

一様流中における円柱後流の 瞬時流速分布特性

原田 賢治^{*1} 佐賀 孝徳^{*2}

The Instantaneous Velocity Distribution Characteristics of Cylinder Body Wakes in Uniform Flow

Kenji HARADA^{*1} and Takanori SAGA^{*2}

Abstract

Using the flow visualization techniques with streamwise view and Particle Image Velocimetry (PIV), the three-dimensional structure in cylinder body wakes in uniform flow are investigated. Hydrogen bubbles were used as tracer in flow visualization technique. The structure of streamwise vortices and the instantaneous velocity distribution characteristic in cylinder body wakes became clear. By PIV, the motions of streamwise vortex changing with the time series are investigated. Furthermore it was shown clearly that bifurcation phenomenon play important role of the structure and the transmission characteristics of streamwise vortices.

Key Words : three-dimensional structure, streamwise vortex, cylinder body wakes, PIV

1. 緒論

自然界に存在する主要な流体である空気・水は、さまざまな流れをつくり、自然環境や動植物、人類とさまざまな関わり合いを持っている。ある時は、人類に自然災害をもたらすものとなり、一方では人類に恵みを与えるものともなる。とくに、物体周りの流れは、それに直接作用する摩擦力、圧力として、いわゆる流体力を及ぼすことから、これまでも多くの研究がなされてきている。工学では、この流体力を応用した翼理論や、流線型などの形状抵抗、摩擦抵抗の軽減など、物体周りの流れの制御が行われている¹⁾。また、スポーツにおいても、競泳の水着やヨットの世界的レースであるアメリカズカップにもその流れの制御が用いられている。

一様流中における円柱周りの流れに関する研究は、基礎的な流れであり、今日まで数多く行われ、多くの円柱周りの流れについての研究をレビューした論文²⁾

には、後流中の三次元性が、今まで不明とされてきた多くの課題を解決したことを指摘している。しかしながら、依然として不明な点が残されている。

流れの三次元性に関する研究では、開水路乱流内層における壁面領域の組織構造の考察がなされ、そこでは壁縦渦が組織構造の支配的な役割を果たし³⁾、さらに、瞬時二次流れを誘起することが明らかにされている^{4)・5)・6)}。このことは、縦渦の形成が流れの三次元構造を解明するうえで重要な視点であることを示している。また、佐賀らにより、円柱周りの三次元構造について研究が行われているが不明な点も多く残されている⁷⁾。

以上のことを踏まえ、本研究では一様流中に置かれた円柱後流において、円柱後流の組織構造の三次元性に注目しながら、その横断面形象の時系列特性の考察を行なう。さらにPIVを用いて、流れの三次元性が誘起する横断面形象の瞬時流速分布の特性について考察を行なう。

^{*1} 環境建設工学専攻

^{*2} 土木建築工学科

2. 実験方法および解析方法

2.1 実験方法

実験装置は、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を用いた。開水路流れの中に物体を水平に挿入し、物体上流側75cmに整流用のハニカムを設置し、下流端には水位調節用の堰を設置した。実験方法の概略を図-1に示す。

本研究では、水平円柱周りの流れが横断面視により可視化され、その形象がデジタルビデオカメラにより撮影された。水素気泡は陰極にタングステン線、陽極に銅板を用い、それに500Vの電圧を加え、水の電気分解を行なうことでタングステン線より発生させた。物体の中心を原点とし、流下方向をX、水深方向をY、物体軸方向をZとする。これらは物体の代表長さで無次元化した値で表示する。

使用した円柱は $D=3.21(\text{cm})$ であり、実験条件は円柱周りのレイノルズ数 $Re_d=577$ 、水深 $H=12.2(\text{cm})$ 、平均流速 $U=2.05(\text{cm}/\text{sec})$ であり、可視化には水素気泡法を用いた。

2.2 解析方法

本論文における瞬時流速の計算にはPIVが適用された。実験より得られた横断面可視化形象の連続画像を流体解析ソフト「FlowPIV」に取り込み、可視化画像の濃度の情報から、輝度差累積の逐次棄却法を用いた濃度パターン追跡アルゴリズムより、瞬時流速分布を計算した。また、同時に3枚の画像より、水素気泡の追跡を直接行なうPTVのよる解析も行なった。

3. 実験結果および考察

図-2は円柱周りの流れの領域を模式図で示している。これまで円柱背後には、はく離せん断層に囲まれた形成領域と、カルマン渦に代表される交互に渦運動を引き起こす後流の存在が知られている。

3.1 渦の横断面形象

今回の実験条件では、カルマン渦の周期が約8.06秒であり、図-3にこの約8.06秒間を12段階に分けた(各画像の間隔は約0.73秒)時系列変化を画像で示す。また、流れ方向は紙面奥から手前であり、可視化撮影している形象は上から下へと発生するカルマン渦である。また、可視化画面の位置は $X/D=3.30$ である。図-3の時系列形象写真の右上に示す、②～⑤は図-2の模式図内

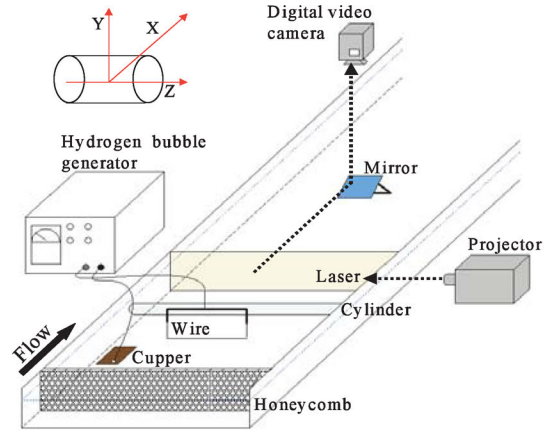


図-1 実験装置

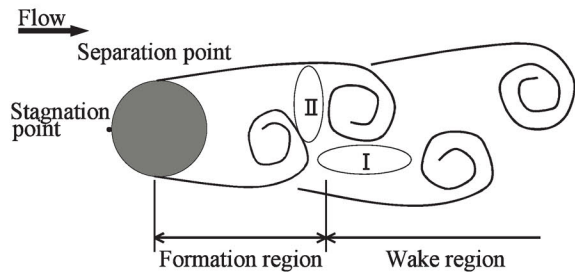


図-2 円柱周りの流れ領域

の領域Iに⑥～⑨は領域IIの場所に位置し、①、⑩～⑫は渦の運動と離れた領域である。

この周期を片側のせん断層から発生するカルマン渦の発生する平均周期と考え、これによりストローホール数 $St(=fD/U)$ 、 f :円柱背後に生じる渦の振動数、 D :円柱直径、 U :平均流速)を求めると0.194となる。円柱のストローホール数は、従来の結果より0.2付近になることが知られており、今回の実験も同等の数値を示している。

図-3-①でカルマン渦の形成が確認され、図-3-②～⑤では円柱規模の巻き込み作用が発生すると同時に、流れ方向に渦軸を持つマッシュルーム型の縦渦が確認できる。その後の図-3-⑥～⑨では、縦渦の渦軸が垂直になったため図-3-②～⑤のようなマッシュルーム型の縦渦は確認できないが、水深方向に対をなす縦渦の軌跡が確認でき縦渦がカルマン渦に対して連続的に発生していることが認められる。この軌跡は水素気泡が水より軽いいため他の部分に比べ縦渦の中心に集まるためと考えられる。この縦渦構造の発生は、遠心力不安

定に起因すると考えられている⁸⁾。さらに、Z軸方向の縦渦の長さを測定してみると $\lambda_z/D=0.8\sim 1.0$ までの間に集中しており、Mode Bに対応している。図-4にこれまでに実験されてきたRe数と λ_z/D の関係を示す。本実験のRe数は577であり従来の結果と一致していることが確認できる。

3.2 水素気泡の横断方向時系列分布特性

図-6は横断面視における $Y/D=0.00, -0.25, -0.50, -0.75, -1.00$ の位置において、1ピクセル(実寸約0.2mm)の幅の画像を1/30秒づつ連続して並べた合成画像である。また、合成画像は約70秒間(約2100枚)の連続画像であり、時間軸の変化は右から左である。図中にaと表記してある部分の形象は図-3の時系列画像の時間と一致している。図-5は合成画像を作成した位置を示した図である。

すべての(a)~(e)までの合成画像の時間軸方向に見られる断続的な形象の発生周期は、カルマン渦の発生周期と同様であるため約8秒となっている。

$Y/D=0.00, -0.25$ ではまずZ軸方向に断続的な水素気泡の集まりが確認でき、その後時間軸方向に気泡が薄く散乱している。これらは図-3-⑥~⑧の画像の場所に対応している。また、Z軸に水平な形象とそうではなく斜めに傾いた形象とがあることも確認できる。

$Y/D=-0.50$ では水素気泡が筋状の連なった形象になり、Z軸方向への変動が見られる。また、水素気泡が時系列方向に集中している位置と $Y/D=-0.75$ で縦渦が確認できる位置が一致している。この $Y/D=-0.75$ では、はっきりとした縦渦が確認でき、Z軸方向に変動があるものの縦渦が発生した後に筋状に水素気泡が伸び、次の縦渦が発生していることが確認できる。さらに、縦渦が横の縦渦と合体し大規模化している縦渦もある。この大規模化している縦渦の発生と $Y/D=0.00, -0.25$ で斜めに傾いている形象との位置がほぼ一致しているため、何らかの関係性があるものと考えられ、今後解明すべき課題のひとつである。

$Y/D=-1.00$ の位置までは縦渦の発生する範囲の端となり、縦渦が確認できる場所とそうでない場所がある。 $Y/D=-0.70$ の縦渦と $Y/D=-1.00$ の縦渦の発生位置を見比べてみると、 $Y/D=-1.00$ で見られる縦渦は $Y/D=-0.75$ で大規模化している縦渦とほぼ一致している。この関係性も今後さらに詳細に検討していく必要がある。

また、あらゆる高さにおいても多少変動はあるが、時系列方向の連続性が認められ、円柱周りに形成される縦渦の時空間特性が示された。

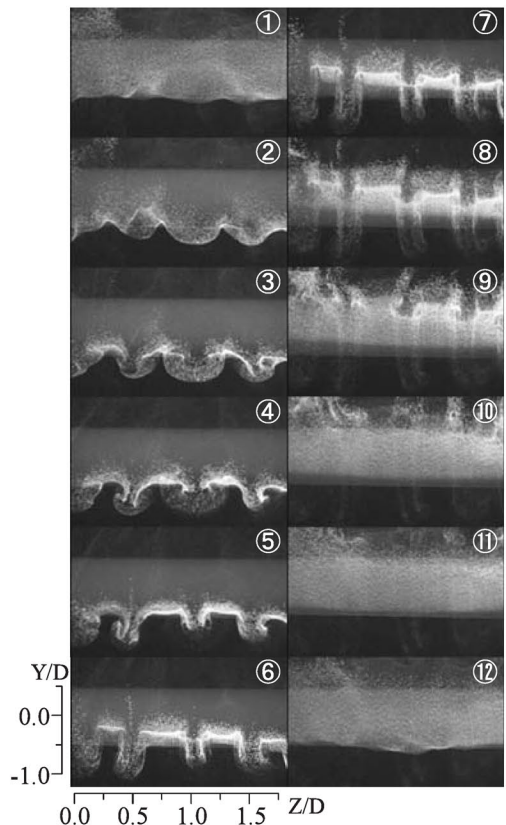


図-3 時系列可視化形象

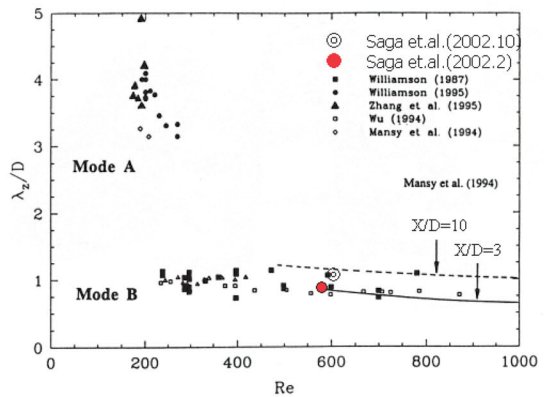


図-4 Re数と λ_z/D の関係

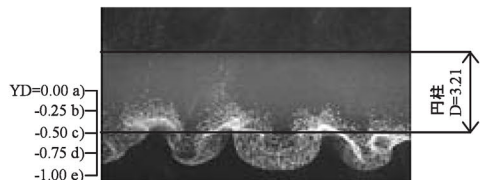


図-5 合成画像の作成位置

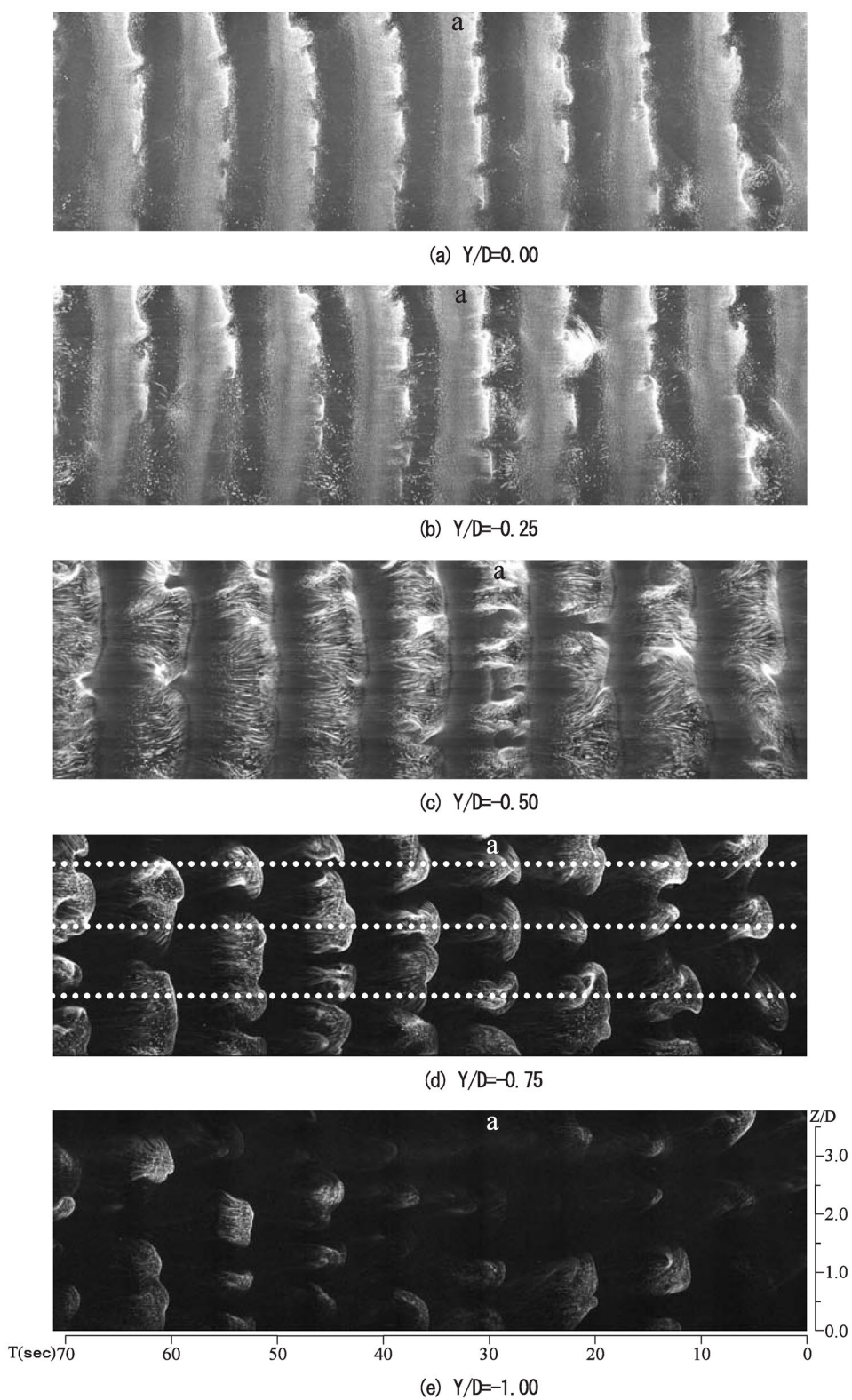


図-6 水素気泡の横断面可視化時系列分布

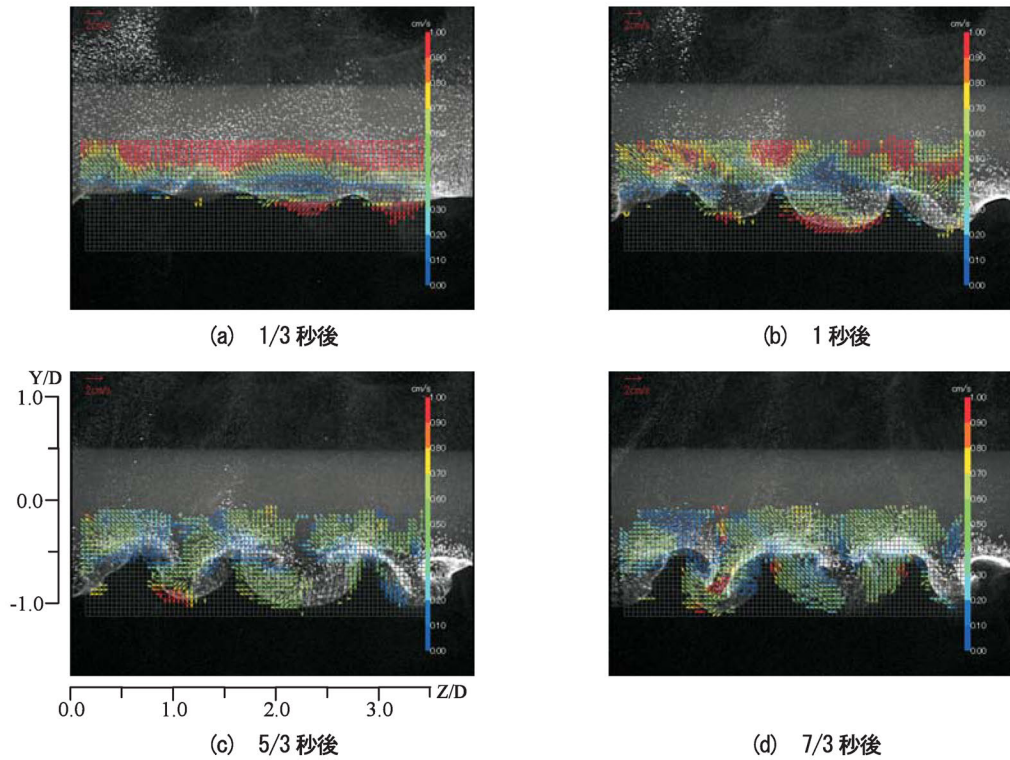


図-7 可視化形象と瞬時速度ベクトル

3.3 PIVによる瞬時流速分布特性

横断面視で観察される縦渦の動きをさらに詳細に検討するためにPIVにより、瞬時速度情報を求めた。また、横断面視で縦渦が観察されるのは約3秒程度であった。そこで発生してから1/3秒後、1秒後、5/3秒後、7/3秒後の画像とそれぞれの画像から1/30秒進んだ画像よりPIVによる解析を行った。

図-7は可視化形象と瞬時速度ベクトルを示す。図-8は水深方向の速度成分 v の分布であり、水面方向に流れが上昇している領域を紫又は青色、下降している領域を赤又は緑色で示す。さらに水平方向の速度成分 w の分布を図-9に示す。左への流れの領域を紫又は青色、右への流れを赤又は緑色で示す。

図-7～図-9の各画像(a)～(d)は同時刻の結果であり、これらのベクトル、 v 成分、 w 成分の分布は可視化形象内の渦運動により誘起された特徴を示している。

まず(a)のベクトル図では円柱下端($Y/D=-0.5$)を中心として、円柱端より離れるほど速度が強くなっていることが確認できる。 v 成分の分布図より円柱端を境界として Y 軸のプラス方向では流れが上昇する領域であり、マイナス方向では下降する領域であることが示された。

w 成分の分布図より $Z/D=0\sim 0.8, 1.4\sim 2.1$ の間において Z 軸のマイナス方向への速度成分、その他では Z 軸のプラス方向の速度成分を持っている。

(b)のベクトル図では、可視化形象の凹凸に伴い Y 軸方向に波状の分布が認められる。 v 成分の分布図で(a)と同様に流れが上昇する領域と下降する領域が円柱端を境界として確認できたが、(a)とは異なり Z 軸方向に大小の分布が現れている。 w 成分の分布図からは図-9(c)に見られる交錯する特徴の前兆が現れている。

(c)のベクトル図では、(b)の特徴を持ち続けているが(a)と(b)ほどの速度変化は見られない。 v 成分の分布図では(a)と(b)で流れが上昇しただけだった領域の場所に下降する領域が楔形状に分布している。この下降流は Z/D が約0.8の間隔で現れている。 w 成分の分布図からは左右の流れが交錯し、千鳥格子状の分布形象となっている。交錯する点については円柱端付近である。

最後に(d)について示す。ベクトル図と w 成分の分布図については(c)と同様の傾向である。 v 成分の分布図については(c)とは逆で、(a)と(b)で流れが下降するだけだった領域の場所に上昇する領域が伸びている。

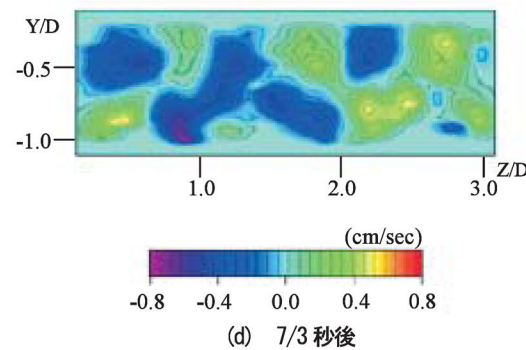
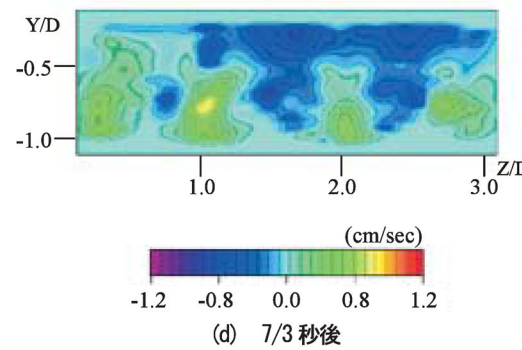
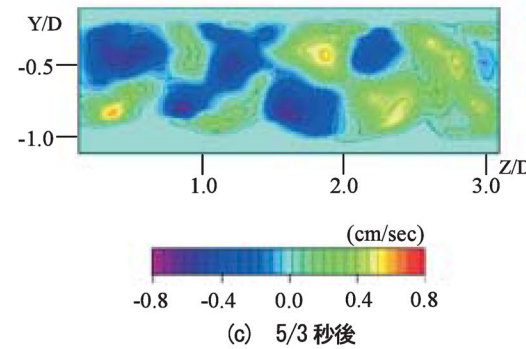
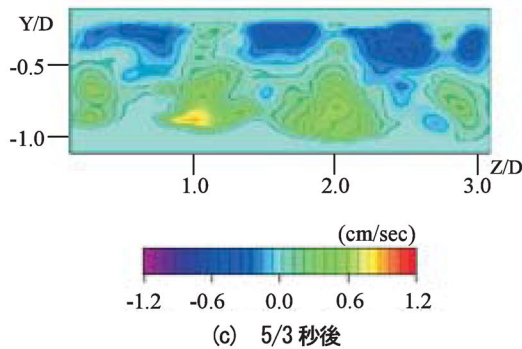
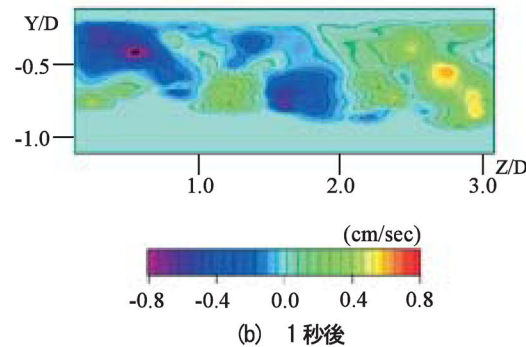
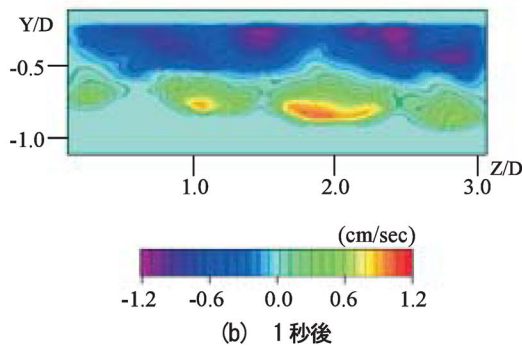
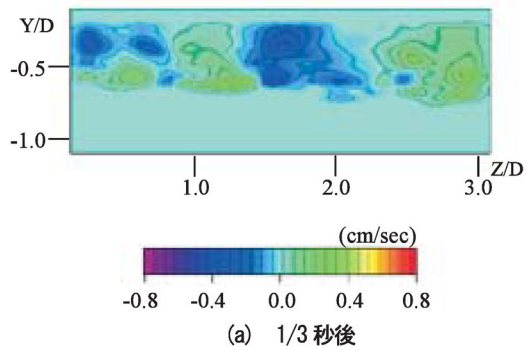
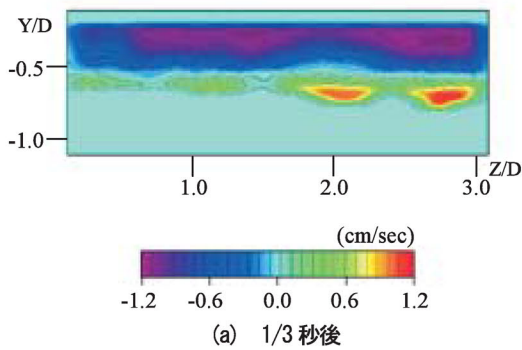


図-9 v成分の分布

図-10 w成分の分布

また、図-9-(a), (b)において見られる分岐現象は、水平断面、横断面における PIV でも確認されており^{10), 11)}、縦渦が相反する回転成分であるカルマン渦の三次元性の伝達に重要な役割を持つ事を示唆しており、意義深いと思われる。

4. 結論

一様流中に置かれた円柱後流の組織構造の三次元性に注目しながら、その横断面形象の時系列特性と PIV を用いた横断面形象の瞬時流速分布について考察を行い、以下の主要な結論を得た。

- (1) 円柱後流の横断面形象には、ストローハル数に一致する周期的なカルマン渦が形成され、その周期内の 3 次元性を示すマッシュルーム型渦形象の時系列変化の構造的特徴が示された。
- (2) 長時間(70 秒)の連続的な横断面画像から横断面可視化形象の時系列の合成図が、Y/D 別に作成され、その時空間構造の特徴であるその横断方向分布特性と平均スケールが $\lambda_y/D=0.8-1.0$ が示された。また、その分布の特徴の相互関連と渦の大規模化、形成領域の特徴が示された。
- (3) PIV により、円柱後流の横断面形象には、分岐現象が存在し、その境界には、縦渦が重要な役割を果たしている。また、分岐の位置はほぼ円柱端である。さらに、縦渦形象と流速分布特性が一致し、瞬時の速度場が渦形象に誘起されることが明らかにされた。

文献

- 1) J.C.R. Hunt: INDUSTRIAL AND ENVIRONMENTAL FLUID MECHANICS, *Annu. Rev. Fluid Mech.* Vol.23, pp. 1-41, 1991.
- 2) C.H.K. Williamson: VORTEX DYNAMICS IN THE CYLINDER WAKE, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.28, pp.477-539, 1996
- 3) 大成博文, 佐賀孝徳, 斎藤隆: 開水路乱流内層の縦渦構造, 土木学会論文集, 第 367 号, pp.135-144, 1985.
- 4) 佐賀孝徳, 大成博文, 渡辺勝利, 斎藤隆: 開水路乱流内層の渦構造と流速波形の相互関係, 土木学会 論文集, 第 393 号 pp.131-140, 1998.
- 5) 佐賀孝徳, 大成博文, 渡辺勝利, 杉本博幸: 開水路乱流側壁領域の組織構造と二次流れの形成機構, 土木学会論文集, No. 677/II-55, pp.33-41, 2001.
- 6) 佐賀孝徳: 壁乱流の組織構造と速度変動の同時測定について, 土木学会応用力学委員会乱流研究小委員会中間報告書, pp.30-34, 2001.
- 7) 松田智恵子, 佐賀孝徳: 一様流中における円柱後流の三次元構造, 徳山工業高等専門学校研究紀要, 第 27 号, 2003.
- 8) 奥山宗重・大蔵信之・早藤英俊, 渦輪に現れる遠心力不安定性, ながれ 21, pp.78-88, 2002.
- 9) 松田智恵子, 深江忍, 佐賀孝徳: 円柱周りの流れの三次元構造 2, 第 55 回土木学会中国支部研究発表概要集, pp.83-84, 2003.
- 10) 原田賢治, 佐賀孝徳, 渡辺勝利: 物体周りの流れの三次元構造に関する研究, 第 58 回土木学会中国支部研究発表概要集, pp.95-96, 2006.

(2006. 9. 11 受理)