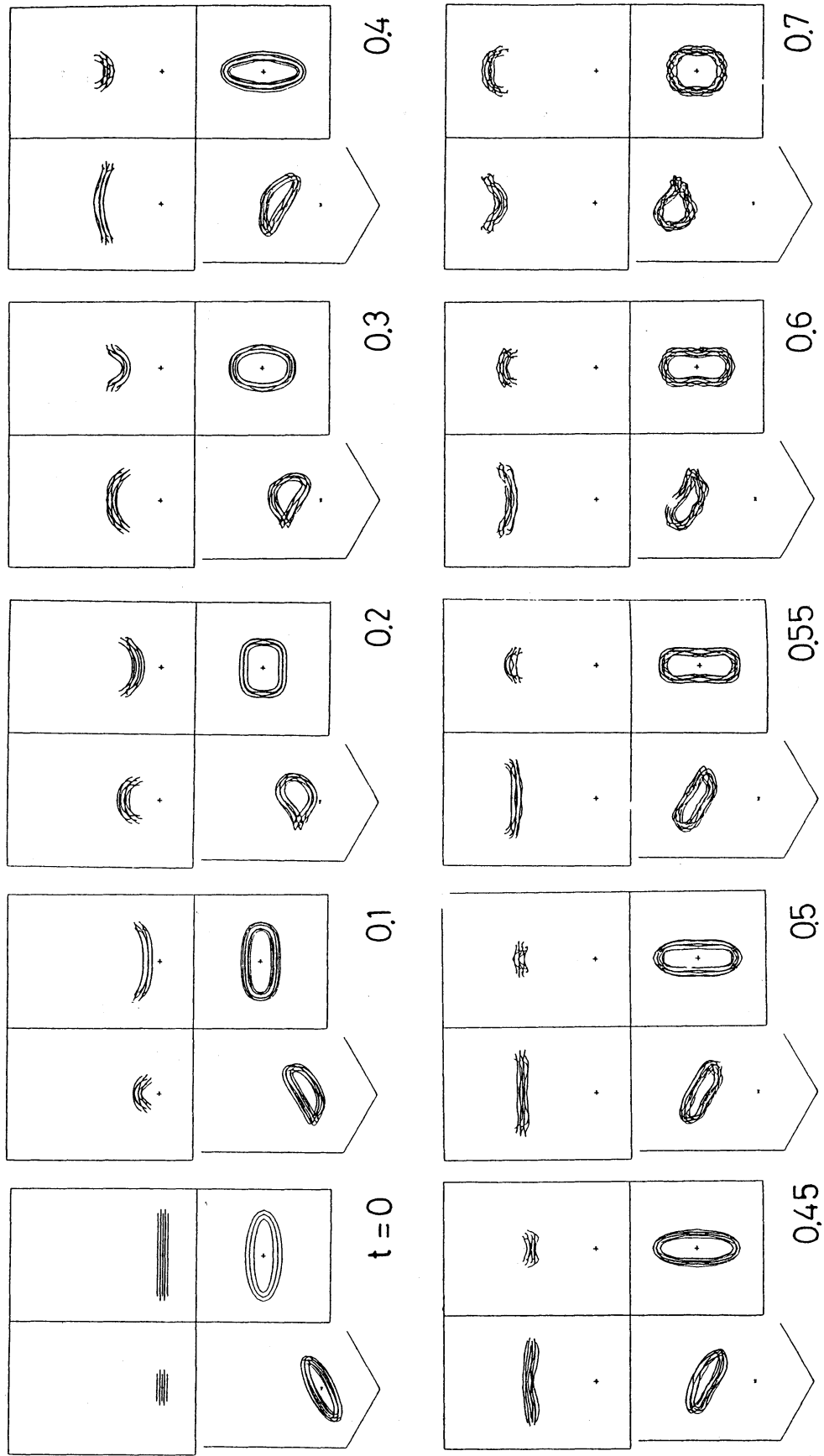
1 2 図 直交する二断面における
インパルスの時間変化



1 3 図 直交する二断面における
エンストロフィーの時間変化



1 5 図 測定領域の
エンストロフィーの時間変化



16 図 三次元渦糸近似法による $AR = 3$ の渦輪の数値シミュレーション