

# せん断流中における円柱後流の三次元構造 に関する研究

STUDY ON THE THREE DIMENSIONAL STRUCTURE IN  
THE CYLINDER WAKE IN SHEAR FLOW

佐賀孝徳<sup>1</sup>・今本雅恵<sup>2</sup>・渡辺勝利<sup>3</sup>

Takanori SAGA, Masae IMAMOTO and Katsutoshi WATANABE

<sup>1</sup>正会員 工博 徳山高専助教授 土木建築工学科 (〒745 山口県徳山市久米高城3538)

<sup>2</sup>学生会員 徳山高専専攻科生 環境建設工学専攻 (〒745 山口県徳山市久米高城3538)

<sup>3</sup>正会員 工博 徳山高専助教授 土木建築工学科 (〒745 山口県徳山市久米高城3538)

The three dimensional characteristics, time-space structure and instantaneous velocity distribution characteristics of coherent structure in the cylinder wake in shear flow are considered by using the flow visualization technique and Particle Tracking Velocimetry in streamwise view, plan view and spanwise view. And we try to study the cylinder wake in uniform flow due to make clear the structure in the cylinder wake in shear flow. The characteristics of the three dimensional structure in the cylinder wakes in shear flow became clear, and the new knowledge with regard to the interaction of the formation mechanism of Karman vortex street and shear layer vortex are gained. For the first time, shear layer vortices visualized in uniform flow below  $Re=1000$ . It is clear that "formation length" defined by Bearman is changed with different Reynolds number in uniform flow.

*Key Words* : cylinder wake, coherent structure, PTV, shear layer vortices, Karman vortex street

## 1. 緒論

物体周りの流れは、自然界の現象はもとより、航空工学、船舶工学、自動車工学、河川工学、橋梁工学などあらゆる工学の流体力学に係る分野で数多く観察される基本的で重要な流れである。しかも、その現象は、物体に直接作用するいわゆる流体力を及ぼすことから、これまでも数多くの研究がなされてきている。翼による揚力、抗力を制御する飛行原理、流線形状による圧力抵抗の軽減は、物体周りの流れの制御が、工学的に生かされている代表的事例である。一方では、タコマナローズ橋の落下、もんじゅのナトリウム漏れ事故のような流体力による構造物の破壊は、その流体力により引き起こされた惨事である。

物体周り、特に素過程としての一様流中における円柱周りの流れに関する研究は、これまで非常に多く行われており、それらの後流に関する研究が総括され<sup>1)</sup>、「従来の研究レビューの中で物体後流中の渦力学に関する多くの謎とされていた事柄が最近の文献で解明されてきている。それは、おそらく研究者らの新しい理解の本

質的な部分が、一見すると二次元的な後流の中でも三次元的な特徴へと向けられたからである。その際、PIV法、三次元的なDNS法、従来法、さらに二次的な安定解析がその解明手段として用いられてきた。」と記されている。このことは、後流の三次元性に注目することにより、この分野の研究を劇的に進展させることが可能となったことを指摘している。

せん断流中における円柱周りの流れでは、境界条件もさらに含めると、より複雑な構造の存在が考えられる。せん断流中の円柱周りの研究では、橋脚である円柱の付け根における洗掘現象が、水理条件、河床材料を変化させながら実験的に検討が行なわれている<sup>2)</sup>。また、同様の現象について、N-S方程式の解析モデルを用いて研究がなされている<sup>3)</sup>。さらに、壁面上に円柱が設置されている流れにおいて、円柱上流部の壁面に吸い込み部を設けることにより、襟巻き渦の制御を行い、その規模とレイノルズ応力の低下を試みる研究が行われている<sup>4)</sup>。このように、多くの研究が行なわれているにも関わらず、一様流ではないせん断流中における物体周りの詳細な三次元的な組織構造についての研究は行われていない。

以上のことを踏まえ、本研究では、せん断流中に置か

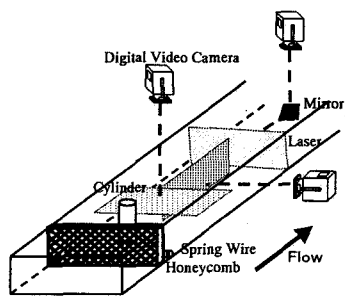


図-1 実験装置 (せん断流)

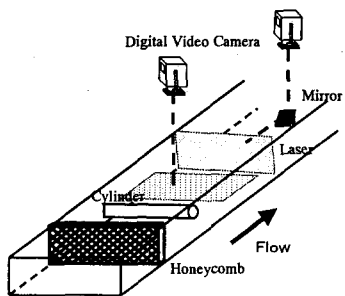


図-2 実験装置 (一様流)

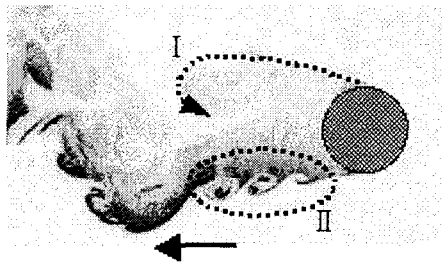


図-3 水平断面形象 (Y/H=0.93, CASE1)

表-1 実験条件 (せん断流)

せん断流	水深 H (cm)	平均流速 U(cm/s)	円柱径 D (cm)	Re数		
				UD/i	UH/i	
CASE1	10.2	5.4	4.0	1940	4950	水平断面視
CASE2	10.2	5.3	4.0	2320	5900	横断面視
CASE3	10.0	5.5	4.0	1680	4200	水平PTV
CASE4	10.4	5.3	3.2	1470	4765	縦断面視
CASE5			4.8	2203	4765	
CASE6	10.2	4.4	4.8	2256	4797	縦断面PTV

表-2 実験条件 (一様流)

一様流	水深H(cm)	流速U(cm/s)	円柱径D(cm)	Re数
CASE7-1	9.7	0.47	3.2	130
CASE7-2	9.7	0.47	4.8	195
CASE7-3	9.7	0.47	7.6	308
CASE8-1	10.1	1.7	3.2	458
CASE8-2	10.1	1.7	4.8	686
CASE8-3	10.1	1.7	7.6	1080
CASE9-1	10.7	3.9	3.2	1108
CASE9-2	10.7	3.9	4.8	1661
CASE9-3	10.7	3.9	7.6	2614
CASE10-1	6.1	6.9	3.2	1944
CASE10-2	6.1	6.9	4.8	2913
CASE10-3	6.1	6.9	7.6	4585
CASE11-1	4.3	9.8	3.2	2758
CASE11-2	4.3	9.8	4.8	4132
CASE11-3	4.3	9.8	7.6	6503
CASE12	13.3	2.1	3.2	560

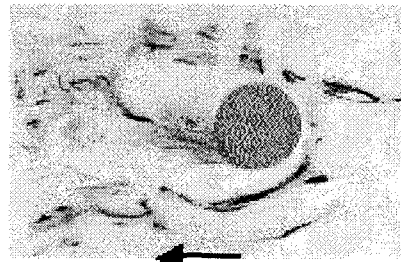


図-4 水平断面形象 (Y/H=0.05, CASE1)

れた円柱周りの組織構造について研究を行なうものである。特に、円柱後流の組織構造の三次元性、時系列特性、瞬時流速分布特性について流れの可視化、PTVを用いて検討を行なう。また、せん断流中の構造を考える上で、一様流中に置かれた円柱周りの組織構造の特性についても考察を行なう。

## 2. 実験装置および実験方法

実験装置には、長さ10m、幅60cm、高さ15cm、水路床勾配1/1000の総アクリル製開水路が用いられた。撮影には、3CCDのデジタルビデオカメラを用いた。せん断流中の実験は図-1のように、上流端に整流用のハニカム、ハニカム下流には乱流促進用のスプリングワイヤー、下流端には水位調節用の堰を設置した。この開水路流れの中に円柱を鉛直に挿入し、水平断面視、横断面視、縦断面視の撮影を行った。一様流中の実験では、図-2のように、一様流を形成させるために円柱より75cm上流に整流用のハニカム、下流端には水位調節用の堰を設置

して、円柱を水平に固定し、水平断面視、横断面視の撮影を行った。せん断流の実験条件を表-1に、一様流を表-2に示す。座標の基準は、せん断流中は、水路床の円柱の中心を原点とし、流下方向をX、水深方向をY、横断方向をZとする。一様流では、円柱の中心を原点とし、流下方向をX、水深方向をZ、軸方向をYとする。これらは、円柱の直径D、または水深Hで無次元化した値で表すこととする。

## 3. 実験結果

### (1) 水平断面形象

図-3にY/H=0.9の水平断面形象を示す。流れ方向は右から左である。円柱後流の右側(図中I)にカルマン渦が発生し、その反対の左側(図中II)では剥離せん断渦が規則的に発生していることが認められる。これは、カルマン渦による大きな巻き込みの形成により、反対側に強いせん断層が発生するためと思われる。カルマン渦は、交互に周期的に発生することが知られているが、剥

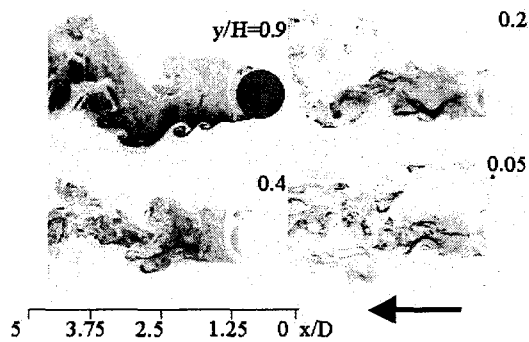


図-5 水平断面形象 (CASE1)

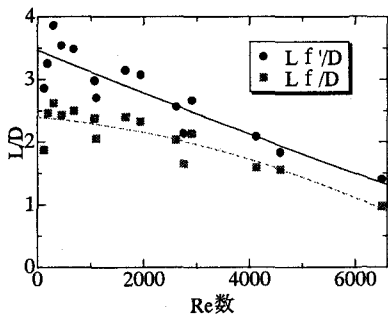


図-6 形成領域の長さ (一様流)

離せん断渦についても、両側から一様に発生しておらず、その発生周期は、カルマン渦の交互性に関係していることが明らかであり、周期の変動特性からも注目すべき点である。また、図-4に、 $Y/H=0.05$ の水平断面形象を示す。これより、河床近傍に左右対称の襟巻き渦が発生していることが認められ、カルマン渦的な挙動は観察されない。

ここで、各水平断面形象の一例を図-5に示す。これらの水平断面形象から、 $Y/H=0.9$ から $0.4$ までの各断面の円柱後流には、剥離せん断層が形成され、その後方にカルマン渦が発生していることが確認できる。また、このカルマン渦の水路幅方向の振幅は、高さ方向によって変化し、水表面に近づくほど大きくなる傾向を示している。 $Y/H=0.2$ 断面では、剥離せん断層は形成されているが、円柱のすぐ後方では明確なカルマン渦は形成されていない。また、 $Y/H=0.05$ 断面では $0.2$ までとは形象が大きく異なり、水路床近傍に左右対象の襟巻き渦が発生していることが確認できる。このように、水深方向に異なる構造性を有しており、特に壁面近くの襟巻き渦領域ではその上部と大きく異なる特徴を有する。

円柱周りの流れの構造は、 $Re$ 数に依存することが知られている。そこで、高さ方向によって $Re$ 数の変化するせん断流中の構造を明らかにするためにも、一様流中においても実験を行い、 $Re$ 数変化に対する考察を行った。まず、形成領域の平均値を図-6に示す。形成領域の下流端は、流れ方向の速度変動の乱れ強度が最大限に大きくなる位置と定義される<sup>1)</sup>。そこで、形成領域の後ろからカルマン渦が形成されると思われるので、水平断面形象において円柱中心からカルマン渦前線までの距離を形成領域長 $L_f$ とした。そして、今回の実験では、円柱

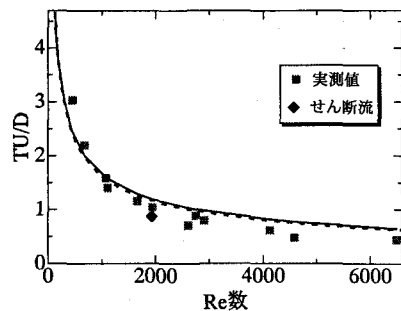


図-7 剥離せん断渦発生周期 (一様流)

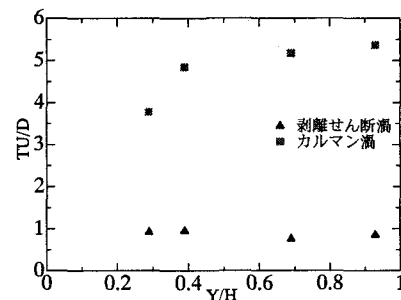


図-8 渦の発生周期 (せん断流)

中心からカルマン渦を含めた距離 $L_f$ も計測を行なった。横軸は $Re$ 数、縦軸は $L/D$  ( $L$ : 形成領域長,  $D$ : 円柱の直径)として無次元化した値で表している。グラフから、 $L_f/D$ ,  $L_f/D$ とも $Re$ 数が増加するに従って形成領域が短くなり、 $L_f/D$ は $Re=1000$ 以下では $Re$ 数の低下に伴い、その増加率が減少する傾向を示す。これは従来その領域が $L/D=2$ 程度とされており<sup>1)</sup>、 $Re$ 数変化に対する系統的考察はこれまでなく、その点で、この図は意義深い。グラフより、 $Re$ 数が増加すると $L_f/D$ と $L_f/D$ の差が小さくなる傾向が認められる。このことは、その値が平均的なカルマン渦の渦径を表すことより、 $Re$ 数に伴ってカルマン渦の渦径が小さくなることを示している。これらのことより、せん断流においては、形成領域は、水路床近くで大きく、水表面に近づくにつれ短くなる傾向が存在することであり、図-5においても、その傾向が認められる。

続いて図-7に剥離せん断渦の発生周期のグラフを示す。ここで、横軸は $Re$ 数、縦軸は $TU/D$  ( $T$ : 周期,  $U$ : 平均流速,  $D$ : 円柱の直径)を示し、ともに無次元化した値で表わしている。Kourta<sup>9)</sup>によって導き出された式 $f_s/f_k=0.095Re^{1/2}$  ( $f_s$ : 剥離せん断渦の振動数,  $f_k$ : カルマン渦の振動数)に $St=0.2$ として求めた剥離せん断渦の振動数を図中の実線で表した。また、Kourtaの式の $f_k$ に実測値を入れて求めた周期の近似値を図中の点線で表した。これらはグラフ上で重なることが認められた。また、撮影した形象をモニターに映し出し、剥離せん断渦の先端が円柱後端から $3cm$ 後方を通過する時間を計測し、求めた値を図中の実測値として表した。これはKourtaの式とよく一致しており、この式の妥当性を示している。さらに低 $Re$ 数において一致していることは注

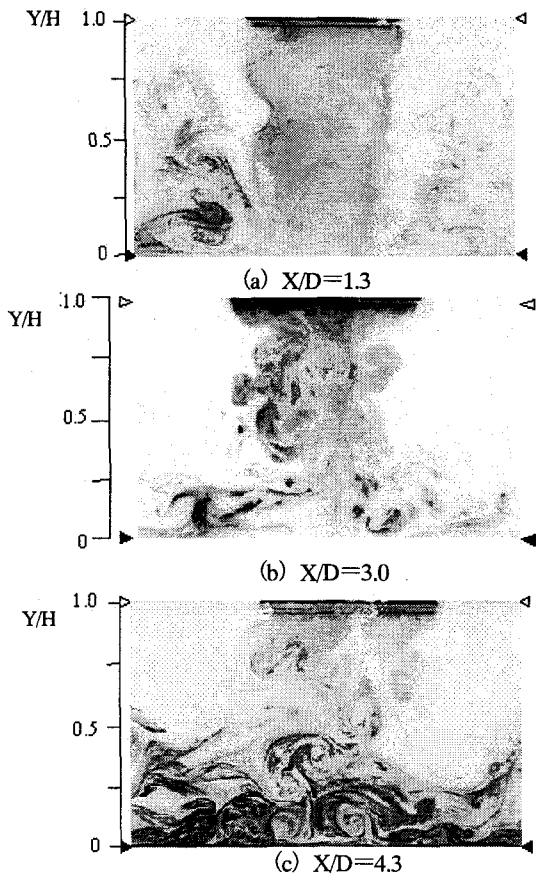


図-9 横断面形象 (せん断流, CASE2)

目すべき点である。グラフから剥離せん断渦はRe数が増加するに従って、周期が短くなるということがわかる。これはRe数が増加し、流れの乱れのスケールが小さくなるためであると思われる。剥離せん断渦の存在について、UnalとRockwell<sup>9)</sup>は、剥離せん断層波は、熱線流速計に基づいてRe=1000より下、流れの可視化ではRe=1900より下では見つけられなかったとしている。そのほかの実験結果から、Re=1200より下での剥離せん断渦の存在の有無が注目されている。また、Gerrard<sup>7)</sup>はRe=350より下での剥離せん断層の不安定性を発見したが、それは、説明できないままである。今回の実験ではRe=458で剥離せん断渦らしい渦が可視化された。この渦の周期は先ほど示した理論値とほぼ一致しているため剥離せん断渦と考えられる。この領域でのカルマン渦と剥離せん断渦の相違は明確にされていないが、このことはGerrardの説の妥当性を示唆し、注目すべき点である。

これらのことを踏まえて、図-8にせん断流中における剥離せん断渦、カルマン渦の発生周期を示し、考察する。剥離せん断渦は、一樣流中と同様に計測し、カルマン渦は、ある時間内に発生する個数より平均値を求めた。これらのグラフは、横軸をY/H (Y:水路床から撮影断面までの高さ, H:水深), 縦軸をTUD (T:周期, U:平均流速, D:円柱の直径) として、ともに無次元化した値で表している。剥離せん断渦は、図-7にプロットしても明確なように、一樣流中の結果と一致する。

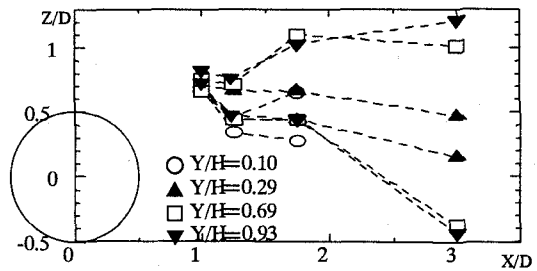


図-10 後流域の変動領域 (CASE2)

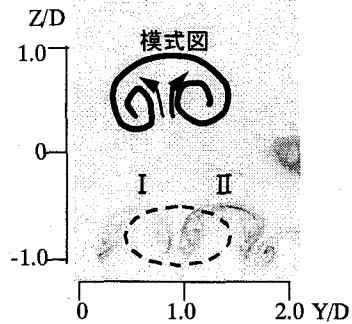


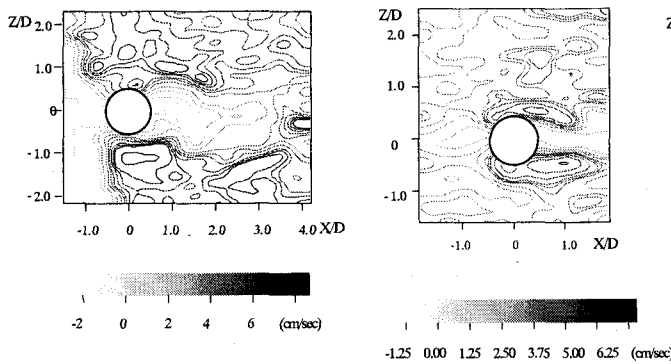
図-11 横断面形象 (一樣流, CASE12)

しかしながら、水表面に近いほど周期のヒストグラムは、集中しているのに対して、壁面近くでは分散傾向にある。カルマン渦は、水表面に近づくにつれ、若干値が大きくなる傾向がある。カルマン渦の平均発生周期は3.54秒でこれを用いたストローハル数St ( $=fD/U$ , f:円柱の背後に生じる渦の振動数, D:円柱の直径, U:平均流速) で表示すると0.21であり、これまで明らかにされたカルマン渦の結果と一致する。

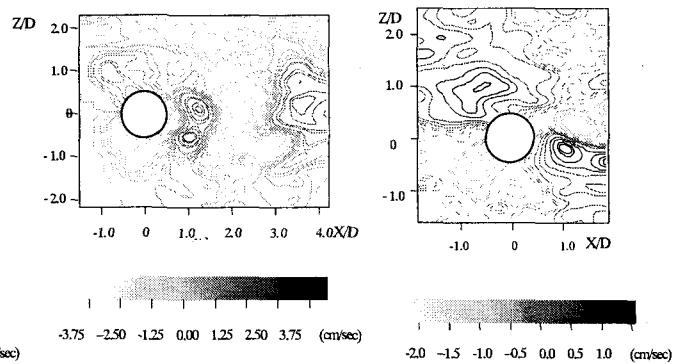
## (2) 横断面形象

図-9に、横断面形象を示す。(a)はX/D=1.3断面で、時間平均的に形成領域を可視化したものである。ここでは、後流域は左右に揺動し、その境界は凹凸を繰り返していることがビデオより確認された。しかも、横断方向の変動は、水深方向の小さなスケールで集団的に変動する三次元性を有していることも確認された。(b)はX/D=3.0断面で、水表面近くは左右に大きく揺れ、円柱後流のカルマン渦の水深方向における特徴を示していることがビデオより確認された。ところが、水路床近くの構造は、変動も小さく、壁面の影響を受けた組織構造が存在していると思われる。このことは、水平断面視における水深方向の変化の特徴と一致している。(c)はX/D=4.3断面の一例である。水表面側には、カルマン渦により形成された後流域の形象の一部が認められる。ところが、Y/H=0~0.5の領域には、壁面より発達した壁縦渦構造の横断面形象が認められる。このことは、この位置では、壁面近くではすでに、円柱の後流域ではないことを示すものと思われる。

次に、流下距離と水深の違いによる可視化形象の変動特性を示すため、各横断面における後流域振れ幅を測定し図-10に表した。横軸をX/D (X:円柱中心からの流下



(Y/H=0.9) (Y/H=0.05)  
**図-12** 水平断面u成分 (CASE1)



(Y/H=0.9) (Y/H=0.05)  
**図-13** 水平断面w成分 (CASE1)

方向距離,  $D$ : 円柱の直径), 縦軸を $Z/D$  ( $Z$ : 円柱の中心からの振れ幅の最大値と最小値,  $D$ : 円柱の直径), パラメーターを $Y/H$  ( $Y$ : 水路床からの高さ,  $H$ : 水深)として, ともに無次元化した値で表している. これらから, 水表面近くでは, 流下距離が長くなるにつれ変動幅も広くなることが示されている. しかし, 水路床近くでは流下距離に関わらず, 変動幅の差は小さく, しかも変わらない特徴を示している. 特に, 水表面近くはカルマン渦の影響を強く受けているために, 大きな変動性を示し,  $Z/D$ がマイナスの領域まで広がっている.

ここで一様流中に円柱を水平に固定して行った実験の横断面形象の一部を**図-11**に示す. 流れ方向は, 奥から手前で, 撮影位置は,  $X/D=2.7$ である. ここでは, 逆方向の回転運動である対の縦渦 (模式図参照) が存在する. これらは徐々に上昇し, 上部においてIの右側とIIの左側の縦渦が新たに対を形成し, 下向きの新たな縦渦対が形成される. このように新たに発生した縦渦は, この後, 下降し, 先ほどと同様に隣の縦渦と対になる. これらが周期的に繰り返される. また, 後流域の変動幅は円柱の約2倍で, 円柱軸方向の距離に関わらずほぼ一定であった. このように, 一様流中と比較すると, せん断流中では, 円柱軸方向によって壁面や水表面の影響と水深方向の二次流れなどにより変動幅が異なり, より複雑な三次元性が存在することが確認された.

### (3) 瞬時速度分布の特徴

異なる高さ ( $Y/H=0.9, 0.05$ ) の水平断面視にPTVが用いられた結果について考察を行なう. その流速ベクトル分布よりu成分, v成分の等値線図をそれぞれ**図-12**, **図-13**に示す. 図中の円で示されたものが円柱に相当し, 流れ方向は左から右である. 横軸は $X/D$ , 縦軸は $Z/D$ で表した.  $Y/H=0.9$ の水表面に近い領域では, u成分の分布は, 後流域で減速, その他の領域, 特にその後流域との境界領域で高速であることが認められる. また, v成分は, カルマン渦により誘起された流れにより交互に横断方向の流れを示す分布を示している.  $Y/H=0.05$ の水路床に近い領域では, 壁面近傍のため平均流速としては

遅い領域であるが, 円柱後方の襟巻き渦の領域に高速域が形成されており, 特に特徴的な分布を示す. これは, 襟巻き渦, 上部の組織構造により高速の流体塊が取り込まれたためと考察される. またw成分では, 襟巻き渦形象に対応した流れの分布を示す.

次に, 円柱の中心軸上, 円柱端における縦断面視にPTVを適用した瞬時速度分布について, 考察を行なう.

**図-14**は円柱軸上の縦断面視の速度ベクトル, u成分, v成分の流速の等値線図である. 流れ方向は, 左から右である.  $X/D=0\sim 2.0$ あたりの水表面近くでは, 円柱に向かう流速ベクトルが確認され, u成分の等値線図では,  $X/D=2.0$ あたりまでの逆流域の形成が明確である. これは, 可視化によって得られた形成領域の特徴とよく一致する. また, その後方では, 下降と上昇を繰り返す速度ベクトルが認められるが, v成分の等値線図からは, より明確に上昇と下降が交互に存在していることを示している. **図-15**は, 円柱端における同様の速度ベクトル, u成分, v成分の流速の等値線図である.  $X/D=3.0$ までは比較的速度の小さな領域で, その後, 急激に上昇するベクトルが確認できる. u成分では, 逆流域はほとんど確認されず, 流下距離に従って値が大きくなっている. v成分においては, 一番値の大きい領域が, ベクトルが急激に上昇する領域と一致する. また, その領域の前では大きな下降が確認される. 特に, 斜めに上昇する流れは, 可視化形象においても特徴的であり. **図-16**は, その縦断面の可視化形象とその特徴を示した一例である. すなわち, 後流の形成領域より下流側では, 三次元性をもつが水深方向に連なりをもったカルマン渦の形象が流下方向に徐々に軸を傾斜させながら間欠的に発生している形象がビデオからも確認できる. その渦は流下するに従って, 壁面近くの構造はよく見えなくなり, 斜め上方に流れる高速の二次流れの形成が認められる. ここは, 横断面視で明らかにされた新たな壁乱流の形成領域に対応するものと思われる. また, 円柱の軸上では下降流, 円柱端では上昇流が形成される $X/D=3.8\sim 5.0$ の領域では, カルマン渦の傾斜構造と襟巻き渦の構造さらにその相互作用がその形成に重要な役割を持つと思われる.

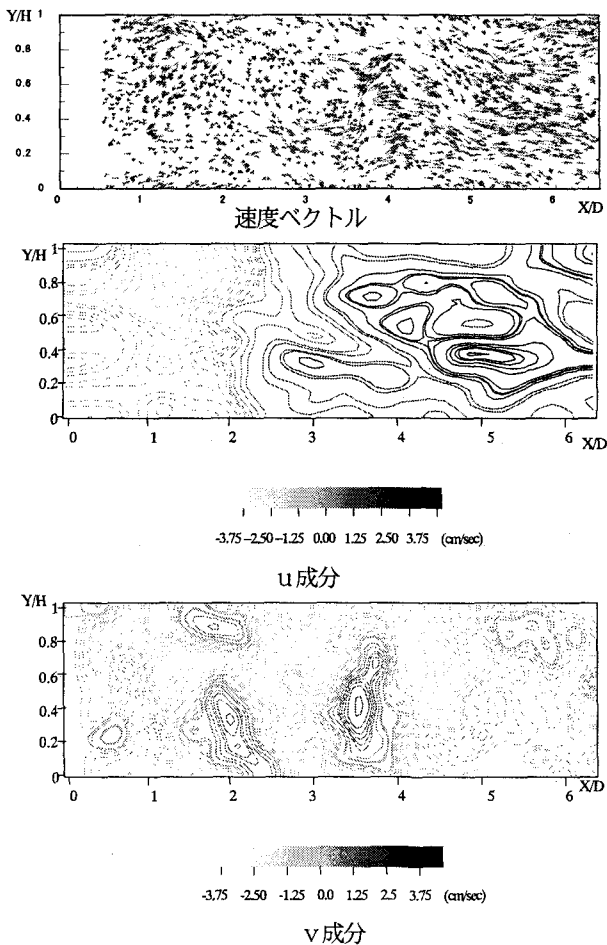


図-14 縦断面 (円柱軸, CASE5)

#### 4. 結論

せん断流中における円柱後流の組織構造の三次元性、瞬時流速分布特性について、流れの可視化、PTVを用いて検討を行い、以下のことが明らかにされた。

せん断流中における円柱の後流は、剥離せん断渦、カルマン渦、襟巻き渦によって形成され、それらの三次元性およびその周期特性が明らかにされた。さらに、その構造により誘起される特徴的な瞬時速度分布特性が明らかにされた。また、一様流における後流の形成領域の変化特性、低Re数での剥離せん断渦の存在など新たな知見も得られた。

#### 参考文献

- 1) C.H.K.Williamson : VORTEX DYNAMICS IN THE CYLINDER WAKE, Ann. Rev. Fluid Mech., 28, pp.477-539, 1996.
- 2) Yee-Meng Chiew, Member, ASCE and Foo-Hoat Lim : FAILURE BEHAVIOR OF RIPRAP LAYER AT BRIDGE PIERS UNDER LIVE-BED CONDITIONS, JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING, pp.43-55, (2000)
- 3) 楳田真也, 石田啓, 由比政年: 直立円柱周辺の局所洗

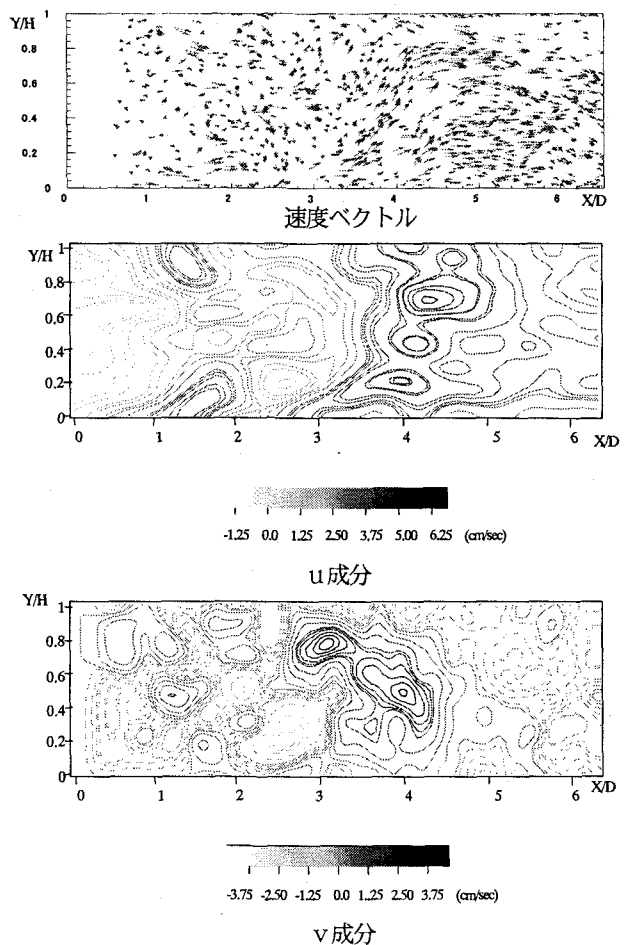


図-15 縦断面 (円柱端, CASE5)

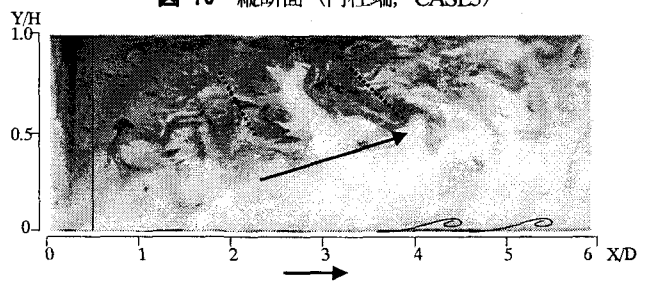


図-16 縦断面形象 (CASE5)

掘に伴う流体場の変化に関する3次元解析, 土木学会第54回年次学術講演会, II-143, pp.286-287, 1999.

- 4) C.V.Seal, C.R.Smith : The control of turbulent end-wall boundary layers using surface suction, Experiments in Fluids 27, pp.484-496, 1999.
- 5) Kourta A., Boisson H.C., Chassaing P., Ha Minh H.: Nonlinear interaction and the transition to turbulence in the wake of a circular cylinder., J.Fluid Mech. , Vol.181, pp.141-161, 1987.
- 6) Unal M.F., Rockwell D.: On vortex shedding from a cylinder, Part 1, The initial instability. , J.Fluid Mech. , Vol.190, pp.491-512, 1988.
- 7) Green R.B., Gerrard J.H.: Vorticity measurements in the near wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers., J.Fluid Mech. , Vol.246, pp.675-692, 1993. (2001.10.1受付)