

# 二次元渦対の三次元化に関する可視化実験

## Flow Visualization Measurement for Three Dimensional Deformation of Two Dimensional Vortex Pair

○学 片所 尚人 (北見工大院) 正 松村 昌典 (北見工大)

Naoto KATASYO, Graduate School of Kitami Institute of Technology, 165 Koen-cho, Kitami-shi, Hokkaido  
Masanori MATSUMURA, Kitami Institute of Technology

**Key Word :** Longitudinal Vortex Pair, Contraction Flow, Vortex Breakdown, Loop Vortex, Vortex Ring

### 1. 緒言

デルタ翼から発生する翼端渦対を縮流し、渦伸張させると、渦対の渦度は増加し、二次元性の強い縦渦対となって流下する<sup>(1)</sup>。この渦対がある程度流下すると、その外周にテイラー渦のような渦輪状の三次元渦構造が多数発生し、その後両者は干渉・合体・変形し合いながら流下し、隣り合う縦渦同士が合体し、大きなリング状渦構造に変化する。三次元渦構造の発生には、渦度の増大に伴う遠心力の不安定性が大きく関与していると思われる。

そこで本研究は、縦渦対の渦度を縮流比によって制御し、これが三次元渦構造の発生・成長および渦対の三次元変形過程に与える影響を明らかにする。

### 2. 実験装置及び実験方法

図1に実験装置の概略を示す。実験には、回流型水路を用いた。ポンプで循環する水は、整流部を通った後、縮流部で縮流され、水路試験部に流入する。整流部出口(縮流部入口)の流路断面は幅  $B_0=900\text{mm}$ 、水深  $H_0=600\text{mm}$  であり、長さ  $700\text{mm}$  の縮流部によって流路の幅  $B$  と水深  $H$  は減少し、縮流部出口で  $B=350\text{mm}$ 、 $H=350\text{mm}$  となる。座標原点は縮流部出口、すなわち試験部入口の水路断面中央とする。主流方向を  $x$  軸とし、水路幅方向に  $y$  軸、水面の高さ方向に  $z$  軸とする右手座標系とした。実験には、二次元性の強い縦渦対を発生させるためにデルタ翼を使用した。デルタ翼は縮流部に設置され、その  $x$  方向位置を変えることによって縮流比を変化させた。実験で使用したデルタ翼は頂角が  $45^\circ$ 、高さ  $99.8\text{mm}$ 、厚さ  $3\text{mm}$  の二等辺三角形の亚克力平板で、各辺は厚さの影響を少なくするために  $45$  度のエッジに加工されている。また色素流脈法で翼端渦を可視化するため、色素を水流に放出する直径  $1\text{mm}$  の穴が翼前縁近傍の両辺に  $8$  個ずつ空いている。色素流脈法では、トレーサーとしてウラニンとローダミン B を使用した。色素をデルタ翼の両辺に設けられた穴から放出し、左右の翼端渦の色が異なるようにした。デルタ翼の先端は水深  $100\text{mm}$  の位置にあり、色素の放出にはマイクロチューブポンプを用いた。

試験部に流入する縦渦の渦度は、水路縮流部に設置したデルタ翼の  $x$  方向位置を変化させることによって制御する。本研究ではデルタ翼設置位置における縮流部断面積  $S$  と試験部断面積  $S_0$  の比  $S/S_0$  を縮流比  $r$  と定義し、 $r=1, 2, 3, 4$  となる  $4$  つの位置にデルタ翼を設置し、それぞれの設置条件の下で縦渦の中心角速度  $\omega$ 、渦核直径  $d$ 、三次元変形の発生頻度を測定した。次に角速度  $\omega$  と渦核直径  $d$  の測定法について図2を用いて説明する。図2はデルタ翼から放出した色素による流脈と、可視化断面内に水深方向に設置

したタングステン線 ( $\phi 50\mu\text{m}$ ) から発生した水素気泡を同時に可視化した写真である。この可視化写真は色素によって縦渦中心の位置を確認し、これがタングステン線上にあるときに瞬間的に水素気泡を発生させ、その  $t$  秒後に撮影したものである。従って写真上の気泡の位置は、 $t$  秒間の流体の移動距離を表しているので、気泡によって作られるラインは、渦内部の速度分布を示している。ここで、渦中心における気泡ラインの接線の傾きから、渦中心の角速度  $\omega$  を算出することができる。また、 $d$  は最大周速度を得る位置の水深方向距離と定義した。 $d$  は渦核直径に相当すると考えられる。

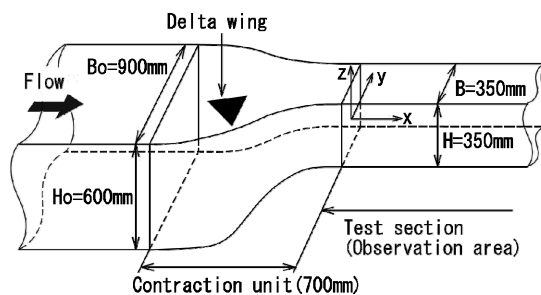


Fig.1 Experimental apparatus

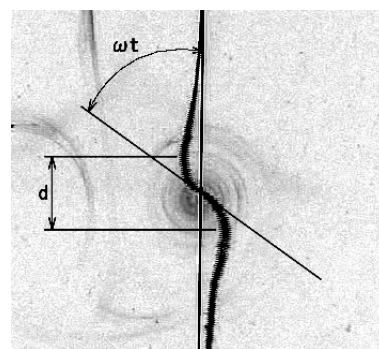


Fig.2 Definition of  $\omega$  and  $d$

縮流部に流入した二次元的縦渦対は、下流で様々な現象を引き起こす。その現象の詳細は縦渦の中心角速度  $\omega$  の大きさによって異なるが、基本的には次のプロセスを経る。まず、最初に二次元的縦渦の周りにテイラー渦のような渦輪状の渦が多数出現し、縦渦が三次元的に変形し始め、渦輪の出現した位置で、縦渦対がくびれるようにお互い接近する。その後縦渦は、くびれた位置で隣り合う縦渦とつながり換わるように分裂し、つながり変わった縦渦同士は馬蹄状のアーチ渦あるいは渦輪状のループ渦となって流下する

場合と、くびれた位置で縦渦が分裂した後、その付近で複雑に乱れた状態が続き、隣り合う縦渦がつなぎ換わることなく流下する場合がある。本研究ではくびれが起こり始める (constriction) 位置の頻度、および分裂後に縦渦がつなぎ換わり (reconnection)、アーチ渦あるいはループ渦が形成される頻度を求めた。

### 3. 実験結果及び考察

図3に、縦渦の周りに出現したテイラー渦のような渦輪状の渦と縦渦のくびれ状態を示す。また、図4に、渦対の三次元変形過程の一例を示す。図3の渦輪は遠心力の不安定性により発生すると考えられる。渦輪が発生すると図4の①に示すように渦対の三次元変形が起こり、②のように渦輪の発生した部分が次第にくびれ始める。さらに流下すると③のようにくびれた部分から分裂し、その分裂した渦対が④のような大きなループ状の渦構造となる。

図5に各縮流比における渦核の角速度 $\omega$ と渦核直径 $d$ の値を示す。縮流比が大きくなるに従って縦渦対は、縮流の影響を受け $\omega$ は増加し、 $d$ は減少している。

図6に各縮流比毎に渦対の三次元変形過程の発生位置の頻度を示す。縦軸は3分間で検出された回数を示す。なお、 $r=1$ のときは、三次元変形は起こらず縦渦対は二次元性を保ったまま流下したので、結果は省略する。 $r=2$ では、くびれ開始位置は $x=550\text{mm}$ に、分裂位置は $x=850\text{mm}$ 付近にピークがあり、縦渦のつなぎ換えはほとんど起こらない。 $r=3$ では、くびれ開始位置は $x=350\text{mm}$ 、分裂位置は $x=800\text{mm}$ 付近にピークがあり、つなぎ換えは少ない。 $r=4$ では、くびれ開始位置は $300\sim 350\text{mm}$ 、分裂位置は $700\text{mm}$ 付近であり、つなぎ換えは多い。これらのことより、縮流比が大きくなり $\omega$ が増加すると、「くびれ開始」、「分裂」、「つなぎ換え」の頻度も増加し、くびれ開始位置、分裂位置は上流側に移動することがわかる。これは過度が増加することで遠心力が大きくなり、渦輪状の三次元渦構造の発生が早まるからであると考えられる。

### 4. 結言

縦渦は縮流によって渦伸張を受け、過度が増加するとテイラー渦のような渦輪状の三次元渦構造が多数発生する。この三次元渦構造はある程度過度が大きくないと発生しない。また、三次元渦構造が発生すると、その部分がくびれ、分裂し、つなぎ換えが起こり、大きなループ状の渦となることがある。

過度が大きいほどくびれ、分裂、つなぎ換えの発生頻度は増加し、くびれ位置、分裂位置は上流側に移動する。

### 参考文献

- (1) 片所・松村・小林、日本機械学会北海道支部第44回講演会講演概要集、(2005)、pp56-57.

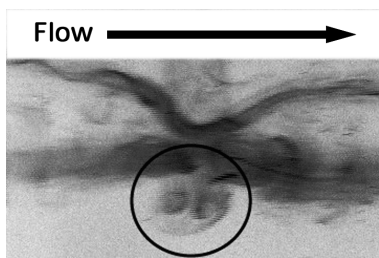


Fig. 3 Vortex ring around longitudinal vortex pair

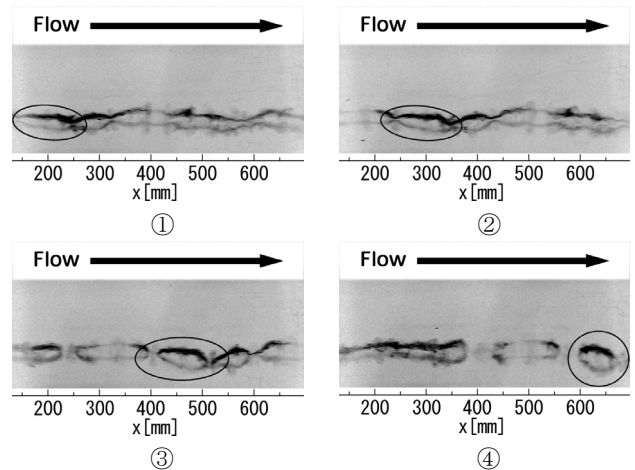


Fig. 4 Three dimensional deformation process of vortex pair

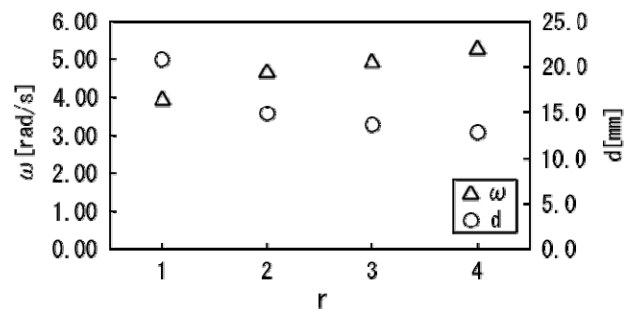


Fig. 5 Angular velocity of vortex center and diameter of vortex core

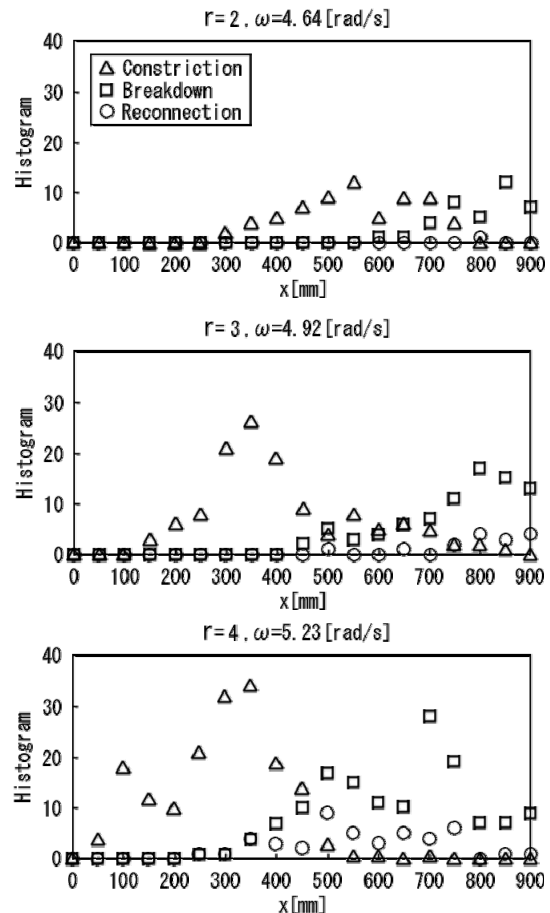


Fig. 6 Histogram of constriction, breakdown and reconnection