

一様流中における円柱後流の三次元構造

松田智恵子*¹, 佐賀孝徳*²

The Three Dimensional Structure of Cylinder Wakes in Uniform Flow

Chieko MATSUDA*¹, Takanori SAGA*²

Abstract

Using the flow visualization techniques with streamwise view, plan view, whole view and PTV, 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 in cylinder body wakes and its transmission characteristics became clear. And the three-dimensional structure, for example spanwise scale and time-space instability of streamwise vortices, changing with Reynolds number are clarified. By PTV, 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, PTV

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、自動車工学などあらゆる工学の流体力学分野で数多く観察される基本的で重要な流れである。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、これまでも多く研究がなされてきている。流体力を応用し、翼による揚力、抗力を制御する飛行原理、流線型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事例である¹⁾。

物体周り、特にその素過程として一様流中における円柱周りの流れに関する研究は、今日まで数多く行われてきているが、物体後流中の流れ構造については、明らかとされていない部分がある。しかしながら、後流中の三次元性に注目することにより、今まで多く謎とされていたことが最近の文献²⁾で解明されてきている。Williamson

によれば、後流中の三次元性の研究は、この分野の研究を劇的に進展させる鍵であるとされる³⁾。

また、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⁴⁾、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^{5)・6)・7)}。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。

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周りの流れの研究を行い、円柱後流の組織構造の三次元性、時系列特性を縦渦の挙動に注目しながら、可視化により検討する。さらにPTVを用いて、流れの三次元構造が誘起する瞬時流速分布特性について解析、考察を行う。

*¹ 環境建設工学専攻

*² 土木建築工学科

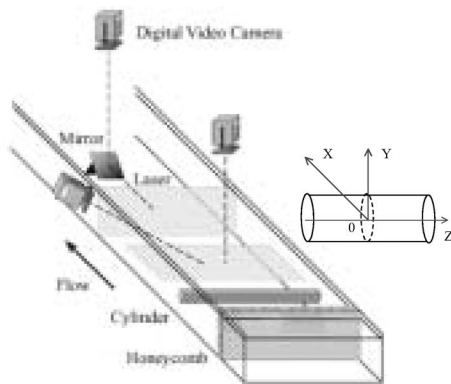


図-1 実験方法の概略

2. 実験方法および解析方法

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。開水路流れの中に円柱を水平に挿入し、円柱上流側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を横断面視、水平断面視および水路上方と側壁からの全体視により可視化し、その形象をデジタルビデオカメラにより撮影した。流れの可視化は水素気泡法、およびフルオレセインナトリウム水溶液を用いた染料流脈法（比重1.005）で行った。一様流中では、円柱の中心を原点とし、流下方向をX、水深方向をY、円柱軸方向をZとする。これらは円柱の直径Dで無次元化した値で表現する。

実験条件は表-1に示すとおりで、レイノルズ数、平均流速は、流下断面積の損失による流速の増加を考慮した値を示している。

解析方法は、可視化実験により得られた粒子映像の観察とPTVによる。PTVは可視化映像を1/15秒ごとに画像として3枚取り込み、各画像の粒子を画像処理ソフトにより着色する。その後、各画像を重ね合わせ、それぞれの粒子の軌跡を求めることで瞬時流速成分を求めた。また、それらを基にして変動流速分布、渦度を計算した。

3. 実験結果および考察

3.1 横断面形象

物体背後の流れは、カルマン渦に代表される後流域とその渦が発生するまでの形成領域とに分かれる。さらに、形成領域内には流れが停滞している死水域、せん断渦が

表-1 実験条件

| | レイノルズ数 $Re=Um*D/\nu$ | 平均流速 Um (cm/s) | 水深 H (cm) | 動粘性係数 $\nu*10^2$ (cm^2/s) | 可視化条件 |
|--------|-------------------------|---------------------|----------------|----------------------------------|------------------------------|
| Case1 | 599 | 1.675 | 10.9 | 0.897 | 横断面可視化 |
| Case2 | 612 | 1.709 | 10.8 | 0.897 | |
| Case3 | 611 | 2.293 | 10.4 | 1.204 | |
| Case4 | 600 | 1.676 | 10.8 | 0.897 | 水平断面可視化 |
| Case5 | 616 | 1.723 | 10.8 | 0.897 | |
| Case6 | 1618 | 4.520 | 12.0 | 0.897 | |
| Case7 | 254 | 0.981 | 13.0 | 1.237 | 水平全体視および 水路側壁からの 斜め全体視 |
| Case8 | 270 | 1.045 | 12.2 | 1.237 | |
| Case9 | 294 | 1.138 | 11.2 | 1.237 | |
| Case10 | 333 | 1.288 | 9.9 | 1.237 | |
| Case11 | 383 | 1.474 | 13.1 | 1.237 | |
| Case12 | 418 | 1.609 | 12.0 | 1.237 | |
| Case13 | 482 | 1.857 | 10.4 | 1.237 | |
| Case14 | 506 | 1.951 | 9.9 | 1.237 | |
| Case15 | 424 | 1.678 | 12.0 | 1.271 | 水平断面可視化 |

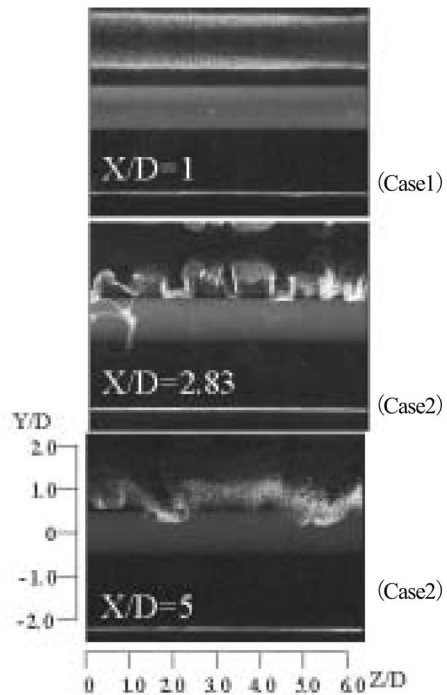


図-2 横断面形象

形成される、はく離せん断層が存在する。本章では、 X/D 、 Y/D の変化に伴う、円柱背後の形成領域内の三次元性について考察する。

図-2に可視化位置、 X/D の変化に伴う横断面形象の変化を示す。流れは紙面奥から手前である。 $X/D=1$ では形成領域内であるため三次元的な挙動は見られず、水素気泡が下流方向へ一様に流れる。 $X/D=2.83$ は形成領域の終端にあたり、縦渦が形成されて、流れが三次元化している。 $X/D=5$ では後流が形成され、カルマン渦と縦渦が発生して円柱周りの流れが三次元化し、さらに複雑化している。

図-3は形成領域内における Y/D による形象の変化を示したものである。形成領域内において X/D を1から1.75まで段階的に変化させ、さらに各条件において Y/D を

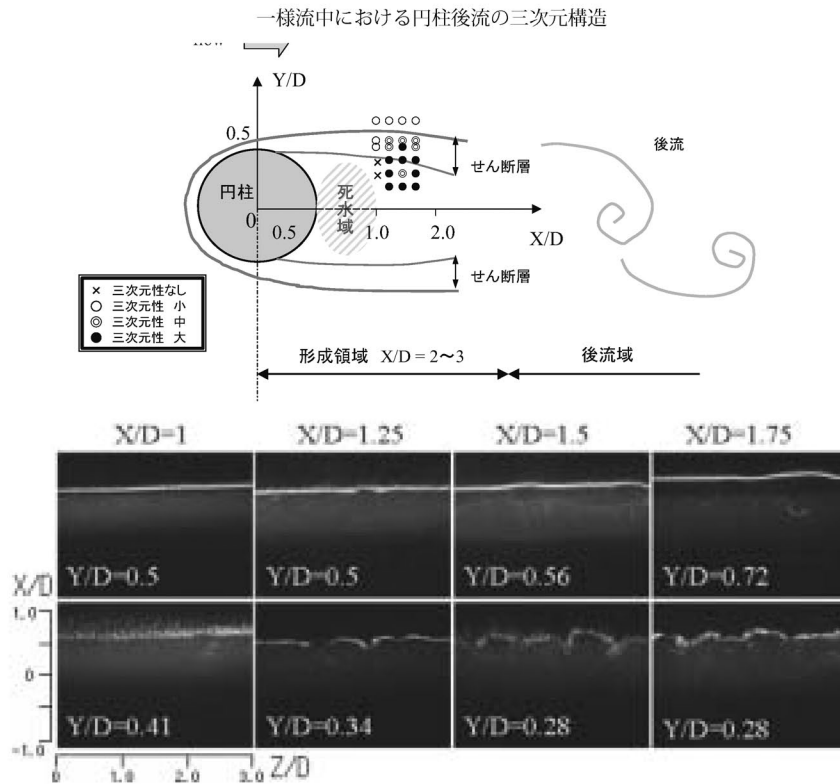


図-3 形成領域内における Y/D による横断面形象の変化 (Case3)

0.72 から 0.28 まで変化させた。円柱の端部は、 $Y/D=0.5$ に当たる。このポイントは、はく離せん断層の境界におよそ対応することから、横断面形象に何らかの変化が見られるものと想定した。

$X/D=1$ では $Y/D=0.5$ 以上の領域において、図-2 にも示した通り、トレーサーは一様に流下する。一方、 $Y/D=0.41$ 以下の領域は死水域であるため、流れが停滞しており流下速度を失った水素気泡は上昇している。

$X/D=1.25$ では $Y/D=0.5$ の領域にさしかかった時点で、まったく一様には流下せず、形象にやや変動が見られ始める。さらに Y/D を下げると、流れには流下以外の成分が見られるようになり、一部にはマッシュルーム型渦のような形象が見受けられる。

$X/D=1.75$ では、 $Y/D=0.72$ においても三次元的な流れが見られ、マッシュルーム型渦の一部分が確認されるようになる。これらの形成領域内における流れの三次元化は、カルマン渦が形成される過程にある円柱規模の巻き込み流れの影響を受けるためである。

ここで、横断面形象における円柱後流の縦渦の挙動を図-4 に示す。各形象は 0.6 秒間隔で $X/D=2.83$ である。円柱端から流下するトレーサーがその上部より発生する巻き込み流れに移流しながら縦渦を形成し、巻き込み流れの方向に従って移動している様子が確認される。この

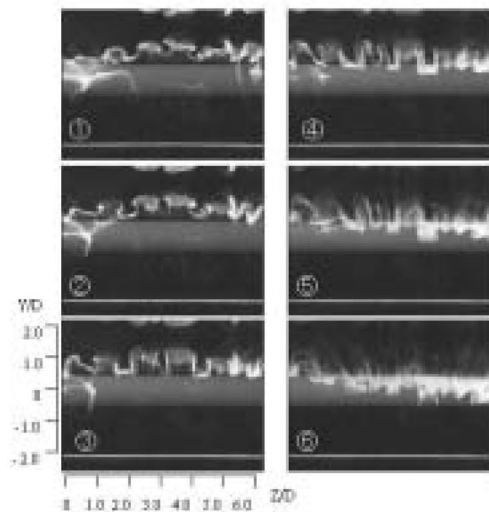


図-4 縦渦の挙動 (Case2)

とき、縦渦の中心部にはトレーサーが集中し、尾を引くように筋を上方に残す。このように筋を残す形象は水平断面形象においても観測された。さらに、流れの全体視を行うことにより、この形象を明確にとらえることができた。その詳細については全体視についての考察で示す。

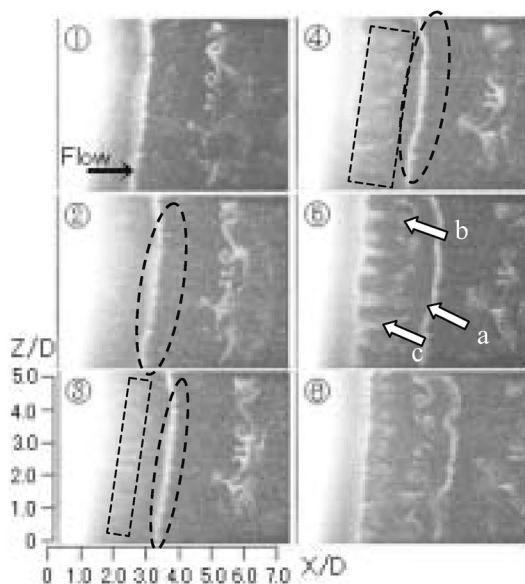


図-5 水平断面形象 (Case4)

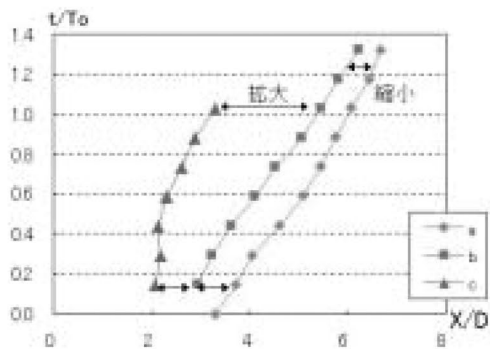


図-6 各形象の位置関係の変化

なお、この一連の運動の周期は6.8秒であった。この周期を片側のせん断層から発生するカルマン渦の平均周期と考え、これよりストローハル数 $St (=fD/U)$ 、 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) を求めると0.197となり、これまで明らかにされたカルマン渦の結果と一致する⁸⁾。また、この縦渦構造の発生は、遠心力不安定⁹⁾に起因すると考えられる。

3.2 水平断面形象

図-5に水平断面形象の時系列変化を1秒間隔に示す。流れは紙面左から右である。スリットの位置は $Y/D=0.4$ でスリット厚はスリット位置を中心に10mmずつ上下に広がっており、計20mmである。円柱上側を流下したトレーサーは形成領域内では一様に流下するが、後流を形成する点に至ると一部が消失する。その後、消失した部分を境に円柱軸方向の1本の線となり、さらに流下していく

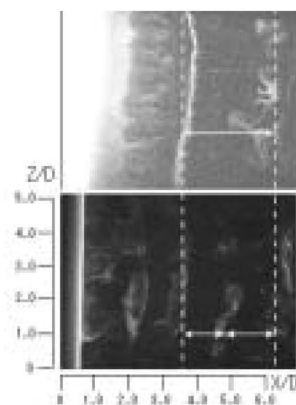


図-7 水平断面形象 (Case4, Case5)

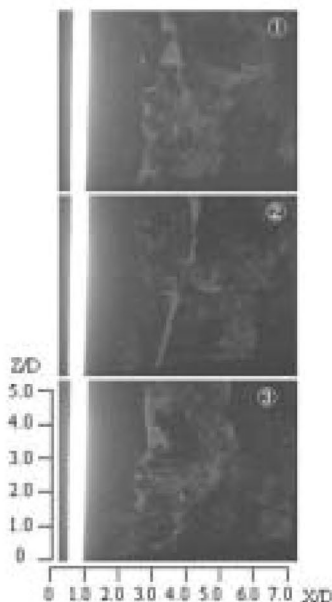


図-8 高 Re 数における水平断面形象 (Case6)

と上流側にマッシュルーム型の渦が出現する。この際、形成領域内に残されたトレーサーに、このマッシュルーム型の筋と連動するような流下方向への筋状の形象が確認される。横断面形象の場合は、巻き取られるトレーサーが下流から上流方向へ筋を残すのに対し、水平断面形象では逆に、巻き取られずに残されたトレーサーが円柱から下流方向へと筋を残している。これら2種類の筋の残り方には、互いに繋がっているなどの相互関係があると考えられる。

同図中⑤には線 (a) と、マッシュルーム型の渦 (b)、そして筋状の形象 (c) が明確に確認される。「線」は水平面での巻き込み運動の先端 (全体視ではないので必ずしも「先端」とは断言できないが) が流下する様子を示し、「渦」は縦渦の挙動にも示されたように、縦渦が巻き

込み運動に伴って流下しながら回転し、水平断面に出現している可能性が考えられる。中でも上流側に発生する筋については、反対側のせん断層からの巻き込み流れも流下とともに存在してくることから、両者の相互関係を今後詳細に調べる必要がある。

図-6 に水平断面に確認された各形象の位置関係の変化を示す。縦軸は流下時間をカルマン渦の発生周期で無次元化した値、横軸は各形象の位置 X/D を表し、グラフは左より順に、c は筋状の形象、b は渦、a は線の形象の移動を表す。なお、筋状の形象は一瞬しか確認されないが、発生後は残されたトレーサーと同化して流下するため、流下の先端位置を測定した。これより、線と渦の形象は流下するに従いその位置関係が狭まっていくことが確認され、それとは対照的に、筋状の形象と渦との間隔は流下するにつれて次第に離れていく。本研究においては、円柱上側のせん断層の巻き込み流れのみを可視化しているが、この傾向には反対側からの巻き込み流れの発達も深く関係していると考えられる。この場合、筋状形象と渦の間に下側からのカルマン渦が入り込み、渦の成長によって発生段階より渦径が増大していくため各形象の流下距離に差が生じ、結果としてマッシュルーム型渦は流下方向に追いやられ、筋の流下は上流側で足止めされる形となる。また、図-12 (Case15) にもマッシュルーム型渦の形成される様子が観測されたが、この断面においては、線状形象は発生しなかった。

図-7 に可視化方法の相違による形象の変化を示す。上図は水素気泡による可視化、下図は染料による可視化である。染料による可視化は $Y/D=0.17$ でスリット厚は 19 mm である。水素気泡と異なる点として、形象の間隔が短いということが挙げられる。その間隔は水素気泡の場合の約 1/2 で、これは両側からのカルマン渦による可視化形象が認められるためである。

図-8 に高レイノルズ数における水平断面形象を示す。Re=2088 で、各画像は 1 秒間隔である。Re=800 でも見られた形象が瞬間的に観察されたが、流れが速いため変動が激しい。トレーサーが巻き取られ雲状に集まり流下していく周期は約 2~3 秒であった。

3.3 全体視

本研究においては、流れの全体像を捕らえるためにスリットを用いない全体視を行った。これにより、今まで断片的に見えていたそれぞれの形象に関連性を見出すことが可能となった。図-9 にレイノルズ数の変化による全体視の変化を示す。図の左列は水路上方から水平面を捕らえた全体視で、右列は下流側の水路壁から円柱後流の斜め全体視を行ったものである。ここでは流速によって

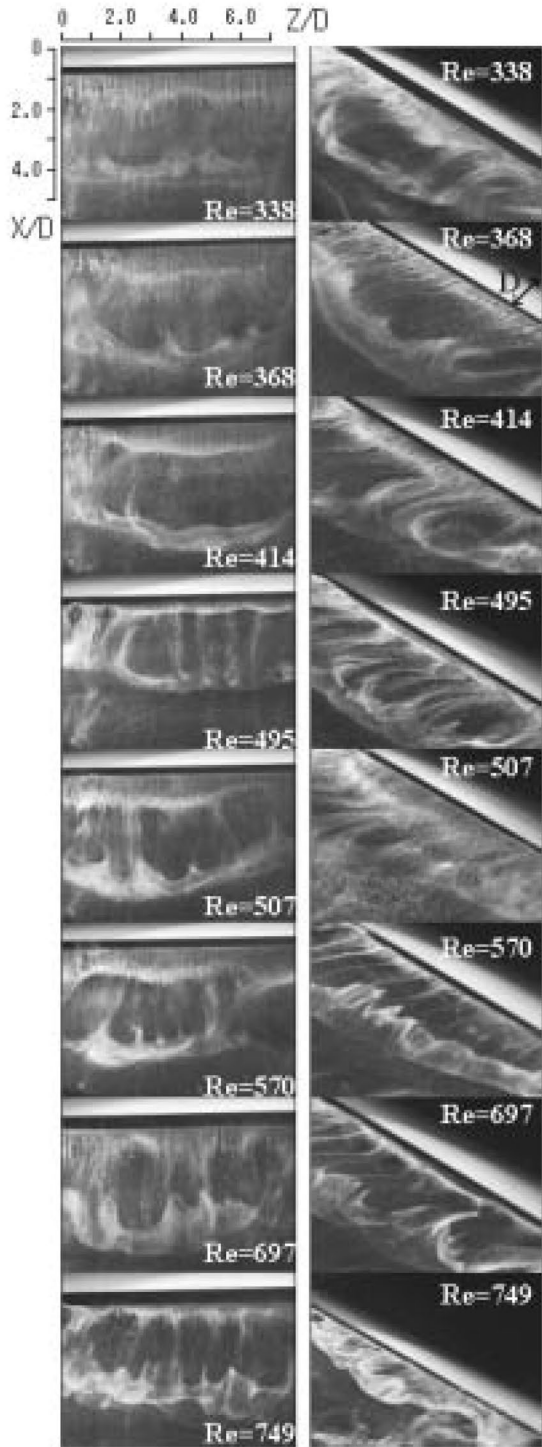


図-9 全体視 (Case7~Case14)

形象の発生に変化が生じている。Re=300 後半では、カルマン渦形成時にトレーサーが巻き取られる際に尾を引く現象は見られないが、Re=500 付近になると頻繁に発生するようになる。特に Re=495 の全体視では水平全体視・斜

め全体視の両方において、「尾」がトレーサーを発生させるタングステン線の位置まで伸びていることが確認される。これは図-10の斜め全体視の時系列変化でも観測された。各画像は1秒間隔で、トレーサーの流下・巻き取り、尾の発生が示されている。尾は、横断面形象で確認された縦渦の回転成分である可能性が高く、これが次のカルマン渦の形成部分までに伝わっている。すなわち、縦渦の回転成分は次に発生する縦渦に伝播していると考えられ、後流の三次元性は次から次へと伝播していると予想される。

流速が上昇すると尾の発生する間隔は狭まり、また流れの三次元化やカルマン渦の発生周期が早まるためトレーサーが途切れてしまい、全体像が捕らえにくくなってしまう。そうして $Re=495$ 以降の形象を観察すると、流速が速まるにつれて尾の連続性は減少していく。 $Re=749$ の水平全体視では連続性が失われ、水平断面形象で観測された筋状形象が生じるようになる。

以上の結果より、次のような構図が浮かび上がる。まず、円柱下側からカルマン渦が形成され、流れが集中した部分に尾を引く現象や筋状形象、つまり縦渦の成分が発生する。断面視においては、これらが巻き込み流れを伴いながら流下することによって、マッシュルーム型の渦、縦渦の形が確認されるようになり、その後、この縦渦は、反対側のせん断層から発生する縦渦に自身の回転成分を受け渡す。この際に、回転成分を受け渡す縦渦の位置は互いに入れ違いとなり、縦渦の回転部分を共有する形となって重なる(図-18参照)。

図-11に縦渦の円柱軸方向の発生間隔($=\lambda z/D$, λz : 縦渦の発生間隔, D :円柱の直径)とレイノルズ数の関係を示す。本実験での $Re=800$ 付近における縦渦発生間隔を測定した結果、 $\lambda z/D=0.96$ であった。これより、その発生間隔は円柱径にほぼ等しく Mode B となり、従来の傾向と一致する¹⁰⁾。また、図-9では $Re=338\sim 414$ での水平全体視において、縦渦の発生間隔が円柱径の3~4倍となる Mode A および等倍となる Mode B の両ケースが発生している。さらにレイノルズ数が増大すると発生間隔は Mode B へと移行する。

3.4 瞬時流れの構造特性

水素気泡による水平断面視 (Case 15) の時系列の形象変化を PTV で得られた結果をもとに考察を行う。なお、この実験は、水素気泡の発生位置は $X/D=1.18$, $Y/D=-0.83$ であり、スリットは $Y/D=-0.32$ の位置で可視化を行った。その結果を図-12~16に示す。流下方向は紙面上から下で、縦軸は X/D , 横軸は Z/D で表した。各画像は1秒間隔で、1秒ごとに(a), (b), (c), (d)と表すことにする。

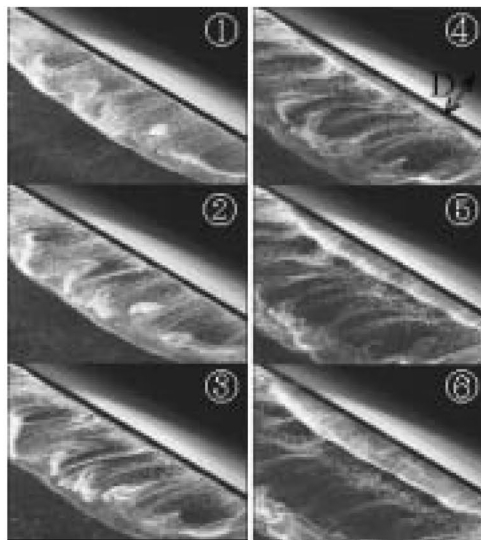


図-10 斜め全体視 (Case10)

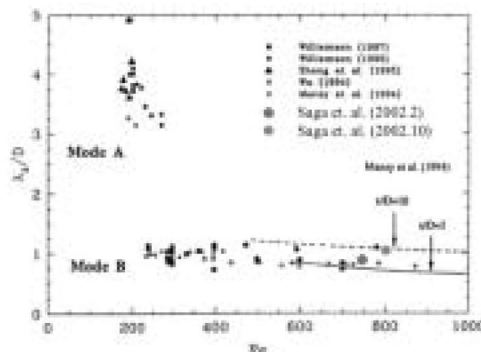


図-11 $\lambda z/D$ と Re 数の関係³⁾

図-12は水平断面形象の3秒間の変化を時系列で示したものである。横断面視、水平断面視と同様に縦渦の筋を引く形象が見られる。渦や筋の形象変化の説明については水平断面形象、全体視の節で述べたので省略し、ここでは速度情報との関係を含めて、それらの時系列における変化の特徴を追っていくことにする。ここで、図-12の縦渦対を左から順に縦渦①, ②, ③とし、それに対応する左右の渦, 筋をそれぞれ $1V_L$, $1V_R$, $1S_L$, $1S_R$, $2V_L$, $2V_R$, $2S_L$, $2S_R$, $3V_L$, $3V_R$, $3S_L$, $3S_R$ と表す。これらの渦と筋の形象は図-17の模式図に対応する。特に回転の様子が明確に現れていた $2S_R$ に注目すると、水平断面形象で述べられた筋にも図-19に示すようならせん状の回転が存在することが明らかになった。

図-13に瞬時速度ベクトルを示す。ほとんどの速度ベクトルが流下方向に向かっているが、一部、逆向きのベクトルが認められる。これは図-12の流れが逆流していた領域に相当し、この領域は、ベクトルが短いことから、流

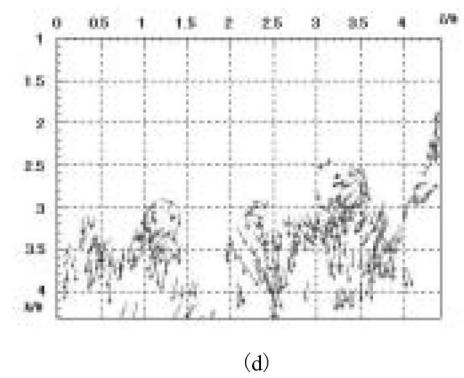
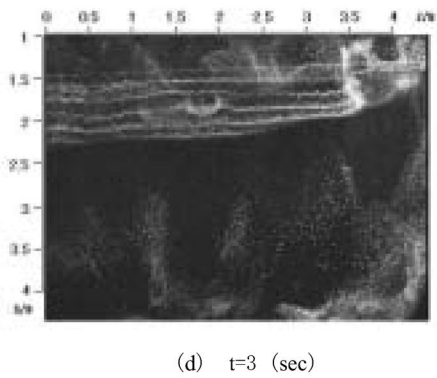
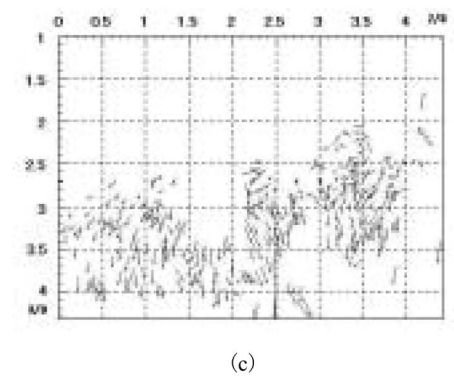
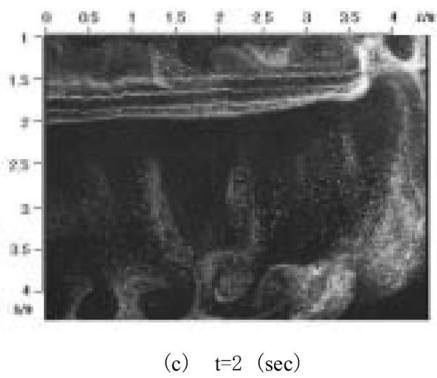
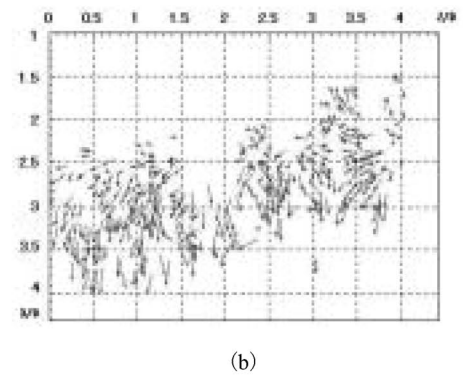
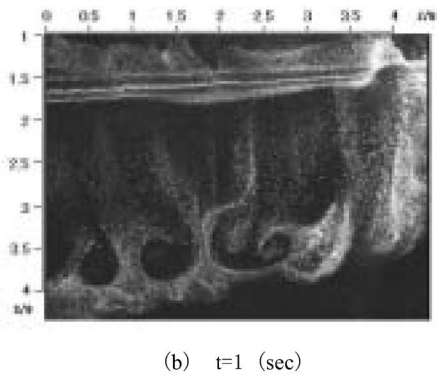
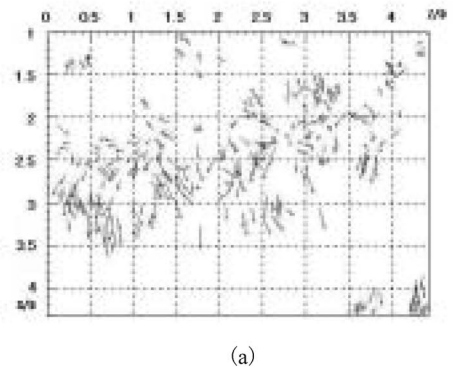
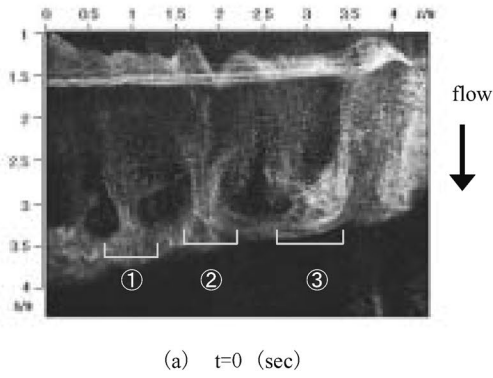


図-12 水素気泡による水平断面形象 (Case15)

図-13 瞬時速度ベクトル

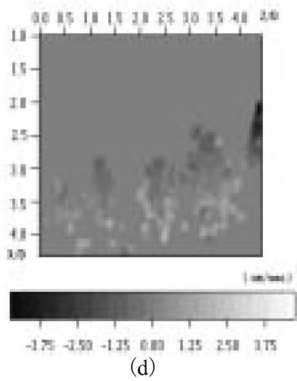
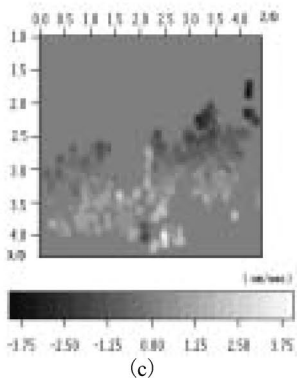
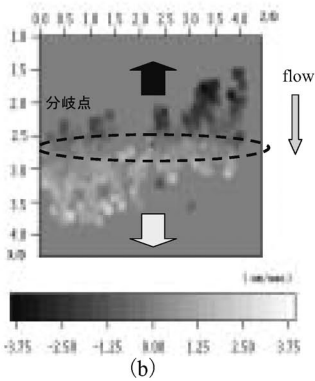
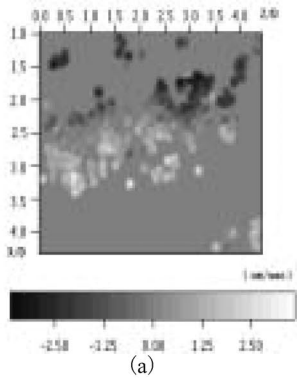


図-14 変動U成分の分布

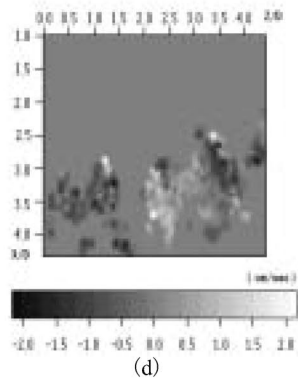
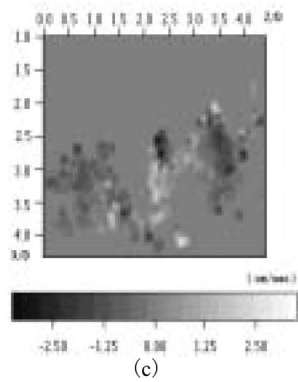
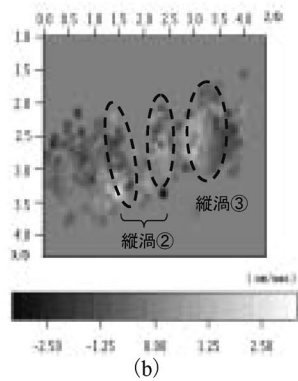
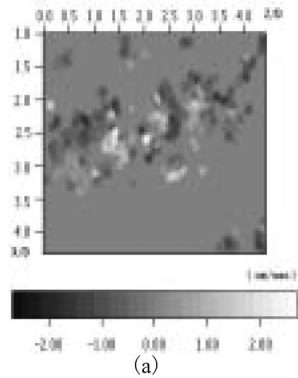


図-15 W成分の分布

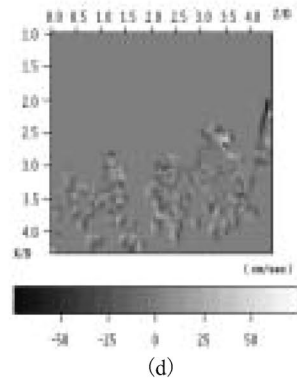
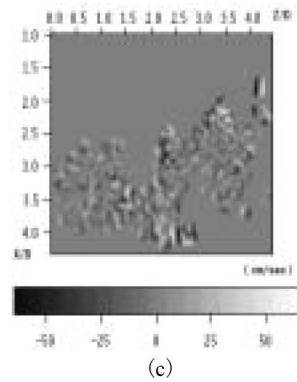
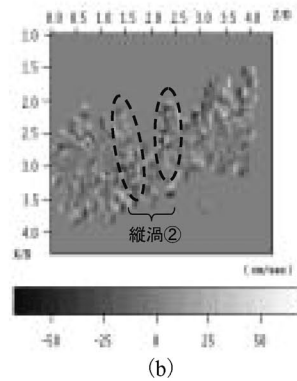
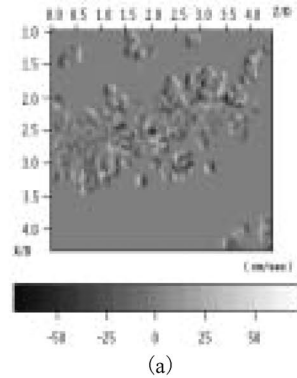


図-16 渦度の分布

下方向の成分と比較して移動距離が少ないという特徴がある。また、図-12 でほとんど動きがなく上昇しているように見えた部分はベクトルが短く、流下方向に向かって流れていることが明らかに確認できる部分はベクトルが長く表示された。回転運動の認められる領域は向きの異なる速度ベクトルが重なり合っている。全体の形象としては流下方向のベクトルが多く、一部、逆流はあるものの、緩やかに流下方向に流れている。

図-14 は X 方向の速度から移流速度を除いた場合の流れを示したもので流下方向への移動を白色、逆流している領域を黒色で表した。黒色で表示された領域は、図-12 における形象の筋に相当する部分で、可視化形象においても同様の現象が観察された。また、筋のらせん状の回転は図-14 の白と黒色の境目で逆回転になることが認められた。この境を以下、分岐点と呼ぶ。分岐点を境に進行方向も回転方向も逆になる現象が起こっているが、縦渦が連続しているものと考え、これを縦渦の進行方向から観察すると、分岐点の上下は同回転であった。これより、円柱上方から発生したカルマン渦の縦渦が、下側のカルマン渦より発生した縦渦の影響を受けて、分岐し、その回転成分を保持したまま、一方は上流側に、他方は流下方向に向かうと考えられる。これらの結果と、全体視の節での考察を合わせた水平円柱の後流の三次元モデルを図-18 に示す。

次に、Z 方向における W 成分の分布図を図-15 に示す。画面に向かって右側への移動を白色、左側への移動を黒色で示している。これより各瞬間で流れの向きが左右に変化していることが認められる。このことは、図-12 において、発生した縦渦が隣り合った渦、筋の影響を受けて横方に揺動しながら流下していく様子から裏付けられる。

図-16 に鉛直方向の渦度の分布を示す。縦渦の回転方向は時計回りを白色、反時計回りを黒色で表すことにするが、ここでは、縦渦はらせん状に回転しているため、白と黒は常に対として考えるものとする。これより、色が濃く表れている部分は図-12 に示す縦渦の回転運動が強い領域と一致する。さらに、時系列による変化において、ほとんど縦渦の回転成分が見られなくなった(d)では、(a), (b), (c) と比較し、色が半分の薄さになっていることから、回転の成分が弱くなったと考えられる。また、回転方向も図-17 で示した模式図とよく一致し、回転方向が逆になる分岐点を境に逆転した白と黒の組み合わせが存在することも確認できる。

図-14, 図-15 を含め、その前後の解析結果から、縦渦は強さの異なる渦同士で対になり、左右に揺動しながら流下していくことが考察できる。縦渦は、そのほとんどが対をなしており、縦渦対に関して、渦は互いに影響を

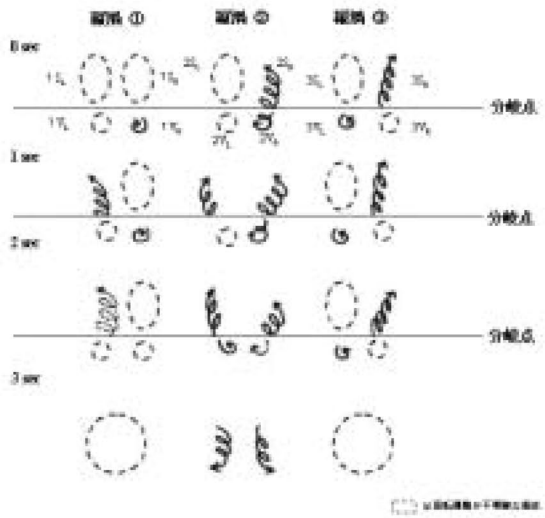


図-17 時系列による縦渦の形象変化



図-18 後流の三次元モデル

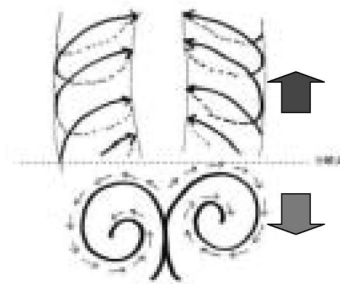


図-19 縦渦の詳細

及ぼし合い、対自身としても複雑な挙動を繰り返すが、隣り合う渦同士でもそれぞれの渦の強さと規模に応じて相互作用を繰り返すことが知られている⁴⁾。また、開水路に形成される壁縦渦対の挙動に関して、渦対が付根を中心にして左右に揺動現象を呈するという特徴が明らかにされており⁴⁾、この揺動の原因は、渦対を形成するそれぞれの渦の強さが常に異なるためと考えられている。2S_R付近の筋についても、筋の回転が強い部分と弱い部分が

交互に存在し、弱い部分はほとんど回転せず上昇していることが確認された。

これらのことから、同様の現象が円柱後流においても起こっていると推測でき、それは渦の強さが大きい方の影響を受けて揺動が繰り返されていると思われる。開水路壁面には壁縦渦対が強弱のペアで形成されるが、円柱後流中においても、同様に強弱のペアの縦渦が形成されることは注目すべき点である。

4. 結論

本研究では流れの可視化、PTV を用いて一様流中における円柱後流の組織構造と三次元性、瞬時流速分布特性を検討し、以下のことが明らかになった。

(1) 円柱後流に発生する縦渦は交互に発生するせん断層からの巻き込み流れに伴って、その回転成分を受け渡し合いながら、後流の三次元性を伝播させる。このことは瞬時流速特性の解析においても明らかとされた。

(2) レイノルズ数の上昇にともない三次元性の伝播は顕著となり、 $Re=500$ 周辺においては、伝播の様子と考えられる筋状形象が明確に確認される。さらにレイノルズ数が上昇すると、流れ場の三次元性が複雑化するため、これらの形象は確認されない。

(3) PTV により、縦渦の伝播に、回転成分の受け渡しの行われる分岐点が存在することが明らかになった。また、円柱後流中に形成される縦渦について、開水路の壁縦渦と同様に、強さの異なる渦対が形成され、揺動現象が起こることも確認された。

文献

- 1) J.C.R. Hunt: INDUSTRIAL AND ENVIRONMENTAL FLUID MECHANICS, *Annu. Rev. Fluid Mech.* Vol.23, pp. 1-41, 1991.
- 2) Roshko A.: Perspectives on bluff body aerodynamics. *J. Wind Ind. Aerodyn.* 49:79, 1993.
- 3) C.H.K. Williamson: VORTEX DYNAMICS IN THE CYLINDER WAKE, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.28, pp.477-539, 1996.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 渡辺英樹, 佐賀孝徳: 一様流中における円柱周りの流れ構造と円柱の振動特性, 徳山工業高等専門学校研究紀要, 第25号, pp.73-80, 2001.
- 9) 奥出宗重, 大蔵信之, 早藤英俊: 渦輪に現れる遠心力不安定, ながれ21, pp.78-88, 2002.
- 10) 佐賀孝徳, 今本雅恵, 渡辺勝利: 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, 水工学論文集, 第46巻, pp.541-546, 2002.

(2003. 9. 5 受理)