

## 3次元正四角柱の後流の流れ場の構造について

河井宏允・奥田泰雄\*・大橋征幹\*\*

\*建築研究所

\*\*国土技術政策総合研究所

### 要 旨

アスペクト比2.7の3次元角柱の後流の流れ場の構造をPIVによる流速測定によって調べた。PIV測定では、画像を剥離剪断層外側の流速変動に同期して抽出することにより、カルマン渦の形成・成長過程における角柱後流の3次元時空間構造を検討した。時間平均流場のみならず角柱の後流でカルマン渦が形成される非定常流場でも、角柱の後流にはアーチ型渦が形成される。アーチ型渦の頂点は、カルマン渦の形成・成長のどの段階でも、角柱のすぐ背後に位置する。したがって、カルマン渦が風下へと移動する時、アーチ型渦の軸は頂部付近で大きく流下方向に引き延ばされる。アーチ型渦を流れが外側から中央に向けて巻き込むように下降する結果、後流には互いに反対方向に回転する流れ方向の渦度の塊が形成される。カルマン渦が後流に放出される時には、流れ方向の渦度もカルマン渦とともに後流へと流される。

**キーワード:** 3次元角柱, PIV, 後流, カルマン渦, アーチ型渦, 条件付き画像抽出

### 1. はじめに

近年、CFDやPIV技術の発達及び普及によって、様々な物体周りの流れ場の様子が調べられている(Sakakibara et al. (2001), Hori et al. (2004), Ito et al.(2005), Wang, H.F. et al.(2009))。しかし、建築物に代表されるような3次元物体の周りの流れは複雑で、その詳細については必ずしも明らかになっていないと言えない。特に、頂部を超える流れと側面から剥離した流れの非定常な干渉については、これまで様々な試みがなされてきたにもかかわらず、その状況は依然として解明されていない。

本論文では、乱れの小さい一様流中に置かれたアスペクト比2.7の正四角柱の後流の流れ場を、2次元および3次元PIVによって測定した結果に基づいて、後流中の非定常流れ場、特に側面からの流れと頂部を超える流れ場の干渉に伴うカルマン渦の3次元構造について検討したものである。本測定では、複数の測定断面におけるPIVの測定画像を、剥離剪断層の外側に設置した熱線風速計の信号に同期して抽出し、カルマン渦形成・成長・放出段階における複数の測定断面の画像を重ね合わせて、非定常流れ場の構造

を調べた(Kawai et al. (2009))。その結果、時間平均流場と同様に、カルマン渦の形成・成長のどの段階でも、側面から生じる鉛直の軸を持つ剥離渦は頂部を超える水平な軸を持つ渦と繋がりアーチ型渦を形成する。このアーチ型渦はカルマン渦が発達し風下へと移動するにつれ、頂部付近で渦軸が流れ方向にねじれるように大きく引き延ばされ、これに伴い、頂部付近外側から中央付近に回り込む強い下降流が生じ、大きな流れ方向の渦度の塊が形成される。

### 2. 測定方法

3次元角柱のPIV測定は独立行政法人建築研究所の乱流境界層風洞(測定部断面:3m×2.5m)で行った。風洞床面に発達する境界層の影響を避けるため、風洞測定部の床面から30cmの位置に新たな地面板を設置し、地面板の先端から80cmの位置に幅(D)が50mm、高さ(H)が135mmの亚克力製正四角柱模型を風向に正対させて設置した。Fig.1は模型設置位置での平均風速および乱れ強さの鉛直プロファイルを示したものである。模型を地面板の先端から80cm風下に置いたため、地面板から4cm( $z/H=0.3$ )程度まで地面板上

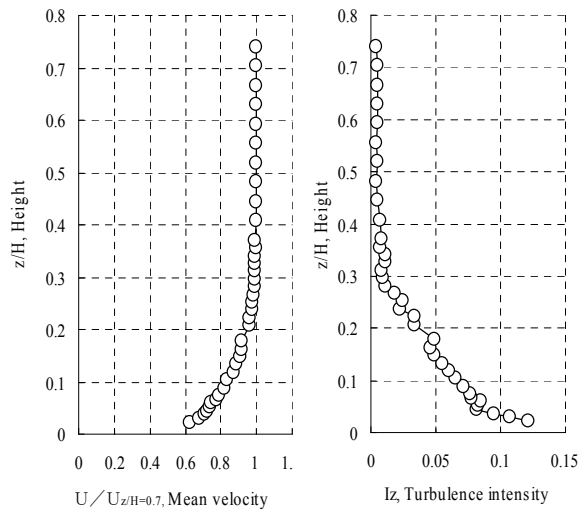


Figure 1 Profiles of mean velocity and turbulence

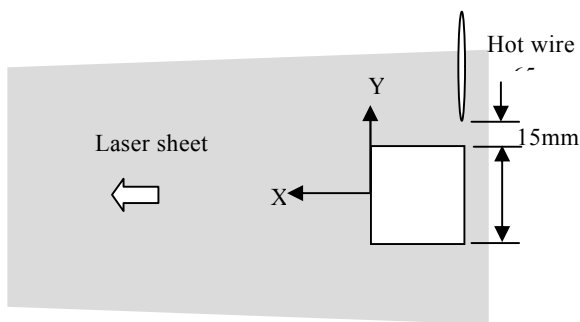


Figure 2 2D-PIV Experimental arrangement

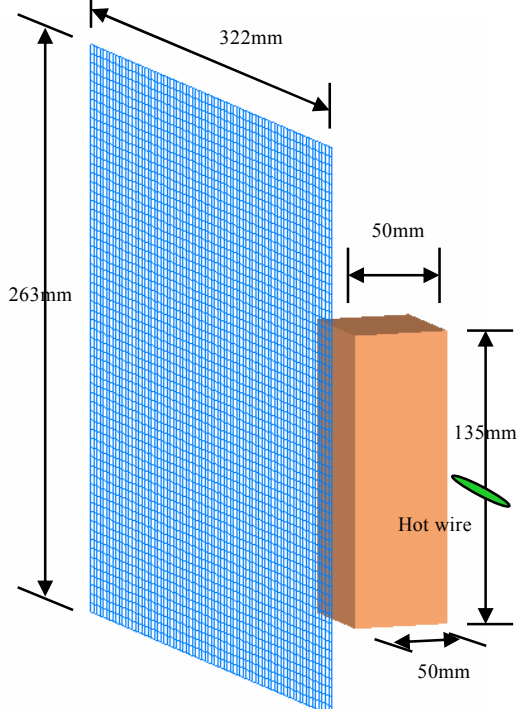


Figure 3 3D-PIV Experimental arrangement

に発達する境界層の影響が認められるが、境界層の外側では流れ場はほぼ一様で、乱れ強さも1%未満である。実験時の風速は境界層の外側で3m/s(PIV測定

及び5m/sec(ステレオPIV測定)に設定した。PIVによる流れ場の測定は、Fig.2に示したように、角柱の後方あるいは角柱の上方から水平あるいは垂直にレーザーシートを当て、角柱後流のトレーサー粒子の動きを高速ビデオカメラで撮影することによって行った。測定断面は、地面板上10mmから10mm間隔で170mmまでの水平断面、及び、角柱の中央から左右に5mm間隔で±40mmまでの垂直断面である。測定では、0.25msec間隔で取られた2枚の画像から、63×63点の瞬間速度ベクトル場を生成した。一つの計測につき、それぞれの断面の2次元瞬間速度ベクトル場は1/30sec間隔で508枚作成される。それぞれの断面での非定常な測定結果から、カルマン渦形成時の非定常な流れ場全体の様子を調べる為、Fig.2に示したように熱線風速計を角柱風上面角から15mm離れた位置に設置し、風速変動の出力信号に同期してPIV画像を抽出した。

ステレオPIV測定では、Fig.3に示したように、角柱の上方からレーザーシートを当て、流れ直交方向断面の流速の3成分を測定した。測定断面は角柱の背面から角柱後流の60mm( $x/D=1.2$ )まで10mm(0.2D)間隔、60mm( $x/D=1.2$ )から120mm( $x/D=2.4$ )までは20mm(0.4D)間隔、120mm( $x/D=2.4$ )から200mm( $x/D=4$ )までは40mm( $x/D=0.8D$ )間隔の計12断面である。ステレオPIVでは、それぞれの断面の瞬間速度ベクトル場は1/500sec間隔で2727枚作成される。

カルマン渦放出時の流れ場は、Fig.4に示すように熱線風速計によって測定した風速変動を基準として各断面のPIV画像を抽出し、そのアンサンブル平均を求めることによって把握した。したがって、3.2節に示す非定常流れ場は、カルマン渦形成のある段階の瞬間流れ場のアンサンブル平均である。

### 3. 測定結果

#### 3.1 時間平均流れ場

Fig.4は、2次元PIVで測定した水平17断面の内から代表的な7断面の時間平均流線を示したものである。時間平均流線は508枚の瞬間速度ベクトルの平均より求めた平均速度ベクトルによるものである。図に示されているように、角柱の後流では、 $z/H=0.074\sim 0.96$ の断面で、互いに反対方向に回転する一対の対称な渦と流れの分岐点が観測される。角柱の底部及び頂部近くでは、渦の中心は角柱側面より内側にあるが、角柱の中央付近では、渦の中心は角柱側面の外側にある。角柱上面から5mm離れた $z/H=1.04$ の流線図には、角柱風下面のごく近傍で一対の渦の影響が見られるが、 $z/H=1.04$ の流線図ではこれらの影響はほとんど認められなくなる。

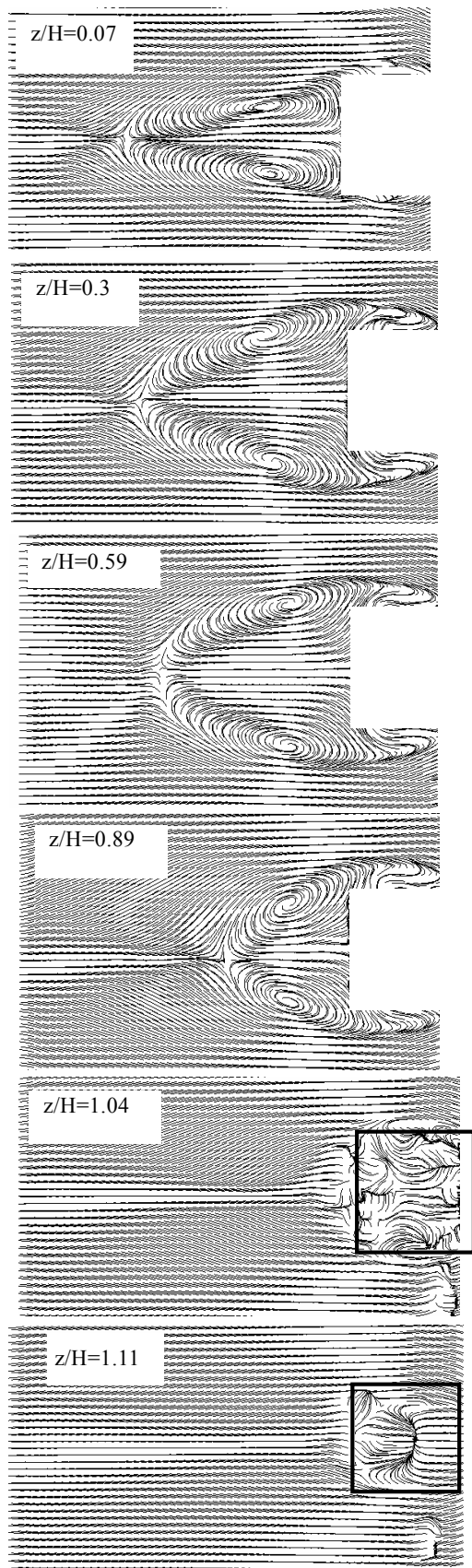


Figure 4 Stream lines of time averaged flow for horizontal sections.

$z/H=1.11$ における角柱の上面の直ぐ上の流線図には、風上からの流れが角柱の中央付近で角柱の上面

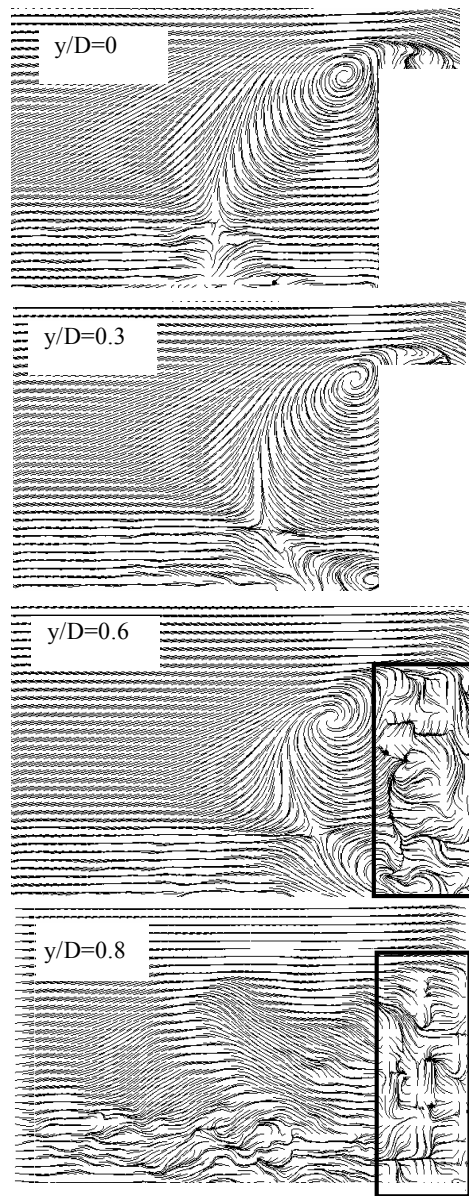


Figure 5 Stream lines of time averaged flow for vertical sections.

へと引き込まれるような特異線が存在する。この特異線は、この位置で角柱の頂部前縁から剥離した剪断層をレーザーシートが横切ることから発生したものと推測される。この特異線は角柱の外側ほど風下に向かっていていることから、剥離剪断層は角柱の外側に向かう程角柱上面に近づいていることが窺える。 $z/H=1.04$ の流線図は剥離剪断層の内側の領域の流れの様子を表している。剥離剪断層の内側では側面からの流れの引き込み等の影響による流れの収束・発散に対応して多くの特異点が生じ、流線は極めて複雑な様相を示す。

Fig.5は2次元PIVの4つの代表的な鉛直断面の平均流線を示したものである。角柱の後流、頂部近傍に水平に軸を持つ渦が観測される他、 $x/D=1.7, z/H=0.3$ の位置に流れの分岐点があり、角柱を超える流れは

底面(地面)に再付着せずに後流へと流ることが分かる。この分岐点に向かって、底面からの流れは風上および風下へと流れる。中央断面から外側に向かうにしたがって、流れの分岐点は角柱に近づく。角柱の側面から外側の $y/D=0.6$ の断面においても、角柱の頂部付近の渦が観察されるとともに、角柱の底部付近にも渦状の流れ場が観測される。 $y/D=0.6$ の断面の流線図はかなり複雑であり、流れ場を想像することは容易ではない。 $y/D=0.8$ の断面では、3つないしは4つのセル状の流線場が観測されているが、これは剥離流線が鉛直方向に波うっている結果生じているものであろうと推定される。しかし、本計測の断面間隔では側面に発達する剥離流の詳細な構造までを解析することは難しい。

Fig.6に水平断面の流線図から求めた渦中心の風下方向の位置と分岐点位置の鉛直方向の変化を示した。 $z/H=0.07\sim 0.22$ までは、渦中心の位置は $x/D=0.75$ 程度であるが、 $z/H=0.22$ を超えると徐々に角柱に近づき、 $z/H=0.37\sim 0.66$ までは、渦中心の位置は $x/D=0.55$ とほぼ一定となる。その後、 $z/H=0.8$ 付近では渦中心はやや角柱から離れたあと、角柱頂部に向かうにつれ、急速に角柱に近づく。分岐点流線位置は $z/H=0.5$ 付近までは $x/D=1.75$ 程度はほぼ一定であるが、その後角柱頂部に向かうにつれ、角柱に急速に近づく。

Fig.7は渦中心の流れ方向と流れ直角方向位置の関係を示したものである。Fig.4の流線図に示されているように、角柱の底部及び頂部付近では渦中心は角柱の側面より内側にあり、中央部付近では角柱の外側にあるが、その間では、渦中心位置が螺旋を描くように変化することが分かる。

Fig.8は3次元PIVによって測定した流れに直角な断面内( $x/D=0.6D, 1.0D, 1.6D, 2.0D$ )の流速ベクトルと流れ方向の渦度を示したものである。渦中心位置の $x/D=0.6$ で角柱の頂部に見られた互いに反対方向に回転する一対の流れ方向の渦度は、後流へ行くにしたがって下降しながら大きくなり流れの分岐点 $x=1.6D$ で最大となったあと急速に拡散する。Fig.9は

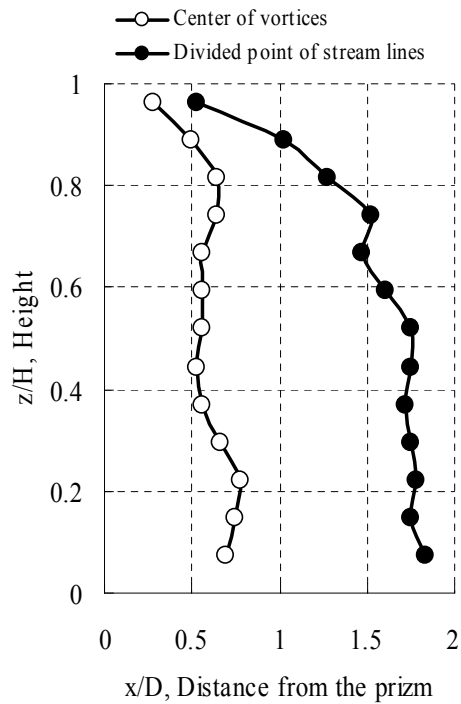


Figure 6 Stream-wise position of center of vortex and crossing point of dividing stream lines.

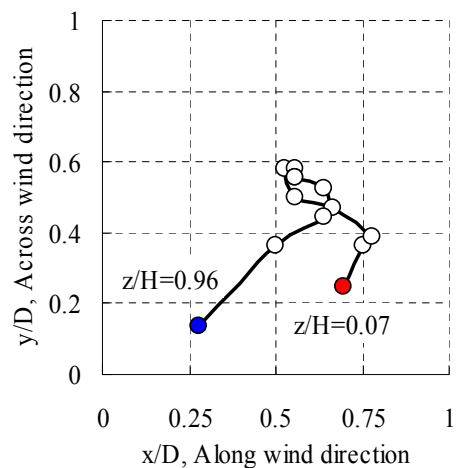


Figure 7 Projective position of center of vortex.

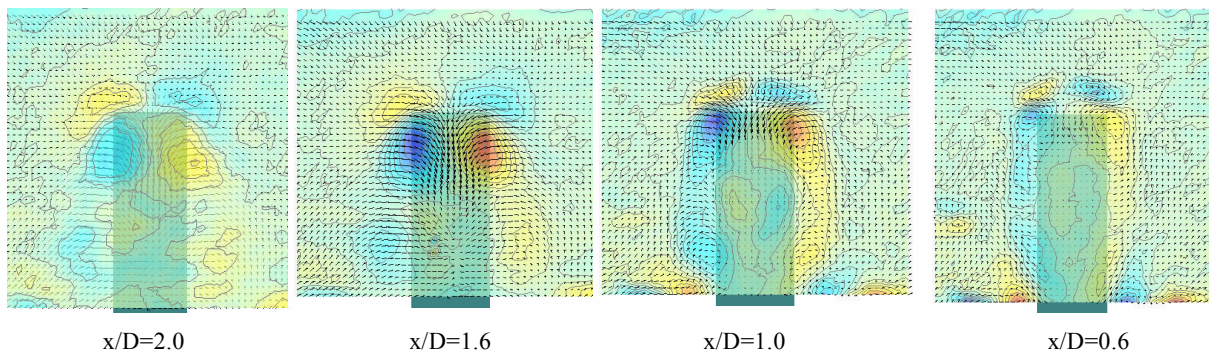


Figure 8 Longitudinal vorticity contour and velocity vector of time averaged flow in perpendicular sections to mean flow.



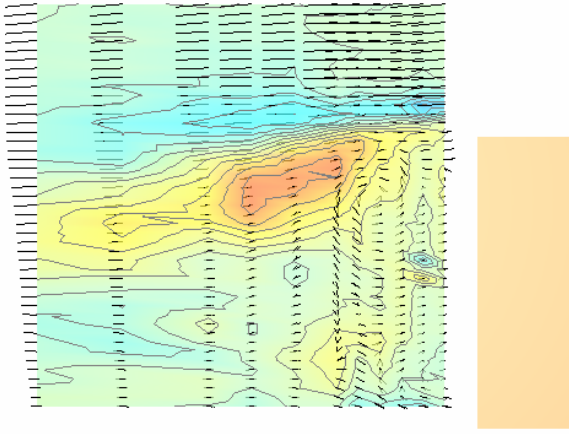


Figure 9 Longitudinal vorticity contour and velocity vector of time averaged flow in parallel section at  $y/D=0.5$ .

$y/D=0.5$ の流れ方向断面における流れ方向の渦度を示している。流れ方向の渦度の等値線から、赤色で示した反時計周りの渦度が流れの分岐点近くで最大になること、及び反時計周りの渦度の上方にはこの渦に誘起された青で示した時計周りの渦度が下流に向けて伸びていることが分かる。

Fig.10は角柱の真後ろから見た角柱の近傍の3次元流線図を示したものである。図に示されているように、角柱の背後にはアーチ型の渦が形成される。Fig.6に示した渦中心位置から分かるように、渦は底面近くでは中央に近づき、底面から1Dより上ではほぼ鉛直であることが分かる。

Fig.11は、角柱の背面から見た渦度の等値面を  $x/D=1.6D$ における流速ベクトルとともに示したものである。角柱の外側の鉛直方向の渦度の等値面(橙色と黄土色)が鉛直方向の渦度、青色の等値面が流れ方向の渦度、緑色が流れ直交水平方向の渦度である。流れ方向の渦度を包むようにして水平方向の渦度が広がっていること、流れの分岐点で水平方向の渦度の等値面がくびれるようになり、渦度が弱まることなどが分かる。

### 3.2 非定常流れ場

#### (1) 瞬間流れ場

一様流中に置かれた角柱の後流の流れ場はアスペクト比によって影響されるが、本実験の角柱（アスペクト比2.7）では、側面からの流れの剥離に伴う剪断層はほぼ規則的に後流中で巻き込まれ、カルマン渦となって後流へと放出される。Fig.12は2次元PIVによって生成された各瞬間の水平断面( $z/H=0.3$ )の2次元流速ベクトルから算定した疑似流線を示したものである。後流の流れは極めて複雑であるが、剥離流が規則的に巻き込まれて放出されている様子が捕

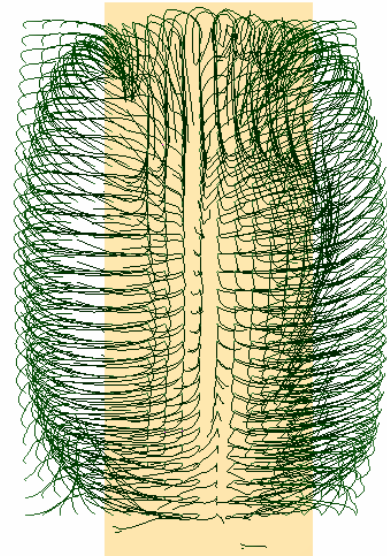


Figure 10 3D stream lines in the wake

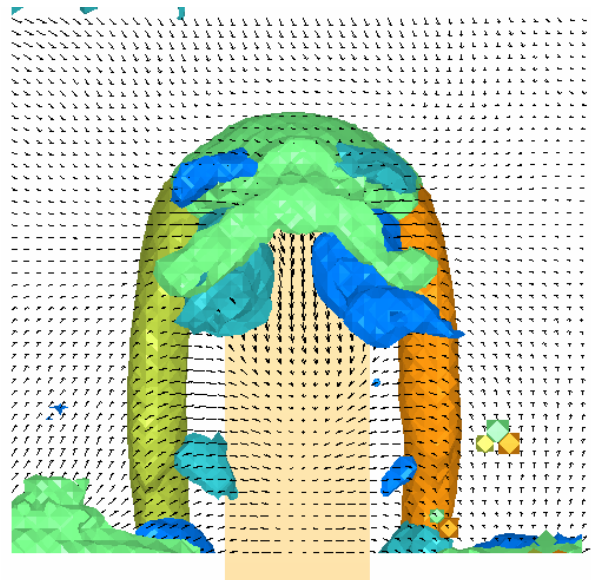


Figure 11 Iso-surface of longitudinal, lateral and vertical vorticities.

Blue longitudinal, green lateral and orange is vertical.

らえられている。図の赤の領域は反時計方向の渦度が強い領域、青が時計方向の渦度が強い領域を表している。Fig.12には、角柱の側面風上側で剥離した剪断層に沿って、渦度の大きい塊が離散的に並び、次第に成長する様子が示されている。また、角柱の背後で剥離剪断層が巻き込まれるとともに、渦度の塊も巻き込まれ、渦中心に向かうことも分かる。

また、Fig.12には疑似流線が収束および発散する多くの特異点及び特異線が観察される。これらの特異線、特異点は、流れがこの場所で収束および発散し、上下方向に動いていることを示していると推察され



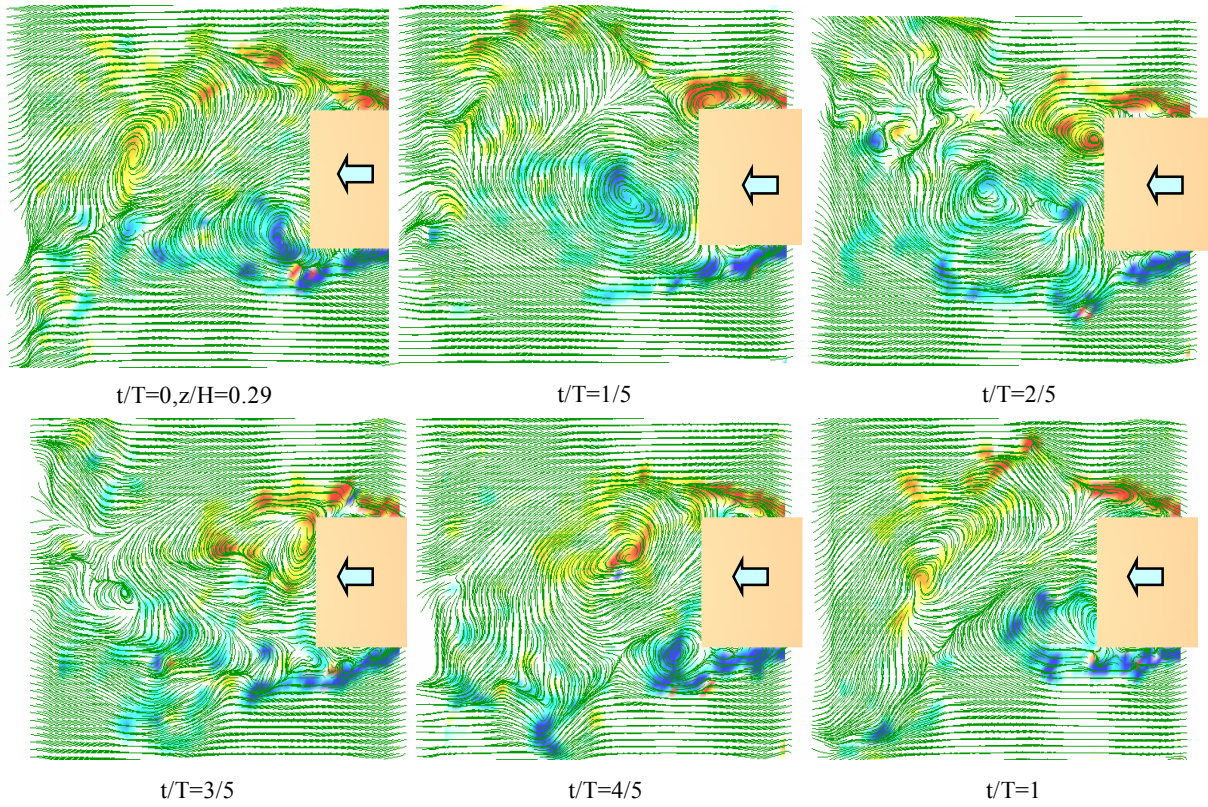


Figure 12 Instantaneous stream line during Karman vortex shedding in a horizontal plane at  $z/H=0.3$

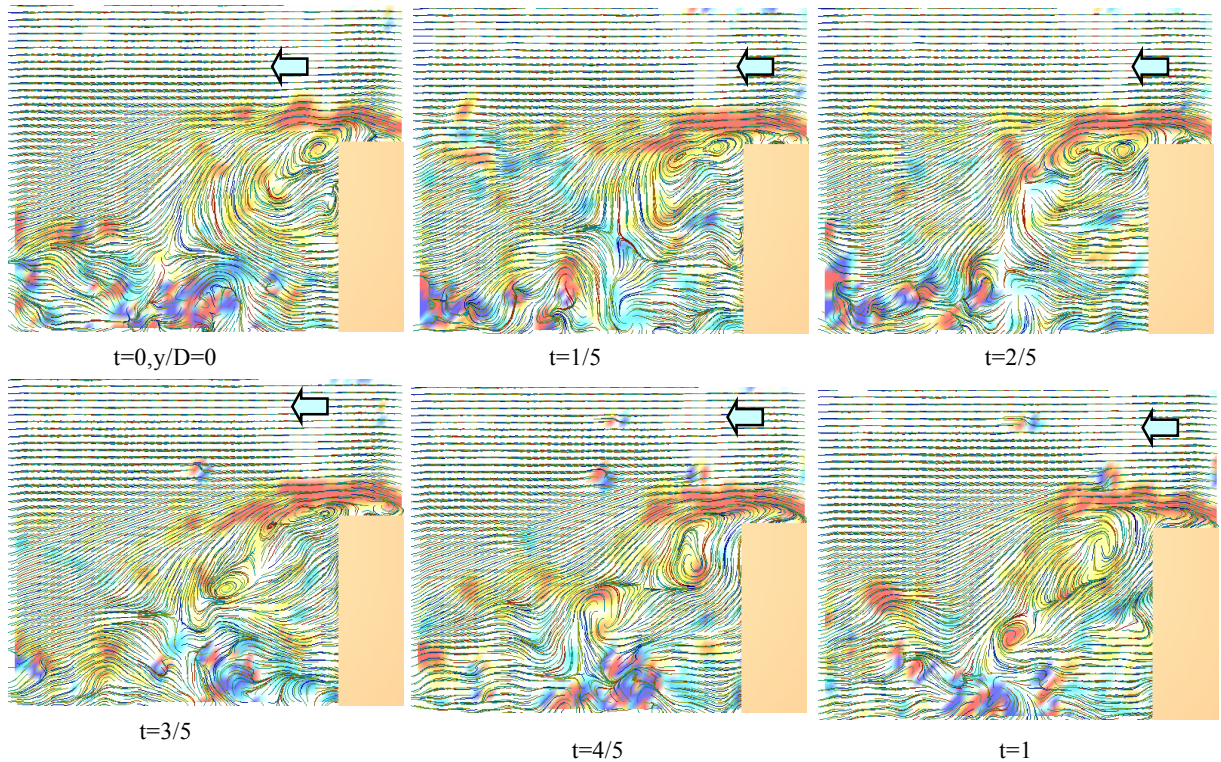


Figure 13 Instantaneous stream line during Karman vortex shedding in a vertical plane at  $y/D=0$

る。

Fig.13は2次元PIVによって生成された各瞬間の流れ方向鉛直断面( $x/D=1.0$ )の疑似流線を示したもので

ある。この図は、水平断面の場合と同様に、カルマン渦放出の一周期を示したものである。水平断面と同様に瞬間疑似流線は収束・発散に伴う多くの特異



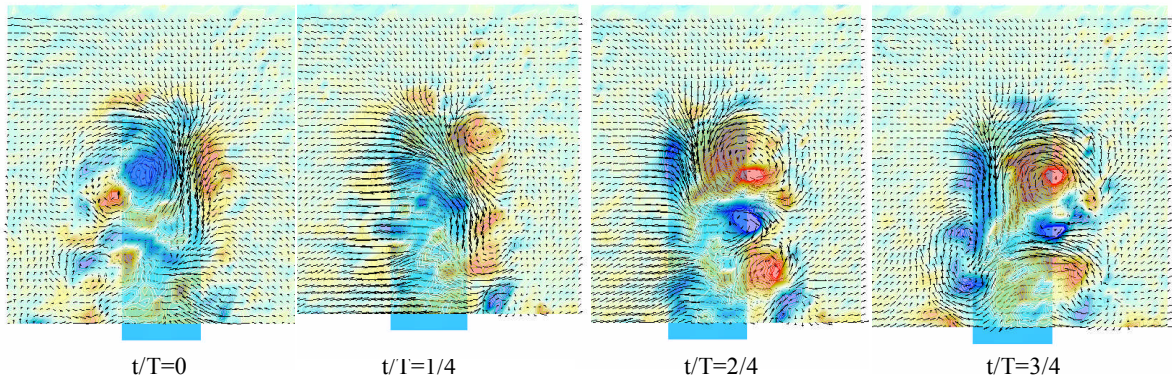


Figure 14 Instantaneous stream line during Karman vortex shedding in a perpendicular plane at  $x/D=1.0$

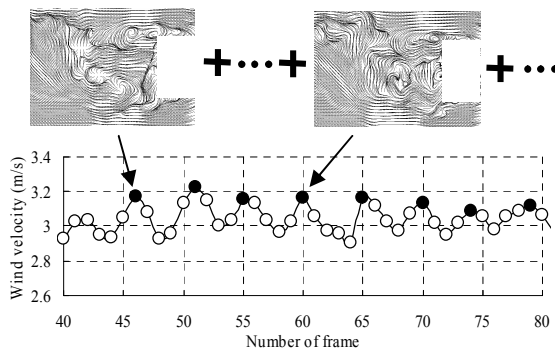


Figure 15 Conceptual diagram of the conditional sampling of PIV images

点を持つ極めて複雑な様相を示してはいるが、大局的には各図に大きな違いはないと考えられる。即ち、角柱の背後の頂部付近には、どの瞬間でも、角柱の頂部風上側前縁から剥離した剪断層の巻き込みによる渦が観察され、疑似流線の分岐はほぼ同じ位置で生じている。渦度の大きい塊は、水平断面と同様に、剥離剪断層に沿って並ぶが、水平断面とは異なり、渦度の大きな塊が角柱背後の渦に巻き込まれる様子は見えない。

Fig.14は $x/D=1$ における流れ直交断面の流れ方向の渦度を流速ベクトルとともに示したものである。左側からカルマン渦が放出される時 ( $t/T=0$ )、角柱の中央から左側頂部にかけて大きな渦度の塊が生じ、それに沿うように、流れが左側頂部から右側に流れが巻き込まれ下降する。カルマン渦が放出された直後から右側の渦度の塊が成長し、右側から左側への流れの巻き込みが顕著になる。

## (2) カルマン渦放出に伴う流れ場の変化

PIVでは一つの断面内における流速ベクトルの2成分が測定される。ステレオPIVでも計測される流速ベクトル成分が3つとなるだけであり、3次元空間内の全ての流速ベクトルを同時計測することは基本的にはできない。時間平均流れ場の場合、計測された全断面の流速ベクトルをそのまま組み合わせることに

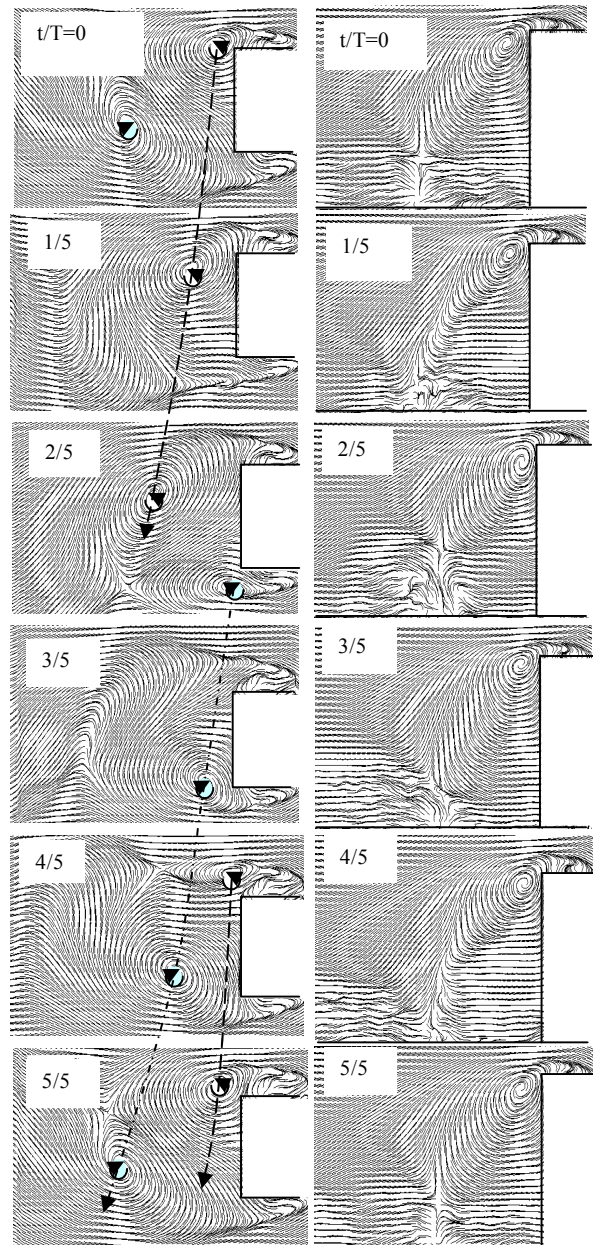


Figure 16 Stream lines in horizontal section at  $z/H=0.3$  and in vertical section at  $y/D=0$  during Karman vortex formation in a cycle.

よって流れの空間的な構造を知ることが可能である。しかし、非定常流れでは、ある断面のある時間で測定した画像は、基本的に他の断面のどの画像とも同期せず、流れの瞬間的な空間構造を知ることが不可能である。そこで、Fig.15の模式図に示したように、熱線風速計の出力を基準として各瞬間の風速ベクトルを抽出し、これをアンサンブル平均することによって、カルマン渦形成の一周期の各段階における平均流れ場を抽出した。

Fig.16は流線の分岐点高 $z/H=0.3$ における水平断面及び角柱中央線に沿った鉛直断面におけるカルマン渦の一周期の流線の変化を示したものである。水平断面の流線図から、剪断層の巻き込みは角柱の背面の近くで始まり、渦は次第に成長しながら、また中心線に接近しながら流れの分岐点近くまで流下し、後流へと放出される。Fig.16の丸印はカルマン渦の位

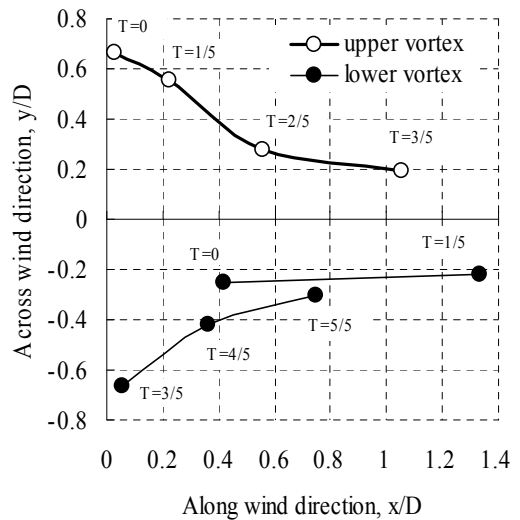


Figure 17 Position of Karman vortex during its formation in a cycle.

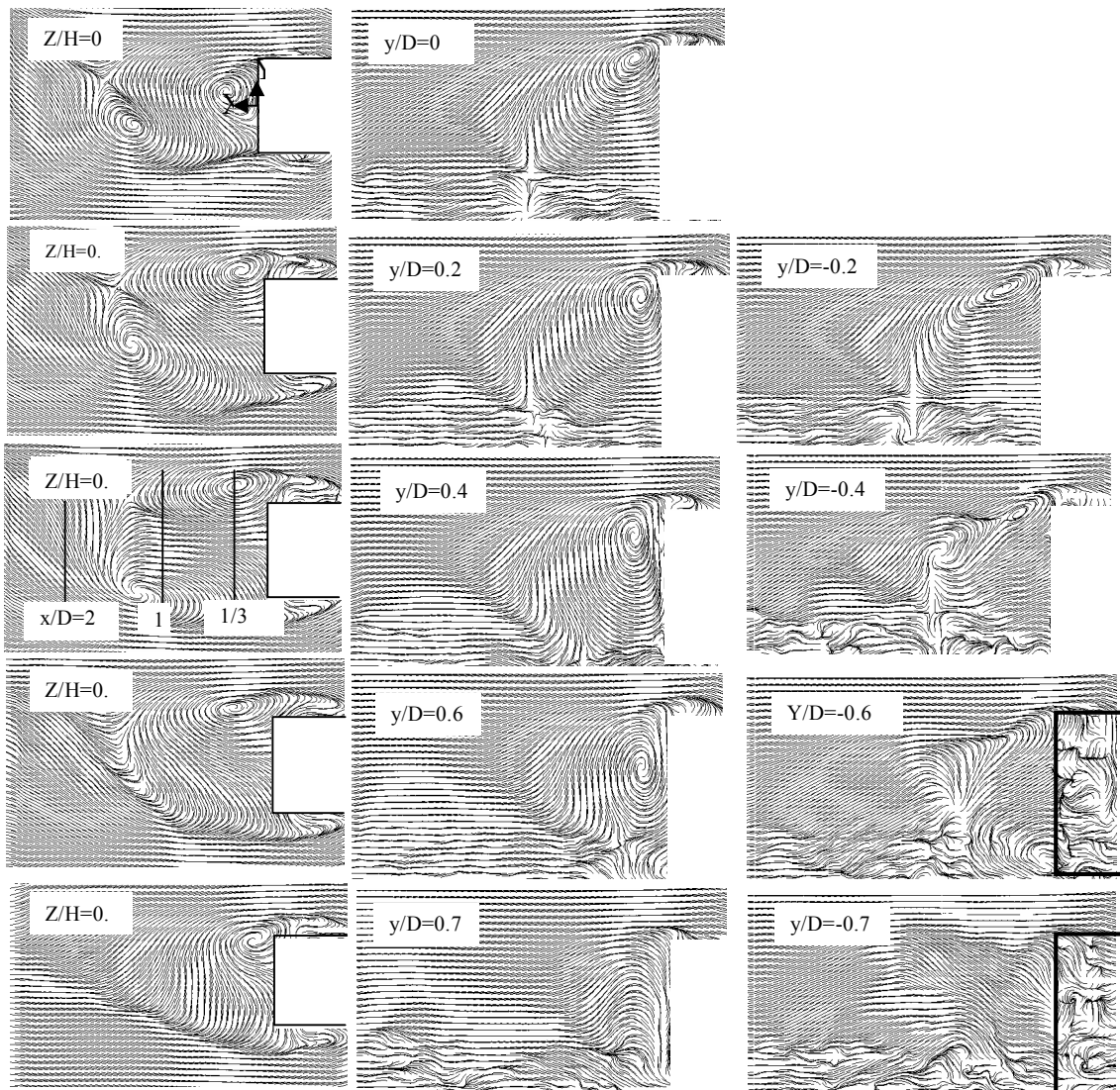


Figure 18 Stream line in horizontal sections at various heights at  $t/T=0/5$ .

Figure 19 Stream line in vertical sections at various transverse positions at  $t/T=0/5$ . Right figures show the upper side and left figures show the lower side of Figure 18.



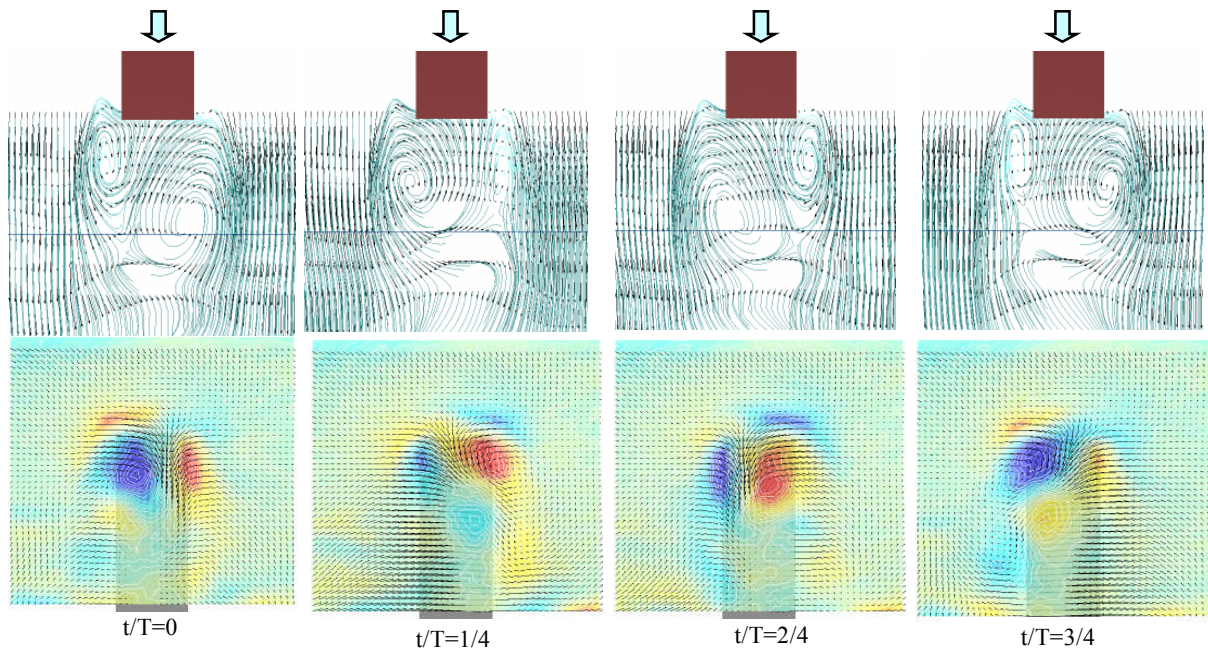


Figure 20 Longitudinal vorticity contour and velocity vector in a perpendicular section( $x/D=1.2$ ) to flow.

置を示している。画像は30Hzで取られているので、渦の周期は約1/5秒となる。実験時の平均風速は3m/sであるから、ストローハル数は0.083である。

Fig.16の右に示した鉛直中心断面( $x/D=0$ )の流線図から分かるように、剪断層が交互に巻き込まれ成長する過程においても、角柱の頂部付近には水平な軸を持つ明瞭な渦が観測される。渦の形および流れの分岐点位置はカルマン渦の成長過程で若干変化するが、流れ場全体の様子はほとんど変わらない。

Fig.17は、流線の分岐点高 $z/H=0.3$ におけるカルマン渦一周期の渦位置を示したものである。角柱の背後で剪断層が巻き込み始めた時には、カルマン渦は角柱よりも外側にあり、ゆっくりと風下へと移動するが、中央に近づき始めると渦の移動速度が急速に増加し、後流へと放出される。

Fig.18は、 $t/T=0$ における流れ場の状況が高さとともにどのように変化するかを調べたものである。角柱の底部近くでは、渦は角柱背面中央線近くに形成されているが、上方に向かうにしたがって、渦は中央線から離れとともに大きくなる。また、 $z/H=0.74$

以上では下側の渦が見えなくなる。

Fig.19は、 $t/T=0$ における鉛直断面の流線である。左側の断面図がFig.18の上半分、右側の断面図がFig.18の下半分を示す。渦が角柱の近傍に形成されている時には、角柱の背後には水平な軸を持つ渦が形成されるが、渦が後流へと移動すると、角柱の中央から離れるにしたがって水平な軸を持つ渦は引き延ばされ、ついには2つに分離するようになる。

Fig.20は、カルマン渦放出の1周期における流れ直交方向断面 ( $x/D=1.2$ ) の流れ方向の渦度の等値線と流速ベクトル図を、 $z/H=0.5$ における水平断面の流線図とともに示したものである。渦度は赤色が反時計方向、青色が時計方向を示している。 $t/T=0$ 、 $t/T=1/4$ は、図の右側の渦が後流へと放出され、左側の渦が成長する過程における流れ場の変化を表しているが、この場合には、角柱の頂部で左側から右側に流れが巻き込まれるように下降する。角柱の頂部付近には互いに反対方向に回転する一対の流れ方向渦度の大きな塊が表れる。右側で渦が放出される瞬間の $t/T=0$ では、流れ方向渦度の塊は左側で強く、渦が放出さ

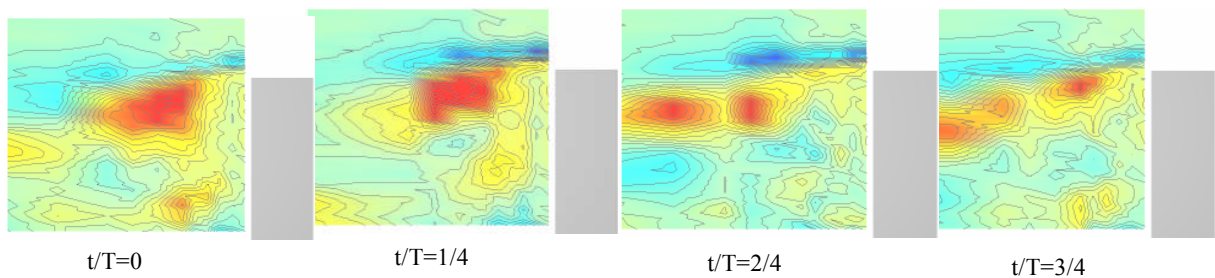


Figure 21 Longitudinal vorticity contour in a parallel section ( $y/D=0.5$ ) to flow.

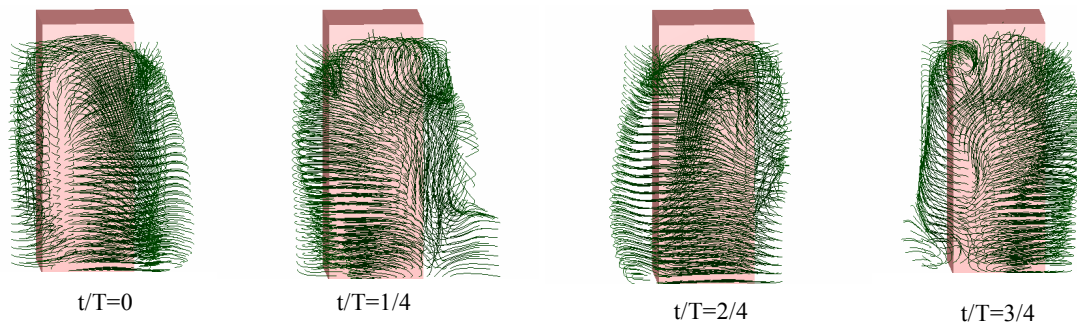


Figure 22 3D stream lines in the wake during Karman vortex formation

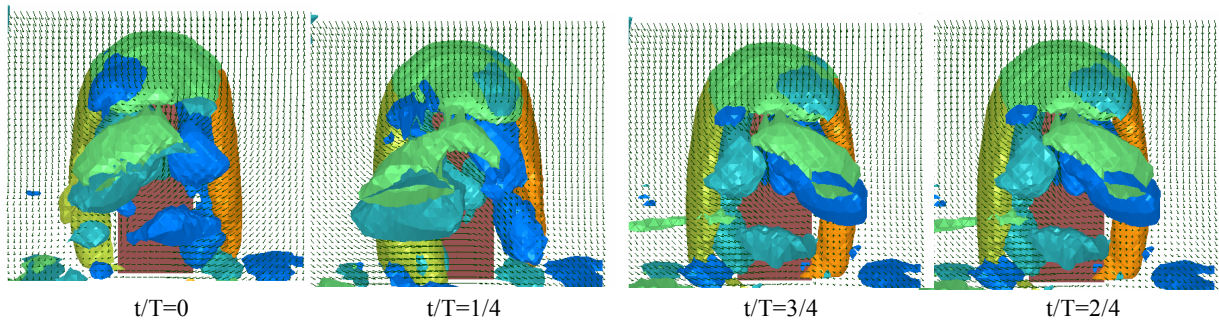


Figure 23 Iso-surface of 3 components of vorticity. Blues longitudinal, green lateral and oranges are vertical.

れた後左側の渦が成長する過程では右側の渦が強くなる。左側で渦が後流へと放出された後、右側で渦が成長しはじめると、流れは頂部右側から左側に巻き込まれるように下降するようになる。

Fig.21は流れ方向断面における流れ直交方向の渦度( $y/D=0.5$ )の変化を示したものである。下側の渦の成長に伴って、渦度の大きい領域が次第に風下方向に広がり、渦が後流へと放出されると、流れ方向の

渦度も後流へと放出されることが分かる。

### (3) 非定常流れ場の3次元空間構造

非定常流れ場の3次元空間構造を調べるため、3次元流線を算出しFig.22に示した。Fig.22は、 $x/D=0.4D$ 、 $x/D=1.0D$ における流れ直交方向の断面から流体粒子を追跡することによって描いた流線を示している。Fig.22に示されているように、流線はカルマン渦形成・成長のどの段階でも、時間平均流線と同様にアーチ型に繋がっていることが分かる。

Fig.23は、流れ方向、水平方向及び鉛直方向の渦度の等値面がカルマン渦の形成・成長段階でどのように変化するかを、角柱の真後ろから見たものである。左右の橙色と草色の等値面は鉛直方向の等値面、緑色は流れ直角水平方向の等値面、青色と水色は流れ方向の等値面である。鉛直方向の等値面は側面からの剥離剪断層に沿って角柱の両側に広がる。カルマン渦の形成・成長に伴い、渦度の等値面は規則的に左右に揺れながら拡大、縮小を繰り返す。一方、水平方向の等値面は、後流に行くにしたがって次第に下降し、カルマン渦が後流へと放出されるとともに、カルマン渦とともに移動する。流れ方向の渦度の等値面は、水平方向の渦度の等値面の下側にあり、カルマン渦の形成・成長とともに左右に揺れながら流れ方向に伸び縮みする。

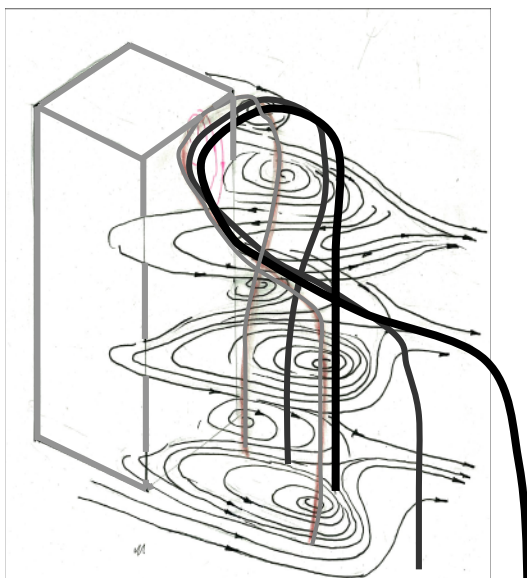


Figure 24 Schematic diagram of wake of unsteady flow during Karman vortex formation behind 3D square prism



#### 4. 考察

以上の測定結果から、3次元角柱のカルマン渦の形成・成長・放出時における流れの構造は大凡以下のように推測できる。角柱側面と角柱上面から流れの剥離によって形成された剥離剪断層は、後流で一体となって巻き込まれアーチ型の渦を形成する。アーチ型渦の柱の部分は、2次元流れ場と同様に逆対称となり規則的に後流へと放出される。片側で渦が成長しながら後流へと移動する過程で、アーチ型渦の頂部付近は常に角柱の直ぐ背後にとどまり続けるため、成長した渦の頂部では渦は流れ方向に大きく引き延ばされる。渦が後流へと放出されると、アーチ型渦は引きちぎられ、別のアーチ型渦が角柱の背後で形成される。Fig.24は以上の考察に基づいて、アーチ型渦の中心がどのように変化するかを推測したものである。

#### 5. 結論

2PIV及びステレオPIVによって、3次元正四角柱の後流における流れの構造を解析した。その結果、

1. 角柱の後流の平均流れ場では、角柱頂部背面近くに頂点を持つアーチ型渦が形成される。アーチ型渦の形成に伴って、水平断面内では互いに反対方向に回転する一対の渦が観測されるとともに、角柱から1.75D離れた位置に流れの分岐点が表れる。また、アーチ型渦の軸は底面から頂点に向かって螺旋を描く。
2. 角柱の中央鉛直断面内では、底面から $z/H=0.3$ 、角柱から $x/D=1.75$ 離れた位置に平均流れの分岐点が形成される。即ち、頂部を超える平均流れは、底面に再付着することなく後流へと流れ去る。底面上の流れは分岐点の真下の特異点に集まり、上方の分岐点へと向かい、分岐点を境に風上側（角柱に向かう側）と風下側へと流れる。
3. 平均流れ場では、角柱の後流で、流れ方向に軸を持ち互いに反対方向に回転する一対の縦渦が形成される。この縦渦は、アーチ型渦による頂部からの下降流に伴って誘発されたものであると考えられ、流れの分岐点付近（ $x/D=1.75$ ）で渦度が最も大きくなる。
4. 剪断層の交互の巻き込みに伴うカルマン渦の形成過程においても、カルマン渦形成領域にはアーチ型渦が形成される。このアーチ型渦の頂部は、カルマン渦の形成・成長過程のどの段階においても、角柱の直ぐ背後に留まる。したがって、アーチ型渦の軸はカルマン渦の流下に伴って、頂部付近で大きく流下方向に引き延ばされねじれた状態となる。流下

方向に引き延ばされたアーチ型渦は、カルマン渦が後流に放出される時、カルマン渦とともに後流へと流れさる。

5. 非定常流の場合でも、アーチ型渦に伴う頂部からの下降流によって、流れは片側からもう一方の側へと巻き込まれながら下降し、その結果、流れ方向の渦度の極めて強い塊が形成される。この塊は、カルマン渦が放出されるとともに、後流へと流される。

#### 参考文献

- Ito, Shinji, Yasuo Okuda, Masamiki Ohashi, Yasuhito Sasaki (2005), Tetsuo Matsuyama, Hitomitsu Kikitsu: Synchronous Measurement of Wind Flow and Wind Pressure around a Cubic Model -Instantaneous Reattachment on Surface, Proceedings of 11th International Conference on Wind Engineering (ICWE XI)
- Hori, T., J. Sakakibara (2004), High Speed Scanning Stereoscopic PIV for 3D Vorticity Measurement in Liquids, *Measurement Science and Technology*, Vol.15, No.6, pp.1067-1078.
- Kawai H., Y. Okuda and M. Ohashi (2009), Three dimensional structures of flow behind a square prism, The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, November
- Sakakibara, J., K. Hishida, W.R.C Phillips (2001), On the vortical structure in a plane impinging jet, *Journal of Fluid Mechanics*, 434, pp. 273-300
- Wang, H.F. and Zhou, Y. (2009), The finite-length square cylinder near wake, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.638, pp453-490.

## **Three Dimensional Structure of Flow behind a Square Prism with aspect ratio of 2.7**

Hiromasa KAWAI, Yasuo OKUDA \*and Masamiki OHASHI\*\*

\* Building Research Institute

\*\* National Institute for Land and Infrastructure Management

### **Synopsis**

Three dimensional structures of steady and unsteady flows behind a square prism with aspect ratio of 2.7 in a smooth flow, are investigated by PIV technique synchronizing with velocity measurement by a hot wire anemometer. It was seen that an arch-type vortex is formed behind the prism. A stagnation point is observed in the wake at a location of  $1.75D$  behind the prism and  $0.3H$  above the floor, where  $D$  is width and  $H$  is height of the prism. Therefore flow over the prism does not attach on the floor but runs away some distance above the floor. When separated shear layers are rolled up to form Karman vortex in a wake, the arch-type vortex is still keeping its form in the formation region though the vortex line is twisted very much. As the vortex is growing and moving downstream, the vortex line is stretched in a stream-wise direction near the tip of the vortex which does not move and locates stationary just behind the prism at any instant.

**Keywords:** 3D square prism, wake, PIV, Karman vortex, arch-type vortex, conditional image sampling