

## 吹送流型2成層流に及ぼす浮揺性水草の影響

村松, 亮介  
九州大学農学部生物資源環境学科生物資源生産科学コース生産環境情報学研究室

<https://hdl.handle.net/2324/1498285>

---

出版情報 : Kyushu University, 2001, 学士, 学士  
バージョン :  
権利関係 :

# 吹送流型 2 成層流に及ぼす 浮揺性水草の影響

生産環境情報学講座

村松 亮介

# 目次

第1章	序論	1
第2章	水草のある閉鎖性水域の環境	
2 - 1	序論	3
2 - 2	水生植物群落の構造	3
2 - 3	水生植物の生活型	3
2 - 4	水生植物の生活型による池の分類	5
2 - 5	結論	7
第3章	密度2成層流における連行現象と乱流構造	
3 - 1	密度成層と風の及ぼす効果	10
3 - 2	密度2成層流における連行現象	20
3 - 3	密度2成層流における乱流構造	24
第4章	閉鎖性密度2成層流における水草の占有率と乱流構造の關係の解明	
4 - 1	実験目的	26
4 - 2	実験概要	26
4 - 3	実験条件	33
4 - 4	結果と考察	33
4 - 5	渦に関する考察	35
	結果(図表)	37
第5章	結論	54
	謝辞	
	参考文献	

## 第 1 章 序論

湖沼や貯水池の流れはゆるやかで、河川とは異なる水理的・水質的特性を有する。河川に比べて水域が閉鎖的で物質が蓄積されやすく、しかも自浄作用に乏しいために富栄養化や水質の汚濁などが発生しやすい状況にあると言える。空間的に閉じた水域では、外乱のない場合、温度あるいは濃度による密度差で鉛直方向に成層化しており、熱や物質は密度流によって輸送されている。

閉鎖性水域における流れの主因は機械的擾乱（風の作用による吹送流および循環流）および熱的擾乱（日中の成層化と夜間の鉛直熱対流）である。したがって、湖沼や貯水池などの閉鎖性水域の水質および環境問題に関して、これら種々の外乱に対して密度成層場がどのように応答するのか、すなわち密度分布が時空間的にどのように変化するかを定量的に把握することは重要だと言えよう。水域に風の作用がなく熱的擾乱のみが作用する場合、水面に付加される 1 日サイクルの加熱・冷却による水温日成層・日混合層の発達・消滅過程は水質輸送に果たす役割は大きい。一方、機械的擾乱が卓越する場合、吹送流とその乱れおよび循環流による水質輸送は、熱的擾乱に対してその規模は極めて大きい。

これまで、水面加熱・冷却による密度流に関する研究や密度 2 成層場における吹送流に対する応答に関する研究が行われてきた。後述の研究により以下の様な考察が得られている。

密度 2 成層場では、上層の乱れが密度界面を介して接している下層流体を上層へ輸送する、いわゆる連行現象を起こし、その結果、界面の低下と上層密度の増加をもたらす。連行のタイプには、密度界面の擾乱による小規模の乱れに起因する拡散的なもの、密度界面に発生、発達する内部波の砕波に起因する巻き込み的なもの、および大規模な渦に起因する侵入的なものが考えられる。これらは連行促進機能を有する成層安定度の大小関係に支配される。すなわち、連行現象は流れ場の乱流構造や密度界面に発生する内部波と密接な関係にあるものと思われる。

さて、閉鎖性水域では吹送流が上層に乱れを生じさせることによって密度流が発生するわけだが、これは吹送流と水面との境界に生じるせん断力に起因している。ここで、各地に散在する湖や貯水池を考えると、その沿岸には様々な植生が見られる。中には水面に浮かんで群生しているものがあり、この場合、水域全体でみると、せん断力が部分的に低下することによって少なからず流れ場の乱流構造や内部波に影響を与えていると考えられる。

本研究では、特に浮葉性の植物について考え、水面の被覆率を変化させ、密度 2 成層場の乱流構造の変化を比較・検討した。

以下、第 2 章では閉鎖性水域に繁茂する水草について、第 3 章では密度 2 成層流における連行現象と乱流構造について、そして第 4 章では本研究で行った実験について述べる。

## 第2章 水草のある閉鎖性水域の環境

### 2 - 1 序論

本研究では、風の作用下での閉鎖性水域の応答に関して浮葉植物の繁茂状況による影響を比較・検討した。そこで、水生植物の一般的な性質や分類を以下に示し、閉鎖性水域の水質さらには水域全体の環境との関係を確認する。

### 2 - 2 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いえることは、湖沼、溜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上げられる。

### 2 - 3 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。休眠芽が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、1年生・越年生・2年生植物を1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、さら生育期に水中でどのように生活してるかにより

- ・ 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）
- ・ 浮遊生植物・・・水面に浮遊しているもの（ウキクサ類）
- ・ 根生植物・・・根は水底の土中にあるもの（ヒツジクサなど）

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 - 4 水生植物の生活型による池の分類

池にはそれぞれの生い立ち、形、水質、集水域など池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表わ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池の分類を試みた。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する。

### ○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池である。富栄養化の進行していない比較的きれいな池で、丘陵地の人為的影響の少ない地域の池に多い。富栄養化が現在のように進行していなかった時代には、この型の池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池もある。

### ○浮葉植物優占型

浮葉植物帯が優占し、沈水植物体は存在しないか、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。



#### ○浮遊植物帯優占型

岸辺にはヨシ・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池がこの型である。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池で、しばしばホテイアオイが水面全域をうめつくす程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、岸辺にヨシ、マコモ、フトイ、カンガレイ、クログワイなどの生育する池である。水の華を生ずるほど富栄養化した池にこの型が多い。この型の池は、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、毎年池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。

## 2 - 5 結論

このように、湖沼における水生植物の生育環境（図 2-1, 2, 3 参照）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池になるほど、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。さらに、浮葉植物は葉の幅が広いために閉鎖性水域内を循環させる風あるいは熱といった水域内に自浄作用をもたらす外乱を阻害すると考えられる。そこで今回は、湖沼の水質の状態が比較的悪化傾向にある浮葉植物帯優占型および浮遊植物帯優占型の池を対象に、浮遊植物が湖沼の水面を占有する場合について室内実験を行って比較検討を行った。

## 植物生態分布

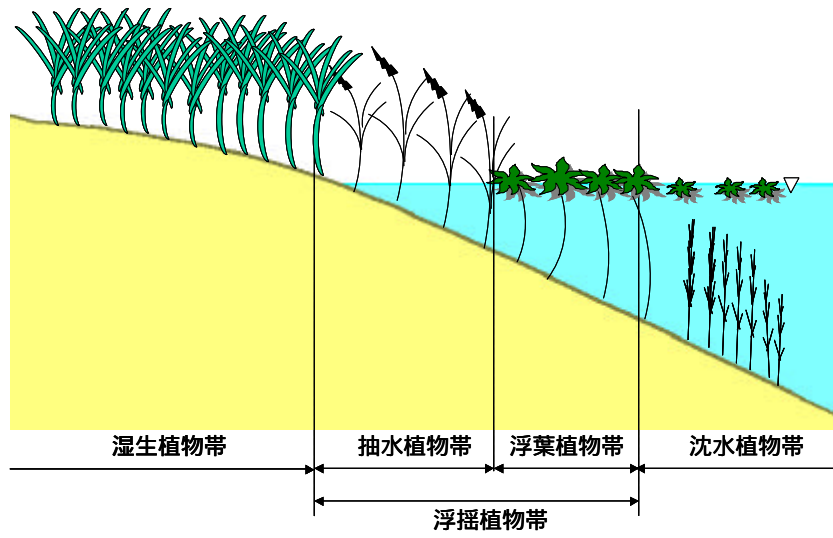


图 2-1

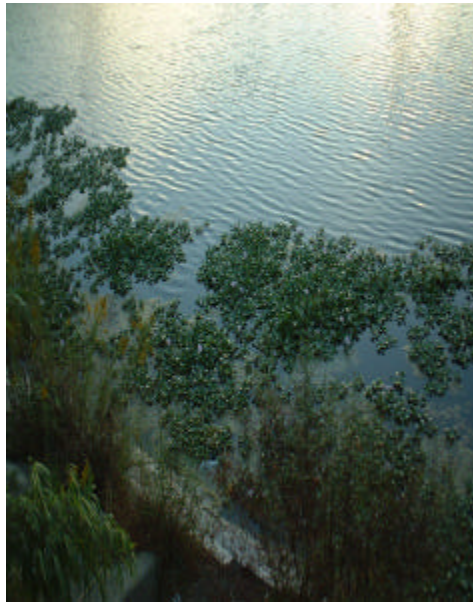


図 2-2 福岡市内の貯水池



図 2-3 福岡市内の貯水池

## 第3章 密度 2 成層流における 連行現象と乱流構造

### 3 - 1 密度成層と風の及ぼす効果

#### 3 - 1 - 1 密度流とその安定性

空間的に閉じた水域においては、水温、浮遊物質（濁度）、溶解性物質（塩分）などの差によって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されている。このような密度成層を有する閉じた水域の水表面に風が作用すると、その応答として表面波（風波）と吹送流およびその乱れが存在することとなり、とくに表層は乱流状態になる。

上層の密度が下層の密度に比較して小さい場合、水域は成層化しているという。また、鉛直方向に連続的な密度分布を持つ成層を連続成層（図 3-1(a)）、成層が多層から成り、密度分布が不連続な成層を不連続成層と呼んでいる。本研究では特に、塩水を用いた上下 2 層から成る 2 成層（図 3-1(b)）を扱った。

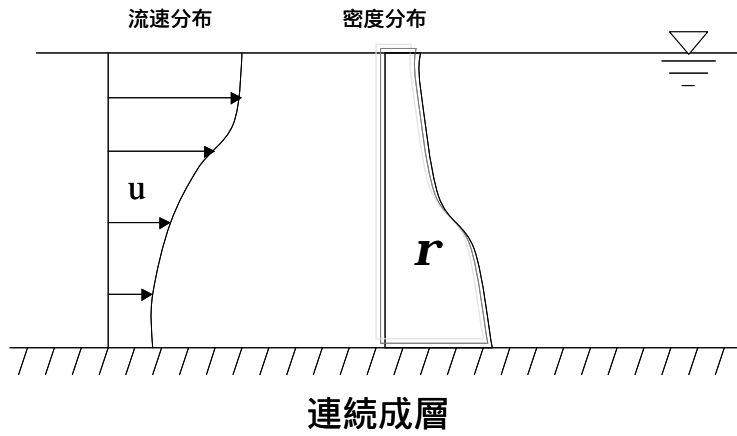


圖3-1(a)

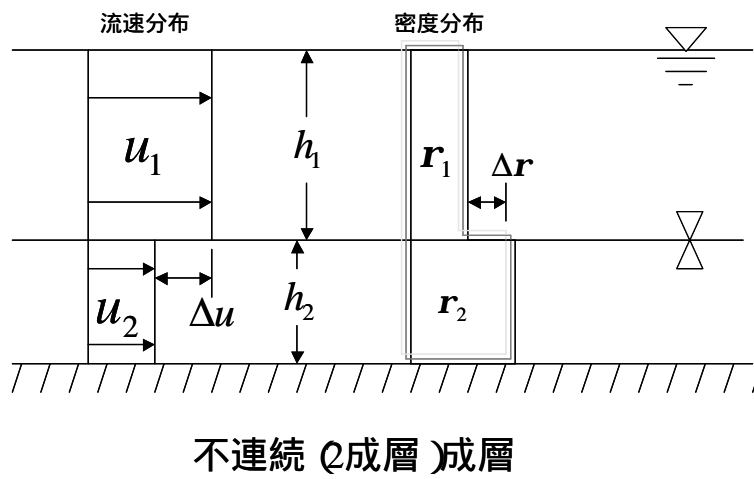


圖3-1(b)

続いて、密度成層の安定度を表すための諸パラメーターについて記述する。

密度流が安定であるとは、時間が経過しても流速、密度分布が初めの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は、時間の経過とともに上下層の混合が生じ、流速、密度分布が一様化することを意味する。なお、上層の流体の密度が下層のそれより大きい場合には密度成層は必然的に不安定となる。

(1) ブルント - バイサラ振動数  $N$

図 3-1(c)に示すように、連続成層した静止流体中 ( $dp/dz > 0$ ) の  $z = z_0$  における密度  $\rho$  の微小流体塊 (単位質量) を  $\Delta t$  時間に  $\Delta z$  だけ下方に移動させる場合の鉛直速度  $w$  は、次式で与えられる。

$$w = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{dz}{dt} \quad (\text{式 3-1-1})$$

また、加速度  $a$  は  $a = d^2z/dt^2$  であり、単位質量の流体塊の受ける外力  $F$ 、つまり浮力  $F$  は  $F = -(\Delta\rho/\rho)g$  である。ここに、 $\Delta\rho = \rho_{z+\Delta z} - \rho_z (= d\rho/dz \cdot \Delta z)$  である。ここで、 $\Delta z = x$  として、ニュートンの第 2 法則:  $F = ma$  をこの流体塊 (単位質量;  $m=1$ ) の運動に適用すると

$$F = a = \frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{\Delta\rho}{\rho} g = -\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} x = -N^2 x \quad (\text{式 3-1-2})$$

が成立する。ここに、 $N$  はブルント - バイサラ振動数と呼ばれ、次式で定義される密度成層の安定度を表すパラメーターである。

$$N^2 = \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \quad (\text{式 3-1-3})$$

$N^2 > 0$  (つまり  $d\rho/dz > 0$ ) の場合には、式 3-1-2 を  $t=0$ :  $x=a$ 、

$$dx/dt = 0$$

の初期条件の下で積分すると、

$$x = a \cos Nt$$

を得る。同式は密度成層中に振幅  $a$ 、角振動数  $N$ 、周期  $2\pi/N$  の振動が



生じることを示している。実際の流体中では、粘性の効果によって振幅は時間の経過とともに減衰していく。このような密度成層を静力学的に安定であるといい、この状態の成層を安定成層という。

一方、 $N^2 < 0$  (つまり  $dr/dz < 0$ ) の場合には、式 3-1-2 の解 (初期条件は先と同じ) は次式となる。

$$x = a \cosh Nt$$

つまり、上下方向に移動させられた流体塊は浮力の作用でますますもとの位置より離れてゆく。このような成層を静力学的に不安定であるといい、この状態の成層を不安定成層という。

また、 $N^2 = 0$  (つまり  $dr/dz = 0$ ) の場合には、上下方向に移動させた流体塊はその位置にとどまる。この成層状態を静力学的に中立であるという。

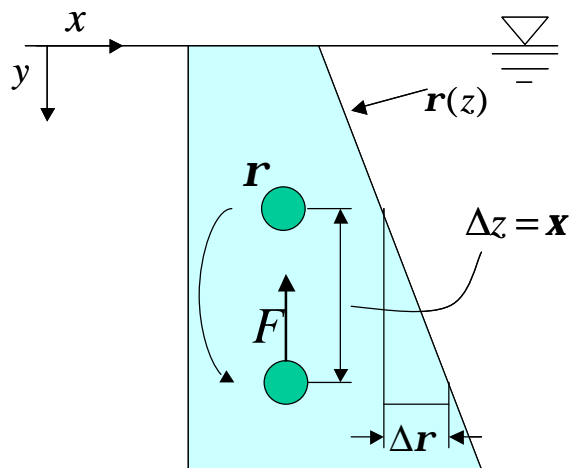


図3-1(○)

( 2 ) リチャードソン数  $R_{ii} \cdot R_i$  および密度フルード数  $F_d$

成層の安定度を表すためのパラメーターの 1 つにリチャードソン数  $R_{ii}$  があり、これは局所的な密度勾配  $d\mathbf{r}/dz$  と速度勾配  $du/dz$  を用いて次式のように定義される。

$$R_{ii} = \frac{-\frac{g}{\mathbf{r}_r} \frac{d\mathbf{r}}{dz}}{\left(\frac{du}{dz}\right)^2}$$

ここに、 $\mathbf{r}_r$  は較正密度と呼ばれ、基準となる密度である (ここでは、 $z$  は鉛直上向きである)。このリチャードソン数は局所的な諸量を用いて定義されるので、局所リチャードソン数と呼ばれている。

一方、2 成層流の場合の上層のリチャードソン数は、 $-d\mathbf{r}/dz = \Delta\mathbf{r}/h_1$   $du/dz = \Delta u/h_1$  ,  $\mathbf{r}_r = \mathbf{r}_2$  とおいて、

$$R_i = \frac{\frac{g\Delta\mathbf{r}}{\mathbf{r}_2 h_1}}{\left(\frac{\Delta u}{h_1}\right)^2} = \frac{\frac{\Delta\mathbf{r}}{\mathbf{r}_2} g h_1}{\Delta u^2}$$

のように書くことができる。ただし、 $\Delta\mathbf{r}$  ,  $\Delta u$  は上下層の密度差、流速差であり、また、添え字 1 , 2 はそれぞれ上層および下層の量であることを表している。同式をより一般的な形で次式のように表す。

$$R_i = \frac{\frac{\Delta\mathbf{r}}{\mathbf{r}} g h}{u^2} = \frac{1}{F_d^2}$$

ここに、 $R_i$  は層平均型リチャードソン数、 $F_d$  は密度フルード数と呼ばれ、成層流の現象を表現する際によく使用されるパラメーターである。

### 3 - 1 - 2 成層水域に風の及ぼす効果

成層水域の水面に風が吹くと図 3-1(d), (e), (f), (g)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を以下に示す。

#### (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じる。

(図 3-1(d)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(図 3-1(e)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。(図 3-1(f)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(図3-1(g)参照)。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全て生ずるわけではない。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・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、三次元的で複雑になっている。

本研究では実際の閉鎖性水域を室内で模擬して実験を行ったが、詳しくは第4章で述べる。

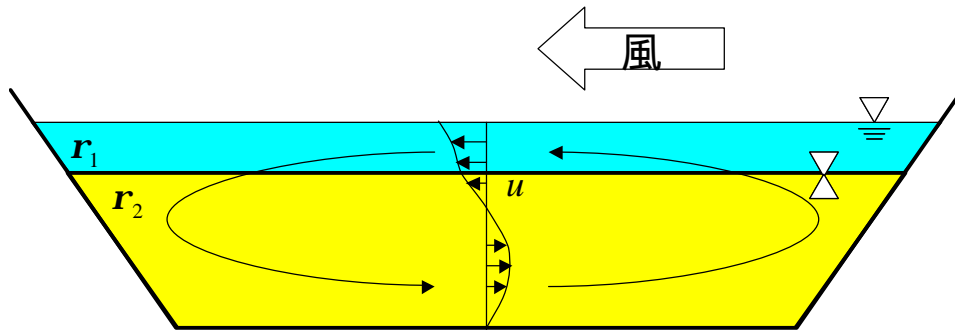


図 3-1(d) 第 1 段階

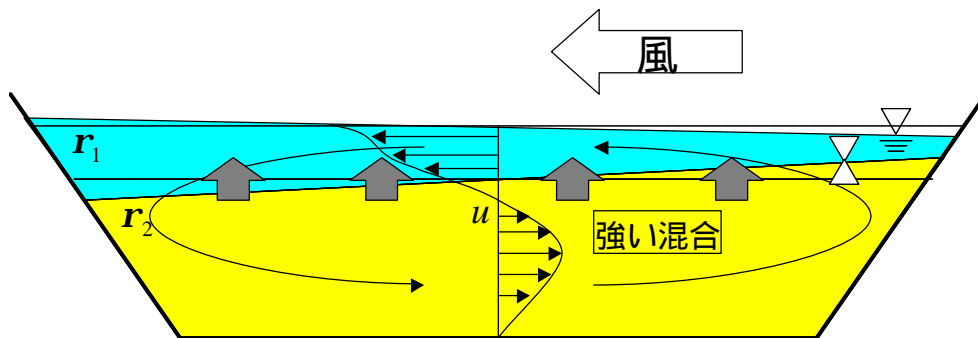


図 3-1(e) 第 2 段階

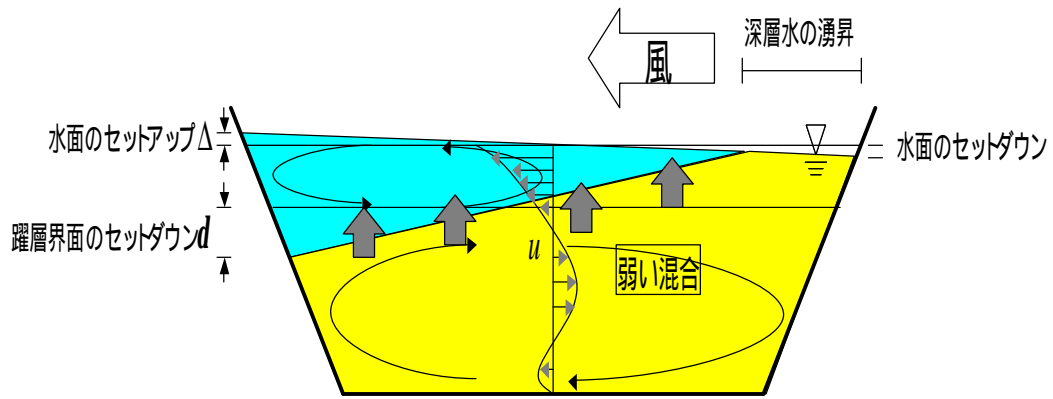


図 3-1(f) 第 3 段階

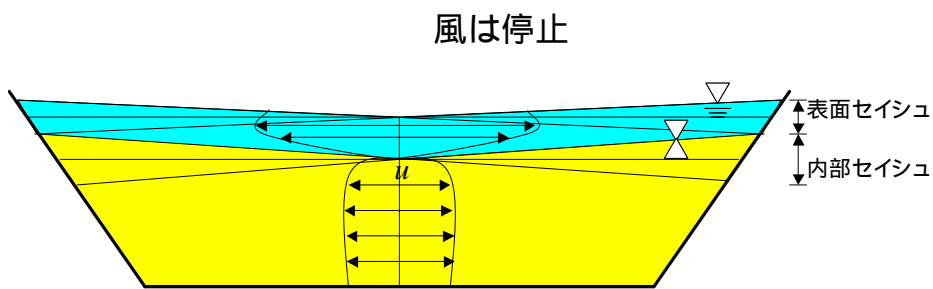


図 3-1(g) 第 4 段階

### 3 - 2 密度 2 成層流における連行現象

#### 3 - 2 - 1 序論

連行現象は一般の拡散現象とは異なり、界面を有する密度 2 成層場で、より乱流強度の大きい上層が小さい下層から流体を取り込む現象である。これまで、密度 2 成層流における密度界面の連行速度に関しては、数多くの実験がなされている。

#### 3 - 2 - 2 界面の時間変化

今回の実験では、密度界面は上、下層間の中間密度を有する位置と定義している。一般的に下層から輸送された塩水が乱れの作用で速やかに混合、拡散され、上層密度の鉛直及び水平分布はほぼ一様化され、かつ界面もほぼ一定の勾配を維持して時間とともに平行に低下している事がわかる。この傾向は成層安定度が弱いほど顕著に見られる。これは、上、下層の間に時間経過とともに発達する中間層の規模が成層安定度が強いほど大きいこととみつどに関係していると考えられる。上層水深の時間変化は初め循環流が形成、内部波の発達のために変動するが、時間の経過とともに時間に比例して増加していく。つまり、界面の低下速度  $d(h_1 - h_{1*})/dt = dh_1/dt$  は一定となる傾向を示している。いま密度 2 成層場の水面に風が作用することによって生ずる流れが 2 次元的であり、かつ流水断面が矩形であれば、上層淡水層の流量の連続の式は次式となる。

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} h_1}{\partial x} = u_e$$

ここに、 $\bar{u}$  は上層の断面平均流速、 $u_e$  は連行速度を表す。ここで対象と

している流れの場では上の式から左辺の第2項は無視できるから

$$\frac{dh_1}{dt} = u_1$$

となり、連行速度は界面の低下速度として求められる。

### 3 - 2 - 3 連行係数とリチャードソン数

一般に、連行速度は連行係数  $E$  と層平均リチャードソン数  $R_i$  の関係として表現されている。

$$\begin{cases} E = u_e / V \\ R_i = \Delta r g l / r V^2 \end{cases}$$

ここに  $V, H$  および  $r$  はそれぞれの代表の速度、長さおよび密度、 $\Delta r$  は上、下層の密度差、 $g$  は重力加速度である。また流れの場における密度保存則は次式となる。

$$\frac{\partial(r_1 h_1)}{\partial t} + \frac{\partial(r_1 \bar{u}_1 h_1)}{\partial x} = r_2 u_e$$

この式は  $\frac{dh_1}{dt} = u_1$  および、 $\Delta r = r_2 - r_1$  を用いると、上式は

$$\frac{\partial r_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial r_1}{\partial x} = \frac{\Delta r}{h_1} u_e$$

となる。上層へ連行された下層塩水は速やかに一様化されるから、

$$\frac{\partial r_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial r_1}{\partial x} = \frac{\Delta r}{h_1} u_e \text{ の}$$



左辺の第2項は無視できる。従ってこの式は

$$\frac{d\mathbf{r}_1}{dt} = u_e \frac{\Delta\mathbf{r}}{h_1}$$

となる。 $\frac{dh_1}{dt} = u_1$ と $\frac{d\mathbf{r}_1}{dt} = u_e \frac{\Delta\mathbf{r}}{h_1}$ から

$h_1\Delta\mathbf{r} = h_{10}\Delta\mathbf{r}_0 = \text{const}$ が導かれる。

そこで $H \rightarrow h_{10}$ 、 $\Delta\mathbf{r} \rightarrow \Delta\mathbf{r}_0$ 、 $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}_a$ 、 $V \rightarrow u_{*a}$ を用いて層平均リチャードソン数を表現すると、

$$R_{ia} = \frac{\Delta\mathbf{r}_0 g h_{10}}{\mathbf{r}_a u_{*a}^2} = \text{const}$$

となり、これは時間的に変化しないので都合がよい。このとき連行係数は、

$$E = \frac{dh_1}{dt} / u_{*a} = \frac{u_e}{u_{*a}}$$

として求められる。

実験結果に基づき、連行係数 $E$ と空気の摩擦速度を用いた層平均リチャードソン数 $R_{ia}$ との関係を示すと、層平均リチャードソン数 $R_{ia}$ がおおよそ100付近を境界にして $R_{ia} > 100$ の領域では $E \propto R_{ia}^{-1}$ 、 $R_{ia} < 100$ の領域では $E \propto R_{ia}^{-3/2}$ の傾向にある。すなわち、水面に作用する風のせん断応力によってなされる仕事のポテンシャルエネルギー増加への寄与が $R_{ia}$ によって異なるものと推察される。

単位面積あたり $dt$ 時間のポテンシャルエネルギー $E_p$ の増加は

$$dE_p = \frac{1}{2} \Delta r g h_1 dh_1$$

$dt$  時間に風の仕事によって加えられた仕事  $E_k$  は

$$dE_k = r_a u_{*a}^2 u_s dt$$

この両者の比をとると

$$\frac{dE_p}{dE_k} = \frac{1}{2} ER_{ia} \frac{u_{*a}}{u_s}$$

となる。ここに、 $u_s$  は表面流速である。 $R_{ia}$  に関係なく  $u_{*a} / u_s = const$  が成立している。従って、 $R_{ia}$  の大きさに関係なく  $dE_p / dE_k = const$  であれば、

$$E \propto R_{ia}^{-1} \text{ が成立し、 } dE_p / dE_k$$

が  $R_{ia}$  の関数であり例えば  $dE_p / dE_k = R_{ia}^{-1/2}$  を満足すれば  $E \propto R_{ia}^{-3/2}$  が成立する事になる。これらは吹送流型 2 成層密度流による流れの内部構造、すなわち乱れ構造に支配されているものと考えられ、その解明が重要な課題である。

### 3 - 3 密度 2 成層流における乱流構造

図 3-3(a)に示すような成層乱流を考える。

このとき、乱れエネルギー  $q = (1/2)(\overline{u'^2} + \overline{w'^2})$  の支配方程式は微小項を省略すると次式で与えられる。

$$\frac{Dq}{Dt} = -\overline{u'w'} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \overline{w' \left( \frac{p'}{r_1} + q \right)} \right\} - \frac{g}{r_1} \overline{\Delta r' w'} - e_t \quad (\text{式 3-3-1})$$

ここに、 $D/Dt = \partial/\partial t + u\partial/\partial x + w\partial/\partial z$ ,  $u'$ ,  $w'$ ,  $p'$  はそれぞれ  $u$ ,  $w$ ,  $p$  (圧力) の乱れ成分、 $\Delta r'$  は  $\Delta r (= r - r_1)$  の乱れ成分である。

式 3-3-1 の第 1 項は乱れエネルギーの時間変化を表し、第 2 項は乱れエネルギーの発生を、第 3 項はエネルギーの拡散を、第 4 項はポテンシャルエネルギーの交換、第 5 項は粘性による逸脱を表している。

図 3-3(b)に式 3-3-1 の表す乱れエネルギーの収支を模式的に示す。同図に示すように、均質乱流 (密度差のない乱流) の場合には、レイノルズストレスによって乱流場に乱れエネルギーが供給され、また、拡散により乱れエネルギーが輸送されており、この乱れエネルギーが粘性によって散逸している。一方、成層乱流の場合には、上記のプロセスに加えて乱れエネルギーとポテンシャルエネルギーの間の移行が生じる。つまり、安定な成層乱流では乱流の乱れエネルギーがポテンシャルエネルギーに移行し、不安定な成層乱流ではポテンシャルエネルギーが乱れエネルギーへ移行する。

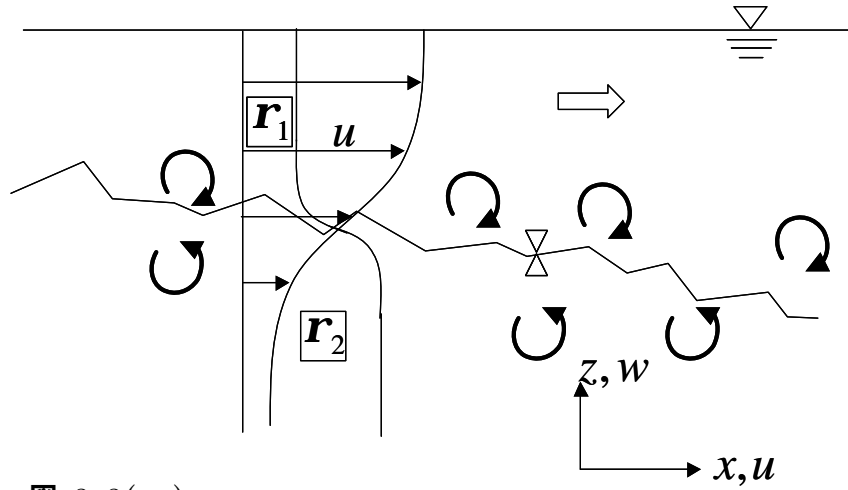


図 3-3(a)

2次元成層乱流

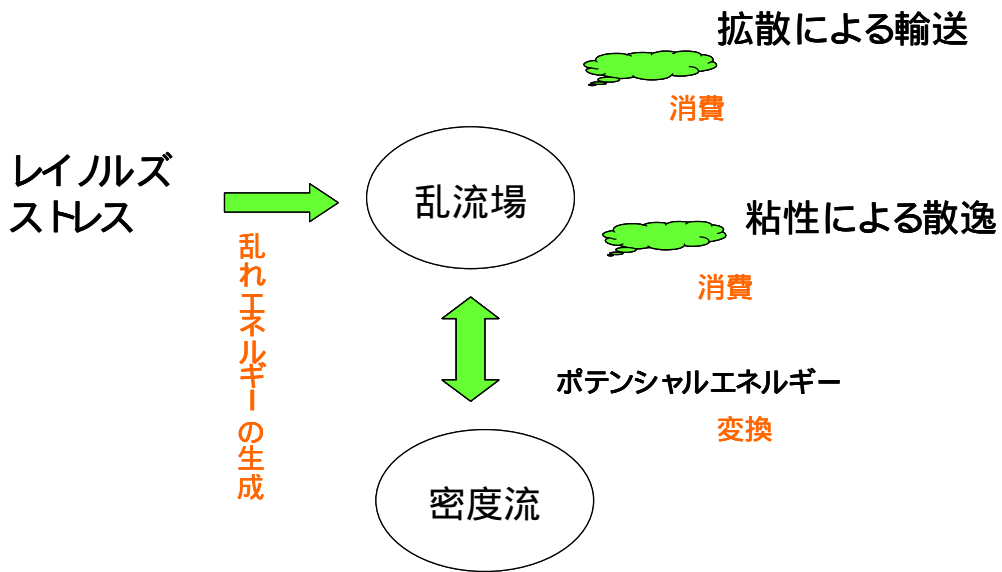


図 3-3(b)

乱れエネルギーの輸送機構

## 第4章 閉鎖性密度 2 成層流における 水草の占有率と乱流構造の関係の解明

### 4 - 1 実験目的

これまで第 2, 3 章でも述べてきたように、閉鎖性密度 2 成層水域に吹送流が作用するとき、水草の繁茂状況によってその応答に少なからず変化が表れることが予測される。外部からの擾乱による自浄作用に頼る閉鎖性水域での水質の改善、さらには水域全体の環境問題を考える上で、水草の占有率と密度 2 成層流の乱流構造の解明を進めることは重要である。本研究では特に浮揺性水草が水面を覆っている場合の閉鎖性密度 2 成層水域を対象として、吹送流による密度界面の連行速度および連行機構に密接に関係する上層の乱流構造について水理実験を行い比較・検討したものである。

### 4 - 2 実験概要

#### 4 - 2 - 1 実験装置

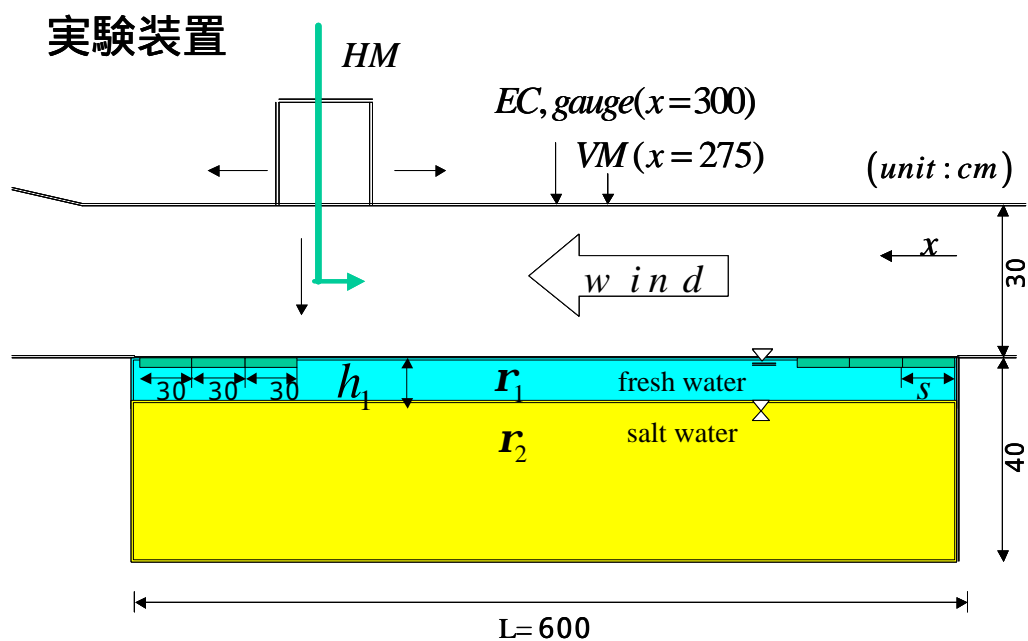
実験装置は、図 4-2(a)(b)に示すように長さ 600cm、幅 30cm、深さ 40cm の水槽と、その上部に取り付けた長さ 30cm、幅 30cm の風路からなる。密度 2 成層場は水道水と塩水を用いて作製した。実験水槽への送風は、密度界面の急激な擾乱を避けるため、徐々に所定の風速になるようにした。

流速の測定には X 型ホットフィルム流速計（図 4-2(e)参照）を使用し、流速計を支えるゲージは、水槽の中心と水草の端の 2 点で流速を測定するために、風洞上部を自由に移動できるようにした（図 4-2(f)参照）。

風速・密度成層の塩分濃度・水温の測定にはそれぞれ熱線風速計・電気

伝導度計・熱伝対を用いた。図 4-2(a)に示すように、風速は風上から 300cm、塩分濃度、水温は風上から 275cm の位置で測定した。

また、水草は厚さ 3mm の発砲スチロール板で模擬(図 4-2(c)(d)参照)し、実験装置の両端から順に被覆率を増加させるようにした。これは先に第 2 章で述べたとおり、実際の湖沼や貯水池での水草の生育環境に従ったものである。



$HM$  : X型ホットフィルム流速計

$EC$  : 電気伝導度計

$VM$  : 熱線風速計

図 4-2(a) 実験装置の概略図

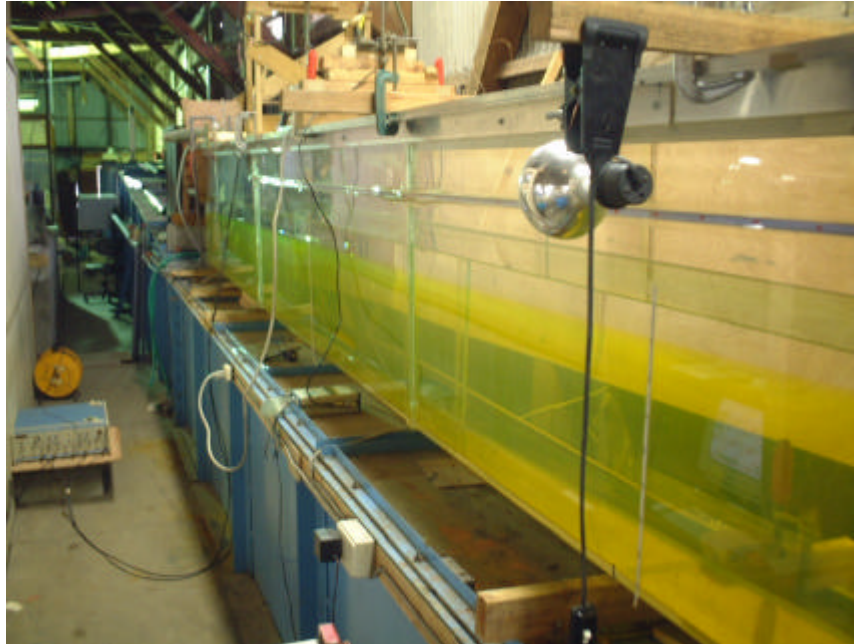


図 4-2(b) 実験風景

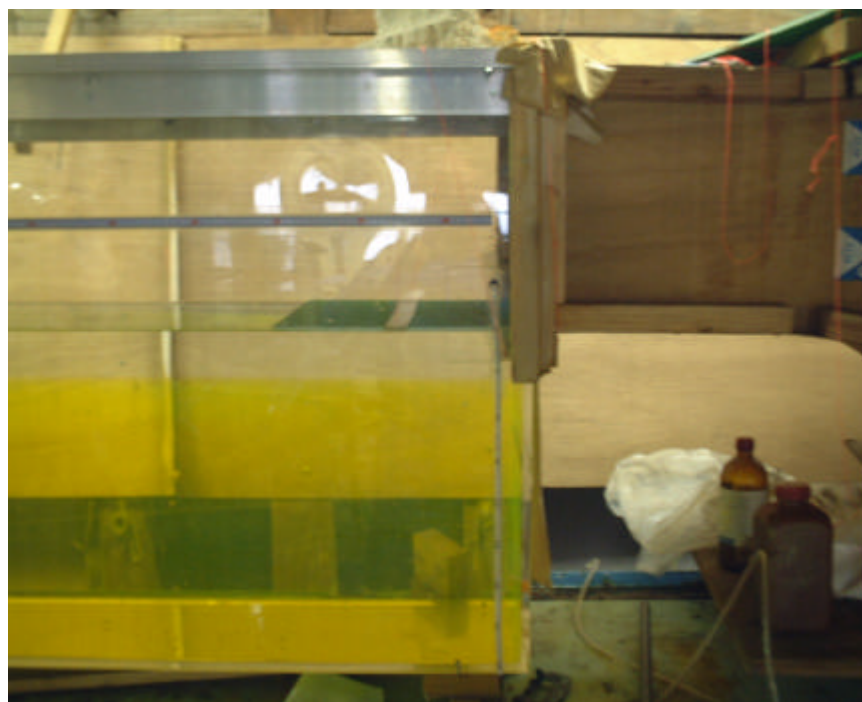


図 4-2(c) 水草を模擬した発砲スチロール（風上側）

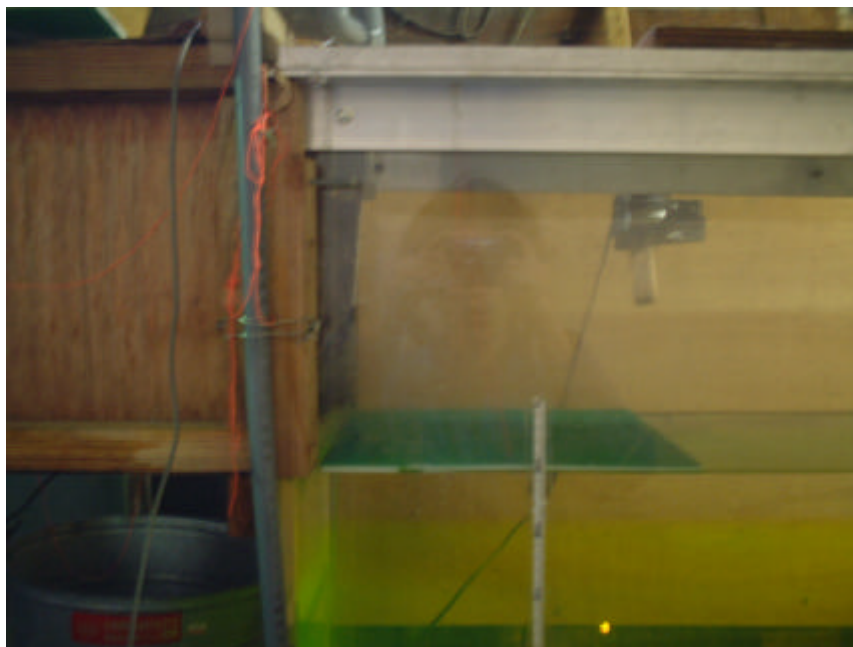


図 4-2(d) 水草を模擬した発砲スチロール（風下側）



図 4-2(e) X型ホットフィルム流速計



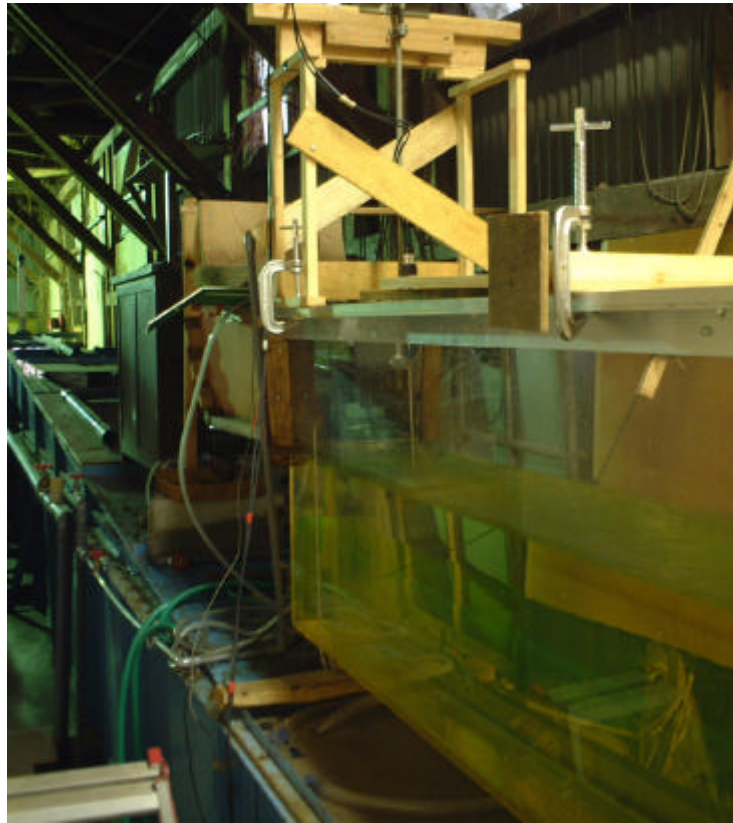


図 4-2(f) 風洞上部に設置したゲージと流速計

#### 4 - 2 - 2 実験方法

実験は、上・下層の密度  $r_1$  ,  $r_2$  の差  $\Delta r_0 = r_2 - r_1$ 、上層の水深  $h_{10}$ 、空気の摩擦速度  $u_{*a}$  および水草の水面占有率  $b(= (2s/L) \times 100)$  をパラメーターとして、層平均リチャードソン数  $R_{ia}(= \Delta r_0 g h_{10} / r_a u_{*a}^2)$  が 100 以下の範囲で行った。ここに、 $L$  は水槽の長さ、 $s$  は水草が水面を占有する岸からの長さ、 $u_{*a}$  は空気の摩擦速度、 $r_a$  は空気の密度である。

なお、空気の摩擦速度  $u_{*a}$  は水面近傍における風速分布の測定結果が対数則に従っていることから、 $U/u_{*a} = (1/k) \ln(z/z_0)$  により算定した。ここに、 $U$  は水面下からの高さ  $z$  における風速、 $k$  はカルマン定数、 $z_0$  は粗度定数である。

まず、水槽の中心すなわち風上から 300cm の地点に X 型ホットフィルム流速計（以下流速計）を取り付けたゲージを固定し、2 成層流の境界面から水面まで、すなわち上層を 0.5cm 間隔に分割し、各点で水面に対して水平方向の流速  $u$ 、鉛直方向の流速  $v$  を計測した。続いて、同条件下で水草端から 3cm の位置にゲージを移動し固定するとともに、水槽中心と同様に流速を計測した（図 4-2(g) 参照）。ただし、水草の占有がない場合、すなわち  $b=0$  の場合は実験装置の都合上、水槽端の風下側から 15cm の位置で測定を行った。計測は各地点とも 100Hz で 25 秒間行った。得られた結果から、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  $\hat{u} = \sqrt{\overline{u'^2}}$ 、鉛直方向乱れ強度  $\hat{v} = \sqrt{\overline{v'^2}}$ 、レイノルズストレス  $-\overline{u'v'}$  を求めて、上層の乱流構造を定量的に把握した。

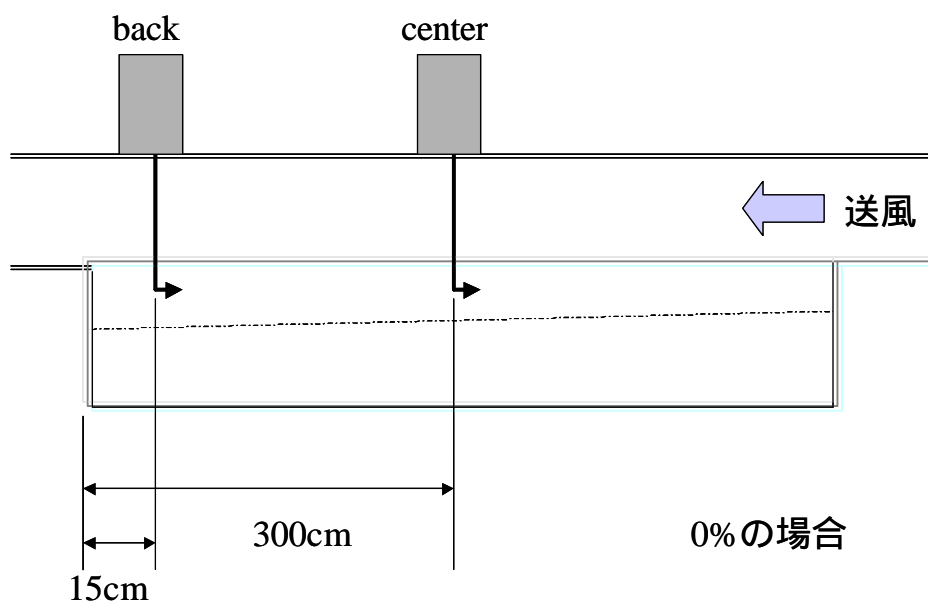
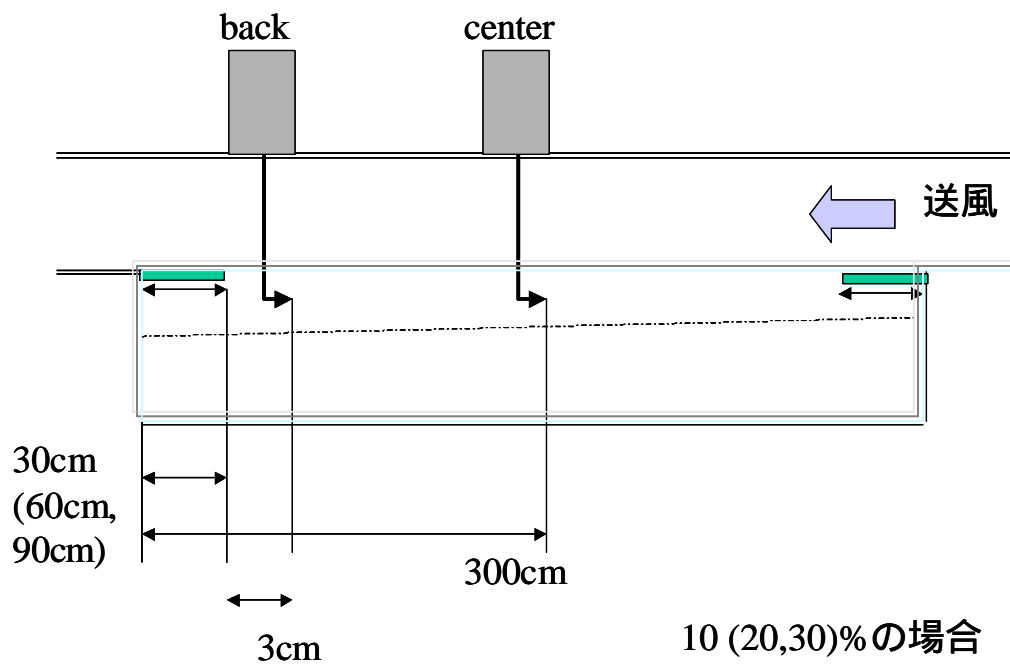


図 4-2(g) 流速計設置法の模式図

#### 4 - 3 実験条件

本研究で行った実験の諸条件を表 1 に示す。

表 1 乱流構造に関する実験条件

占有率	計測位置	風速(m/s)	(g/cm <sup>3</sup> )	$a \times 10^{-3}(\text{g/cm}^3)$	$h_{10}(\text{cm})$	$U^*a(\text{cm/s})$	$U_*(\text{cm/s})$	$R_{ia}$
0%	center	8.5	0.01175	1.2365	12.6	44.46	1.5604	59.3
0%	back	8.5	0.01175	1.2365	13.5	44.46	1.5604	63.6
10%	center	8.3	0.01154	1.2528	9.6	43.21	1.5296	46.4
10%	back	8.3	0.01154	1.2528	11.5	43.21	1.5296	56.6
20%	center	8.3	0.01062	1.2360	10.1	43.21	1.5194	45.5
20%	back	8.3	0.01062	1.2360	11.5	43.21	1.5194	51.8
30%	center	8.5	0.01111	1.2365	10.8	44.46	1.5638	48.1
30%	back	8.5	0.01111	1.2365	11.5	44.46	1.5638	51.2

#### 4 - 4 結果と考察

求めた結果のグラフは別紙に記す。

結果を見ると、水平方向時間平均流速については、水草の占有率が増加するにつれて各水深での水平方向流速は減少する傾向にあると言える（図 4-4(a)参照）。この傾向は center,back のいずれについても観察できる。また水平方向流速は水面から境界面に向かうにつれ減少し、水面から上層水深の 3 割程度の水深までは風上から風下方向への順流部をもち、そこから風下から風上方向の逆流部に移行していることが観察できる。順流部から逆流部への移行水深は水草の占有率が増加するにつれ水面に近づく傾向にある。境界面近くの流速はほぼ 0 である。続いて、各占有率での center と back を比較する（図 4-4(c), (d), (e)参照）と、占有率が 0% の場合

と 10% , 20% , 30% の場合では逆の傾向が見られる。これは、水草の端から潜り込む乱流エネルギーにくらべて、岸すなわち水槽の端から潜り込むほうが大きいことを示すものと思われる。ここで、0% の場合のみ測定位置が他の場合と同条件でないこと( 図 4-2(g) 参照 ) を考慮に入れなければならない。

鉛直方向時間平均流速については( 図 4-4(f) , (d) , (h) , (i) , (j) 参照 )、各点は負の値の範囲に広範囲に散らばっており、水面から沈み込む向きの流速が様々に変化しながら境界面付近では 0 に近づいている様子が観察ができる。これは上層が乱流場であることによるもので、流速の大きな変動は渦の通過などによるものと考えられる。center , back いずれについても各水深の流速は水の摩擦速度  $u_*$  の 3 割以内の値を示している。

乱れ強度は各点での乱れの強さを表す指標であるが、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各点での乱れの強さが減少する傾向を見ることができる( 図 4-4(k) , (l) 参照 )。center と back を比較すると、back では center よりも大幅に乱れは少なく、水草の端付近では水面から上層水深の 3 割程度の深さでほぼ乱れがなくなっていると言える。鉛直方向の乱れ強度( 図 4-4(u) , (v) , (w) , (x) , (y) 参照 ) についても同様の傾向が見られる。

レイノルズストレスは乱れの発生源を示すものであるが、水槽中心では水面付近で大きな乱れの発生がみられるのに対し、水草の端では水面付近で微小な乱れの発生が見られるに留まっている。いずれの条件でも水面付近でのみ大きな値をとっており、水深が 2cm を越えるとほぼ 0 である。これは乱れの発生が水面でのせん断力に起因しており、そのエネルギーが下部に伝えられていることがうかがえる。

## 4 - 5 渦の発生に関する考察

### 4 - 5 - 1 概要

閉鎖性水域における密度 2 成層流の乱流構造についてこれまで考察を続けてきたが、外乱によって水面付近で生成した乱れのエネルギーは成層内部に渦を発生させている。水草の占有率や、計測点の違いによる渦の動向を見る。

まず、渦に関する考察を行うために、 $x$ 方向の流速変動  $u$  の自己相関関数を考え、次式の自己相関関数  $R_u(t)$  から流速変動の  $x$  方向の積分スケール  $l_x$  を各測点について求めた。

$$l_x = \bar{u}(z) \int_0^{t_0} R_u(t) dt$$

ここで、 $t$  は自己相関関数のずらし時間であり、 $t_0$  は自己相関係数が最初に 0 になるまでのずらし時間すなわち渦の寿命時間である。

続いて、流速変動の自己相関係数  $R_u(t)$  にはっきりとした卓越周期が認められる場合、その周期が積分時間スケールに対して十分に大きいとき、その卓越周期を  $t_p$  として以下の式より組織渦スケール  $L_x$  を求めた。

$$L_x = \bar{u}(z) \cdot t_p$$

#### 4 - 5 - 2 結果と考察

求めた  $x$  方向の積分スケール  $l_x$  , および組織渦スケール  $L_x$  の鉛直分布を center と back それぞれについて別紙に示す。

積分スケールについて見ると、center に比べ back の方が全般に渦のスケールは小さいことが分かる ( 図 4-5(a) , (b) 参照 )。これは先に示した水平方向乱れ成分のグラフ ( 図 4-4(m) , (n) 参照 ) と比較しても分かる通り、水草の繁茂する付近では風によるせん断力が抑えられ、乱れのエネルギーの発生が抑制されていることに起因すると考えられる。水草の占有率が 0% の場合は他の実験条件にくらべ逆の傾向をとるが、これは水槽の壁面から潜り込む際の渦の発生か、もしくは図 4-2(g) で示した実験条件の違いに原因があるものと思われる。レイノルズストレスが 0% back の場合のみ上層水深の 5 割程度の深さでも乱れの発生を示していることから壁面近傍での強い乱れの存在を見ることが出来る。

乱れ強度のグラフ ( 図 4-4(m) , (n) 参照 ) と対比して考えると、10% , 20% , 30% については、水面付近では渦のスケールは大きく、乱れのエネルギーも大きい渦が存在し、界面付近での渦はスケールも乱れのエネルギーも小さい。back での 0% については渦のスケールは大きい含有する乱れのエネルギーは小さい渦が存在している。

組織渦については、解析の段階で卓越した周期があまり見られず、はっきりとした傾向を得るには至っていない。

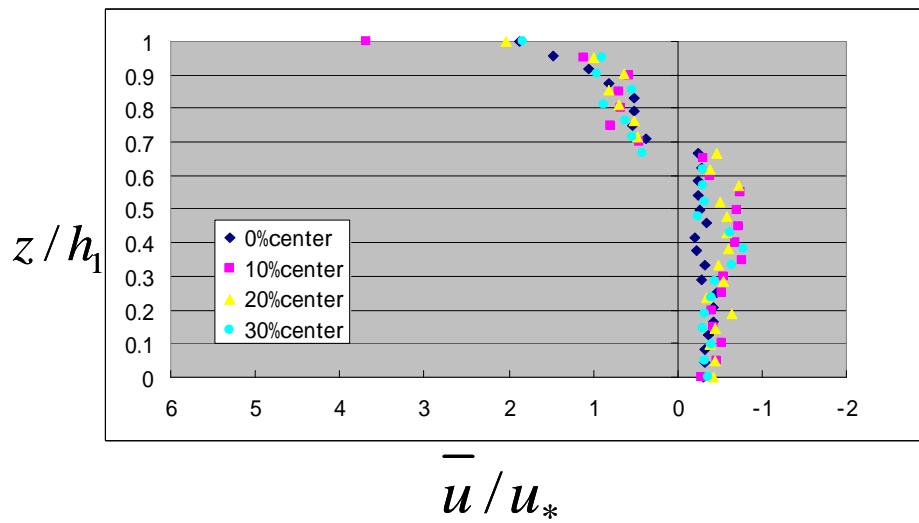


圖 4-4(a) 水平方向時間平均流速 (center)

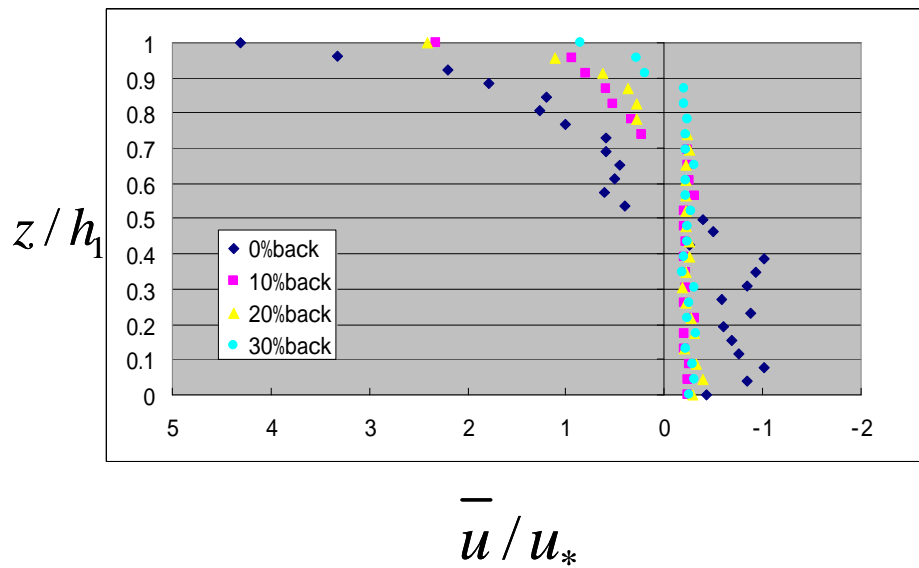


圖 4-4 水平方向時間平均流速 (back)



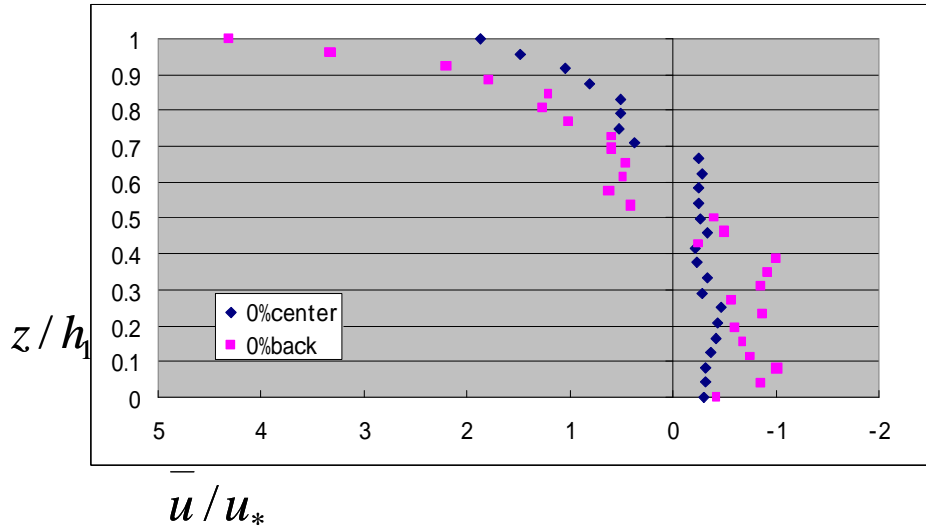


圖 4-4(c) 水平方向時間平均流速 (0%比較)

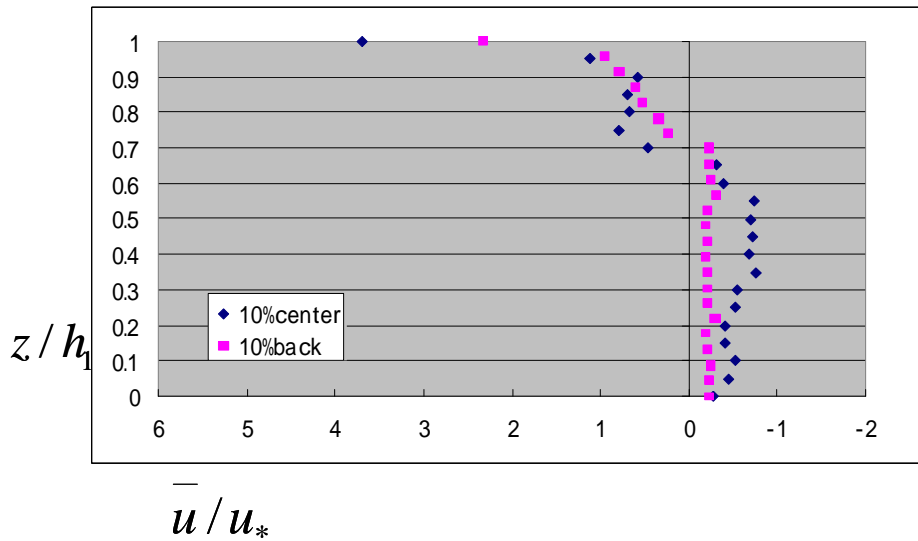


圖 4-4(d) 水平方向時間平均流速 (10%比較)

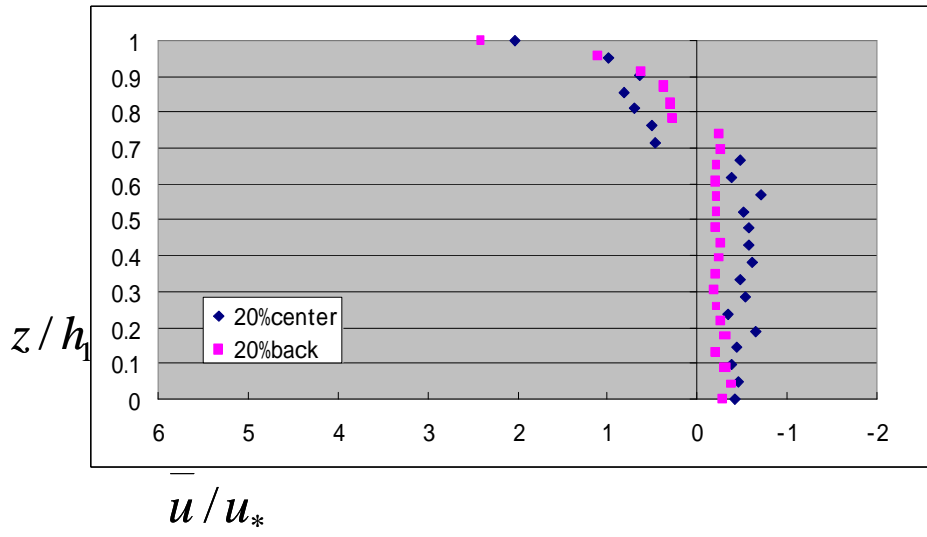
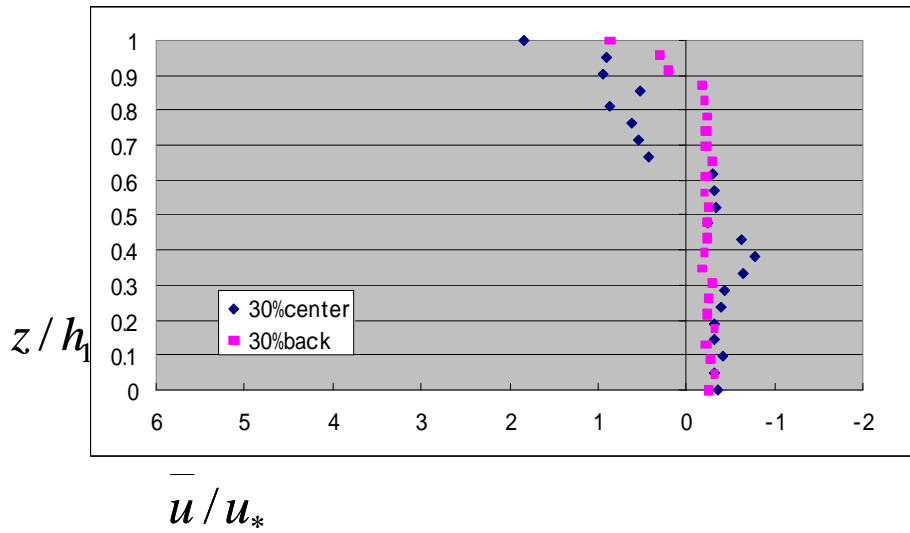


圖 4-4(e) 水平方向時間平均流速 (20%比較)



4-4(f) 水平方向時間平均流速 (30%比較)

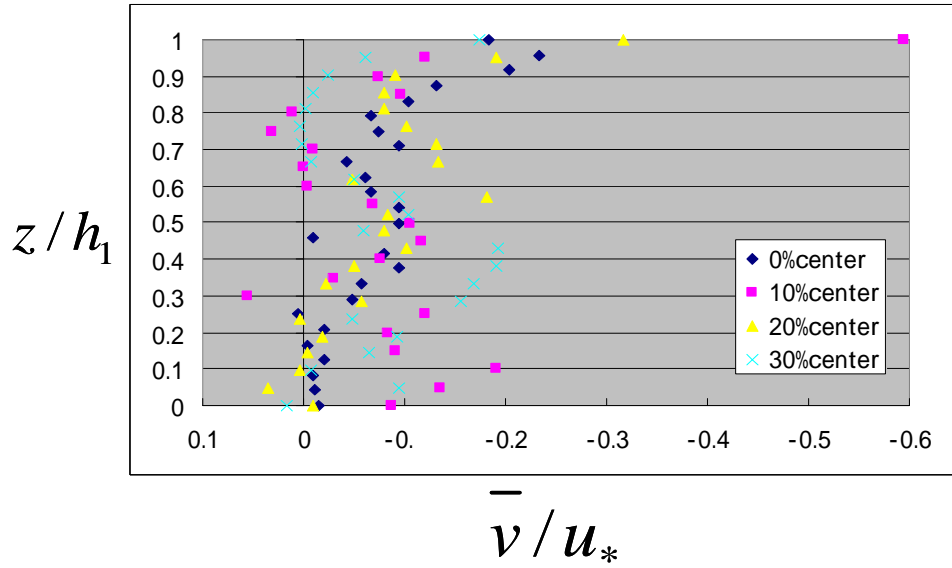


圖 4-4(g) 鉛直方向時間平均流速 (center)

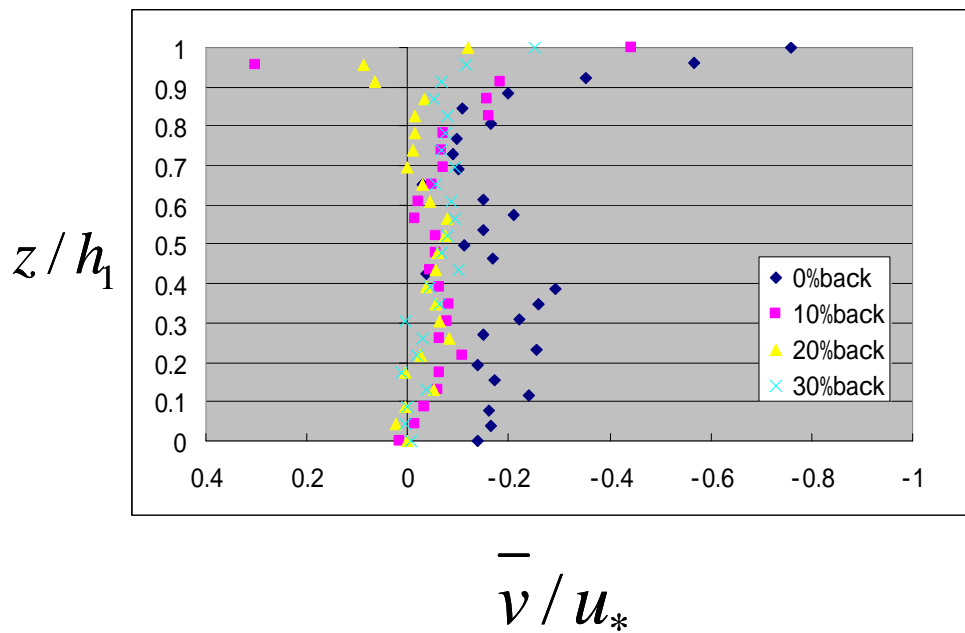


圖 4-4(h) 鉛直方向時間平均流速 (back)

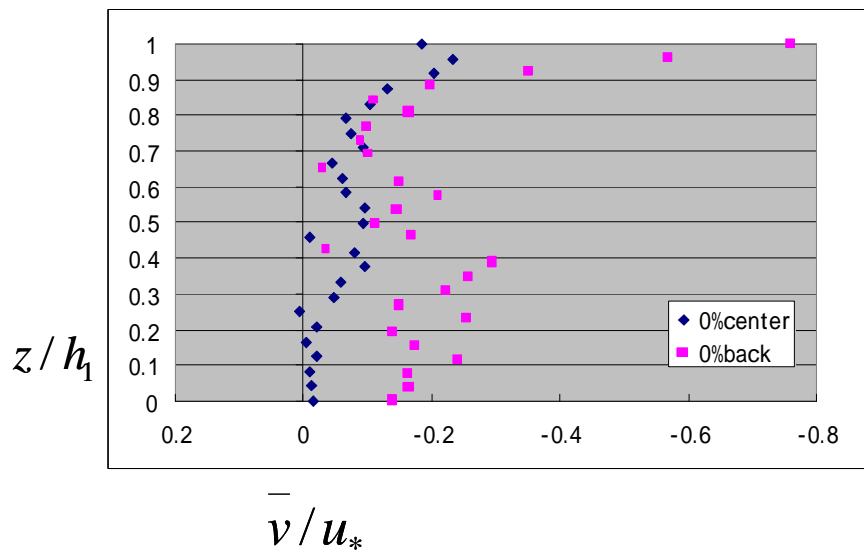


圖 4-4(i) 鉛直方向時間平均流速 (0%比較)

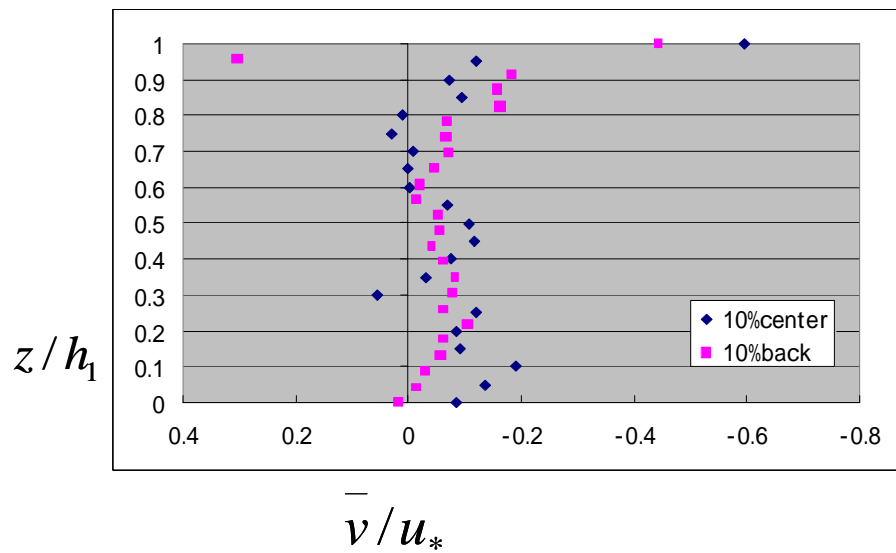


圖 4-4(j) 鉛直方向時間平均流速 (10%比較)

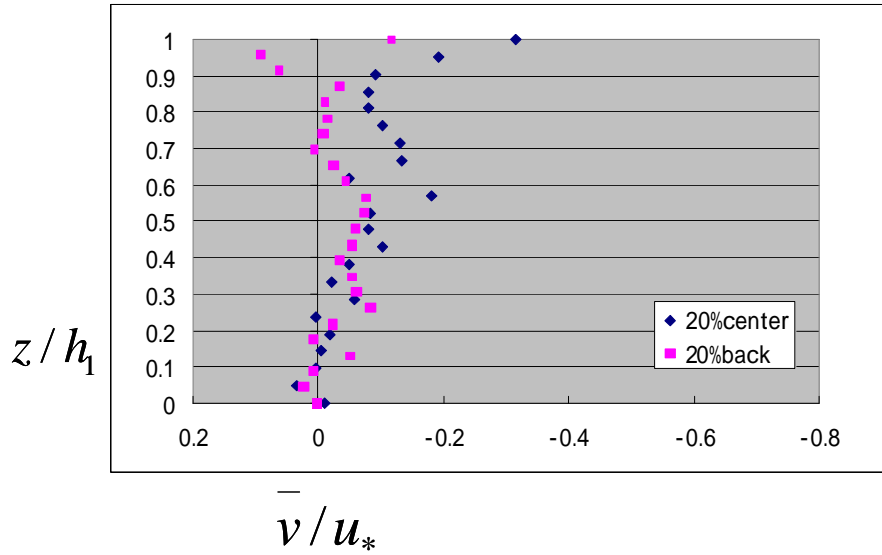


圖 4-4(k) 鉛直方向時間平均流速 (20%比較)

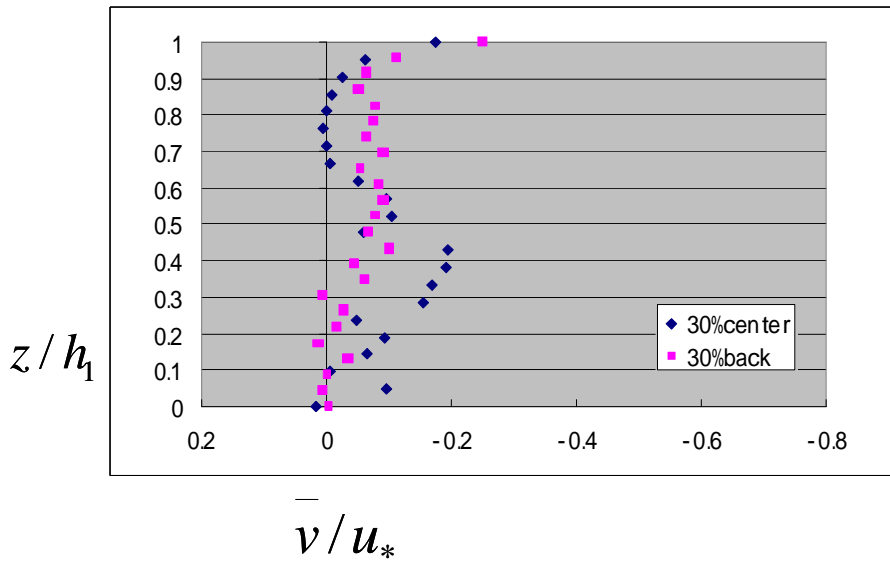


圖 4-4(l) 鉛直方向時間平均流速 (30%比較)

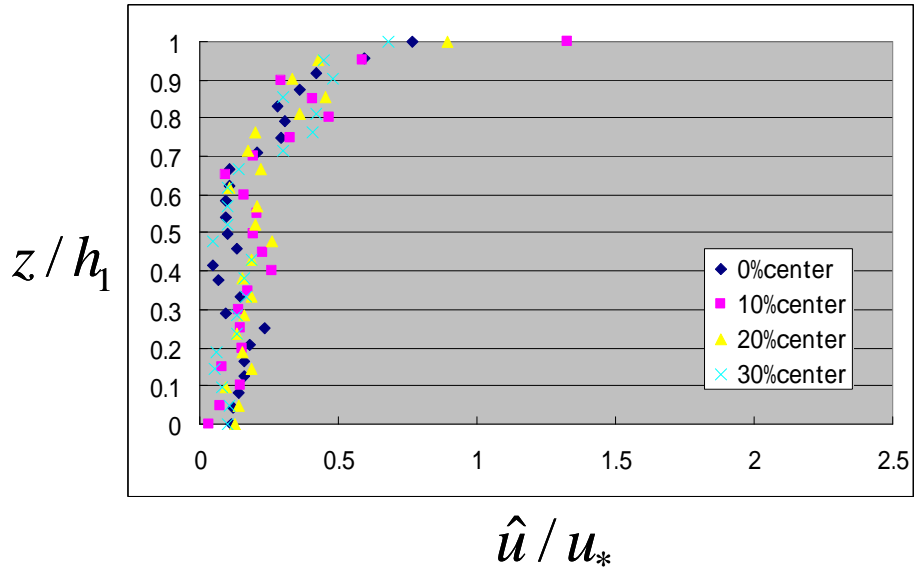


図 4-4(m) 水平方向乱れ強度 (center)

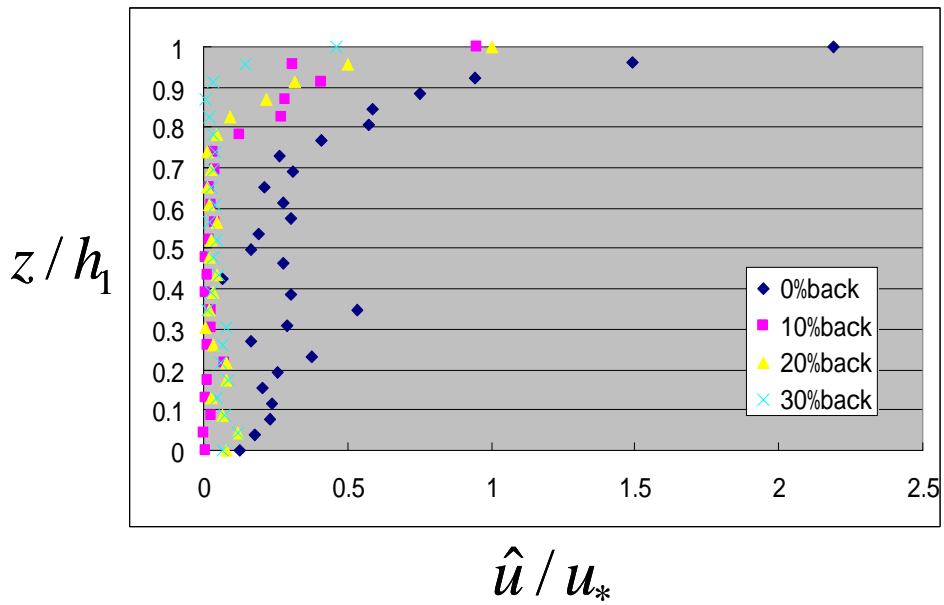


図 4-4(n) 水平方向乱れ強度 (back)

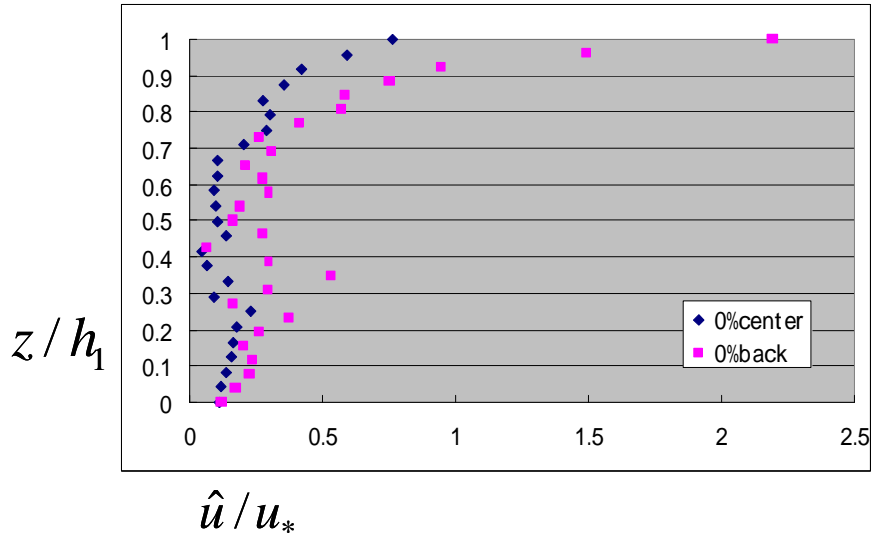


図 4-4(o) 水平方向乱れ強度 (0%比較)

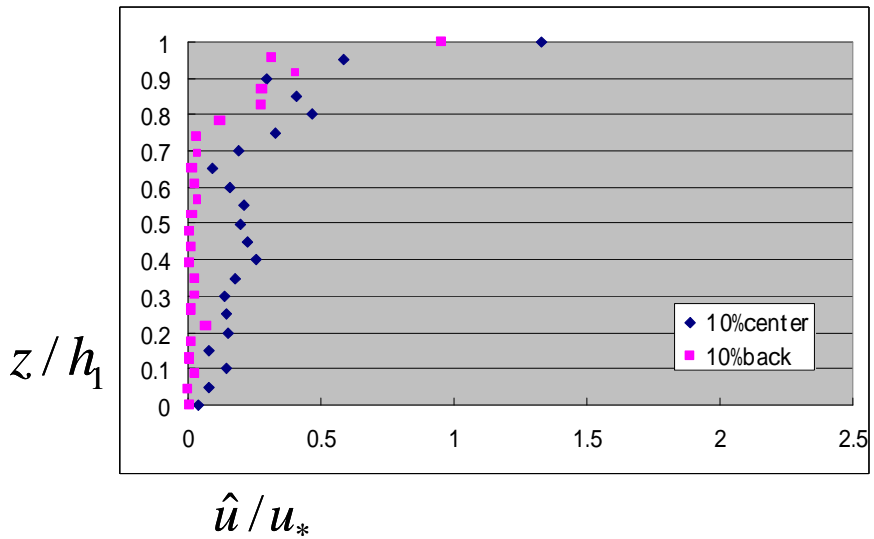


図 4-4(p) 水平方向乱れ強度 (10%比較)

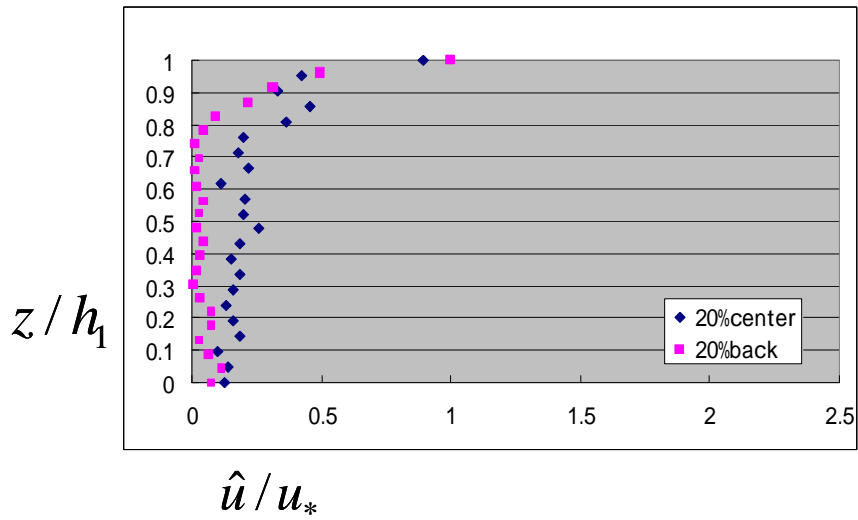


図 4-4(q) 水平方向乱れ強度 (20%比較)

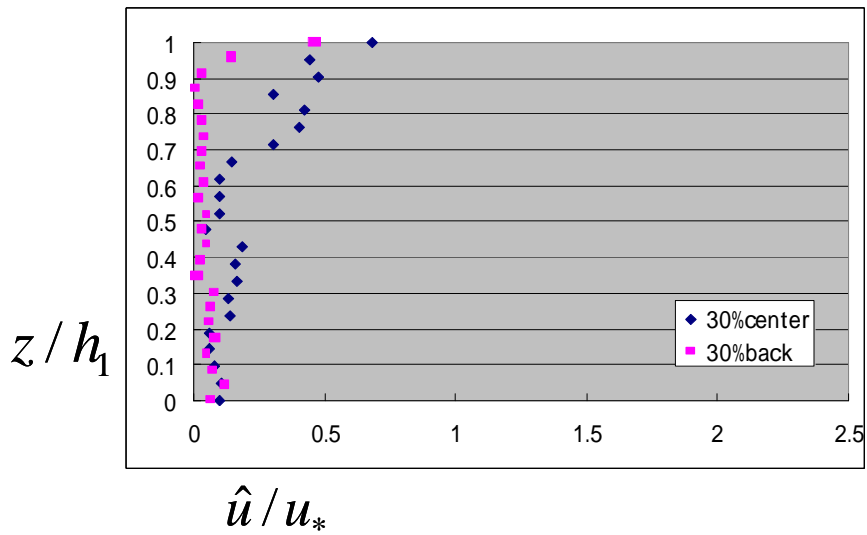


図 4-4(r) 水平方向乱れ強度 (30%比較)



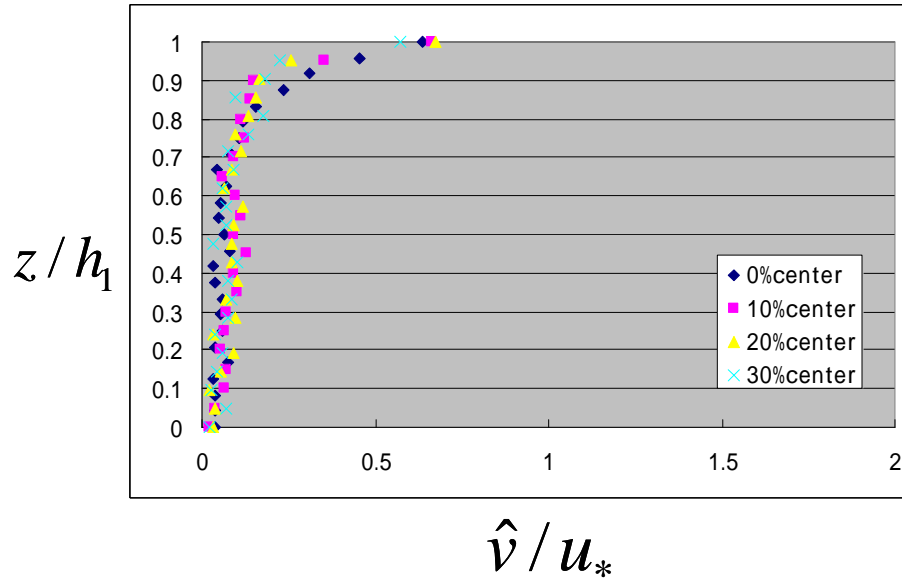
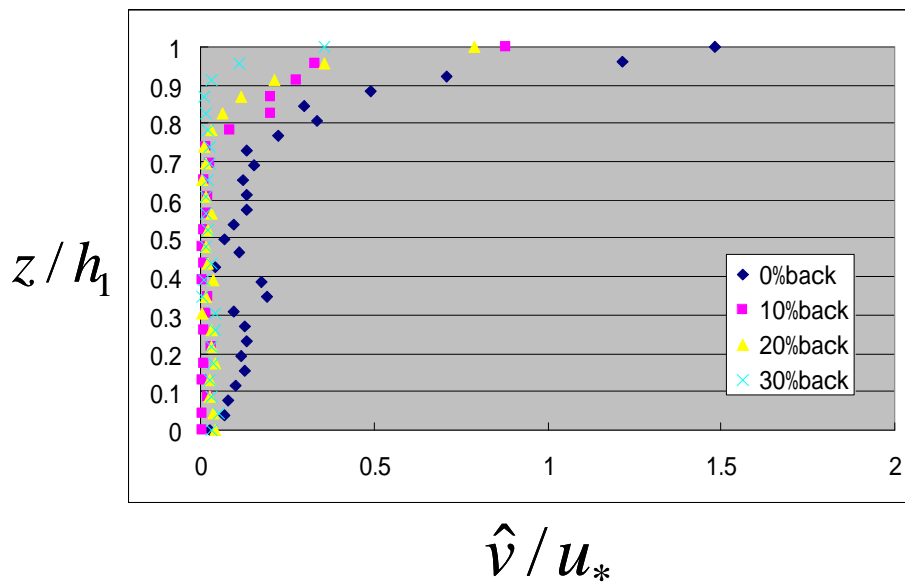


図 4-4(s) 鉛直方向乱れ強度 (center)



4-4(t) 鉛直方向乱れ強度 (back)

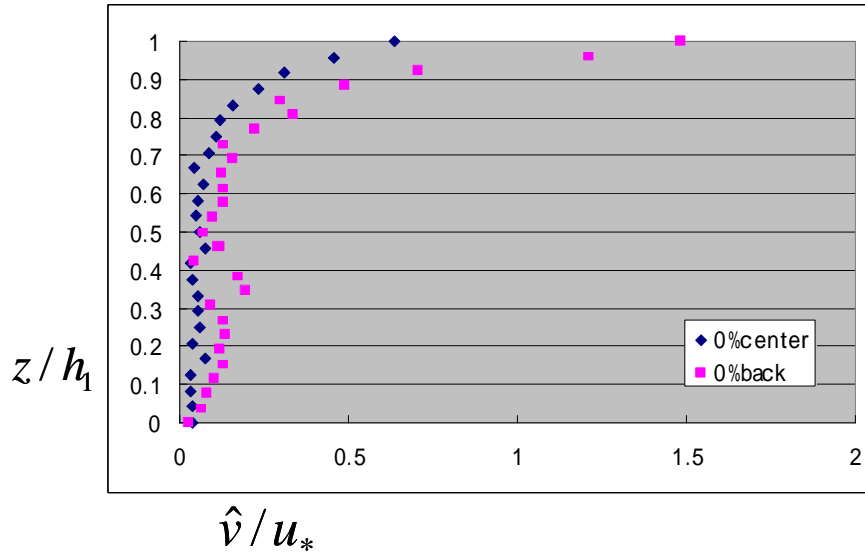


図 4-4(u) 鉛直方向乱れ強度 (0%比較)

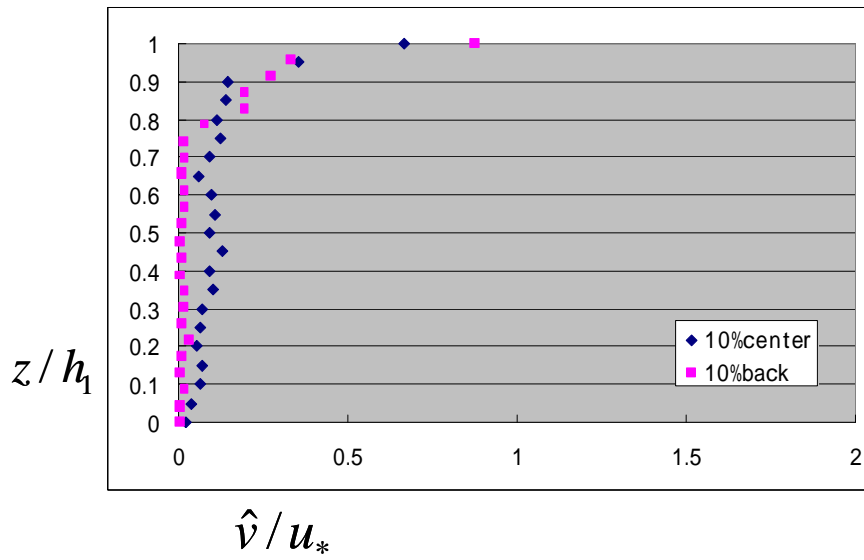


図 4-4(v) 鉛直方向乱れ強度 (10%比較)

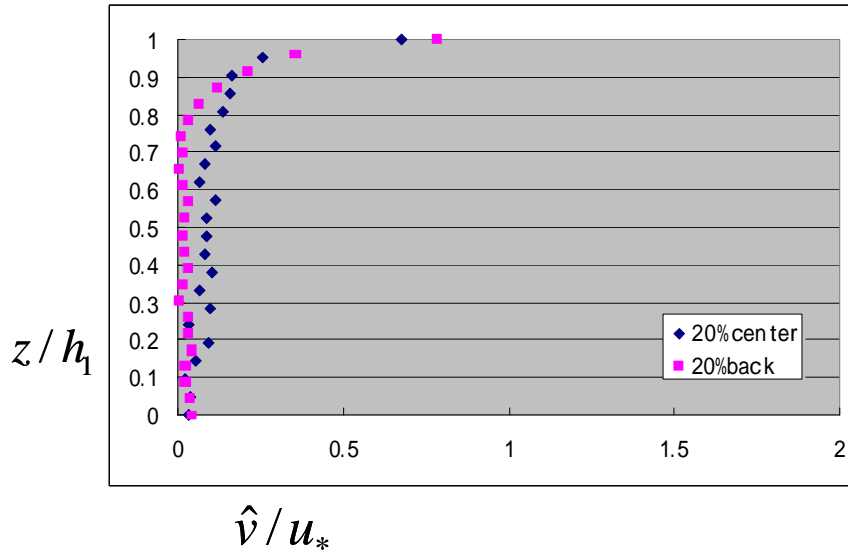


図 4-4(w) 鉛直方向乱れ強度 (20%比較)

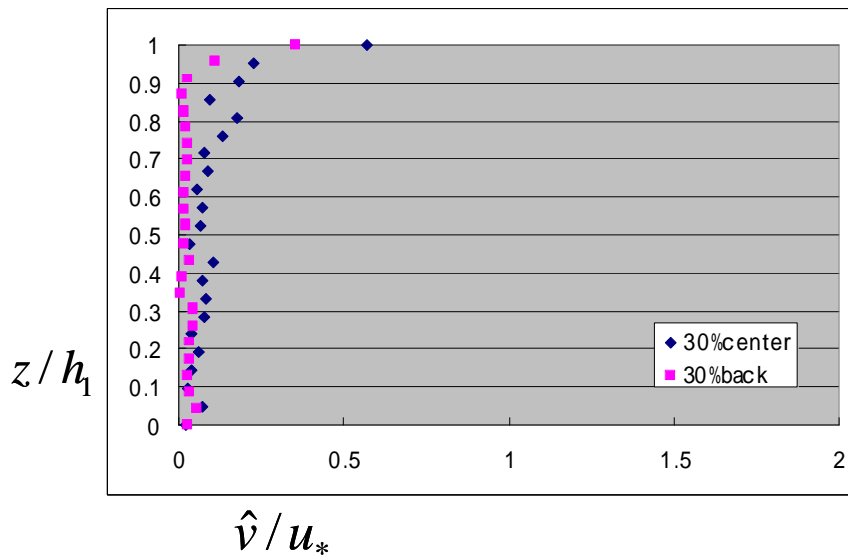
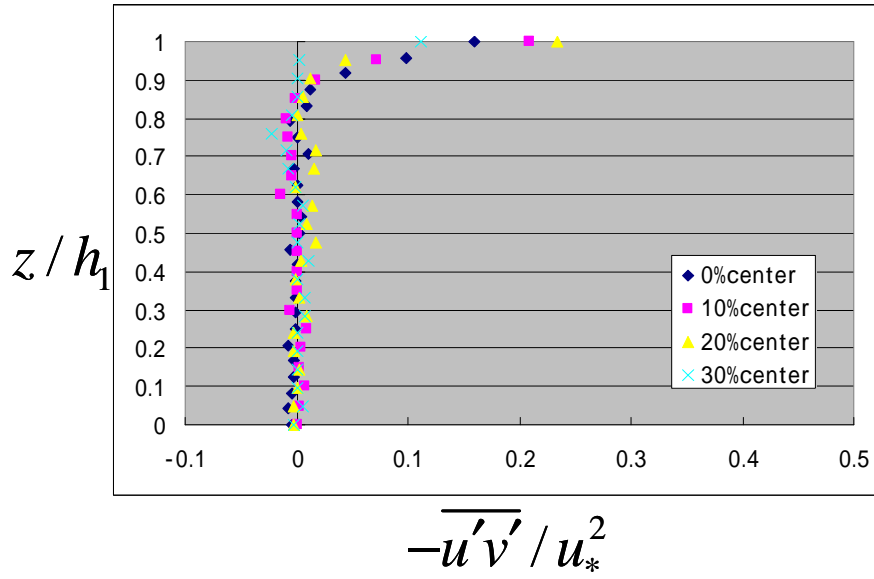
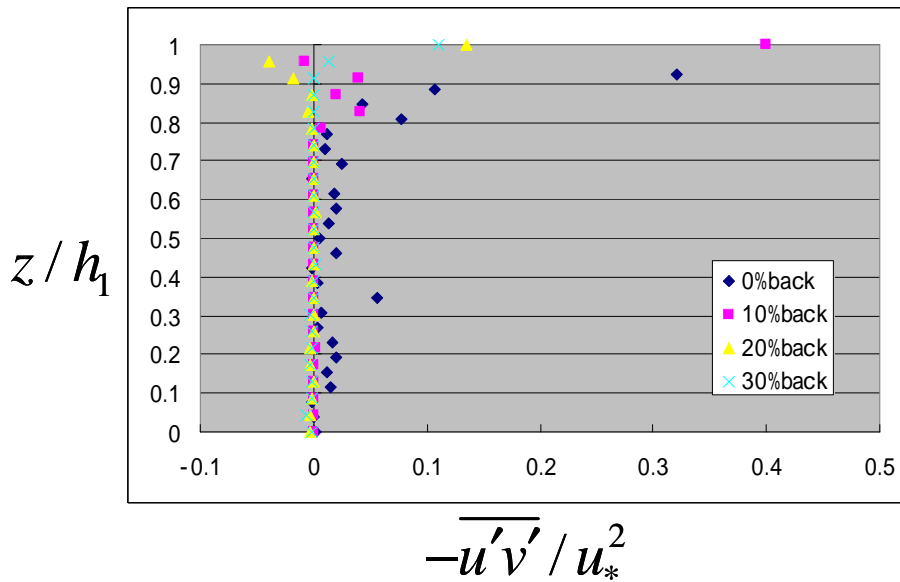


図 4-4(x) 鉛直方向乱れ強度 (30%比較)



☒ 4-4(rs1) レイノルズストレス ( center )



☒ 4-4(rs2) レイノルズストレス ( back )

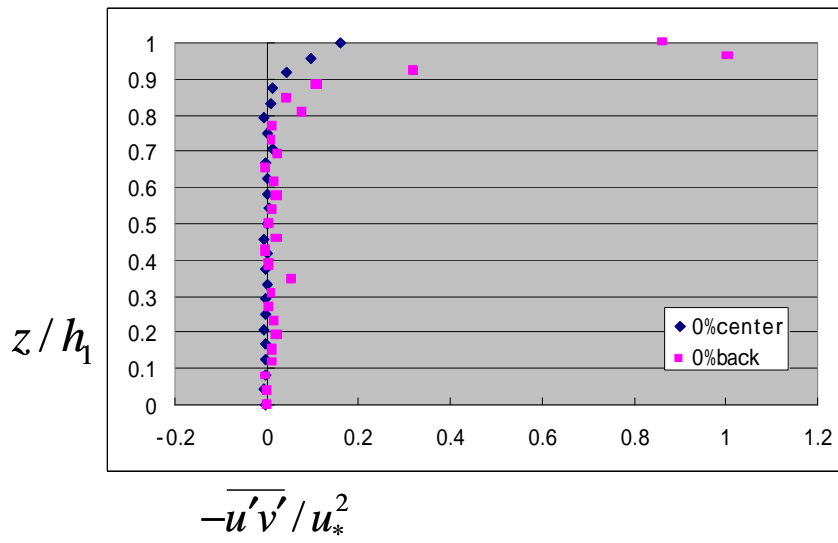


図 4-4(rs3) レイノルズストレス (0%比較)

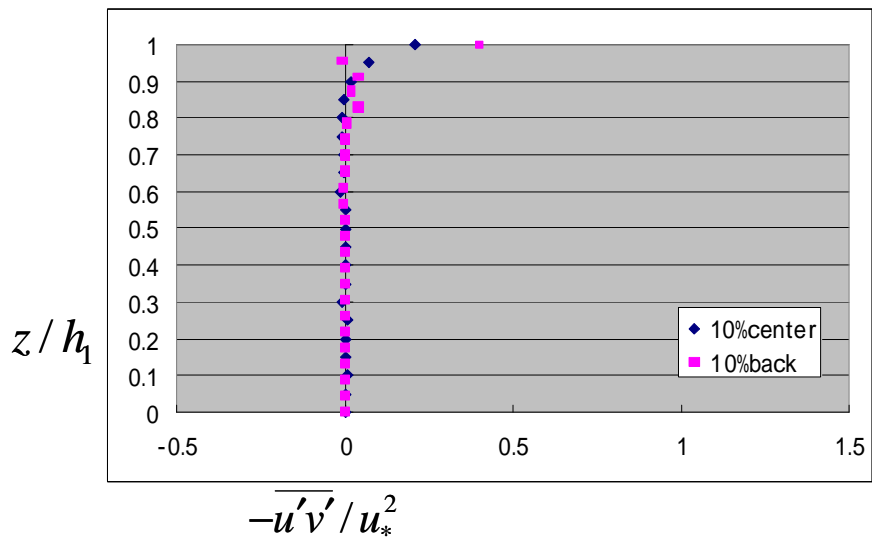


図 4-4(rs4) レイノルズストレス (10%比較)

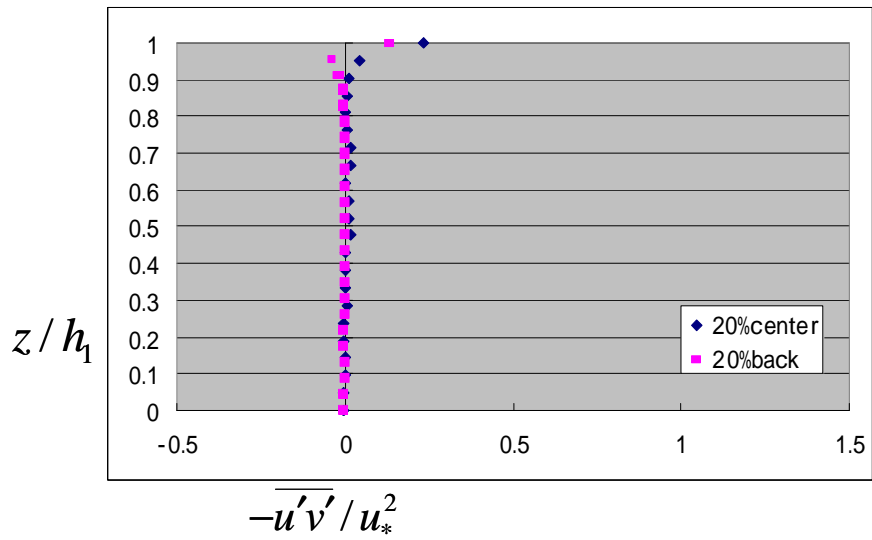


図 4-4(rs5) レイノルズストレス (20%比較)

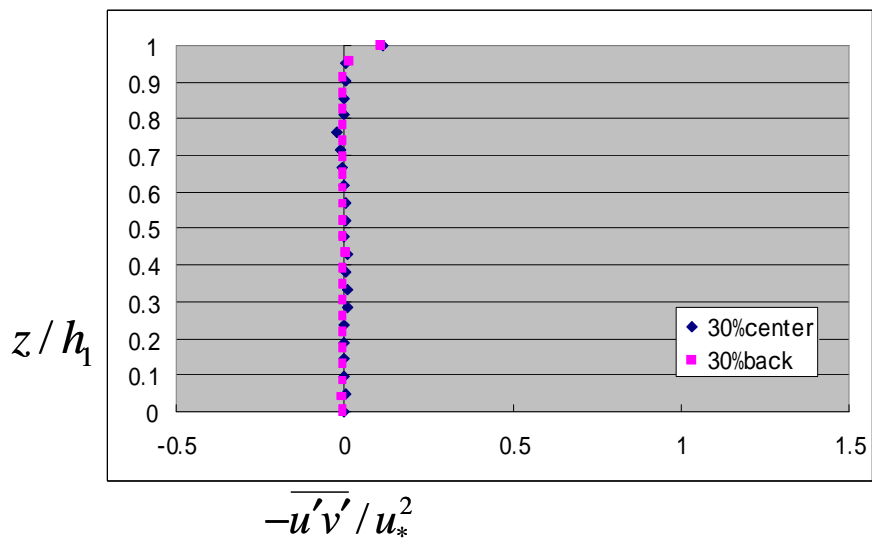


図 4-4(rs6) レイノルズストレス (30%比較)

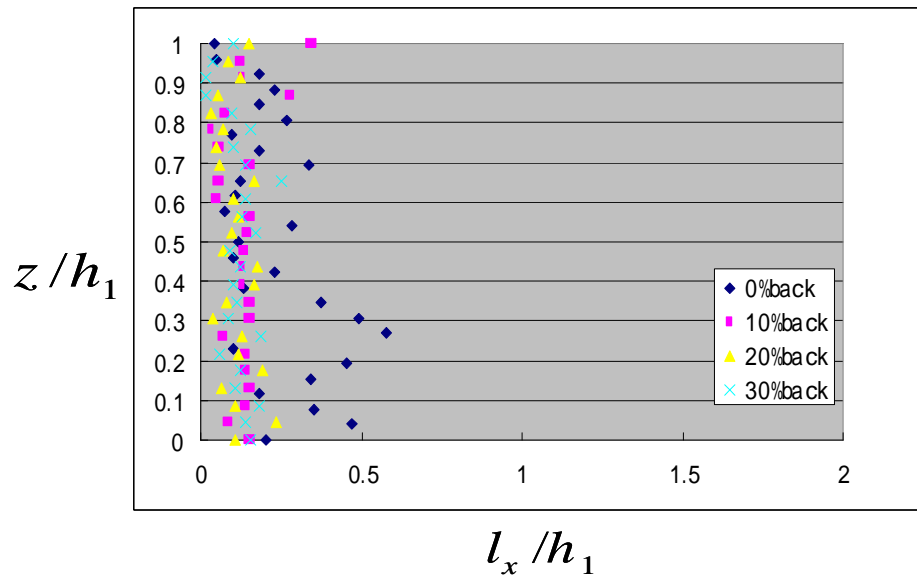


図 4-5(a) 水平方向積分スケール (center)

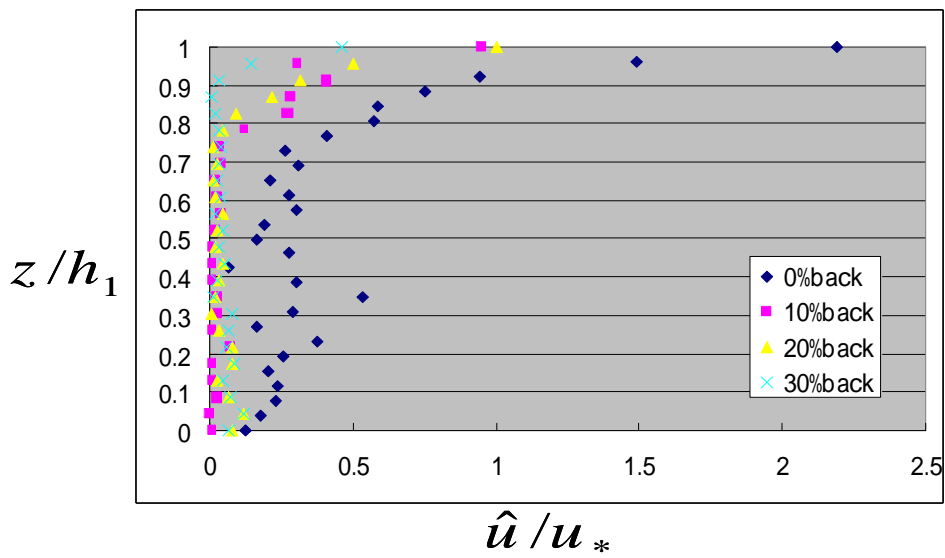


図 4-5(b) 水平方向積分スケール (back)

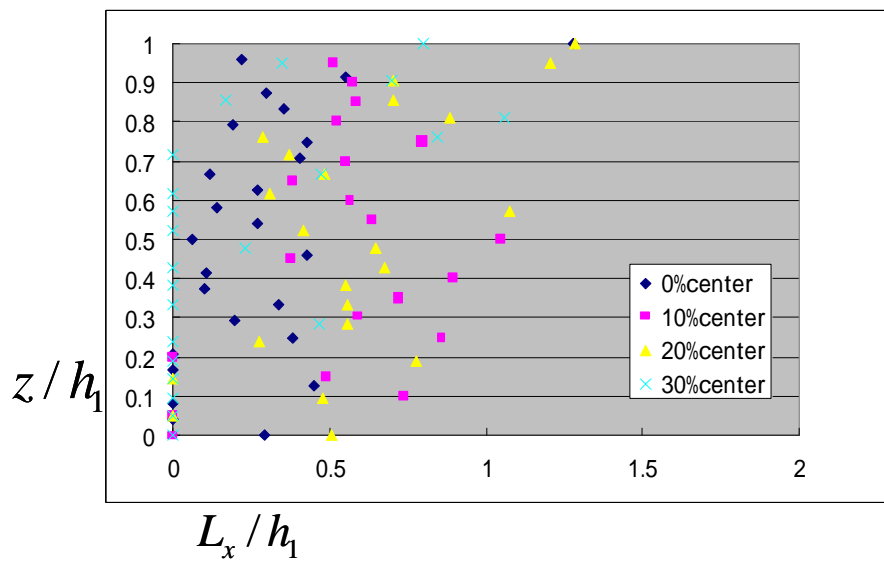


図 4-5 水平方向組織渦スケール (center)

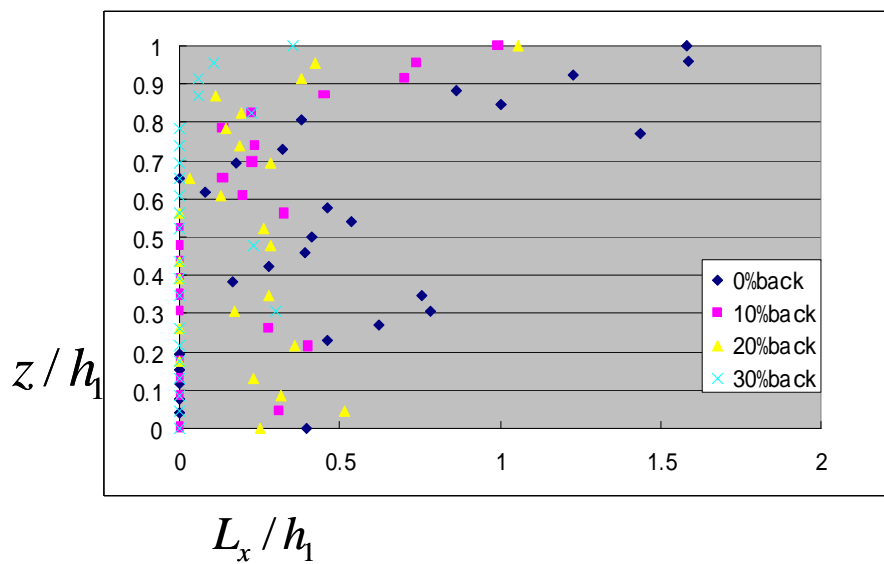


図 4-5(d) 水平方向組織渦スケール (back)



## 第5章 結論

本研究では水草が水面を占有することで、閉鎖性密度 2 成層水域での乱流構造にどのような変化が表れるかを調べた。その結果以下のような結果を得た。

- ( 1 ) 密度界面の連行現象と密接な関係のある乱流エネルギー量は水草の占有率が増加すると、減少する結果を得た。したがって、特に夏期に閉鎖性水域の沿岸に繁茂する水草は、上層から下層への酸素等の供給もしくは下層から上層への物質の移動を妨げることになることが予測される。
- ( 2 ) 水槽中心よりも水草の端付近では全般に乱れのエネルギーが少ない結果を得た。このことからとくに浮揺性の水草が繁茂する湖沼において、岸辺の水草の下部では外乱が作用してもその影響を著しく受けにくいと言える。
- ( 3 ) 乱れのエネルギーは水面での風のせん断力によって生成される様子が、レイノルズストレスの分布からとらえることができた。水草の占有率が増加すると表層付近で与えられる乱れのエネルギーが減少しており、密度流のポテンシャルエネルギーとの交換を考える ( 図 3 - 3(b)参照 ) と、水草の占有率の増加に対する連行現象の低下を、乱流構造の側面から説明できる。
- ( 4 ) 乱流構造の解明の一助として、渦に関しても考察を行った。乱れ強度の傾向とよく類似していることを確かめたが、はっきりとした傾向を得るには至らなかった。今後はより詳しい解析手法で渦の生成に関しても調べていく。

## 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，井上英二助教授，原口智和助手に深く感謝し，厚く御礼申し上げます。

また，同講座修士課程衛藤鑑氏，尾崎彰則氏には，本研究を進めるに当たり終始惜しみない熱意と愛情溢れる御助言，御教示をいただくと共に，本論文の作成にあたり最後の最後まで温かい御激励をいただき，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生産環境情報学講座の博士課程松井正実氏，平井康丸氏，修士課程紺屋秀之氏，高瀬敬史氏，桑野朋子氏，光岡宗司氏，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，助け合った炭本祥生氏，中島敬太郎氏，中島央晶氏，中村生子氏，福島崇志氏，丸谷一郎氏に深く感謝いたします。

最後にいつもかけながら協力，激励して下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。

2002年3月

村松亮介

## 参考文献

- 1) 森 健 : 停滞性水域における水環境の機械的・熱的擾乱に対する  
応答に関する研究(1996)
- 2) 有田正光編著 : 水圏の環境(東京電機大学出版局)
- 3) 有田正光著 : 流れの科学(東京電機大学出版局)
- 4) 浜島繁隆 : 池沼植物の生態と観察(ニュー・サイエンス社)
- 5) 生嶋 功 : 水界植物群落の物質生産 (共立出版)