

## No.10

## 渦輪の変形過程における構造

奥出宗重(名城大・理工)、大蔵信之(愛機製作所)

## Structure of a Vortex Ring in Deformation Process

Muneshige OKUDE\* and Nobuyuki OHKURA\*\*

\* Faculty of Science and Technology, Meijo University, \*\* Aiki Seisakusyo Ltd.,

The structure of a vortex ring in deformation process were investigated by means of smoke visualization technique. The photographs of the flow pattern of a section perpendicular to the axis of a vortex ring were taken continuously with a high-speed video camera. The solid picture of a vortex ring was obtained by constructing these photographs with a computer graphics tool. Just after generating a vortex ring, the solid picture displayed a shape like the doughnut. The circumferential distortion appeared regularly on the surface of a solid picture as the vortex ring travelled downstream and the solid picture grew into the polygon. The distortion of the inner side on the circumferential surface of the solid picture was larger than that of the outer side on the surface. At final stage, i.e., just before collapse of the vortex ring, it seemed that a pair of rings might enclose the vortex core of vortex ring. These pair of rings were not combined with the vortex core. The pair of rings may be constructed of a small pair of vortex ring which are generated due to the centrifugal instability.

Key Words : Vortex ring, Flow Visualization, Centrifugal instability

## 1. まえがき

層流-乱流遷移過程で、渦の変形や崩壊が重要な役割を果たしていることはよく知られている。渦の崩壊過程の調査は、遷移のメカニズムを知る上で重要な手がかりを得ると考えられる。しかし、多くの場合、遷移過程で見られる渦運動は、その発生の直後に、規則的な変形が見られるものの、直ぐ複雑化するので、それを直接取り扱うのはかなり困難である。

内藤ら<sup>1)</sup>は、渦輪の変形過程を調査している。これを見ると、比較的簡単な装置で、渦輪を安定して発生させ、再現性もよいようである。また、渦輪は、発生から崩壊に至る過程で興味深い変化を示す。すなわち、渦輪は、発生直後、円形であるが、時間経過と共に、その周方向に波状変形が現れ、それが増幅して、形が花びら状になった直後崩壊する。

Widnall ら<sup>2)</sup>は、渦輪全体の流れ模様を可視化し、周方向の波の数とその増幅率を求め、理論解析結果と比較している。また、内藤らは、渦輪軸に垂直な断面の流れ模様を可視化し、その波の数が、時間経過に伴って減少することを示した。渦輪の外見的な時間経過に対する変化については分かっているものの、その変化の過程の渦輪の内部構造を明らかにしたものはないように思う。

本研究は、流れの可視化技術を用い、渦輪の変形過程の渦の内部構造を観察した結果を報告する。

## 2. 実験装置および方法

渦輪は、オリフィス(直径  $d = 50 \text{ mm}$ )とスピーカとの間に線香煙を溜め、オリフィスから空気を上方に押し出し可視化された。渦輪は、オリフィスから所定の高さ  $h$  を通過するとき、渦輪軸に垂直に照射した、幅  $2 \text{ mm}$  のスリット光で可視化された。渦輪断面の流れ模様は、その上方に置かれたビデオカメラで、毎秒 120 コマで撮影された。撮影は、渦輪が円形を保つ高さの位置から崩壊する直前の位置までの数カ所で行われた。渦輪がスリット光を通過する間に収録された一連の画像数は、渦輪に微小変形が現れる範囲で約 15 画数、崩壊直前の位置で約 30 画数であった。これらの一連のビデオ画像を計算機に取り込んだ後、三次元画像処理ソフトを用い、渦輪の軸方向に繋ぎ、渦輪の立体画像が得られた。

## 3. 実験結果および考察

## 3. 1 渦輪の進行に伴う変形の様子

Fig.1 に、 $Re = Vd/\nu = 1100$  ( $V$ : 渦輪の進行速度) に対する、オリフィスからの高さ  $h = 370$ 、 $650$  および  $750 \text{ mm}$  の位置の渦輪の立体画像を示す。画像に現れた表面は、渦輪の流れ模様を撮影したビデオ画像の明暗の敷居値に相当する。言い

換えると、渦輪に導入された煙の等濃度面に相当する。この図の場合、煙の等濃度面として、渦輪外周近傍の濃度の低い値が選ばれているので、この立体画像は、渦輪のほぼ全体の輪郭を示す。渦輪は、下方から上方に、やや手前に向かって進行していて、その様子を渦輪軸に対して手前 30 deg の方向から観察している。

$h = 370 \text{ mm}$  (Fig.1(a)) の場合、渦輪は、ケーキのドーナツに似た形をしている。渦輪表面の内周および外周を見ると、何れもほぼ円形であって、波状変形は現れていない。ドーナツを取り巻く部分的な皺は、煙の濃淡の斑によって現れた。図を省略しているが、この様な画像は、 $h \leq 400 \text{ mm}$  の範囲で現れる。

渦輪の進行した  $h = 650 \text{ mm}$  (Fig.1(b)) の場合、図から分かるように、渦輪は、6 角形に変形している。その変形は、外周部より内周部の方が大きく現れている。図を省略しているが、内部の渦核を見ると、その形は、表面と同様に 6 角形であったが、表面が凸の部分で、渦核が凹を示し、その変化が表面と逆であった。このような変形は、 $h = 450 \text{ mm}$  付近から始まり、 $h = 540 \text{ mm}$  付近で 8 角形、 $h = 575 \text{ mm}$  付近で 7 角形に変形した後、 $h = 650 \text{ mm}$  付近で図に示す 6 角形へと変形が進む。内藤らの実験で現れた不安定波の波の減少が立体画像の輪郭に現れた。

さらに、渦輪が進行した  $h = 700 \text{ mm}$  (Fig.1(c)) の場合、図から分かるように、 $h = 650 \text{ mm}$  (Fig.1(b)) の場合と比較して、渦輪はかなり大きく変形している。しかし、渦輪周方向に、依然明確な規則性が見られる。その形の特徴として、図中の ↓ ↓ 印で示す一対の環状の節が渦輪の周方向に 6 つ規則的に並んでいる。Fig.1 (a)、(b) および (c) は、同一の渦輪の変化を示したものではないが、 $h = 700 \text{ mm}$  の環状の部分は、 $h = 650 \text{ mm}$  の渦輪の ↓ ↓ 印で示す部分が発達したものである。 $h = 650 \text{ mm}$  付近から渦輪の変形が急激に進むことが分かる。渦輪は、このすぐ後の  $h = 750 \text{ mm}$  付近で崩壊する。

渦輪は、円形の状態から多少変形が現れた後、急激にその変形が進み、崩壊に至ることが分かる。渦輪の外見的变化については以上の通りであるが、次に、この変形過程の渦輪の内部構造について詳しく調べる。

### 3. 2 渦輪の内部構造

Fig.2 に、Fig.1(c) の立体画像の下方から観察した画像を示す。Fig.1(c) の ↓ ↓ 印が Fig.2 の画像の ↑ ↑ 印に対応する。

立体画像を見ると、↑ ↑ 印の位置に、一対の環が現れている。この一対の環は、↓ 印 A で示す

渦輪の本体を取り巻いているように見える。これに似た環が、渦輪周方向に 6 対規則的に並んでいることが分かる。これら一対の環が渦輪本体を取り巻いているかどうか確かめる。

Fig.3(a) および (b) に、それぞれ、Fig.2 の白線で示す B 断面および C 断面内の画像を示す。

B 断面 (Fig.3(a)) を見ると、渦輪本体を示す渦断面とこれを取り囲む環の断面が観察される。環の切れている部分が見られるが、これは環が切断面に対して多少傾いているためであって、B 断面を少しずつすると他の部分が切れて、この部分がつながる。一方、C 断面 (Fig.3(b)) を見ると、渦輪本体のみの断面が観察され、B 断面のような環は見られない。これらの画像から、渦輪の渦周りに一対の環が現れることが分かる。

この渦輪本体を取り巻く環の構造をさらに詳細に調べる。

Fig.4 に Fig.3(a) の環を含み紙面直角方向に厚みを持たせた切断面を D-D 断面で切って上方から観察した画像を示す。図から分かるように、図中 a に左巻き、b に右巻きの渦が観察される。a と b は、その回転方向から互いに逆の渦度を有する。渦 a と b は、Fig.3 では一つの環のように見えているが、この環は二つの渦で構成されているようである。さらに、この画像を E-E 断面で切断したものを Fig.5 に示す。この断面では、a' と b' に渦管の断面が現れている。a' と b' は、それぞれ Fig.4 の渦 a と b につながっている。渦 a と b は、それぞれ渦 b と a の断面に近づくに従い弱くなることが分かる。

円柱が回転するとき、円柱まわりに遠心力不安定によって一対の渦環が現れる。Fig.6(a) にその模式図を示す。円柱を渦管と見立て、これを波状変形した模式図を Fig.6(b) に示す。この時、一対の渦環の c 部分と d 部分で互いに渦度が逆であるのでうち消し合い弱くなる。結果として、e と f の渦部分が強く残る。これと同じ現象が上記の渦輪の渦環に現れたと考えられる。この結果から、上述の一対の環は、二対の渦環で構成された考えられる。すなわち、Fig.2 に観察される 6 対の渦環は、1 2 対の渦環で構成されていると言える。

### 3. 3 回転円柱まわりの渦環の間隔

回転円柱まわりに現れた遠心力不安定による渦対 (渦環) の間隔  $p/d$  ( $p$ : 渦環の間隔、 $d$ : 円柱直径) を回転レイノルズ数  $Rer (= \Gamma/\pi \nu$ 、 $\Gamma$ : 循環値、 $\nu$ : 動粘度) に対してプロットしたものを Fig.7 に示す。Chen ら<sup>3)</sup> および Liu<sup>4)</sup> の結果を同時に示す。

渦環の間隔は、 $Rer$  数が増加するとき、対数グラフ上を直線的に減少することが分かる。

渦輪が Fig.2 の変形に至る直前での渦度分布、それから計算した循環値および渦輪の直径が分かっている<sup>5)</sup>。ここで、渦輪の一部を切断してこれを伸ばすとき、渦輪に現れた渦環を遠心力不安定による渦対と見なし、その間隔を Fig.7 に●印 (Vortex ring) でプロットした。

図から分かるように、プロット点は、回転円柱の直線の近くに現れている。この結果および上述の結果から、渦輪に現れる渦環は、渦の回転による遠心力不安定によって現れた可能性がある。すなわち、渦の回転による遠心力不安定が、渦輪の周方向の波の数を決定している可能性がある。

#### 4. まとめ

- 1) 渦輪に現れる波状変形の波が、立体画像に現れた。
- 2) 渦輪の外周が多角形となる時、その渦核も同じ角数の多角形となる。しかし、渦輪の外周と渦核の変形の凹凸は、互いに逆であった。
- 3) 渦輪の崩壊直前で、渦輪の渦核を取り巻く、一对の環が現れ、これが渦輪周方向に規則的に形成される。

- 4) 渦核を取り巻く一对の環は、渦核と結合していない。
- 5) 上記4) の一对の環は、渦の回転による遠心力不安定で現れた二対の渦環で構成されている。
- 6) 上記5) の渦対の間隔は、回転円柱に現れる渦対の間隔と一致する。

#### 参考文献

- 1) 内藤隆 他:日本流体力学会誌「ながれ」,15(1996), pp.401-408.
- 2) S.E.Widnall et al.:Proc.R.Soc.Lond. A.332 (1973), pp.335-353.
- 3) C.F.Chen et al.:Phys.Fluids.,Vol.10(1967), pp.1845-1846.
- 4) D.C.Liu:Ph.D.Thesis, Rutgers University (TR-136-MAE-F)
- 5) 大蔵信之 他:日本流体力学会誌「ながれ」,17 巻別冊(1998), pp.27-28.

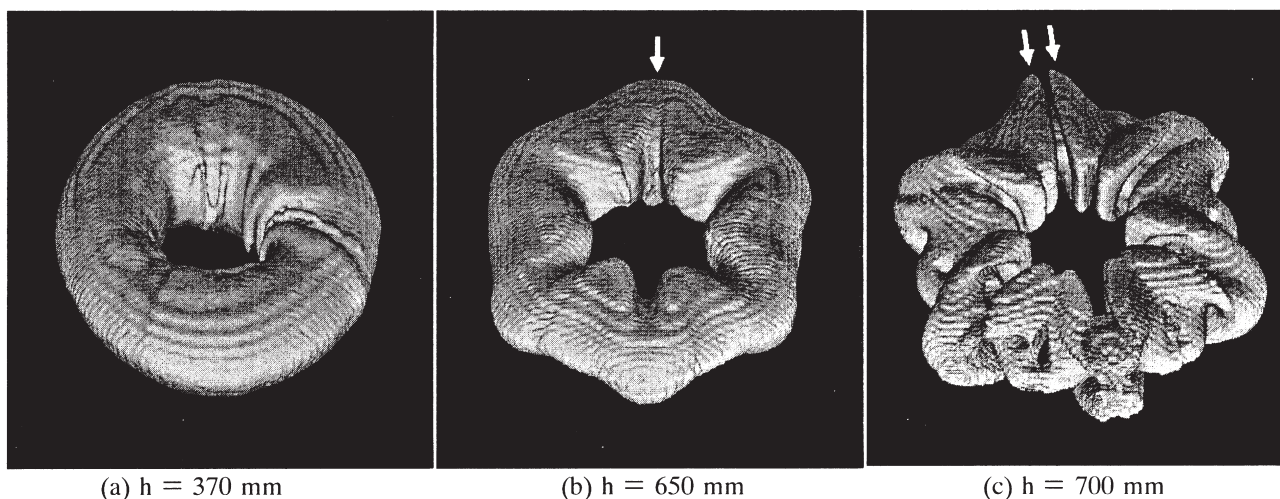


Fig.1 Solid pictures of a vortex ring

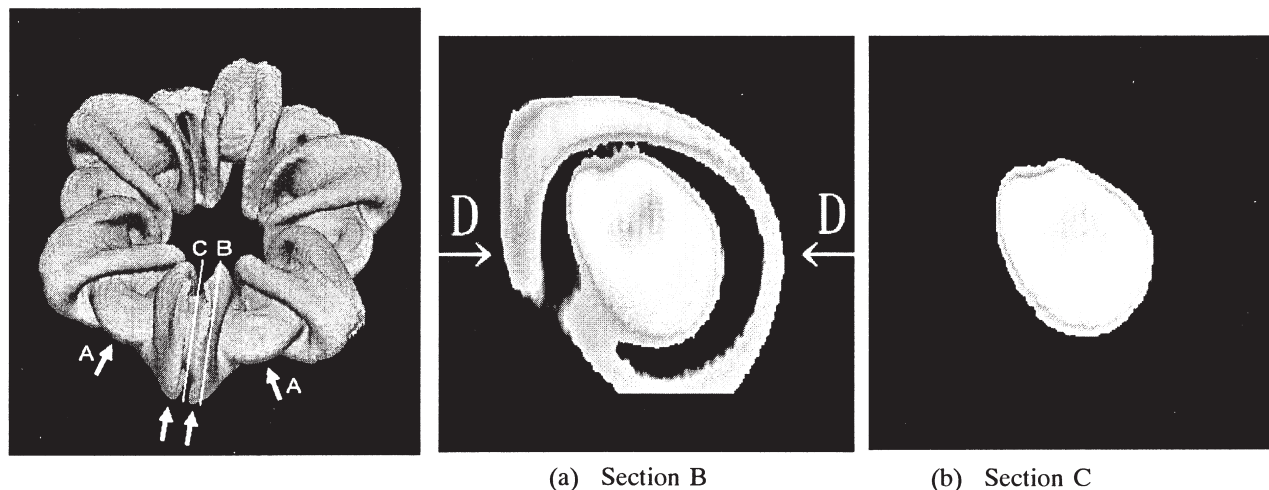


Fig.2 Pair of rings enclosing the vortex ring

Fig.3 Cross sections of a pair of rings

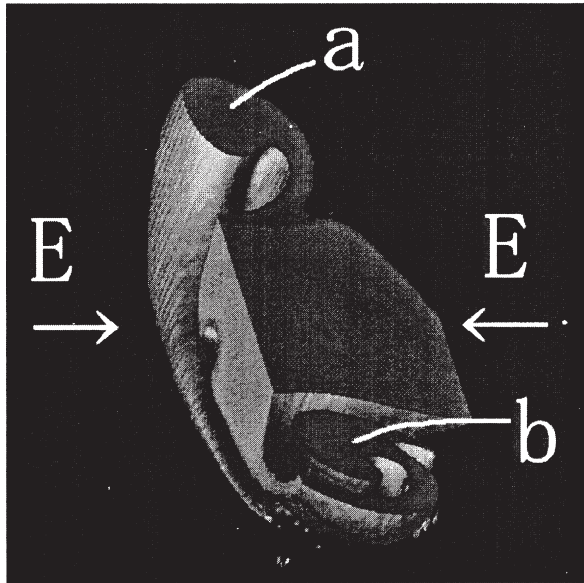


Fig.4 D-D cross section in Fig.3(a)

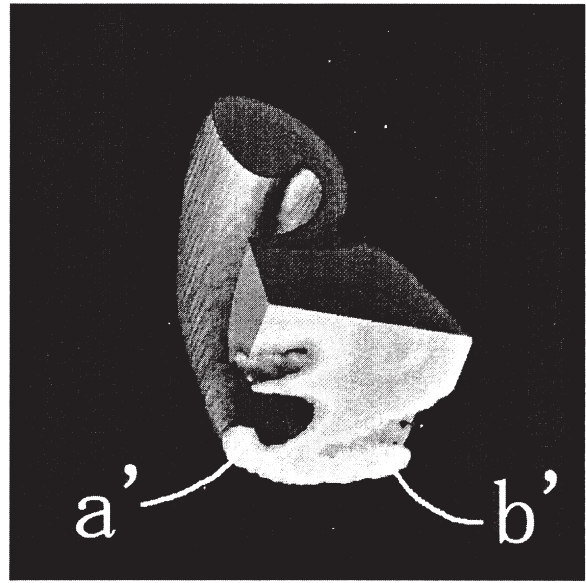
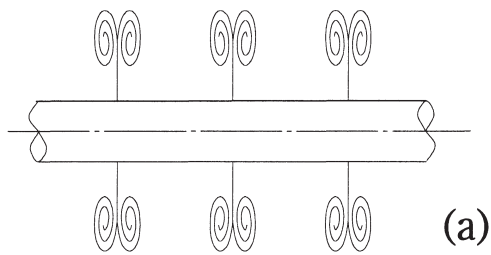
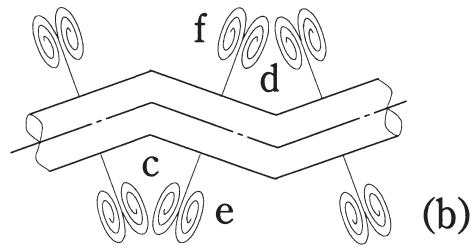


Fig.5 E-E cross section in Fig.4



(a)



(b)

Fig.6 Typical flow around a circular cylinder

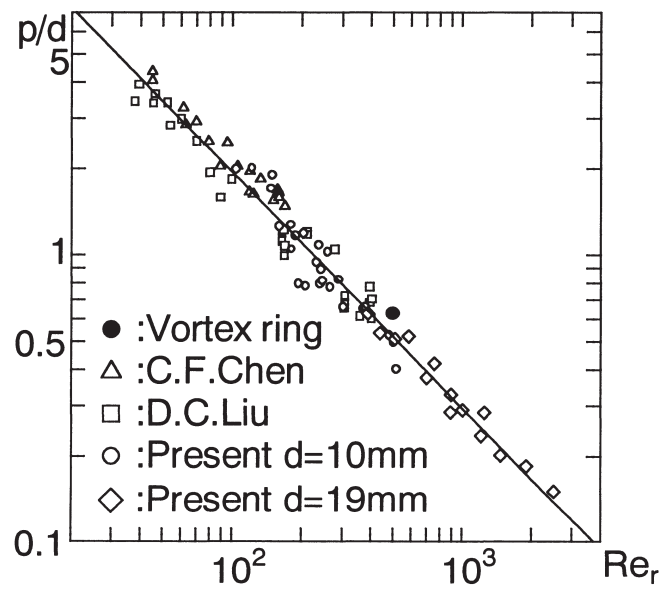


Fig.7 Spacing between neighboring pair of rings