

## 密度2成層流における円柱後流に関する研究

山崎, 寛史

九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学専攻生産環境情報学研究室

<https://hdl.handle.net/2324/1498267>

---

出版情報 : 九州大学, 2006, 修士, 修士  
バージョン :  
権利関係 :



修士論文

密度 2 成層流における円柱後流に関する研究

九州大学農学部生物資源環境科学府生産環境科学専攻  
生産環境情報学研究室

山崎 寛史

2007 年 3 月

第1章	序論	1
第2章	閉鎖性水域における水生植物	
2.1	水生植物群落の構造	3
2.2	水生植物の生活型	3
2.3	水生植物の生活型による湖沼の分類	4
第3章	閉鎖性成層水域の吹送流と連行現象	
3.1	密度流とその安定性	6
3.2	成層水域に及ぼす風の効果	7
3.3	沈水性植物がある場合の連行現象	10
3.4	沈水性植物がある場合の乱流構造	13
3.5	沈水性植物の乱流構造と連行現象の関係	17
第4章	円柱後流の流動特性	
4.1	はじめに	18
4.2	二次元円柱の後流	18
4.3	三次元円柱の後流	21
4.4	有限長円柱の後流	21
第5章	密度2成層流における円柱後流に関する実験	
5.1	実験目的	22
5.2	実験装置	22
5.3	座標系及び測定断面	23
5.4	実験方法	24
第6章	密度2成層流における円柱後流に関する実験結果と考察	
6.1	速度分布に関する結果	25
6.2	密度界面形状に関する結果	27
6.3	乱れ強度及びレイノルズストレスに関する結果	30
第7章	結論	32
	謝辞	33
	参考文献	34

## 第 1 章 序論

流入，流出の少ない湖沼や貯水池などの閉鎖性水域では，物質が蓄積されやすく，近年富栄養化などの水質悪化が問題になっている．閉鎖性水域は流体運動の駆動力が日射や放射冷却などの熱的擾乱（熱対流）と風などによる機械的擾乱（吸送流）に限られ，また，日射による水温成層など，密度成層化しやすいという特異な水理学的特徴を持っている．このような流動特性を定量的に把握することは，閉鎖性水域における水質問題を解決するためにも重要である．

閉鎖性水域での水質悪化の原因となるものに，密度成層の存在が挙げられる．密度成層のため上下層の混合が阻害され，溶存酸素濃度の高い水塊が下層に到達できず，下層が貧酸素化することで，水質悪化を招きやすい．このような密度成層では，上層に流れが生じると，密度界面を通じて下層水が上層に混入する，いわゆる連行現象が生ずる．この連行現象による上・下層の流体混合は密度成層を破壊し，水域の水質に与える影響は大きい．閉鎖性水域における連行現象の駆動力は，上述の熱的擾乱と機械的擾乱に限られる．

このような水域では夏季に抽水性，浮揺性，沈水性，浮遊性の水生植物が繁茂する．近年，このような水生植物を用いた水質浄化が研究されてきているが，水生植物はその存在自体水域内の流体運動に影響を与えることが考えられる．このような水生植物が存在する場合の水吹流に関する既往の研究では，浮遊性植物が存在する場合については，その水面占有率の増大に伴い，密度界面における連行速度は減少し，乱流構造は水吹流によって生じる乱流エネルギー量を減少させ，鉛直混合能力が低下するが，一方で，沈水植物が存在する場合では，逆に鉛直混合能力が増大するという結果が得られている（村松ら 2002，尾崎ら 2003）．これは，沈水植物後流から発生する乱

れが密度界面の連行現象を促進しているためと考えられるが、その詳細は明らかになってはいない。

沈水植物周りの流れを単純化したモデルで考えると、有限長円柱周りの流れと考えることができる。有限長円柱周りの流れについては、すでに多くの研究がなされているが、それらの多くは均質流体についてのものであり、成層流体中での流動特性についての研究は十分ではない。沈水植物周りの流れの密度界面及び連行現象への影響について検討する場合、対象となる流れ場は成層流であるため、成層流体における円柱周りの流動特性を調べる必要がある。

そこで、本研究では、沈水植物後流が密度界面に与える影響を解明することを目的として、2 成層流における円柱後流の流れを対象とし、密度フルード数を変化させ、流れ場の構造及び密度界面の変化を比較・検討した。また、沈水植物は通常水域内においては群落で存在する。そのため、沈水植物同士の相互作用の把握のため、2 円柱の場合についても実験を行い、その連行現象に与える影響を検討した。

また、本研究においては、流れ場の計測方法に PIV を用いた。これは、このような流れ場は乱流場であるため、計測は困難であるが、PIV を用いることにより、面的・非接触に計測できるためである。

## 第2章 閉鎖性水域における水生植物

### 2.1 水生植物群落の構造

水生植物の群落の研究は歴史が深く 19 世紀後半から現在に至るまで様々な学者が研究を行っている。これらの研究の主な内容は各々の植生をどのように分類し位置付けるかというものであるが、これらの研究に共通して言えることは、湖沼、ため池の水生植物群落は周辺部から中心に向かい相関的に明瞭な同心円的帯状に分布がなされているということが挙げられる。

### 2.2 水生植物の生活型

環境に結びついた植物の生活様式、形態的特徴（適応性）が生活型である。生活型には、有名なラウンケアの生活型がある。これは、植物が生活に不利な時期をどのように過ごすかによって分類したものである。休眠芽を地表からどの位置につくるかにより、地上植物・地表植物・半地中植物・地中植物に分けられる。さらに、一年生・越年生・二年生植物を一年生植物にまとめ、休眠芽の位置が水中または水で満ちた土中にあるものを水生植物とする。これには湿性植物も含まれる。

以上の分類と生育期の生活様式などを考慮して、水草の生活型は次のように分類することができる。

- ・水生一年植物 …… 種子を作り、一年で生活環境を完了する。
- ・水生地中植物 …… 休眠芽が水底の泥の中にある。
- ・水生半地中植物 …… 休眠芽が水底の地表近くにある。

この3つを大きく区分した上で、さらに生育期に水中でどのように生活しているかにより、

- ・着生植物 …… 急流の岩の表面に固着しているもの（カワゴケ・ソウ・

カワゴロモなど)

- ・浮揺生植物 …… 水面に浮揺しているもの(ウキクサ・サンショウモなど)
- ・根生植物 …… 根は水底の土中にあるもの(ヒツジクサ・ヒシなど)

に分類される。

また、おもな葉が水面に対してどのような位置にあるかにより

- ・抽水植物帯 …… 水面上に葉がつき出ている。
- ・浮葉植物帯 …… 水面上に葉が浮かんでいる。
- ・沈水植物帯 …… 葉はすべて水中にある。

に分類される。

### 2.3 水生植物の生活型による湖沼の分類

湖沼にはそれぞれの生い立ち，形，水質，集水域など湖沼をとりまく環境条件の違いがあり，それがそこに生育する植生の違いとして現れてくるのは当然である。池ごとに生育する水草の優占生活型をもとに湖沼の分類が行われている。浮葉植物帯，沈水植物帯は抽水植物帯に比べ強く環境要因の影響を受けると考えられるので，これらの優占度を重視して次のように分類されている。

#### ○浮葉・沈水植物帯優占型

浮葉，沈水，抽水植物帯が調和を保ち生育する安定した湖沼である。富栄養化の進行していない比較的きれいな湖沼で，丘陵地の人為的影響の少ない地域の湖沼に多い。富栄養化が現在のように進行していなかった時代には，この型の湖沼がごく普通であったと思われる。水草の種類，量ともに豊富である。ごく稀には，浮葉植物帯を欠き沈水植物帯のみ優占する沈水植物帯優占型というべき湖沼もある。

#### ○浮葉植物帯優先型

浮葉植物帯が優先し、沈水植物帯は存在しないか、ごくわずかに見られるだけである。岸边にはヨシ・マコモなど抽水植物帯が生育する。富栄養化に伴う水質汚濁で、浮葉・沈水植物帯優占型からこの型へ移行するものと考えられる。汚濁により透明度が低下し、沈水植物帯の生育を阻害するからと考えられる。

#### ○浮揺植物帯優占型

岸边にはヨシ・マコモなど抽水植物帯が生育するが、浮葉・沈水植物帯は見られない。富栄養化のかなり進行した湖沼がこの型である。(Fig.2-2 参照) 優占群落は、ウキクサ群落、ホテイアオイ群落である。家庭排水による汚濁の激しい住宅周辺の湖沼で、しばしばホテイアオイが水面全域をうめつくすほど繁茂しているのが観察される。

#### ○抽水植物帯優占型

浮葉、沈水植物帯は生育せず、岸边にヨシ、マコモ、フトイ、カンガレイ、クログワイなどが生育する湖沼である。水の華を生ずるほど富栄養化した湖沼にこの型が多い。この型の湖沼は、富栄養化による水質汚濁を原因とする場合と、水位変動が激しく、毎年湖底部の多くが露出することが原因となる場合がある。いずれの場合も、それらを原因として浮葉、沈水植物帯が絶滅したものと考えられる。

このように、湖沼における水生植物の生育環境と水質変動は密接に関わりあっている。また、水生植物が多量に繁茂する夏期には富栄養化が進行している湖沼になるほど、より多量に水生植物が繁茂するため、水生植物の存在が湖沼の水質変動の妨げになっていると考えられる。

### 第3章 閉鎖性成層水域の吹送流と連行現象

### 3.1 密度流とその安定性

空間的に閉じた閉鎖性水域において，水温，浮遊性物質による濁度，溶解性物質などの空間的量の差により鉛直方向に密度差を生じ，外乱がない状態では安定に成層化している．このような密度成層を有する閉鎖性水域の水表面に風が作用すると，その応答として風波と吹送流およびその乱れが存在することになり，とくに表層付近は乱流状態になる．鉛直方向に連続的な密度分布を有する成層を連続成層（Fig.3-1 参照），成層が多層からなり密度分布が不連続な成層を不連続成層（Fig.3-2 参照）と呼んでいる．密度流が安定であるということは，時間が経過しても流速，密度分布が初期状態を保つことを意味している．一方，密度流が不安定であるということは，時間の経過とともに上，下層間の混合が生じ，流速，密度分布が一様化することを意味する．

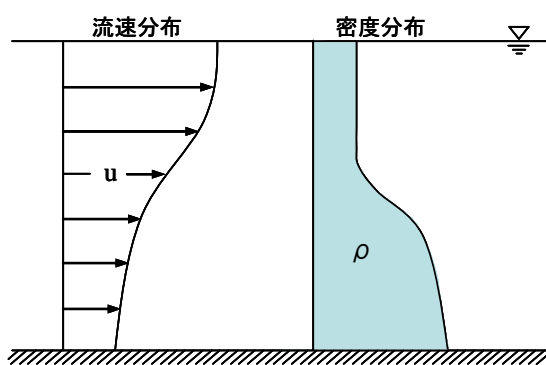


Fig.3-1 連続成層

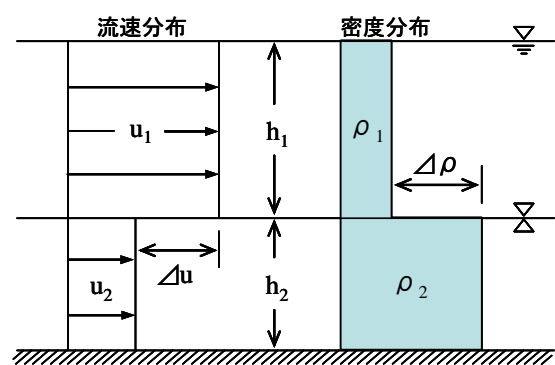


Fig.3-2 不連続成層(二成層)

### 3.2 成層水域に及ぼす風の効果

成層水域の水面に風が吹くと Fig.3-3 に示すような鉛直循環流が形成される。風の吹き始めからの鉛直循環流の形成過程は次の通りである。

#### (第 1 段階)

上層水が風下へ吹き寄せられ、下層では逆方向の補償流れが生ずる。

(Fig.3-3(a)参照)

#### (第 2 段階)

吹き寄せとともに風下側の水位は上昇し(セットアップ)、風上側では低下する(セットダウン)。このとき躍層界面は水面と逆方向に傾斜し、また水面変位に比べて躍層界面の変位は非常に大きくなる。吹送流が湖岸に達するまで流速は増加し続け、躍層界面での内部せん断力が増大する。これによってせん断不安定型の強い鉛直混合が生ずる (Fig.3-3(b)参照)。

#### (第 3 段階)

さらに風が吹き続けてセットアップ・ダウンが完了すると、上層と下層内で回転方向が逆の鉛直循環流が形成される (Fig.3-3(c)参照)。図のように第 2 段階の場合よりも躍層界面での内部せん断力が小さいので鉛直混合は弱い。躍層のセットアップが大きい場合には深層水が水面まで達する(湧昇現象)。貧酸素化している深層水が湧昇すると、沿岸域の魚介類が短時間で多量に窒息死することがある。

#### (第 4 段階)

風が吹き終わると水面と密度界面が揺り戻されて表面セイシュおよび内部セイシュが発生する (Fig.3-3(d)参照)。セイシュとは閉鎖性水域における外力によって生じる水表面の振動のことで、内部セイシュとはとくに水域が成

層化しているとき密度界面に生じる振動をいう。これらの振動はやがて減衰する。

以上のような各段階はいつもすべて生じるわけではない。第 2 段階に至るまでに全層が混合して第 3, 4 段階が現れない場合や、第 1 段階だけで終了する場合、第 2 から第 4 段階に直接移行する場合など、吹送時間、水域のサイズや成層状態などによってさまざまなケースが出現する。

一方、湖岸や水深などの条件、風向き・風速や水温の場所的不均一性によって湖流の加速度や方向が水平面内で一様とはならず、これが原因となって水平循環流が形成される。実際の水域内の流れは鉛直方向と水平方向の循環流が組み合わさり、三次元的で複雑である。

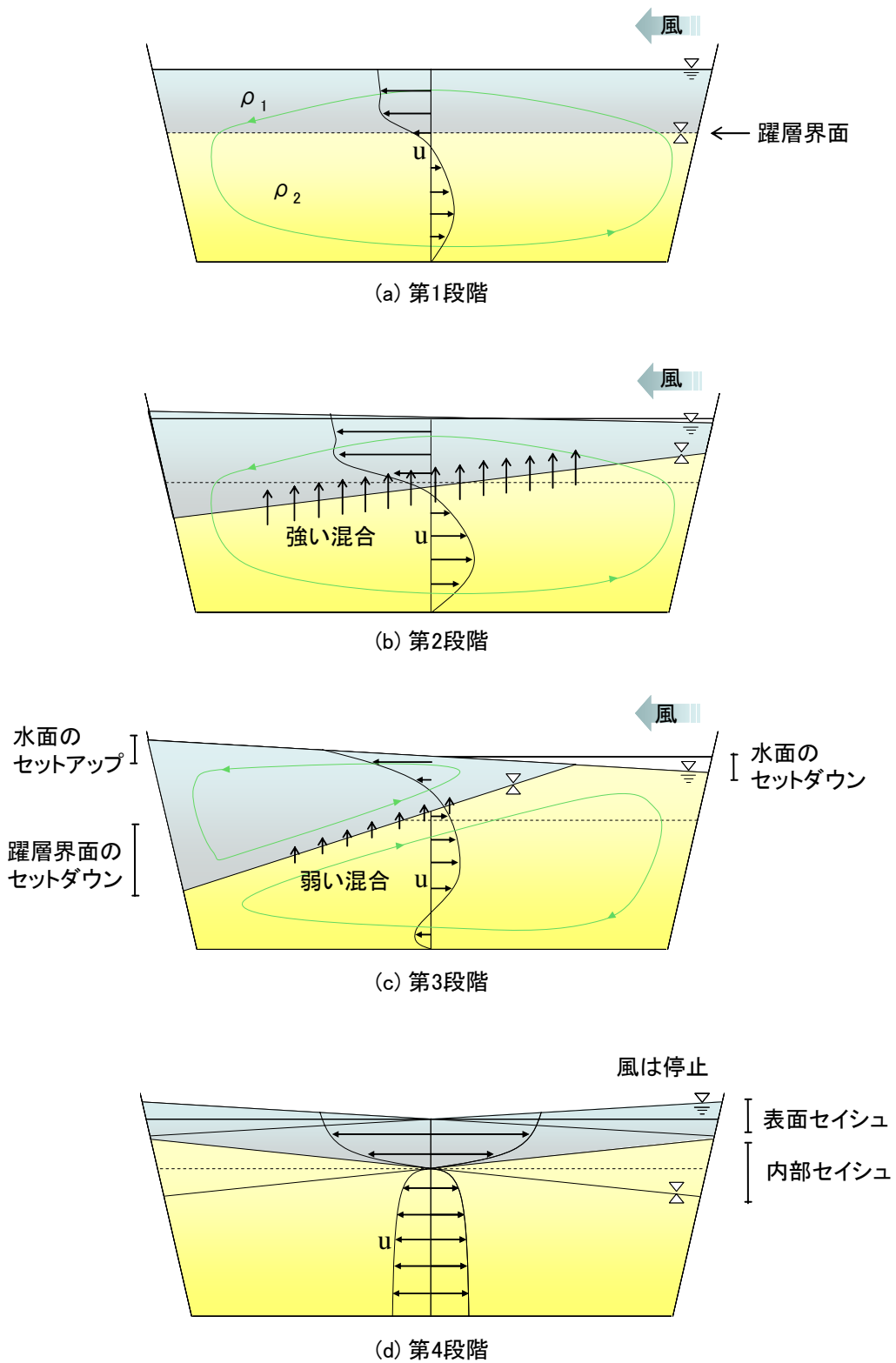


Fig.3-3 吹送流による鉛直循環流形成過程

### 3.3 沈水性植物がある場合の連行現象

尾崎（2003）は、沈水性植物がある場合について、吹送流による密度界面に関する実験を行い、連行係数と層平均リチャードソン数の関係 Fig3-6 を得ている。なお、実験装置は長さ 600cm、幅 30cm、深さ 40cm の水槽において下層に塩水、上層に淡水の 2 成層場をつくり、その上部に幅 30cm、深さ 30cm の風洞を設け吹送流を発生させている。（Fig.3-4 参照）

実験は、上、下層の密度  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  の差  $\Delta\rho_0 = \rho_2 - \rho_1$ 、上層の水深  $h_1$  および、空気の摩擦速度  $u_{*a}$  をパラメータとして、層平均リチャードソン数  $R_{ia} (= \Delta\rho_0 g h_1 / \rho_a u_{*a}^2)$  が 100 以下の範囲で行われており、ここに  $g$  は重力の加速度、 $\rho_a$  は空気の密度である。

沈水性植物の模擬は針金で模擬し 30cm×30cm の金網（5mm メッシュ）に直径 1.5mm の針金を固定して製作している。繁茂状況は、まず繁茂状況を等間隔に(13×13)=169 本の状況を考え、それぞれの高さを TypeA=35cm（密度界面より 5cm 上）、TypeB=25cm（密度界面より 5cm 下）、TypeC=15cm（密度界面より 15cm 下）と、3 通りとしている（Fig.3-5 参照）。 $R_{ia} < 100$  の範囲において、浮葉性植物のない密度 2 成層場における連行速度の既往の結果である  $E \propto R_{ia}^{-3/2}$  の関係をほぼ満たしており、また、沈水性植物が存在する場合の連行速度は同じ  $R_{ia}$  に対して水生植物のない場合のそれに比べてかなり大きくなることを示している。さらに、草丈が大きくなるにつれて連行速度が大きくなっていることがわかる。ここで、 $E = K_\beta R_{ia}^{-3/2}$  とおいて、比例係数  $K_\beta$  を実験結果から推定した結果を Fig.3-7 に示す。沈水性植物が繁茂

すると、 $K_{\beta}$ の値が大きくなる傾向が示されている。このことは、密度界面近傍に輸送される乱流エネルギー量が植生のない場合に比べて増加することを示しており、これによって密度界面の連行速度が大きくなるものと推察されている。

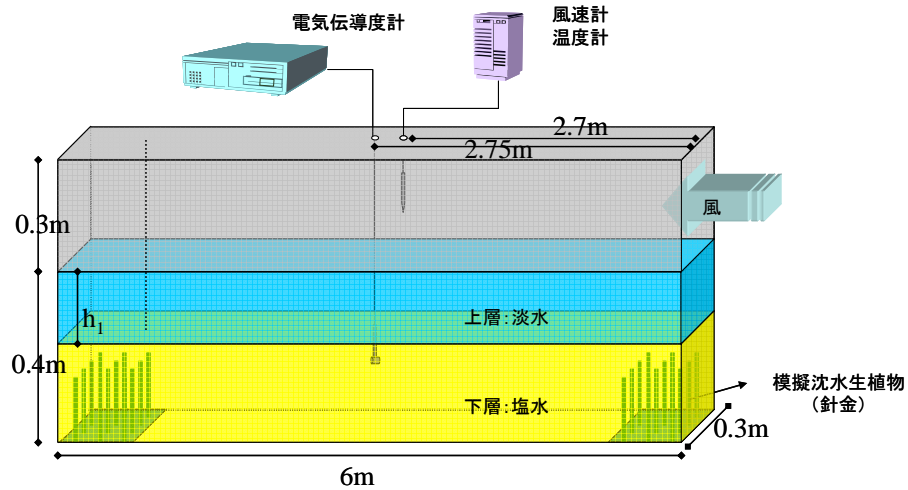


Fig.3-4 連行現象に関する実験装置

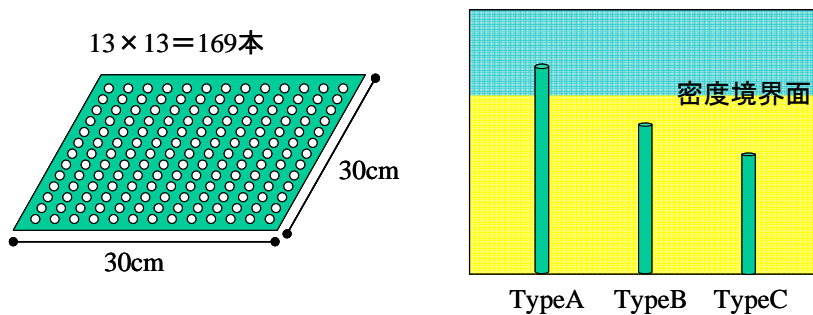


Fig.3-5 沈水性植物模擬方法

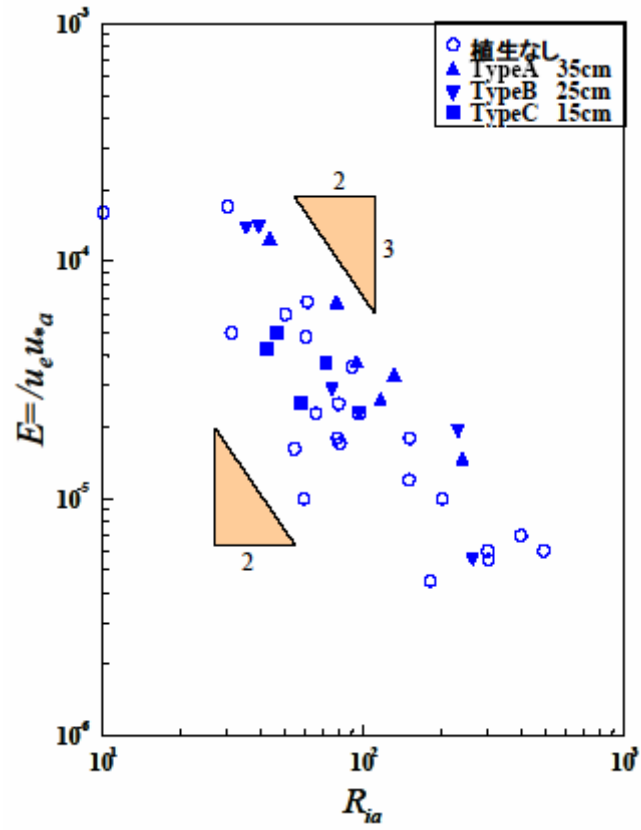


Fig.3-6 連行係数とリチャードソン数

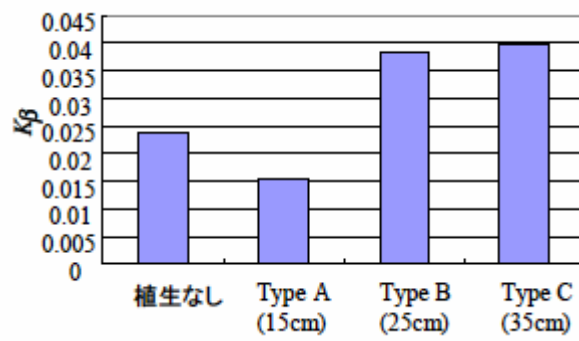


Fig.3-7 沈水性植物高さと $K_\beta$

### 3.4 沈水性植物がある場合の乱流構造

前述の  $K_\beta$  の差異を明らかにするために、尾崎ら（2003）は、沈水性植物がある場合の乱流構造に関する実験を行った。実験装置は、連行現象に関する実験に用いたものと同じである。流速の測定には X 型ホットフィルム流速計を使用している。

測定結果から、水平方向時間平均流速  $\bar{u}$ 、鉛直方向時間平均流速  $\bar{v}$ 、水平方向乱れ強度  $\hat{u} = \sqrt{u'^2}$ 、鉛直方向乱れ強度  $\hat{v} = \sqrt{v'^2}$ 、レイノルズストレス  $-\overline{u'v'}$ 、密度の乱れ強度  $\hat{\rho} = \sqrt{\rho'^2}$ 、鉛直方向フラックス  $\overline{v'\rho'}$  を求め、上層の乱流構造について検討している。

Fig.3-8 に示すは水平方向時間平均流速の鉛直分布を示している。沈水性植物の草丈が高くなるにつれて特に草丈が 25cm および 35cm の場合について、各水深での水平方向流速は若干増加する傾向にあり、水面から境界面に向かうにつれ減少すること、また水面から上層水深の 4 割程度まで風上から風下方向への順流部をと、それより下部の逆流部からなることを示している。順流部から逆流部への移行水深は沈水性植物の草丈が高くなるにつれ水面に近づく傾向にあり、この傾向は水槽後方部で顕著に現れ、境界面近くの流速はほぼ 0 である結果を得ている。

Fig.3-9 の鉛直方向時間平均流速の鉛直分布からは、密度界面近傍を除いて上層全域負の値であることから、水面から沈み込み流れが卓越することを明らかにしている。

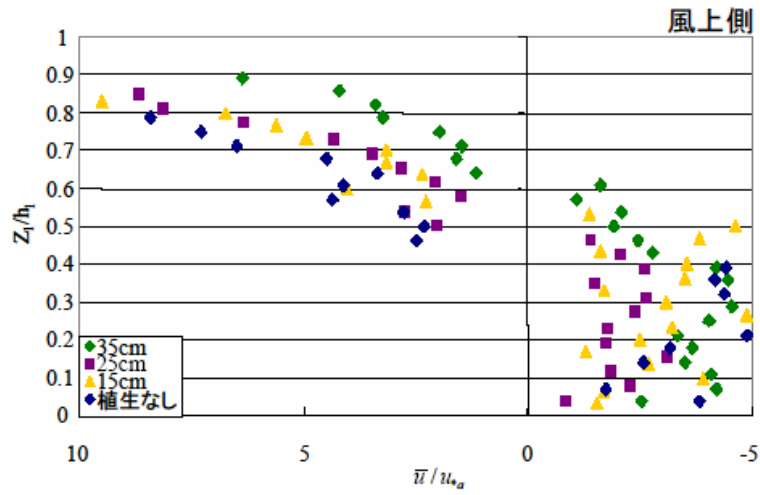


Fig.3-8 水平方向時間平均流速 (PointB<sub>f</sub>)

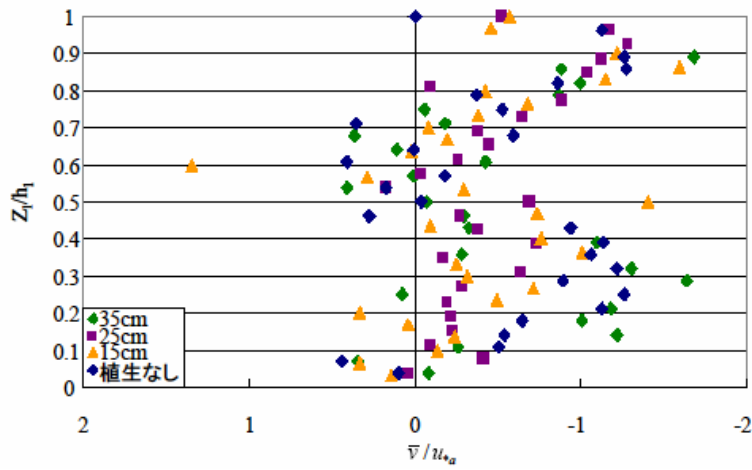


Fig.3-9 鉛直方向時間平均流速 (PointB<sub>f</sub>)

乱れ強度は各点での乱れの強さを表す指標であるが、Fig.3-10より水平方向乱れ強度は、水平方向流速と同様に水草の占有率が増加するにつれて乱れの強さが減少する。

また、Fig.3-11の鉛直方向の乱れ強度についても同様の傾向が見られる。Fig.3-12に示すレイノルズストレスは、水槽中心部には水面付近で最大となり、水深が3cmを超えると0になる傾向が見られるが、水草の端では密度境界面付近まで大きな値をとる。これは乱れの発生が水面でのせん断力に起因以外に、沈水性植物の存在により、乱れエネルギーが大きくなった結果であるとしている。

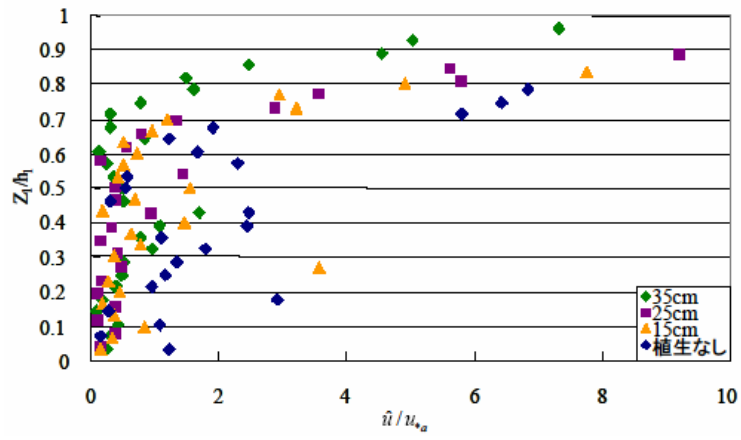


Fig.3-10 水平方向乱れ強度 (PointB<sub>r</sub>)

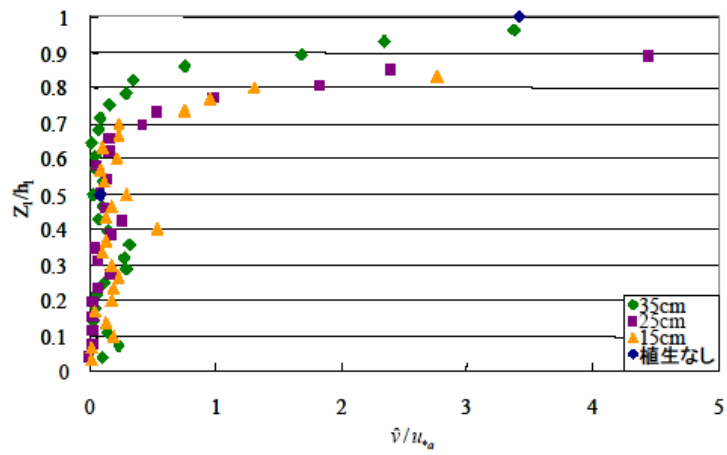


Fig.3-11 鉛直方向乱れ強度 (PointB<sub>r</sub>)

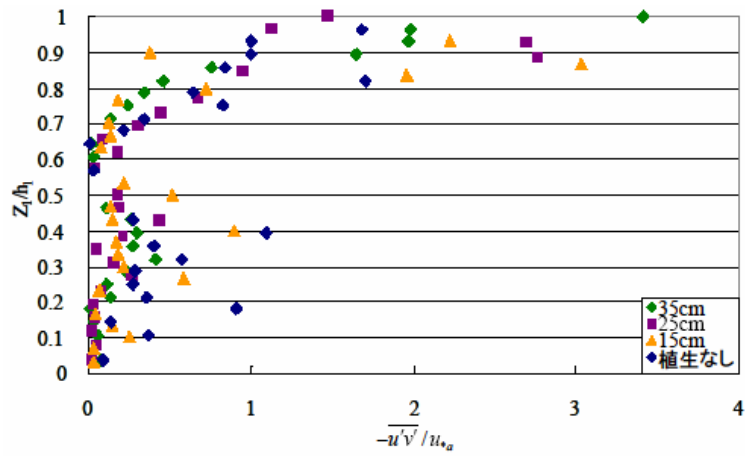


Fig.3-12 レイノルズストレス (PointB<sub>r</sub>)

### 3.5 沈水性植物の乱流構造と連行現象の関係

また，尾崎ら（2003）は，水平および鉛直方向乱れ強度の水深平均  $\tilde{u}$  と沈水性植物の繁茂状況との関係について検討し，Fig.3-13 を得ている．図は，乱れ強度の水深平均は水平方向，鉛直方向ともに，沈水性植物の草丈が高くなるにつれて大きい値になっている．また，この図から，連行現象に関する実験値から得られた  $K_\beta$  の変化とほぼ一致し，沈水性植物の草丈が高くなるにつれて，上層の乱流構造が変化し，上下層間の鉛直混合能力が高くなる結果を得ている．

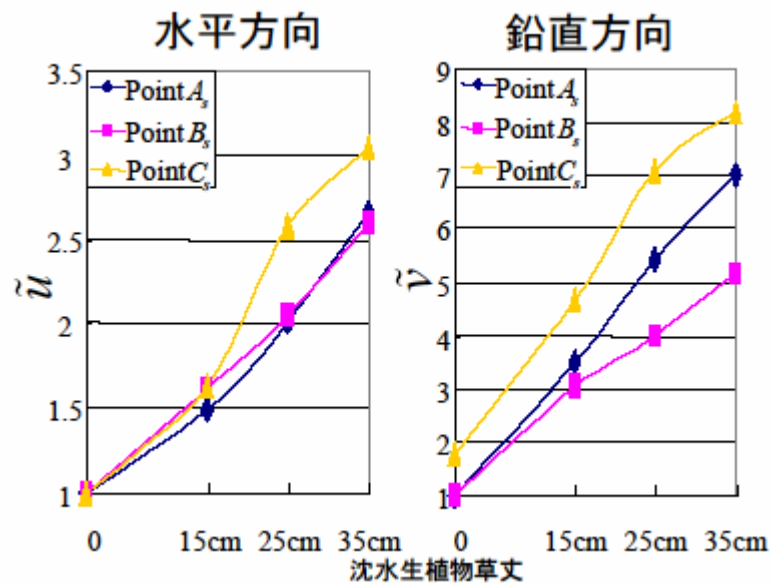


Fig.1-1 閉鎖性水域における水環境物質挙動

すなわち，密度 2 成層水域において吹送流が発生するとき，沈水性植物が水域内部に存在する場合には，密度界面から上層に突出する草丈の長さが大きくなるほど連行速度は増加すること，およびこのことは密度界面近傍の乱流エネルギー量の収支と密接に関係することを明らかにしている．

## 第4章 円柱後流の流動特性

### 4.1 はじめに

第2章では、閉鎖性成層水域における密度界面の連行係数に関する既往の研究成果により、沈水性植物が存在する場合の吹送流による密度界面の連行係数は、それが存在しない場合に比べて大きくなることが明らかにされており、そのことは、密度界面近傍の乱流エネルギー収支の違いで説明できることを述べた。

そこで、沈水性植物の存在が、その乱流エネルギー収支に果たす役割を定量的に解明することが重要な課題となる。すなわち、沈水性植物の茎のまわりの流れ及びその後流が界面近傍の乱流エネルギー生成に重要な役割を果たしていると考えのもとに、沈水性植物後流と乱流エネルギー生成の関係について解明することが重要となる。

本研究では、その基礎研究として、円柱まわりの流れおよびその後流特性を把握することを目的としている。

そこで以下の節では、二次元流れ、三次元流れ中の円柱及び有限長円柱の後流特性について概観する。

### 4.2 二次元円柱の後流

流れの中に物体がある場合や静止流体中を物体が動く場合、物体背後の流れを後流という。流れに対して鈍い物体においては、前面では面に沿って流れるが後面では流れが物体表面から剥離してしまう。これは、表面に沿って流れるためにはおおきな角度で曲がらなければならないが、流れは慣性のために曲がりきれないためであると考えられる。この流れの剥離が鈍い物体の特徴で、この剥離によって大きな抵抗を生じ、また強い乱れが生成される。

本論文では、沈水性植物の茎の後流を対象としているので、これと類似した流れの場と考えられる円柱後流について考える。

いま、均一流体の流れ場を考える（単層流）。一様な流れの中に流れに対して垂直に円柱が立っている場合、円柱を過ぎる流れは、流速が十分小さいときは左右対称な流れが実現する。しかし、流速が次第に大きくなると流れの様子は一変する。すなわち、次式で定義するレイノルズ数  $R_e$  の大小によって流れのパターンが異なってくる。

$$R_e = \frac{\rho U d}{\mu}$$

ここに、 $U$  は一様流速、 $d$  は円柱の直径、 $\rho$  は流体の密度、 $\mu$  は粘性係数である。

Fig.3.2 はレイノルズ数の大小による円柱まわりの流れ模様の変化を示したものである。レイノルズ数が十分小さい間は粘性の作用が圧倒的であるから、流体は円柱を沿うように流れる。このとき、円柱まわりの流線は下流に向かって前後左右対称である (Fig.3-2(a))。レイノルズ数が 0.1 の程度になると前後対称性がくずれ出し、レイノルズ数が 5 の程度を超えると流れが剥離して、下流側に反対方向に回転する一対の渦が発生する (Fig.3-2(b))。これを双子渦と呼ぶ。この双子渦はレイノルズ数の増加とともに下流側に伸びる。流れのパターンはまだ対称性を保持し、時間的にも変化しない。レイノルズ数がさらに大きくなり 40 の程度になると、渦が円柱の左右から交互に剥がれ、反対方向に回転する渦が互い違いに二列に並んだ渦列ができる (Fig.3-2(c))、この渦をカルマン渦と呼ぶ。このカルマン渦列はレイノルズ数が 160 程度のところまで見られるが、レイノルズ数がこれより大きくなると渦列の規則性が乱れ始める。このように、レイノルズ数が 40 程度以下の場合には、円柱まわりの流れは安定であるが、この値を越すと流れは不安定になることわかる。流れが不安定になると円柱表面から剥離した 2 つの剪断層が内側に巻き込まれる結果、円柱の背後に渦が形成されることになる。この渦は、通常、円柱の両側から交互に渦形成領域内において形作られ、その形成順序に従って下流へ放射される。さらに、レイノルズ数が 1000 程度になると、流れの乱れが激しくなり、円柱まわりの流れは非常に複雑な流れになる (Fig.3-2(d))。しかし、流れが時々刻々複雑に変動していても、集団平均をとると、速度分布にカルマン渦列に類似したジグザグ型渦列構造が再現できる。

さて、レイノルズ数が 40 以上になると、円柱を過ぎる流れに発生するカルマン渦列において、渦対の発生周波数  $f$  は

$$f = S_t \frac{U}{d} \quad , \quad S_t \approx 0.2$$

であることが知られている。ここに、 $S_t$  はストローハル数と呼ぶ。この関係は、規則的なカルマン渦列が発生するレイノルズ数の範囲  $40 \leq R_e \leq 160$  を越えて、 $40 \leq R_e \leq 10^5$  の範囲で成立すると言われている。

先に見たように、レイノルズ数が 40 以下では円柱まわりの流れは左右対称であるから、円柱が流体から受ける力は一様粒の方向を向いている。つまり、抗力を受ける。しかし、レイノルズ数が 40 を越えてカルマン渦ができると、流れは非対称になり一様流に垂直な力の成分が現れる。つまり、揚力が作用することになる。渦塊が左右交互に剥がれるのに同期して、揚力の向きも周期的に変化する。つまり、円柱まわりの流れのレイノルズ数が 40 を越えて、カルマン渦が発生するようになると、円柱は抗力だけではなく、揚力が作用することになり、円柱は横揺れ振動をすることになる。

以上のように、円柱を過ぎる流れ（円柱後流）はレイノルズ数に依存し、カルマン渦を

発するようになると、円柱は横揺れ振動することになり、その後流特性も複雑になるものと推察される。したがって、本論文で対象としている沈水植物の茎の後流についてもこのことを考慮して検討する必要がある。

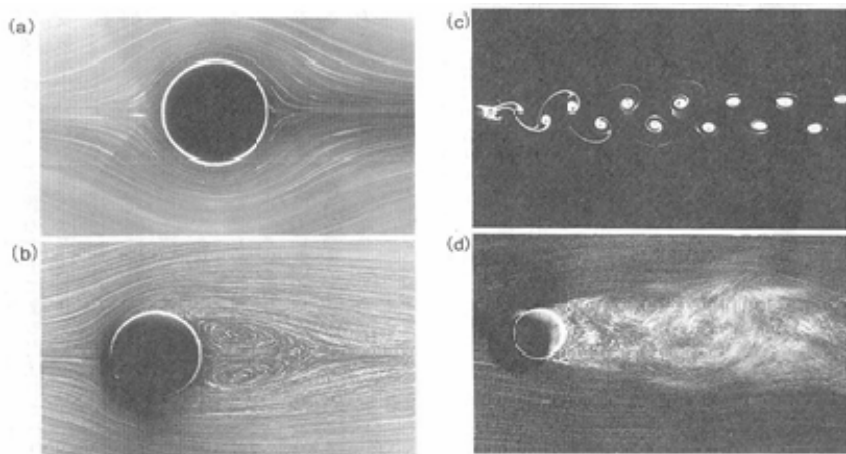


Fig.3-1 レイノルズ数の変化による流れ模様の変化

#### 4.3 三次元円柱の後流

三次元円柱では、二次元円柱では考慮しなかった速度勾配の影響が生じる。特に壁面部分に存在する境界層の影響は大きい。円柱前縁部では、境界層部分において馬蹄型渦が生じ、円柱後流域では後流剥離渦が生じ、水路床近傍の流れを巻き上げる。カルマン渦は主流と後流剥離渦の境界に生じる強い渦度が帯状に下流へ引き伸ばされることによって生成される（宇民 1974）。

#### 4.4 有限長円柱の後流

有限長円柱では、壁面近傍の境界層及び円柱端の影響のため、2次元円柱の場合とは異なる、3次元的な流れとなる。有限長円柱後流の3次元性を特徴付ける流れとしてはとくにその円柱先端からの吹き降ろしの存在がある。また、低アスペクト比の円柱では周期的な渦列が存在しないとされ、また、高アスペクト比の円柱の渦列の渦流出振動数は円柱軸方向に変化するとともに、アスペクト比と  $Re$  数に大きく依存し、特にアスペクト比の減少につれ、その振動数は大幅に減少する（岡本・八木田 1972）。二次元円柱とはかなり異なる流動特性となる。

## 第 5 章 2 成層流における円柱後流に関する実験

### 5.1 実験目的

第 1,2 章で述べてきたように，閉鎖性密度 2 成層水域に沈水性植物が存在する場合，吹送流による密度界面における連行係数はそれが存在しない場合に比べて大きくなることが明らかにされており，沈水生植物後流が界面近傍の乱流エネルギー生成に影響を及ぼしていることが考えられる．そこで本研究では閉鎖性密度 2 成層水域における，沈水性植物が存在する密度界面近傍の流れを対象とし，2 成層流での円柱の後流特性について水理実験を行い，比較・検討した．なお，対照実験として均質流体での実験及び，円柱間の干渉の影響を調べるため，円柱二本の場合についても実験を行った．

### 5.2 実験装置

実験水槽は Fig.5-1 に示すように，幅 10cm，高さ 12cm の水槽を用いた．密度 2 成層場は水道水と塩水を用いて作成した．塩水の濃度は 1‰ になるよう設定した．上層の部分に淡水を流入させ，上層のみ所定の流量が流れるようにし，下層の塩水は静止の状態になるようにした．連行により密度界面が低下するのを防ぐため，下層には穴あきチューブを這わせ，低下速度に合わせて徐々に塩水を補給できるようにした．上層，下層の水深はそれぞれ  $h_1 = 5\text{cm}$ ， $h_2 = 5\text{cm}$  とした．代表流速の設定は，淡水の流れる上層部分の面積  $50\text{cm}^2$  ( $h_1 \times$  水路幅) を流水断面とし，(所定の流速  $u$ )  $\times$  (流水断面積) となる流量が流れているように流量を調節することで行った．流量の調節には三角堰を用い，所定の越流水深が得られるようにすることで行った．段落ち部から 40cm 下流部に円柱を設置し，その周辺の流れを撮影した．円柱は長さ  $l = 7.0\text{cm}$ ，直径  $D = 2.0\text{cm}$  のものを用い，一本設置の場合と，中心間距離  $S = 2D$  での二本設置の場合で実験を行った．

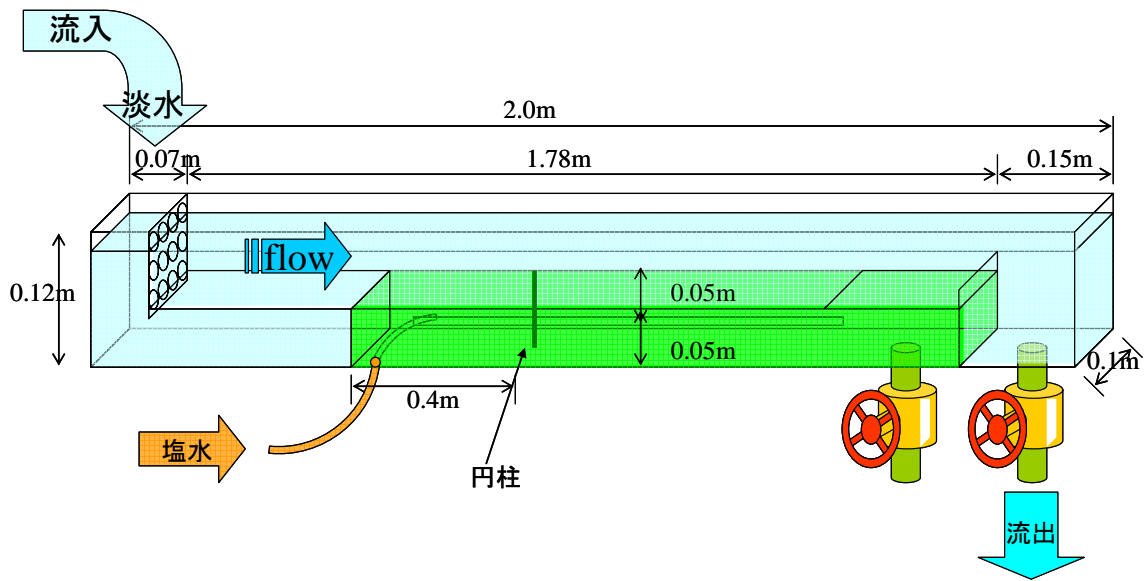


Fig.5-1 実験水槽

### 5.3 座標系及び測定断面

座標系は Fig.5-2(a)に示すように、水槽の中心軸から下流側に  $x$  軸，水路横断方向に  $y$  軸，平均密度境界面から上向きに  $z$  軸を設定し，それぞれの流速を  $u$ ， $v$ ， $w$  とした．また，測定断面については Fig.5-2(b)に示すように，鉛直 ( $x-z$ ) 断面については水路中心軸から，水平 ( $x-y$ ) 断面については平均密度界面から，それぞれ 0.5cm 間隔で撮影した．

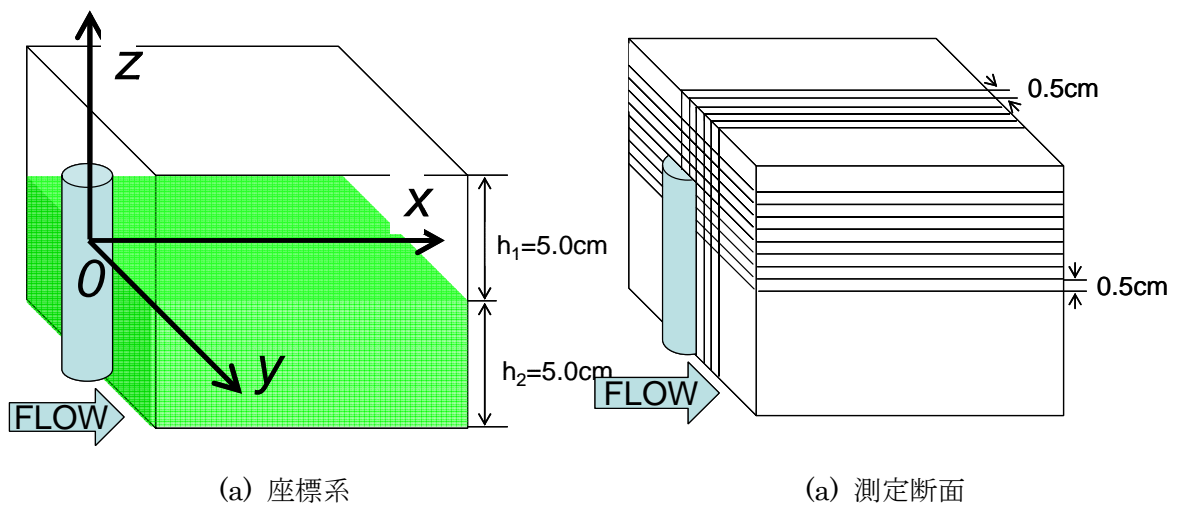


Fig.4-2 座標系と測定断面

#### 5.4 実験方法

実験は上層平均流速を変化させることで2成層流においては密度フルード数  $F_d$  が約 0.25~0.75 の範囲で行った。対照実験とした均質流体での実験においては上層水深 10cm, 下層水深 0cm とし, フルード数  $F_r$  が 0.005~0.015 の範囲で行い, レイノルズ数  $R_e$  はそれぞれ約 80~250 の範囲となった。

実験方法は Fig.5-3 に示す。トレーサとして粒径 48~52  $\mu\text{m}$  のナイロン粒子を用い, レーザーシート光を照射し, 鉛直 ( $x-z$ ) 断面 ( ), 水平 ( ) 断面 ( ) についてそれぞれ Fig.5-2(b) に示す断面で撮影し, 計測を行った。サンプリング周波数は 30Hz で, データ収録時間は 60 秒間であり, そのうち 1030fram 分 (約 34 秒間) を流体解析ソフト「Flow-PIV」で解析し, 得られた結果から時間平均流速  $\bar{u}$ ,  $\bar{v}$ ,  $\bar{w}$ , 乱れ強度  $\sqrt{u'^2}$ ,  $\sqrt{v'^2}$ ,  $\sqrt{w'^2}$ , レイノルズストレス  $-\overline{u'v'}$ ,  $-\overline{u'w'}$  を求めて, 乱流構造を定量的に把握した。実験条件を Table 4-1 に示す。

Table 5-1 実験条件

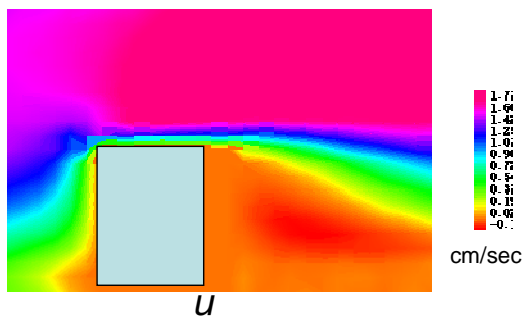
CASE	流体	円柱本数	上層平均流速 (cm/sec)	密度差 $\Delta\rho(\rho)$ (g/cm <sup>3</sup> )	Fd (Fr)	Ri	Re
D1_L	2成層流	1	0.5	9.21E-04	0.246	16.55	82.0
D1_M		1	1.0	1.08E-03	0.452	4.89	177.0
D1_H		1	1.5	8.75E-04	0.759	1.74	245.9
D2_L		2	0.5	9.11E-04	0.247	16.34	79.1
D2_M		2	1.0	8.51E-04	0.513	3.80	164.7
D2_H		2	1.5	9.31E-04	0.733	1.86	245.3
M1_L	単層流	1	0.5	0.9997	0.005	-	78.1
M1_M		1	1.0	0.9996	0.010	-	160.0
M1_H		1	1.5	0.9994	0.015	-	252.1
M2_L		2	0.5	0.9997	0.005	-	78.1
M2_M		2	1.0	0.9997	0.010	-	157.7
M2_H		2	1.5	0.9996	0.015	-	240.0

## 第6章 密度2成層流における円柱後流に関する実験結果及び考察

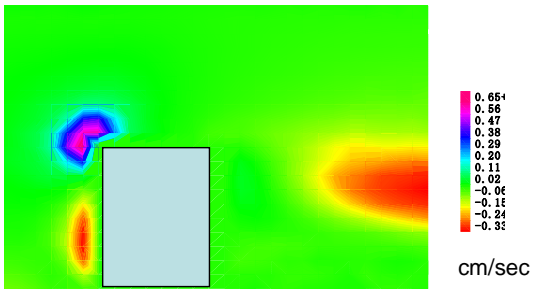
### 6.1 速度分布に関する結果

Fig.6-1 はそれぞれ成層流体と均一流体の場合の単一円柱時における  $x-z$  断面 ( $y=0$ ) の時間平均流速  $\bar{u}, \bar{w}$  の分布である。どちらも高密度フルード数での条件のものである。図から、成層流体・均一流体どちらにも有限長円柱に見られる円柱端からの主流の吹き降ろし（越流）が見られる。この吹き降ろしに関しては、とくに成層流体について顕著である。しかしながら、均一流体においては円柱下流側に非常に強い上昇流が見られるのに対し、成層流体では上昇流はほとんど見られない。これは、上昇流の駆動力となる剥離領域の低圧部に下層水が入り込むこと、成層流では剥離領域自体が均質流体の場合に比べて小さいこと、成層流では円柱端部分もまだ境界層部分になり、均質流体に比べて流速が小さく、その分慣性力が弱く、剥離が不十分であると考えられることなどの理由から、上昇流の駆動力が成層流体では小さいことが考えられる。このように、成層流体では、均質流体に比べ、鉛直方向の流れが抑制されるといえる。

Fig.5-2 は、二円柱の場合の、水路中央断面 ( $y=0$ ) と、円柱軸上断面 ( $y=2$ ) での  $x-z$  断面の  $\bar{u}, \bar{w}$  の分布である。どちらの場合も高密度フルード数での条件での図である。円柱軸上のものは単一円柱 ( $y=0$ ) の場合 (Fig.6) とあまり変化はないが、円柱間の中心を通る水路中央断面 ( $y=0$ ) の場合では、円柱を回りこみ、加速された流れが見られる。この部分は強い上昇流であり、鉛直方向の流速も大きくなっている。一方で、上昇流から下流側では低流速域が広がっている。これは、下層水が上昇流に伴って上昇した部分であり、そのため非常に微流速となっている。

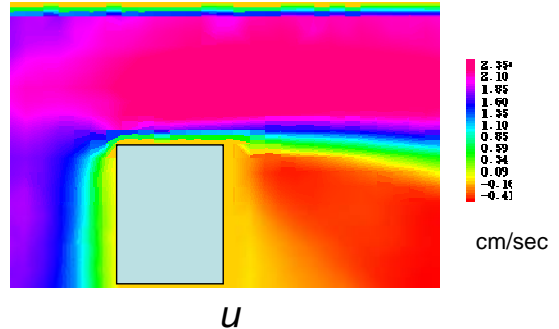


U

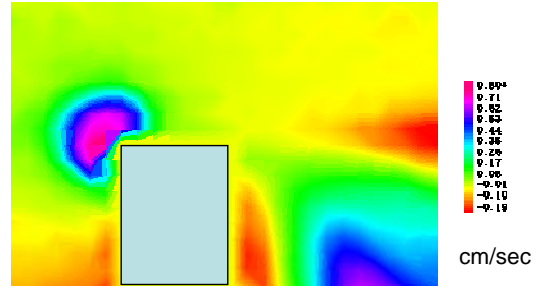


W

(a)成層流体での場合(D1\_H)



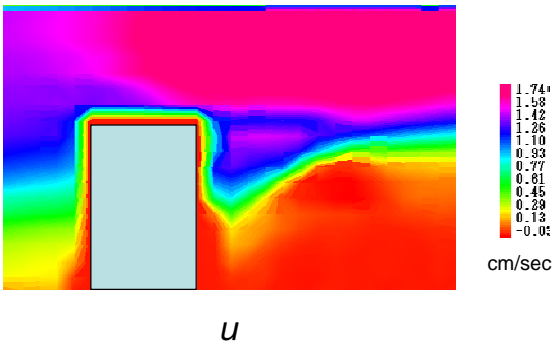
U



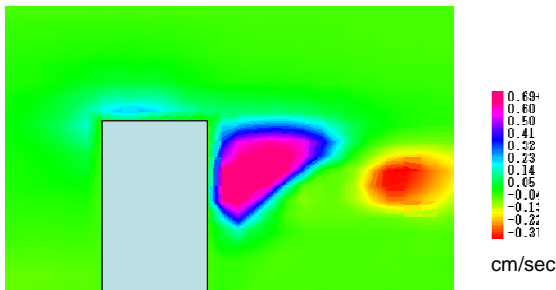
W

(b)均質流体での場合(M1\_H)

Fig.6-1  $x-z$ 断面 ( $y=0$ ) での速度分布図

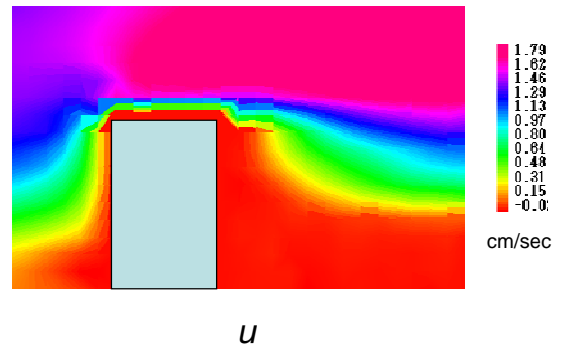


U

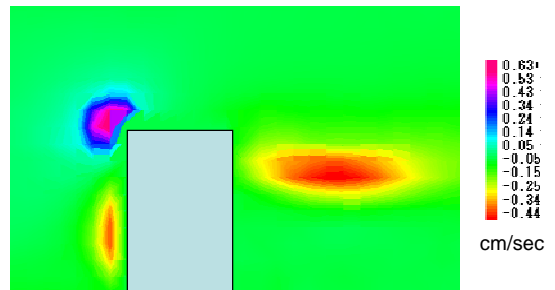


W

(a)  $x-z$ 断面 ( $y=0$ ) (D2\_H)



U



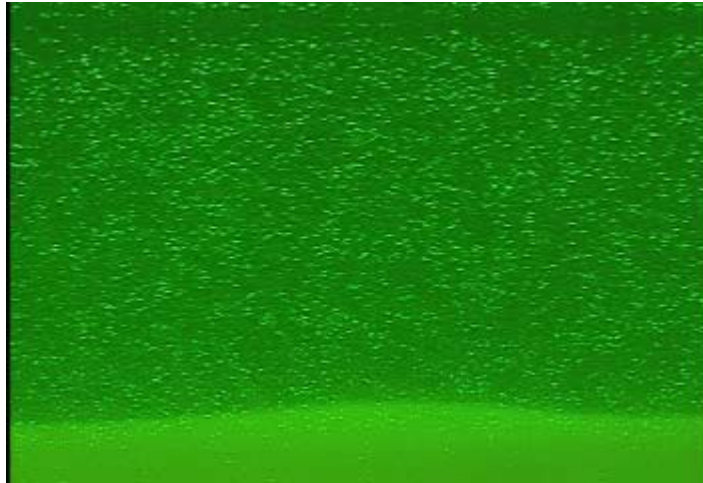
W

(b)  $x-z$ 断面 ( $y=2$ ) (D2\_H)

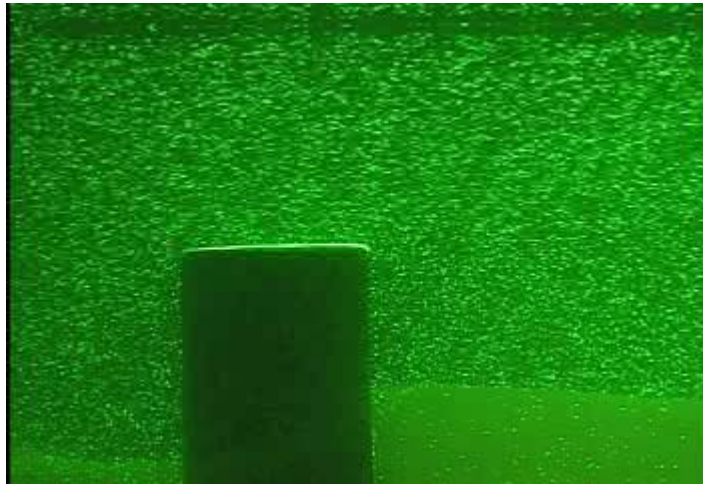
Fig.6-2 二円柱の場合での  $x-z$ 断面での速度分布図

## 6.2 密度界面形状に関する結果

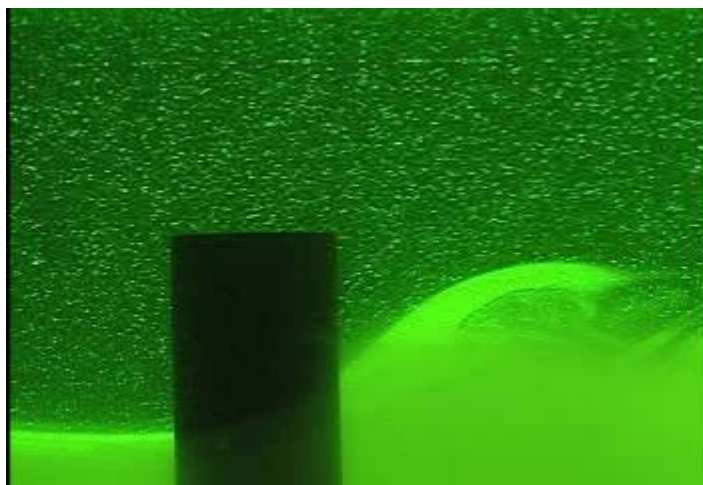
円柱の存在により，上述の速度分布の違いが生じ，そのことが密度界面形状に影響を与えていることが考えられる．Photo.6-1 に高密度フルード数の条件での密度界面形状の変化を示す．円柱がない状態では内部波が発生しているものの，その表面はほとんどフラットである（Photo.6-1(a)）．ここに円柱がおかれると（Photo.6-1(b)），円柱上流側のよどみ域において界面が低下し，下流側の剥離領域で界面が上昇している．二円柱の場合では（Photo6-1(c)），円柱間から放出される上昇流が界面から剥離する際に大きく下層水を巻き上げているのがわかる．このように，上層の流れの変化が密度界面に変化を生じさせている．また，密度界面が上昇した部分では密度界面自体が流れを抑制している（5.1 節）．そのため，密度界面形状を調べることで，上層の流れを推測することもできると考えられる．Fig.6-3 に高密度フルード数の場合の単一円柱周りの平均密度界面形状を示す．



(a) 円柱なし



(b) 円柱一本



(c) 円柱二本

Photo.6-1 密度界面形状の変化

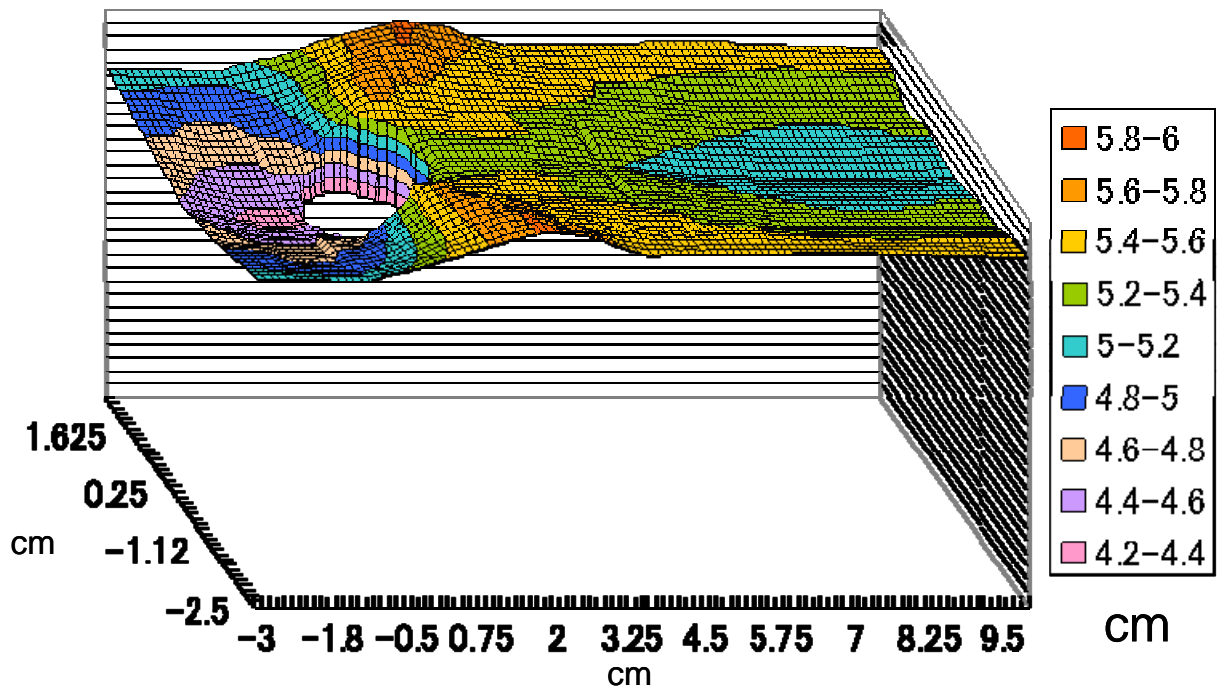
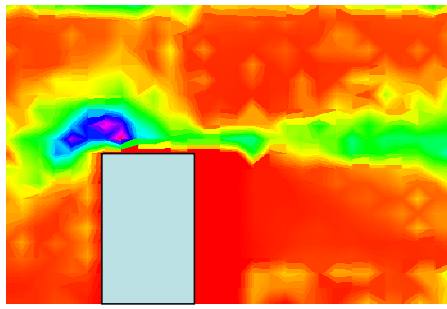


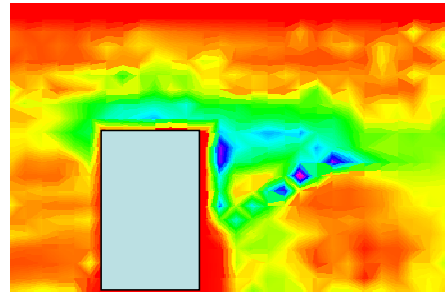
Fig.6-3 平均密度界面形状 (D1\_H)

### 6.3 乱れ強度とレイノルズストレスに関する結果

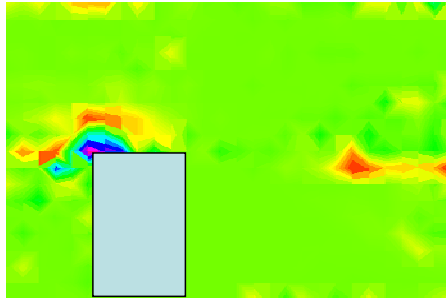
Fig.6-4 に単一円柱と二円柱の場合の  $x-z$  断面 ( $y=0$ ) での乱れ強度  $\sqrt{u'^2}$  とレイノルズストレス  $-\overline{u'w'}$  の分布図を示す. 単一円柱においては乱れ強度は円柱前縁部で特に大きく, 下流側に剥離せん断領域に渡って大きな値が続いている. 乱流エネルギーの発生源となるレイノルズストレスについては, 円柱前縁部では同じく特に大きい, 円柱下流側の剥離せん断領域では,それほど大きな値となっていない. そのため, 剥離せん断領域の部分の乱れの多くは円柱前縁部で発生した乱れが輸送された結果であろうと思われる. 二円柱の場合は, 円柱間の上昇流の部分で特に大きな乱れが生じている. また, レイノルズストレスもこの部分で大きな値となっている. 円柱間で流れが加速され, 速度勾配が非常に大きくなったためであると考えられる.



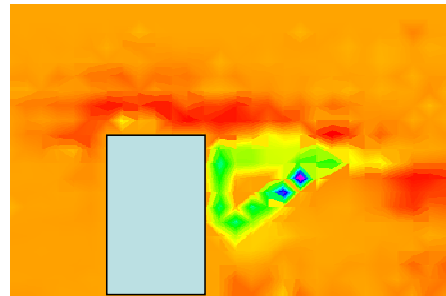
$$\sqrt{u'^2}$$



$$\sqrt{u'^2}$$



$$-\overline{u'w'}$$



$$-\overline{u'w'}$$

(a) 単一円柱  $x-z$  断面 ( $y=0$ ) (D1\_H)

(b) 二円柱  $x-z$  断面 ( $y=0$ ) (D2\_H)

Fig.6-4  $x-z$  断面 ( $y=0$ ) での乱れ強度  $\sqrt{u'^2}$  ・レイノルズストレス  $-\overline{u'w'}$  分布図

## 第 7 章 結論

本研究では、閉鎖性密度 2 成層水域における、沈水植物が存在する流れにおいて、沈水植物が流れにどのような影響を与えるかを明らかにするために、その基礎研究として密度 2 成層流での円柱周りの流れ及びその後流特性について水理実験を行い PIV により計測し、検討した。その結果以下のような結論を得た。

- (1) 成層流では、円柱後流の鉛直方向流れは、均一流体の場合と比べて抑制される。
- (2) 円柱から回り込み、加速した上層流が界面から剥離する際に特に連行が生じている。
- (3) 円柱前縁部及び剥離部分、円柱間から放出される上昇流部分で強い乱れが発生しており、これが連行を促進すると考えられる。

## 謝辞

本論文の作成にあたり，御指導，御協力を承りました九州大学大学院生物資源環境科学府生産環境科学部門生産環境学講座の森 健教授，平井 康丸助教授に深く感謝し，厚く御礼申し上げます．

なお，本研究を実施するにあたり，九州大学大学院農学研究院生産環境科学部門水環境学研究室に便宜を図っていただいたことに謝意を表します．

また，同講座特別研究員尾崎 彰則氏には，本研究を進めるに当たり御助言，御教示等，終始惜しみないご協力をいただき心より御礼申し上げます．

また，多方面にわたり広く御意見，御協力をいただいた同情報生産学講座の博士課程 Bui Quoc Lap 氏，濱上 邦彦氏，Nguyen Van Tuan 氏，修士課程柿崎新之助氏，木佐貫順子氏，すべての皆様に深く感謝いたします．

さらに，講座配属以来，本日に至るまで励ましあい，助け合った田上 賢吾氏，陳 元氏に深く感謝いたします．

最後にいつもかげながら協力，激励してくださった家族に心より感謝の意を捧げて結びとさせていただきます．

2007年3月

山崎 寛史

## 参考文献

- 椿 東一郎 : 水理学Ⅰ, 森北出版株式会社, 1995
- 椿 東一郎 : 水理学Ⅱ, 森北出版株式会社, 1995
- 有田 正光 : 水圏の環境, 東京電気大学出版会, 1995
- 飯泉 茂 : 植物群落とその生活, 東海大学出版会, 1986
- 生島 功 : 水界植物群落の物質生産Ⅰ, 共立出版, 1974
- 浜島 繁隆 : 池沼植物の生態と観察, ニューサイエンス社, 1983
- 沖 陽子 : 水生植物の水質浄化能の評価, 農業土木学会論文集, 2003
- 増島 博 : 水生植物を利用した水質浄化, 農業土木学会論文集, 2003
- 木田 重雄 : いまさら流体力学?, 丸善株式会社, 1994
- (社) 可視化情報学会 : PIVハンドブック, 森北出版株式会社, 2002
- 宇民 正 : 橋脚後流息の流れパターンについて, 京大防災研究所年報, 1974
- 岡本哲史・八木田 幹 : 一様流に平行な平面に垂直に置かれた有限長円柱の流れに関する実験的研究, 日本機械学会論文集, 1972
- 森 健 : 吹送流による密度界面の連行速度に関する実験的研究, 農業土木学会論文集, 2002
- 森 健 : 吹送流型二層流の乱流構造, 農業土木学会論文集, 第144号, pp.75-84, 1989
- 村松 亮介 : 吹送流型2成層流に及ぼす浮揺性水草の影響, 九州大学卒業論文, 2002
- 尾崎 彰則 : 水生植物がある閉鎖性2成層水域の吹送流による連行現象, 九州大学修士論文, 2003