

渦輪・渦対と物体との干渉 (煙による流れの可視化)

名工大生産システム 山田 日出夫
(YAMADA HIDEO)

§1. はじめに

私の実験室で最近得られた実験結果から次の二つの話題を提供する。

(1) 渦対と拘束平板との干渉

(2) 細い円柱を通過する渦輪

これらの実験では、いずれも渦が物体表面に接近する際に起る境界層剥離により2次渦が発生することが見出された。この2次渦が今度は主渦に影響を及ぼす。渦輪・渦対といった要素的渦と物体表面との干渉の結果生じる流れ場は基本的なものであるにもかゝらず予期しないような渦構造を我々の眼前に現わしてくれる。このような主渦と2次渦の干渉に伴う渦運動や渦構造を記述すること、さらにその現れの起源やメカニズムを考察するのがこの講究録の目的である。

§2. 渦対と拘束平板との干渉について

実験的に渦封を発生させようとする、原理的には図1に示すような平行平板間にノズルから流体を噴出させる装置にせざるを得ない。ノズル先端からは境界層を形成していた剪断層が押し出され、その渦度集中により渦封が形成される。平行平板は、これらの渦封の端部を拘束する端板ともいえる。この平行平板近傍の渦封の様子を調べるために流れ場を煙可視化法により観察したところ、2次渦が発生することが見出された⁽¹⁾。その時のノズルのアスペクト比 ($AR = h/d$) は $5/3$ の場合に限定されていた。そこで今回は前回のものにくらべ、 AR が半分の $5/6$ の場合 (即ち、平板による粘性の影響が流れ場全域に顕著に現われると予想される) と2倍の $10/3$ の場合 (その影響が流路の中央部に及ばないと予想される) について実験を行った。その結果見出された2, 3の興味ある実験結果を報告する。

2-1. $AR = 5/6$ で、 $Re = 340$ の場合の渦封の変形の様子

渦封の Re 数は、渦封間隔を代表長さとし、並進速度を代表速度として得られるが、ここでは渦封が十分発達した直後の並進速度を取った。この定義によって求められた値は340であった。図2には、 XZ 平面に平行な断面での渦封の可視化写真の典型例を示す。撮影の照明には約3mm厚の光のシートが用いられた。渦核中心と思われるあたりでは煙が抜け

て円形状に可視化されている。

渦管の3次元の様子を知るために、可視化から得られた渦核断面の位置をXY平面, XZ平面, ならびにYZ平面にプロットした, 図3。XY平面での渦管の変形の様子を見ると, 拘束壁によつて渦管の端部付近が流路での渦核位置^{中央部}にくらべ, 並進した距離が短いことがわかる。時間の経過とともに端部と中央部の距離がますます広がり, 渦管が伸ばされている様子が伺える。

ZX平面に渦核断面の位置をプロットした様子を見る。 $t = 400 \text{ ms}$ の場合に注目すると流路中央部合にある渦対部分は, 渦対間隔 (Z方向の間隔) が狭いことがわかる。これは, 相互誘起速度がその他の部分よりも大きいことを示唆する。その結果, Δ 印 ($Y = 0 \text{ mm}$ の面) と $\square$ 印 ($Y = 12 \text{ mm}$ の面) で示されるように, XZ面に投影された渦管の相互の位置が $t = 800 \text{ ms}$, 1200 ms では急速に遠ざかりはじめることがわかる。

最後にYZ面の様子を見る。渦対が中央部合でくびれX字型に変形している。 $t = 400 \text{ ms}$ では中央部がますますへこんでいる。時間が 1200 , 1600 ms と経過するにつれて, 壁面近くにまで渦管の変形が進む様子が見られる。

2-2. $AR = 10/3$ で $Re = 2800$ の場合

前節で示した $AR = 5/6$ の実験での渦対は、2本の平行で直線状をした渦系で定義される“完全流体の渦対”とは大変かけ離れたものであることは明らかである。しかし、本節で述べる渦対は、もう少し渦対らしさを持つものである。

ところで、粘性の影響を強く受ける実験での渦対の特性は、 AR だけではなく、 Re 数にも相当に依存する。図4に $AR = 10/3$, $Re = 2800$ の場合について示す。 Re 数が前節のものより大きいのは、いわゆる“渦対らしさ”を維持しているのに他ならない。

各座標軸に垂直な面に投影した渦管の様子を見る。 XZ 平面への投影図では、最初ノズル出口端で剥離剪断層の強い巻上りがあり、渦対間隔は広い。しかし、その後急速に一定間隔に近い状況に落ち着くことがわかる。 XY 平面への投影図で見ると、渦管は $t = 40, 80 \text{ ms}$ あたりまではほとんど真直ぐである。 120 ms あたりから変形が少し現れ、 $t = 200 \text{ ms}$ では変形が顕著になる。その後は、煙の乱れと拡散が著じるしく、変形の様子を追跡できなかった。

YZ 平面での様子を見ると、 $Y = 0$ 面（流路の中央面）で渦管がくびれX字型に変形している。これは前の例で見られた渦管の挙動である。しかし、良く観察すると壁面から $Y = 0$ 面まで渦対の間隔は単調に狭まっているのではなく、途中

まではその間隔はいくらも広がり，その後狭まることかわかる。

2-3. 渦対がX字型に変形するメカニズム

長方形ノズルから平行平板間に短時間だけ流体を噴出させ，渦対も発生させる方法では平板の近傍において粘性の影響が，壁からされない。この影響は，発生させた2本の渦管が下流に進むにつれて進行方向に弓なりに変形することである。そして，弓なりに曲げられた渦管の最も曲率の大きい所で渦管の間隔が狭まる現象が可視化により観察された。ここでは，この現象の発生するメカニズムについて考察する。

まず，循環 Γ の曲がった渦系（細い渦管は近似的に渦系とみなせる）を考える，図5(a)。渦系上の点 O がごく近傍の任意の点 $\vec{x}$ に誘起する速度 $U(\vec{x})$ は次の支配方程式⁽²⁾により求まる。

$$U(\vec{x}) = \frac{\Gamma}{2\pi r} (\hat{e} \cos \theta - \hat{n} \sin \theta) + \hat{e} \frac{\Gamma}{4\pi R} \log \frac{R}{\delta} + O\left(\left(\frac{r}{R}\right)^2\right)$$

但し， r ： O と $\vec{x}$ の距離， R ：渦系の曲率半径， $\hat{e}$ ：渦系の接線方向ベクトル， $\hat{n}$ ：主法線ベクトル， $\hat{e}$ ：陪法線ベクトル， θ ： $\vec{x}$ と $\hat{n}$ のなす角， δ ：渦核の半径。この式の第1項は渦系の回転運動に伴う誘起速度を表している。ここで注目するのは第2項の方で，陪法線方向に $1/R$ と $\log(R/\delta)$

に比例した誘起速度が生じることが示されている。この誘起速度も今回の進行方向に弓なりに変形した渦対で考えると、渦度ベクトル $\vec{\omega}$ と曲率中心に向う位置ベクトル $\vec{r}$ の外積 $\vec{\omega} \times \vec{r}$ の方向、即ち、渦対間隔を狭める方向に自己誘起速度が生じる、図5(8)。曲率が最大の所で渦対間隔が最も狭まるのは、自己誘起速度が R より小さい所では主として $1/R$ に比例するためである。

5.3. 細い円柱を通過する渦輪

渦輪に関する流れ場の研究は、噴流中の渦構造という観点からすれば、その基礎的問題としての意義を持つ。筆者は、渦輪が並進する道筋に細い円柱を設置することによって渦輪に攪乱を与えることを試みた。このような問題は、渦運動を研究する上で一つの基本的なものと考えられる。この問題は、また、スモークワイヤ法や水素気泡法で用いられるワイヤを渦管が通過する際にどのような影響も及ぼすかという重要な問題をも含んでいる。さらに、本研究は、後序的な渦が支配的な流れ場を細い形状の bluff body によって制御するという考えをも示唆している。

5-1. 流れ場の特徴の概要

煙可視化法で観察される本実験での流れ場の特徴については、すでに報告してある(3),(4)。ここでは、その概要について

触れるにとどめる。

本実験での装置と流れ場の配置 (arrangement) を図6に示す。直径4 cm の円形オリフィスから短時間だけ空気が噴出し、渦輪が形成される。渦輪の直径は、ほぼ4 cmであり、渦核の直径はスモークワイヤ法で測定したところ、渦輪のその20%弱であった。渦輪は、渦形成直後には31 cm/s の並進速度で運動した。

流れ場の説明のために座標系を定義しておく。オリフィスの中心に原点をとり、渦輪の並進方向にX軸、垂直方向にY軸、それらに垂直にZ軸をとる、図6。

渦輪はオリフィス面から4 cm の所では十分発達することが可視化実験からわかった。そこで細い円柱を $X = 4$ cm の所で、しかも渦輪を2等分するような位置に設置した。

本実験での渦輪が円柱 (直径 0.05 ~ 0.60 cm) を通過する際の典型的な流れ場の様子を図7に示す。円柱の上側と下側の面上からそれぞれ境界層が剥離し、その渦度集中により発生する2次渦により、主渦は影響を受けて変形し、さらにその結果、非円形渦として特徴的な時間的に変形を伴う運動をする。可視化結果から推測された2次渦の代表的な瞬間の渦構造を図8に示す。

3-2. 渦輪の並進運動の様子

流れ場を支配する無次元パラメータは、次元解析によれば、 $Re = UD/\nu$, $\varepsilon_1 = d_1/D$, $\varepsilon_2 = d_2/d_1$, ここで U は渦輪の並進速度 (ただし、円柱がおかれていない時の渦輪形成直後の速度), D は渦輪の直径, d_1 は渦核直径, d_2 は円柱直径である。ところで、本報告で言及する“細い”円柱とは、物理的には渦核の直径にくらべてその直径は小さく、さらに渦輪を崩壊させない程度のものを意味している。

本実験では、一つの種類の渦輪についてのみ実験も行っているので Re と ε_1 とは固定されていることになる。それゆえ、円柱直径のみを変化させ、渦運動の様子を実験的に調べた。図9は、種々の直径を持った円柱が置かれた場合に対する主渦輪の運動の様子を示す。横軸には、ラウドスピーカにステップ電圧を印加してから経過時間が、また縦軸には並進距離がとられている。円柱が置かれていない場合を基準として、円柱がある場合の影響も考察する。円柱直径が 0.05 , 0.2 mm の場合には、運動の様子で見え限り、その影響は無視できると言ってもよい。しかし、円柱直径が 0.5 mm の場合には、 $t = 0.9$ sec では、その並進距離が円柱なしの場合にくらべ、 15% 程度減っている。円柱直径が 1 mm, 2 mm と増大するにつれて並進距離も減り、減り、減り。注意すべき点は、 0.5 mm から 1 mm の直ぐの変化は大きい、それに比して 1 mm と 2

mmの間の变化は小さいことである。 $d=3\text{ mm}$ に円柱直径が増大すると意外なことに並進距離が1または2 mmの場合よりも大きいことである！この意外な結果をひきおこす原因については、まだ詳しいことはわかっていない。ところで、渦輪の並進速度が層流渦輪では、 τ^{-1} に比例するのに対し、乱流渦輪では $\tau^{-1/5}$ に比例する⁽⁵⁾と述べられている。即ち、渦輪は乱流化した方が速度の減衰が小さい。このことが、前述の意外な結果を説明するヒントを与えているのではないかと思われる。

§4. 結論

渦村・渦輪といった要素的な渦と物体表面との干渉において、2次渦の発生、それに伴う主渦と2次渦との干渉は複雑な渦構造を生み出すことがわかった。また、その結果生じる渦運動には予想しない結果が見出された。

文献：(1) Yamada, H., and Honda, Y., *Phys. of Fluids A*, vol. 1, no. 7, p. 1280, (1989). (2) Batchelor, G. K., *An Introduction to Fluid Mechanics*, Cambridge Press, p. 510, (1977). (3) 山田・内藤, 可視化情報, vol. 10, Suppl, No. 2, p. 175, (1990). (4) 山田・内藤, 第22回乱流とエネギウム講演論文集, p. 39, (1990). (5) Lugt, H. J., *Vortex Flow in Nature and Technology*, John Wiley & Sons, p. 122, (1983).

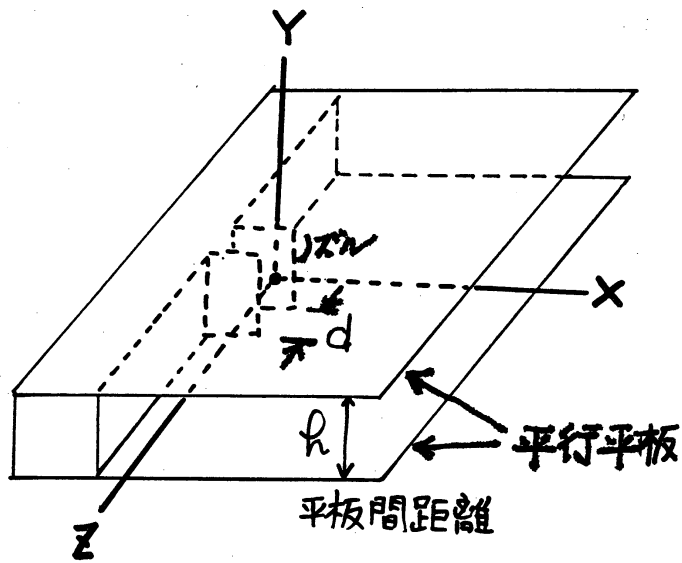


図1. 実験装置

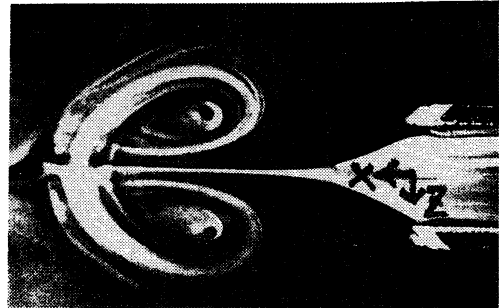
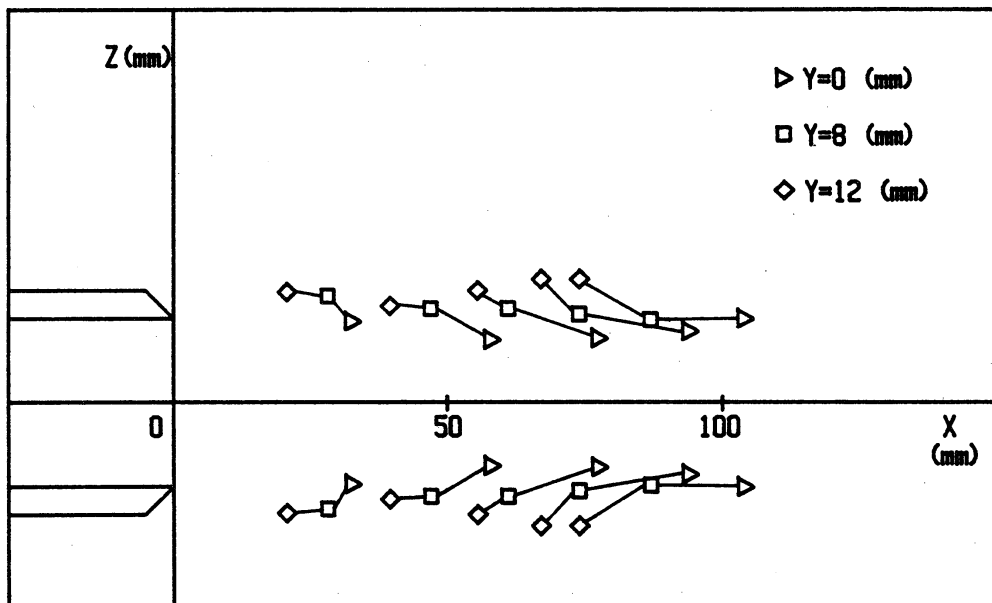
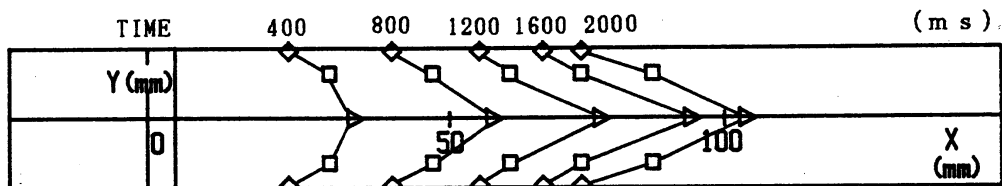


図2. XZ面での渦対の可視化写真



(a) X-Z面への投影



(b) X-Y面への投影

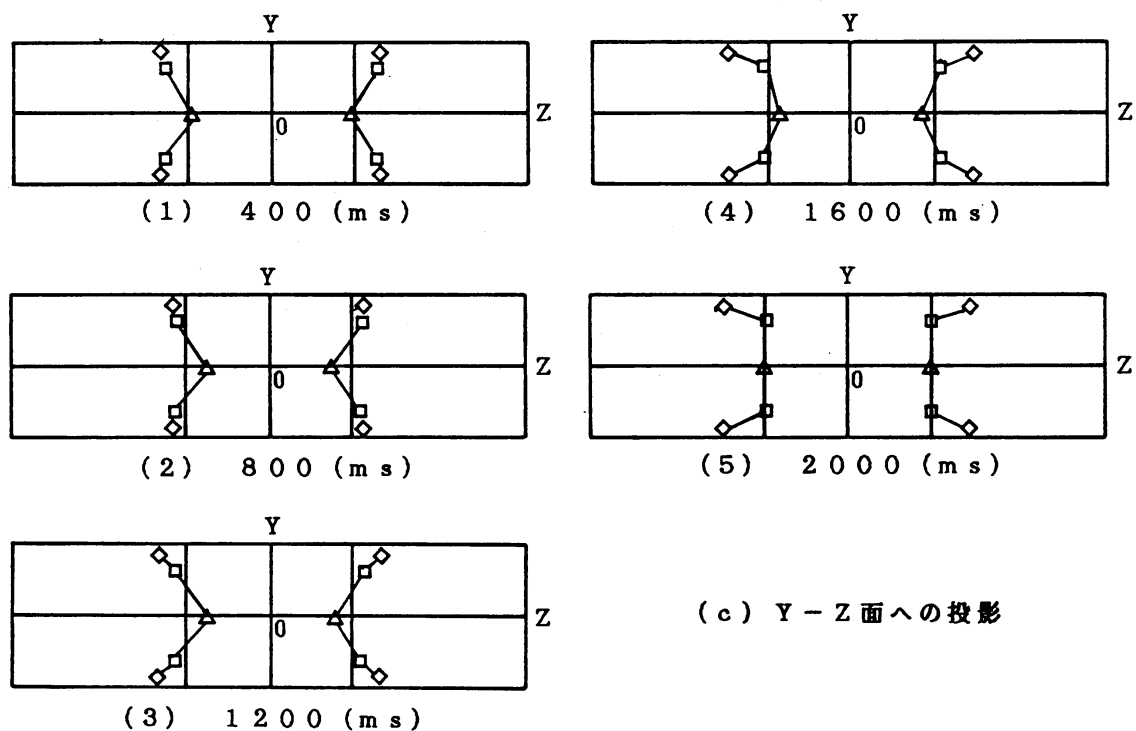
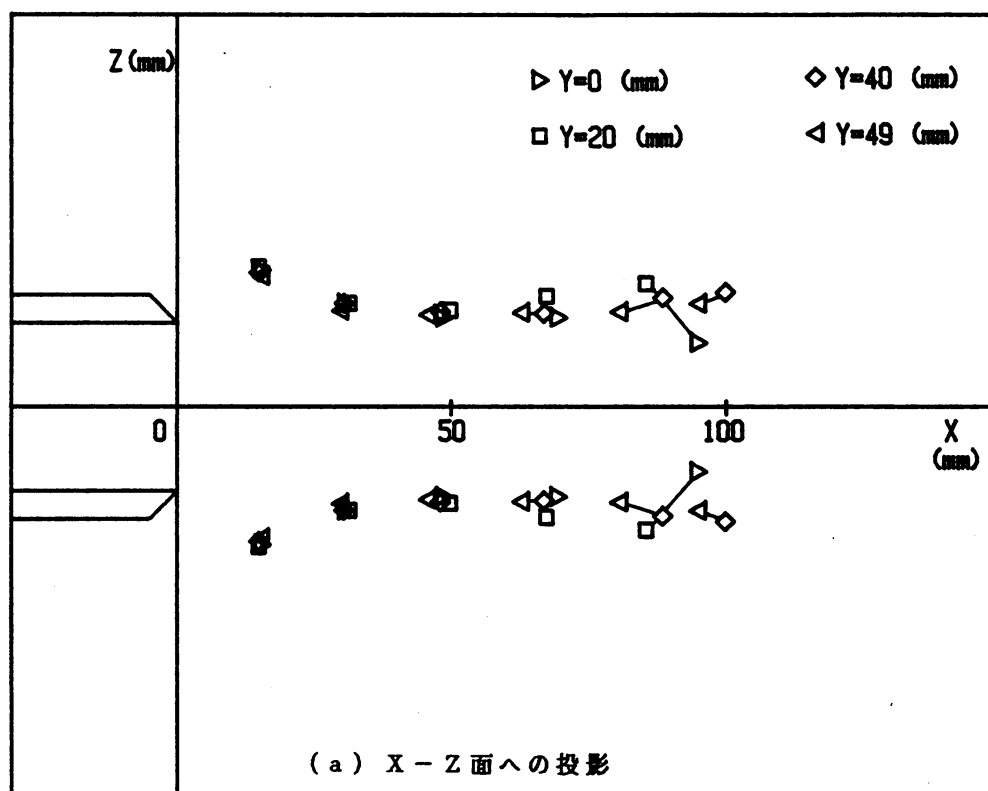
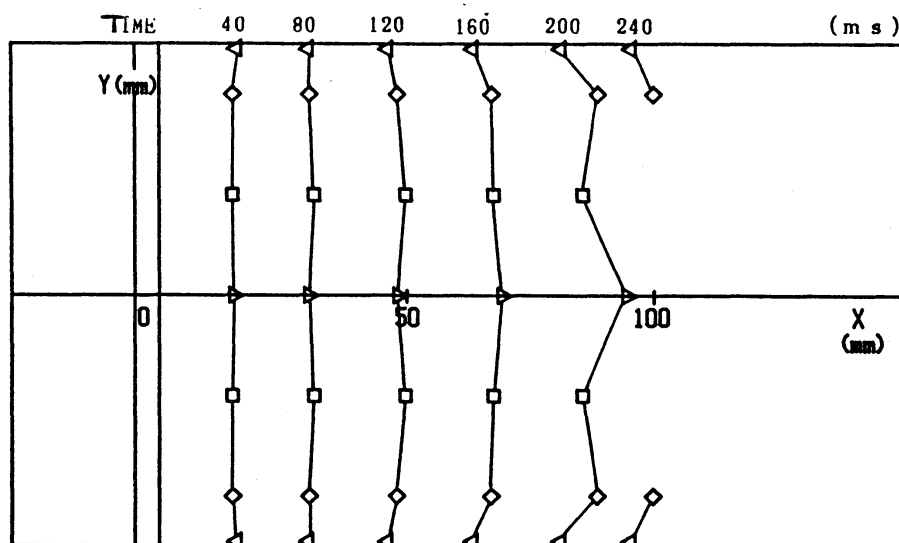
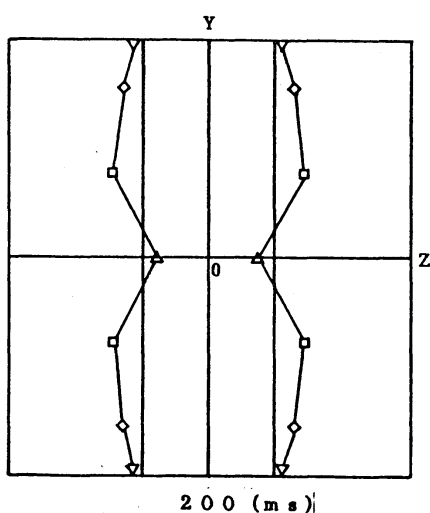


図3. 渦対を構成する渦管の様子. $Re = 340$
 $AR = 5/6$





(b) X-Y面への投影



(c) Y-Z面への投影

図4. 渦対と構成する渦管の様子
 $Re=2800$, $AR=10/3$

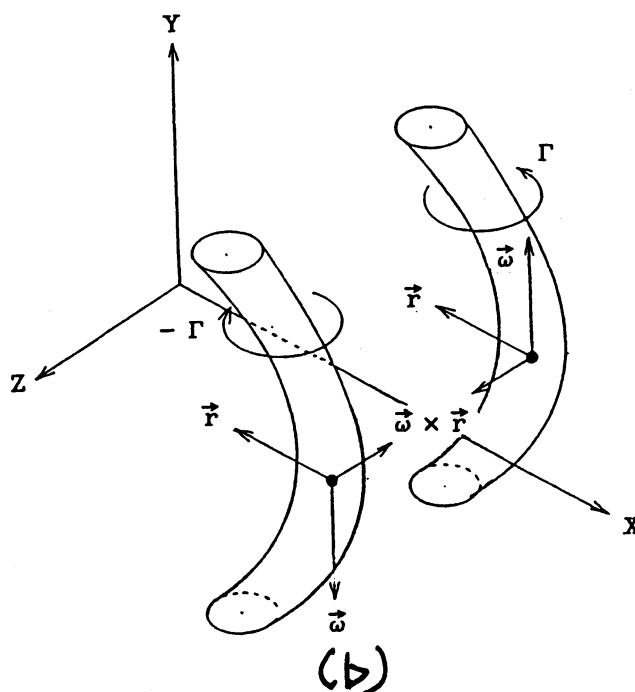
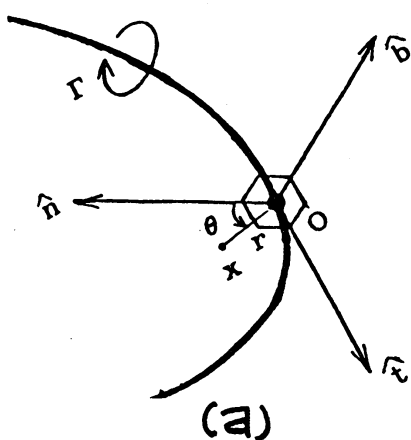


図5. 渦管がX字型に変形するメカニズムの説明

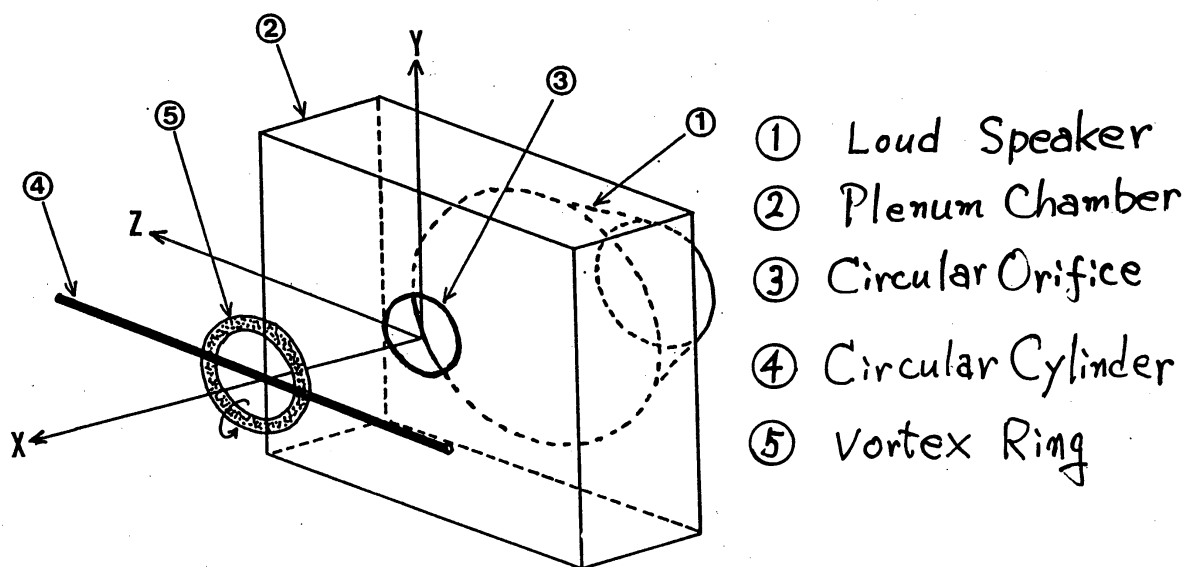


図6 実験装置

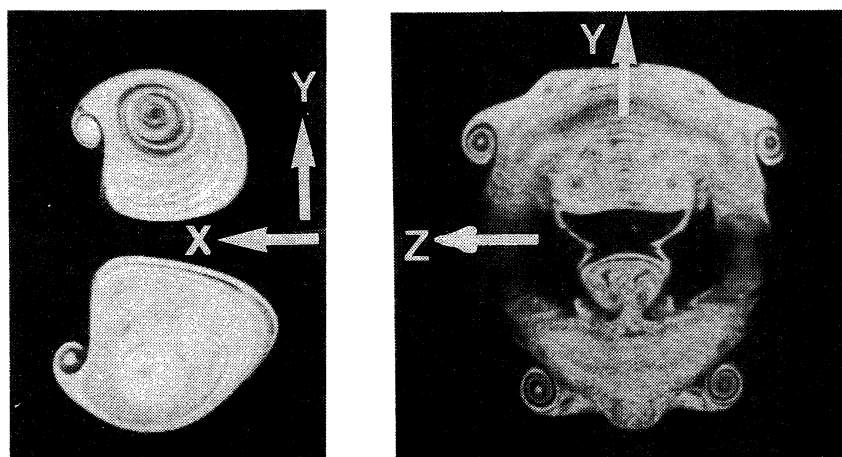


図7. 円柱通過後の渦輪の様子

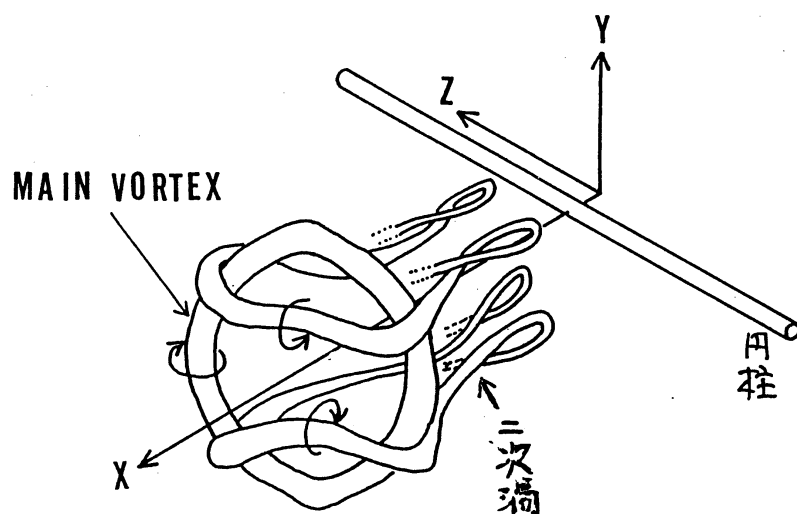


図8. 推測された
2次渦の渦構造

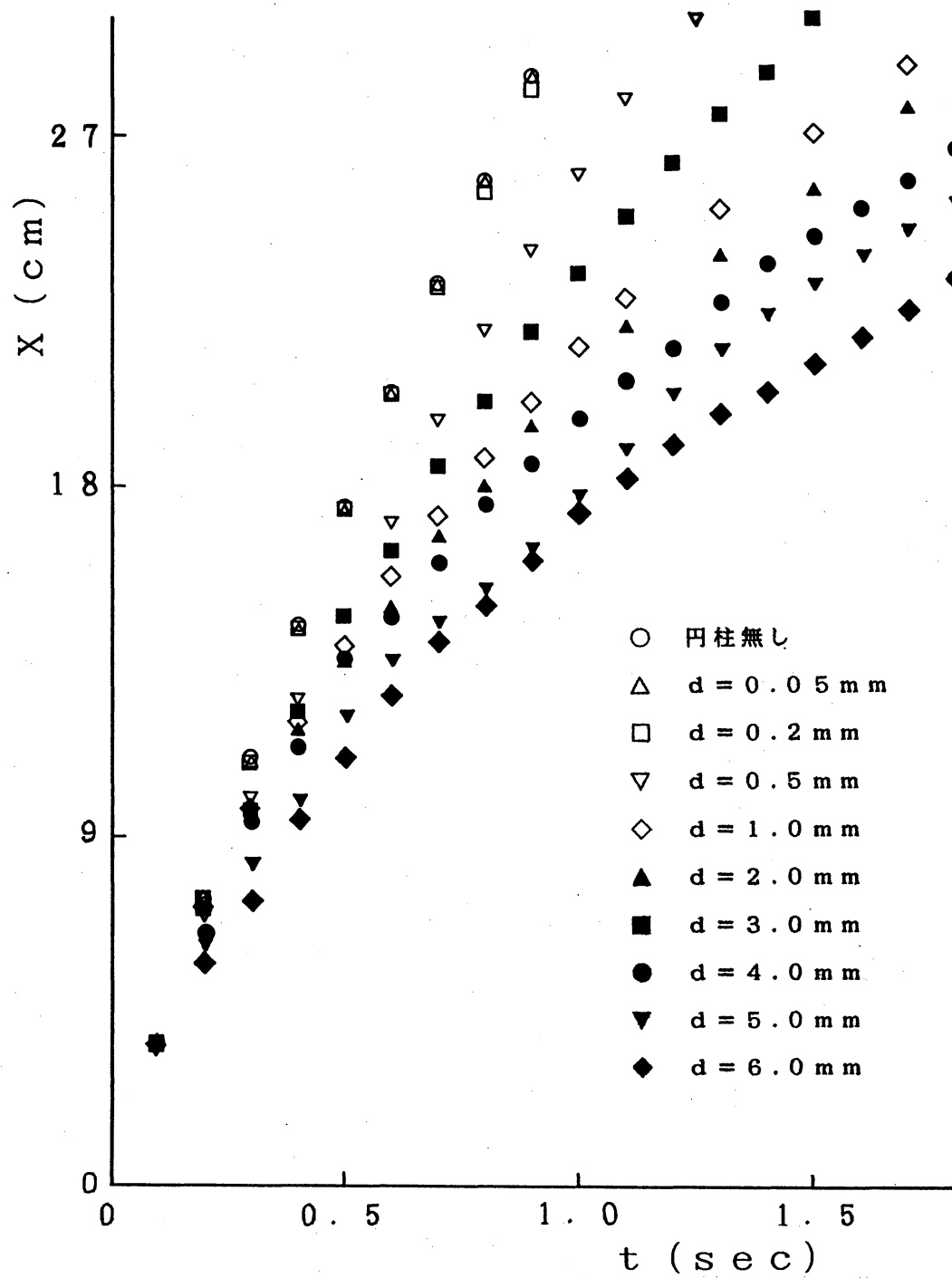


図9. 円柱通過後の渦輪の並進運動の様子