

渦輪の流れ場の測定

お茶の水大学理学部 大島裕子 (Yuko Oshima)

宇宙科学研究所 井筒直樹 (Naoki Izutsu)

§ はじめに

渦輪の運動についての研究は古く100年以上の歴史をもっているが、実験的にみるとその多くは可視化法によるものであった。特にその干渉過程を示すものでは、どのような現象であるかを理解するために、可視化法は大きな役割を果たして来た。そして可視化法の技術の発達に伴っていろいろな新しい現象をも目で確かめられるようになったと同時に、最近のコンピュータの発達で可視化された映像からイメージプロセッシングによって数値化されたデータを得ることが行なわれるようになって、各所で各様のシステムが次々と生まれている状態である。

一方測定においても 計算機の発達によって、測定データの処理をデータプロセッシングによって行なうことが多くなった。ここでは種々の渦輪の作り出す流れ場について、パソコンで実験そのものを制御、データを取り込んでディスクに書き込み、実験終了後にディスクのデータを整理することで、時間的に変化する流れ場の速度分布より渦度の分布を算出、時々刻々と変化する流れ場の様子を映像化する一方、その他の物理量を求める手法を開発した。

円形オリフィスから短時間空気を吹き出すことによって円形の渦輪を作ることができ、渦輪はその平面に対して直角方向に進行する。行なわれた測定はこのようにして作られる、単独渦輪の進行¹⁾、同軸上の二つの渦輪の干渉と合体²⁾および平行軸上に並んだ二つの渦輪の干渉による渦糸のつながり³⁾についてであって、以下にその方法と測定結果を述べる。座標として渦の進行方向をZ、それに直角にX、Yをとりそれぞれに対応する速度をW、U、Vとするが、単独渦、同軸渦では軸対称である。

8 実験装置および方法

実験全体の概要を第1図に示す。まず熱線風速計による速度の測定およびそのデータのディスクへの収納、そのデータを時間と空間に対する並べ換えと渦度の算出、更にその渦度の分布より対応する画像の作製と種々の物理量の算出とグラフ化、画像化という三つの段階から成り立っている。第一段階である測定のブロックダイヤグラムを第2図に、その流れ図を第3図に示す。まず、空気溜に貯えられた圧縮空気を減圧弁で一定な圧力でオリフィスから短時間噴き出すことで渦輪を作るが、電磁弁の開閉とその間隔の調節をするコントローラをタイマーのパルスによって作動させる。また電磁弁の開口時間とその開き具合および加える圧力を調節することで単独渦輪や二連、三連の同軸上に連続的な渦輪をつくることが出来る。なお、このタイマーのパルスの間隔は、前に放出した渦輪の流れ場が次の渦輪に影響を与えない程度に長く、しかし、流れ場全体を1点ずつ移動して測定する作業か

ら考慮すると、全測定時間を短縮する必要があるので、それぞれの現象に対して決定する。一方、このタイマーよりのパルスはコントローラへのトリガーであると同時にデータ採取の時間経過の基準として用いられる。測定に先だって流れ場全体の様子および干渉過程を知るためにシュリーレン法によって可視化実験がなされた。シュリーレン法では、密度変化での検出となるため、圧縮空気の代わりに炭酸ガスのポンペをつなぎ、同じ圧力条件のもとで実験を行なった。すなわち基準パルスから遅延回路によってストロボを発光させて、現象の時間的变化に対する写真撮影をした。このようにして作られた渦輪の通過領域をメッシュ状に分けて、熱線流速計を用いて1点1点について測定を行なうのであるが、実験に先だってその日の温度などの初期条件をいれて熱線流速計の較正を行ない、それとともに測定範囲やメッシュの間隔、繰り返しの測定回数などの実験条件をあらかじめ計算機にインプットする。測定はX型熱線流速計で $U+W$ 、 $U-W$ としての出力をA/Dコンバータ(A/D X-98)を通して $200\mu s$ 毎192個のデータを採取する。1点の各時刻につき数回(多いほど統計的によいのであるが、全測定時間を考慮して本実験では4回と決めた。しかし本実験では再現性がよく、特に層流領域ではほとんど一致するデータを得られることから4回で十分と考えた。)のデータを平均して U と W を決定し、その点に対応するデータとしてディスクに書き込む。これで1点に対する測定が終わるので、次の点に移動して同様な測定を繰り返す。先に与えられた点の数の測定を終了すると、元の位置へ戻り、 W 方向に一ステップ移動して同じ測定を繰り返すということで、

全領域の測定を行なう。この間、ディスプレイ上にはWとUがグラフとして次々と表わされると同時に、現在の測定位置、ディスクの交換時刻などが表示されている。そのため測定そのものは全部自動的に行なわれるが、圧力の調整やディスクの交換などは常に注意を払う必要がある。このような実験のシステムによって、第1表にあげるような条件の下で単独渦輪の運動と、同軸上に前後して放出された二つの渦輪と、平行軸上に並んで併進する渦輪の干渉に関する種々の測定を行なった。

さて、このようにしてディスクに収められたデータは1点毎に時刻毎に速度のUとWがシリアルに並べられたデータであるので、第二段階としてこれを全流れ場についての時刻毎のデータに並べ換えるのであるが、この時にメッシュ毎の速度から渦度を計算して、時刻毎の渦度場のデータとして、再びディスクに収納する。更に第三段階としては、渦輪の進行速度、渦輪の半径、渦核の半径、循環、インパルスなどを各時刻毎に算出することとそのグラフ化、流れ場の渦度分布をディスプレイに時々刻々表示して16mmフィルムに撮影してアニメーションをすることである。

§ 測定結果

○ 単独渦輪と同軸上の渦輪

第4図に単独渦輪のシュリーレン写真とそれに対応する渦度の分布の時間的变化の例を示すが、初期の形成の時を除けば、渦輪は形を変えずに進行している。また第5図に同軸上の二連渦輪の干渉の様子

写真と渦度の分布の例を示す。二つの渦輪において、後の渦輪の誘導速度のために前の渦輪がその径を広げて進行速度が遅くなるのと反対に、前の渦輪の誘導のために後の渦輪はその径を縮めて早くなり、前の渦輪の中心部をくぐり抜けて前に出る。その後、前後を交換した二つの渦輪は同様の追い抜きをするはずであるが、二度目には合体して一つの渦輪になる。この間の測定より算出した単独渦輪と同軸上の二つの渦輪についての種々の量の時間的变化を次の5枚の図に示す。第6図の進行速度 U は一つの渦輪ではほぼ一定、二つでは合体した後に一定となる。第7図と第8図に渦輪の半径 R と渦核の半径 r を示すが、初期の形成時を除いて大きい変化がないのに対して、第9図、第10図に示す循環 Γ 、インパルス P では時間とともに徐々に減衰しており、特に二つが合体してからの減衰が急激である。

○ 平行軸に沿う二つの渦輪

同時に放出された二つの渦輪はその進行の過程で平行軸の内側の部分の方がより大きい誘導の影響を受けるために互いに内側に傾いて進み、ぶつかり渦糸のつながりかえをして一つのゆがんだ渦輪を作る。さらにこのゆがんだ渦輪の各部分はそれぞれの曲率にしたがって進行し、はじめに外側にあった部分が中心でぶつかって渦糸のつながりかえをすると二つの渦輪になるが、この時には Z 軸のまわりに 90° 回転した方向に並び、この一つの渦輪は元の渦輪の両方の渦糸を併せもった渦輪となっている。第11図に二方向から撮影したシュリーレン写真を上下に示し、それに対応する Z 軸上の渦度を右側に $X-Z$ 面、左側に $Y-Z$ 面をそれぞれの時間について第12図に示してある。渦度

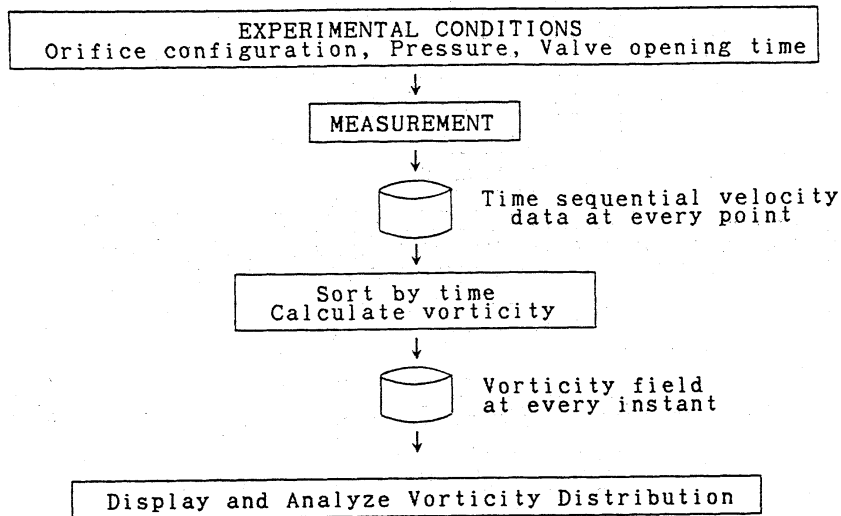
のなかった $Y-Z$ 面で、上昇とともに徐々に渦度が広がっていることがわかる。第13図に循環 Γ の x と y 成分と和の時間変化を示してあるが、総和としてほぼ一定であることに注意したい。

§ おわりに

パソコンを使用して、実験の制御、測定を行なって渦輪における渦度場を決めるシステムを開発した。このシステムが利用は、コンピュータのメモリーや測定時間、データの並べ換えに要する時間、さらには測定される現象の再現性などによって決まるが、少しのプログラムの変更で色々な測定に用いられるものと思う。また一方、時間毎に三次元的な広がりをもって描き出される図の物理的意味について、その必要性とともに考えておかななくてはならないことであろう。

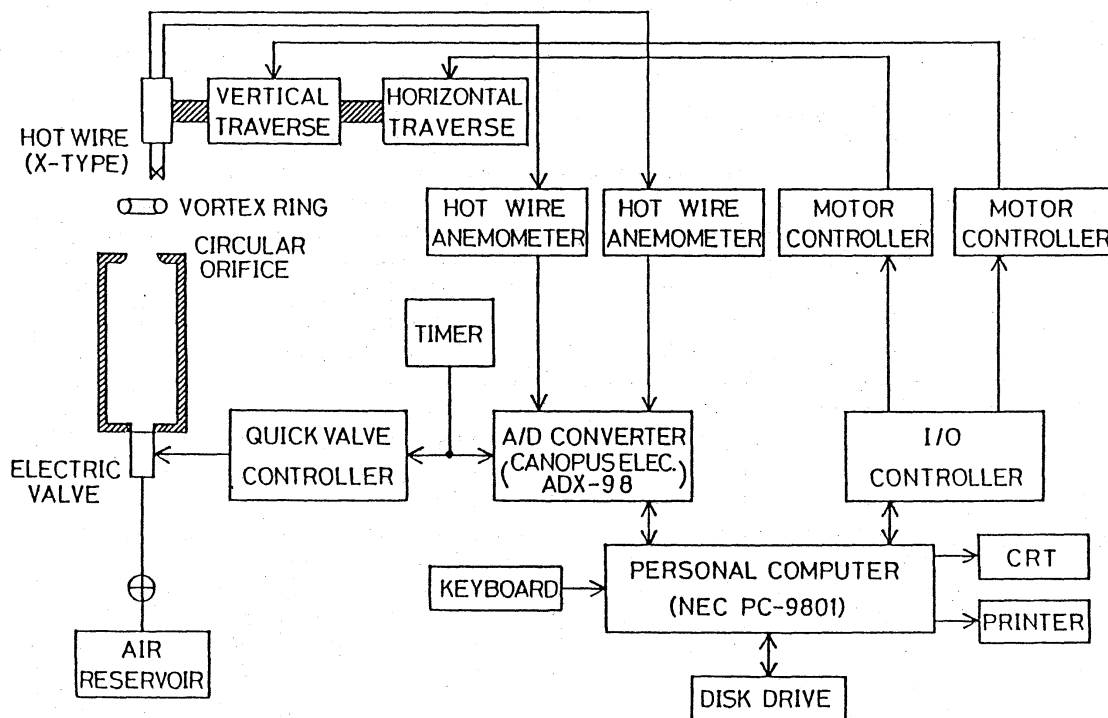
参考文献

- 1) T.Kambe, Y.Oshima : Generation and decay of viscous vortex flow, J.Phys.Soc.Japan, vol.38, (1975) p271.
- 2) Y.Oshima, T.Kambe, S. Asaka: Interaction of two vortex rings moving along a common axis of symmetry, J.Phys.Soc. Japan, vol.38, (1975) p1159.
- 3) Y.Oshima, S.Asaka: Interaction of two vortex rings along parallel axes in air, J.Phys.Soc.Japan vol.42 (1977) p708.

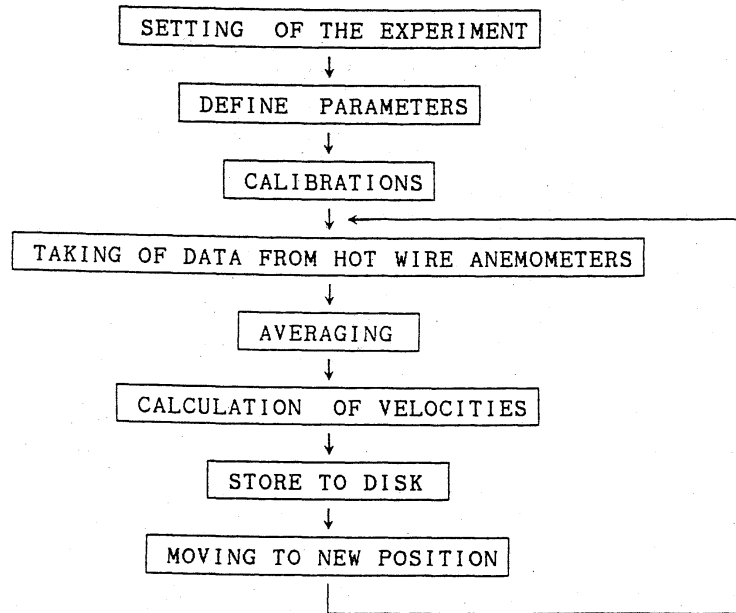


DATA PROCESSING

第1図 実験の概要



第2図 測定装置のブロックダイアグラム



PROCEDURE OF MEASUREMENT

第3図 測定の流れ図

第一表 実験条件

Case	Orifice	Air		Measurement			
		pressure (kg/cm2)	duration time(ms)	Time (ms)	Range x(mm) y(mm) z(mm)		
=====							
* Single vortex ring -----							
1	20mmD	0.3	2	38.2	0- 20	0	2- 80 /1
2	20mmD	0.35	2	38.2	0- 20	0	2- 80 /1
3	20mmD	0.35	2	76.2	0- 20	0	2-256 /2

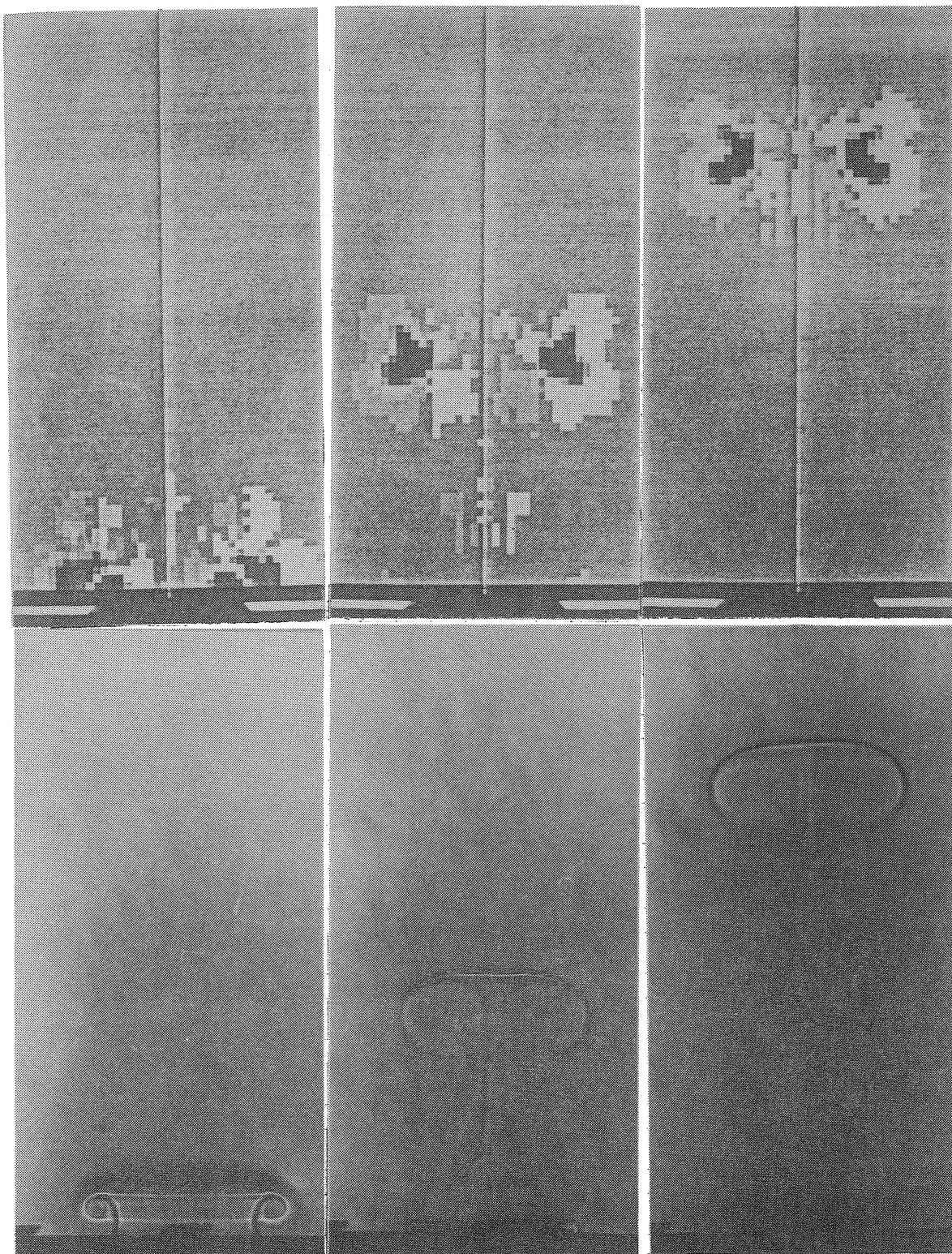
* Two co-axial vortex rings -----							
4	20mmD	0.3	5	38.2	0- 26	0	2- 80 /1
5	20mmD	0.35	5	38.2	0- 26	0	2- 80 /1
6	20mmD	0.35	5	38.2	0- 26	0	2- 80 /1
7	20mmD	0.35	4	76.4	0- 26	0	2-256 /2

* Two parallel-axial vortex rings -----							
8	Two 13mmD 8mm apart	0.275	2	38.2	0- 33	0	2- 80 /1
					0	0- 33	2- 80 /1
9	Two 13mmD 8mm apart	0.3	2	38.2	0- 33	0	2- 80 /1
					0	0- 33	2- 80 /1
10	Two 13mmD 8mm apart	0.35	2	38.2	0- 33	0	2- 80 /1

* Two parallel-axial vortex rings (3-D measurement) -----							
11	Two 13mmD 8mm apart	0.3	2	38.2	0- 24	0- 24	2- 80 /1.6

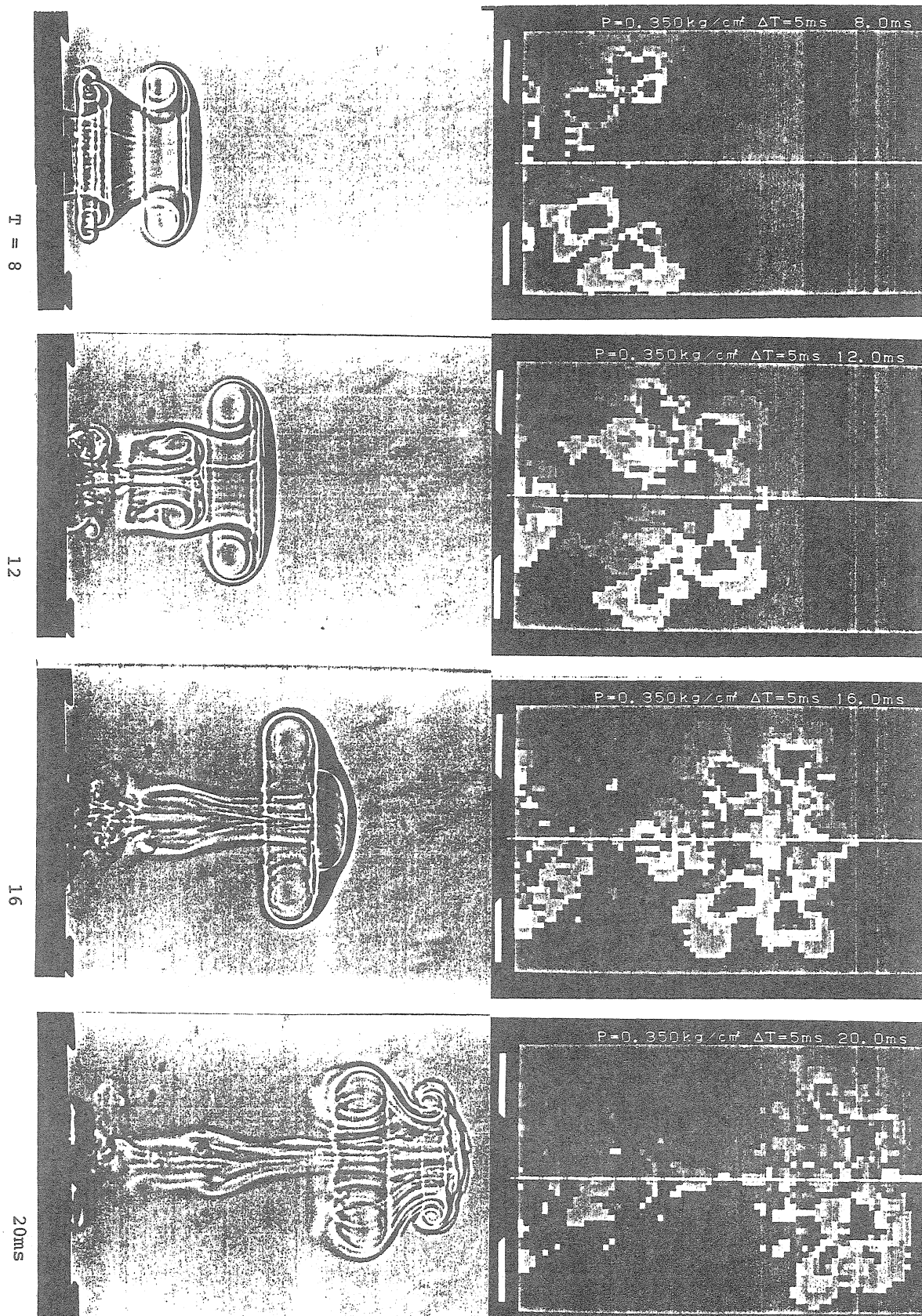
+ Data are sampled every 200 micro second.

+ Measurement data are ensemble averaged 4 times at each point.

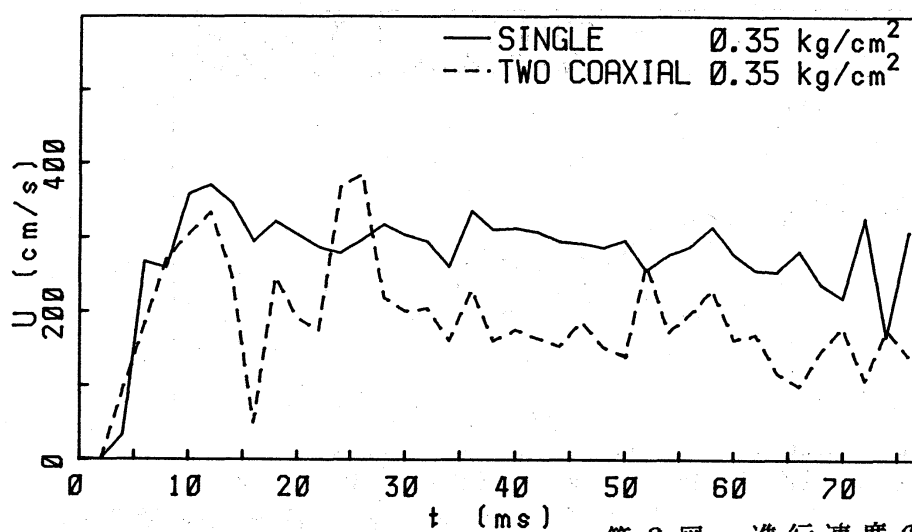


第4図 単独渦輪の渦度分布（上）とシュリーレン写真（下）

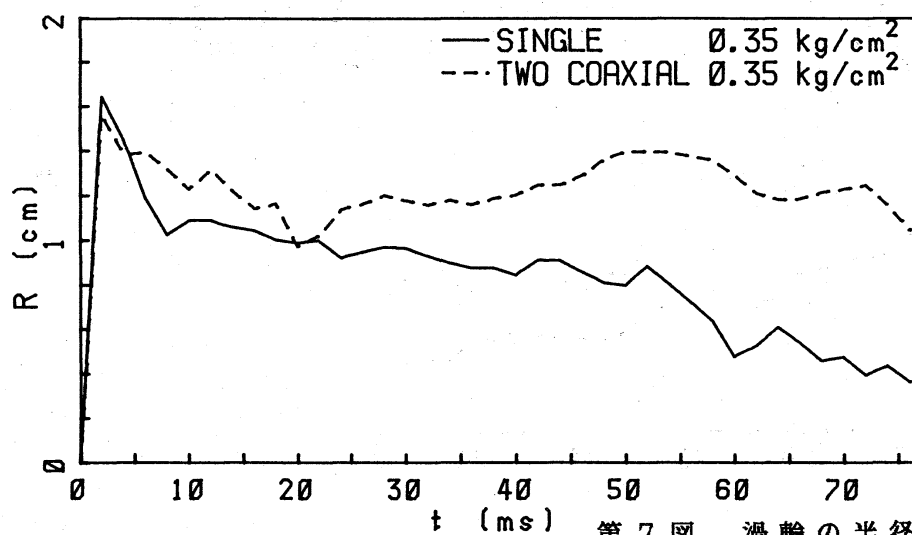
$P=0.35\text{kg/cm}^2$ $\Delta T=2\text{ms}$ $t=4, 12, 20\text{ ms}$



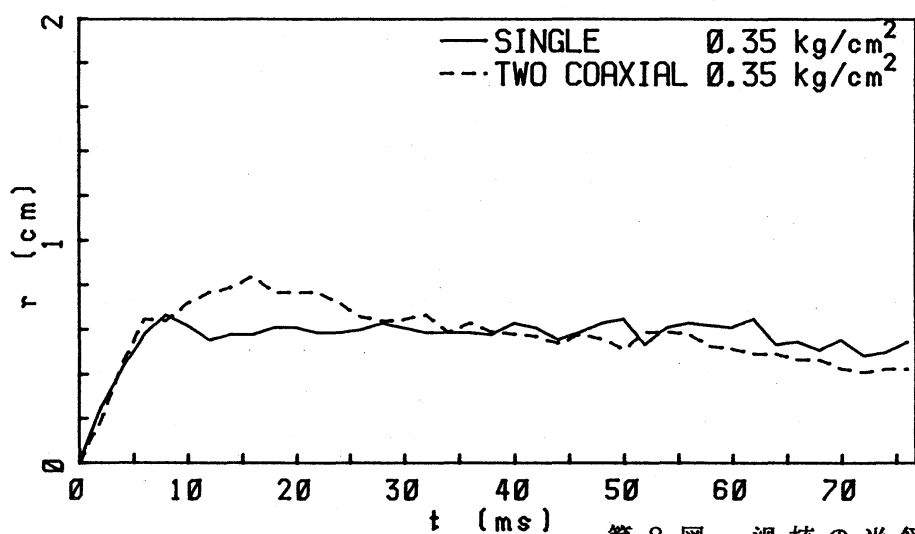
第5図 同軸渦輪の干渉過程の渦度分布とシュリーレン写真



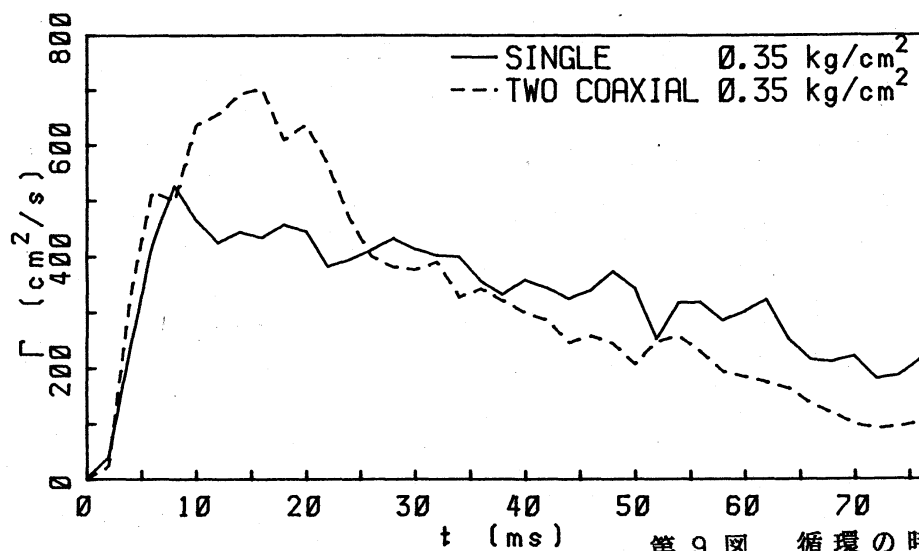
第6図 進行速度の時間変化



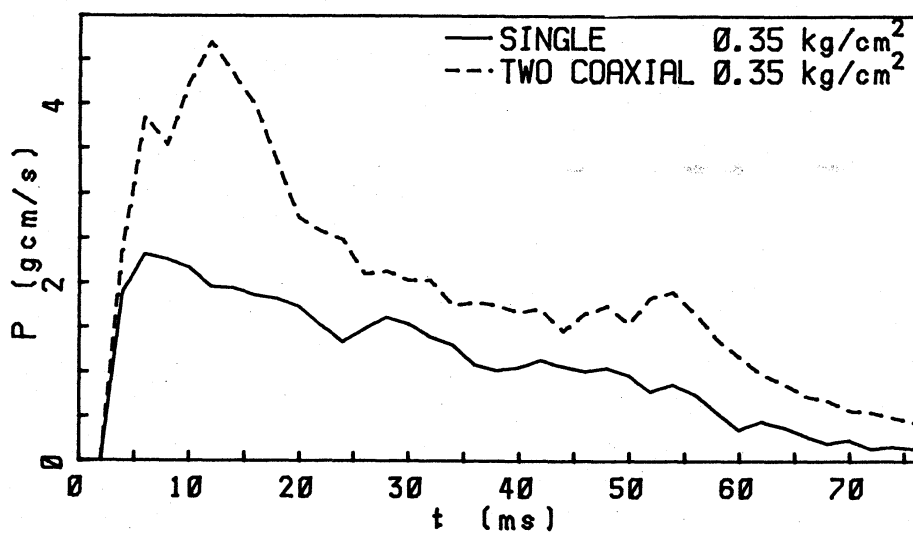
第7図 渦輪の半径の時間変化



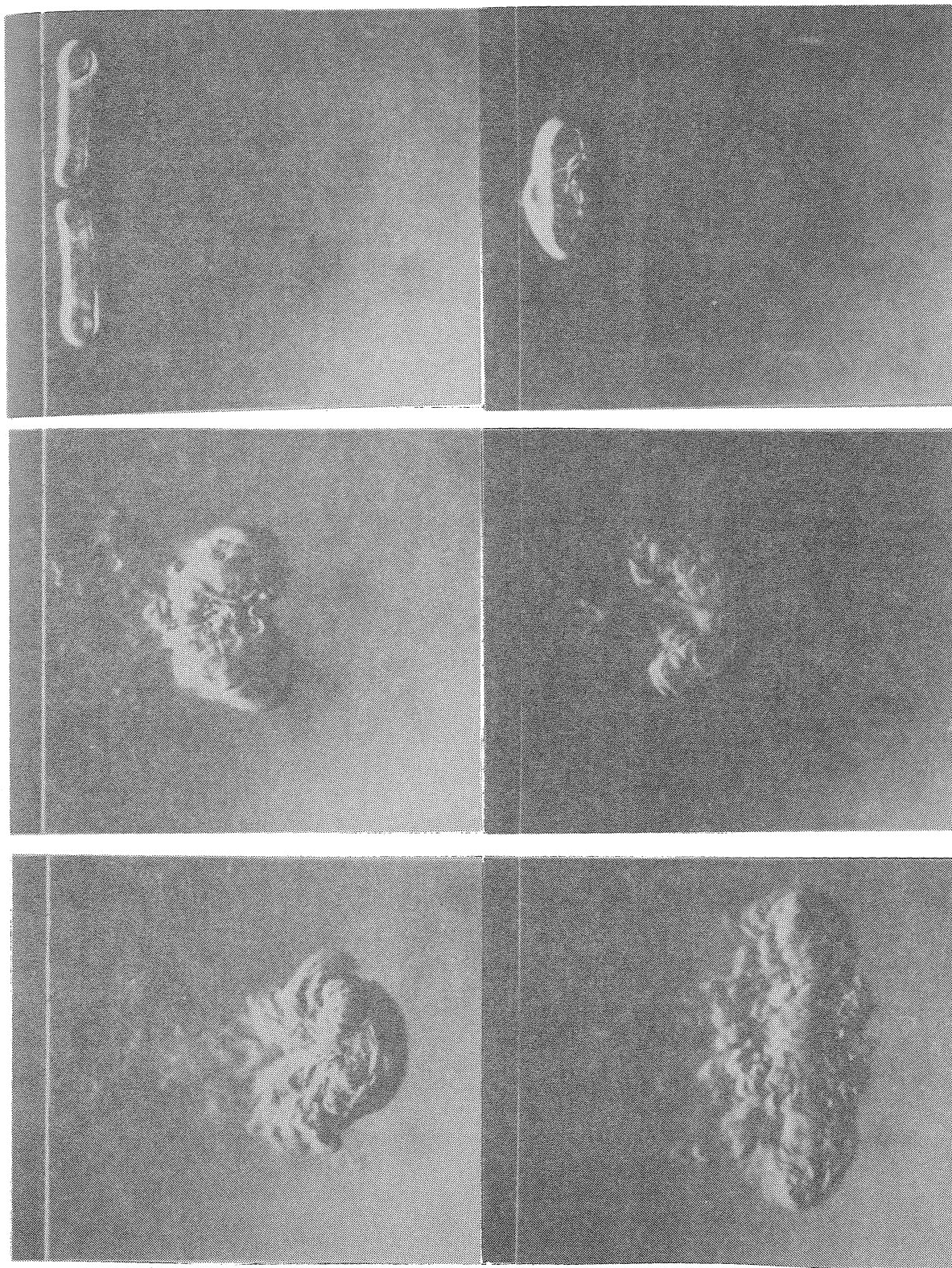
第8図 渦核の半径の時間変化



第9図 循環の時間変化

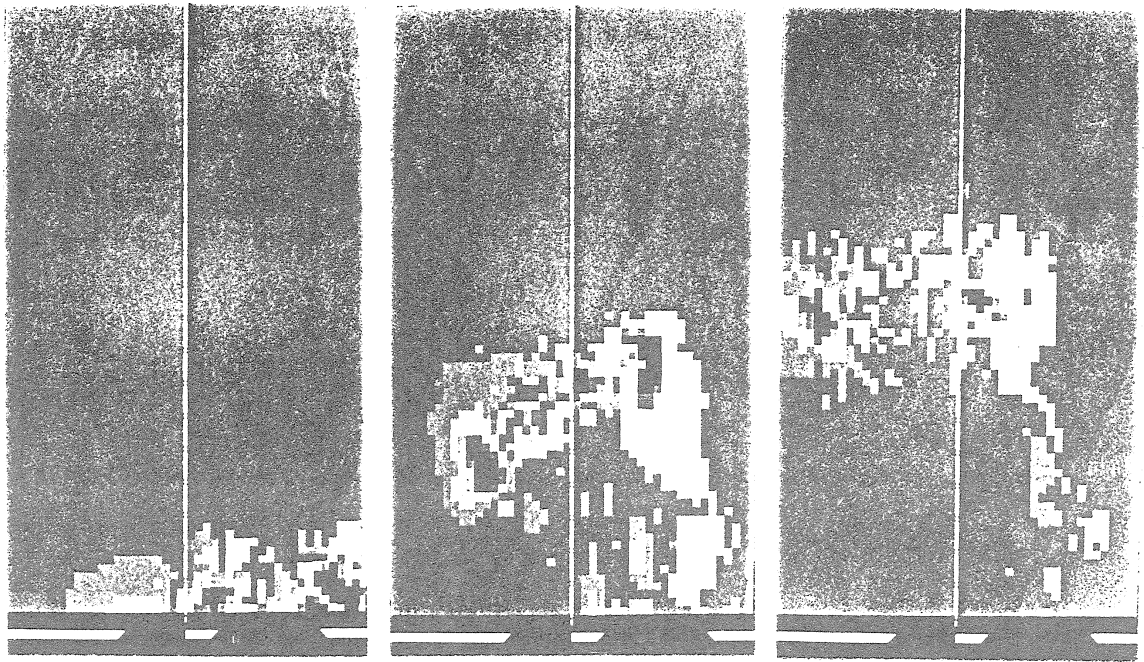


第10図 インパルスの時間変化

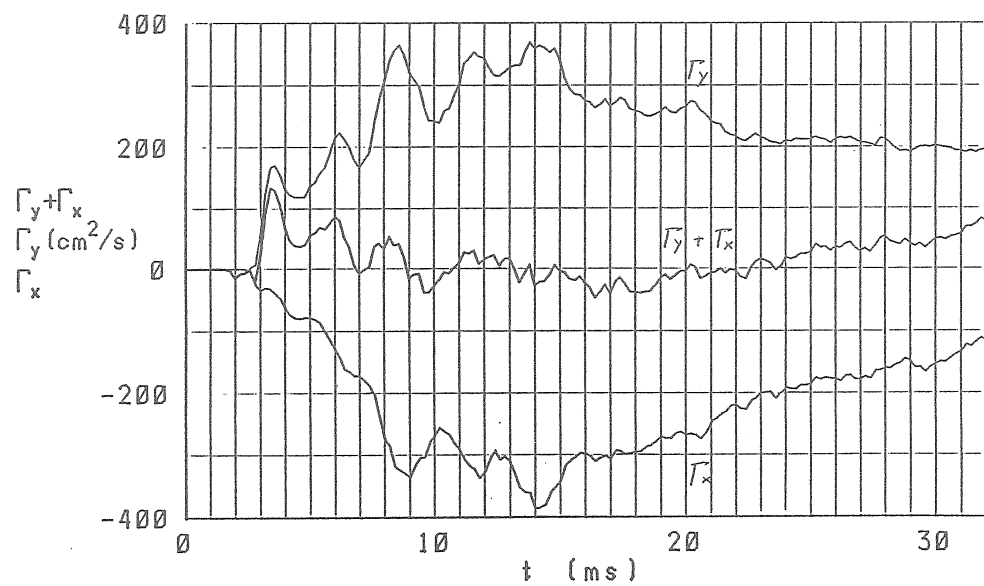


第 1 1 図 平行軸に沿う二つの渦輪の干渉のシュリーレン写真

(上) Y-Z 面、(下) X-Z 面 $P=0.35\text{kg/cm}^2$ $\Delta T=2\text{ms}$ $t=4, 12, 20\text{ms}$



第 1 2 図 第 1 1 図に対応する渦度分布



第 1 3 図 平行軸に沿う二つの渦輪の干渉における
循環の x 、 y 成分とその和の時間変化