

## 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

尾崎, 彰則  
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/2324/1498278>

---

出版情報 : 九州大学, 2002, 修士, 修士  
バージョン :  
権利関係 :

修士論文

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

尾崎 彰則

2003年 3月

# 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

尾崎 彰則

<b>第1章 序論</b>	
1.1 はじめに	1
1.2 研究背景	3
1.3 水生植物群落の構造	4
1.4 水生植物の生活型	4
1.5 水生植物の生活型による湖沼の分類	5
1.6 密度流とその安定性	8
1.7 成層水域に及ぼす風の効果	9
<b>第2章 密度界面の連行現象に関する実験</b>	
2.1 浮葉性植物に関する実験装置	12
2.2 沈水性植物に関する実験装置	16
2.3 塩分濃度と電圧の関係	18
2.4 塩水の密度の決定方法	19
2.5 空気の密度の決定方法	20
2.6 密度界面の決定方法	20
2.7 代表風速と空気の摩擦速度	20
2.8 連行係数とリチャードソン数	22
<b>第3章 密度界面の連行現象に関する実験結果および考察</b>	
3.1 浮葉性植物に関する連行現象の実験結果	24
3.2 沈水性植物に関する連行現象の実験結果	27
<b>第4章 密度2成層場の乱流構造に関する実験</b>	
4.1 実験目的	30
4.2 浮葉性植物に関する乱流構造の実験装置	30
4.3 沈水性植物に関する乱流構造の実験装置	30
4.4 乱流構造に関する実験方法	34
<b>第5章 密度2成層場の乱流構造に関する実験結果および考察</b>	
5.1 浮葉性植物に関する乱流構造の実験結果	35
5.2 沈水性植物に関する乱流構造の実験結果	42
<b>第6章 乱流構造に関する実験に基づく連行現象規模の評価</b>	
6.1 浮葉性植物の乱流構造と連行現象の関係	51
6.2 沈水性植物の乱流構造と連行現象の関係	52
<b>第7章 結論</b>	53
<b>謝辞</b>	54
<b>参考文献</b>	55

## 第 1 章 序論

### 1.1 はじめに

密度 2 成層流に対する研究は，例えば干拓調整池において取水する際に弊害となる塩分挙動や，クリ - クなど海水が混入しやすい水域における流体運動を考察するために行われてきた研究である．そのため，1970 年代から盛んに行われていた既往の密度 2 成層流に対する研究は，淡水と塩水の 2 層の混合現象について行われたものが多い．それ以降の 1980 年代から 1990 年代における温度成層流についての研究は，その主たる目的が内部流体の挙動に関する基礎的研究が多い．またその研究によって得られたデータが現地における再現性を議論されているものは少なく，生物的な環境を無視した実験水槽によって行われた実験と現地観測を比較して議論されているものに限られているため再現性がない．

水域内部の流体が 2 つあるいはそれ以上の異なる密度からなる成層における現象は，必ずしも淡水と塩水あるいは低温と高温などといったものに限定されるものではなく，プランクトンの発生によって 2 次的に生じる溶存酸素成層や，底泥からの栄養塩類の溶出によって生じる内部プランクトンの生息環境の 2 極化による濁度成層など，水域内部に生息する生物によって生じる，すなわち生物あるいは生物化学物質による成層も密度成層である．近年環境問題への関心の高まりとともに，特に富栄養化が深刻な問題となっている閉鎖性水域における水質問題が様々な分野で研究がなされている．そういった研究の中で，近年水域周辺に生息する水生植物が，富栄養化の原因となる栄養塩類を吸収する能力を持っていることが明らかになり，水生植物を用いた水質浄化が提案されている．

ところが，閉鎖性水域においては流入・流出が極めて少ないためにその内

部における水環境物質の挙動を支配する流れは、風によって生じる循環流あるいは熱によって生じる熱対流に限られている。そのため、水面に生育する水生植物や藻類といった生物は風あるいは熱によって生じる擾乱を少なからず妨げているということが考えられる。

そこで、本研究は、化学的浄化作用をもつが物理的に弊害になる恐れがある水生植物について、これらが閉鎖性水域に生息した場合、内部循環流の形成がどのように変化するか密度 2 成層場を用いて検討したものであり、その水生植物の臨界的な繁茂量を定量的に把握することが本研究の目的である。

また、本研究において内部流体として密度 2 成層場を用いている理由は、前述のように、様々な水域内部における生物的・化学的物質が存在する水環境を模擬するためである。

## 1.2 研究背景

閉鎖性密度 2 成層水域における水環境物質の挙動は，吹送流による機械的擾乱および太陽熱による熱的擾乱により形成される循環流に依存する。また，日中の日射，夜間の冷却あるいは底泥からの栄養塩類の溶出により水域内に密度成層が形成される。密度 2 成層化した水域の水面に風が作用した場合，吹送流とその乱れにより，密度界面の連行現象が生ずる。この連行現象に基づく水域内部の上，下層流体の混合は水域の水質変動に大きな影響を及ぼす。ため池，自然湖沼などの閉鎖性水域では，夏期に，抽水性，浮揺性，沈水性および浮遊性の水草が繁茂する。いま，閉鎖性成層水域内部に水性植物が存在する場合，吹送流による密度界面の連行速度は水生植物のない場合のそれと異なることが推察される。

密度 2 成層場における，機械的擾乱あるいは熱的擾乱に対する内部循環については，水利用の高度化，環境問題への関心の高まりとともに，1980 年頃から，実験的，理論的研究が行われてきた（玉井ら 1987，森ら 1989）。

また，現地観測による水温成層，密度成層に関する観測例およびその観測データによる数値シミュレーション（池永ら 1999，道奥ら 1994）は，多くの湖沼において行われているが，各水域の特徴による考察しかなされておらず，現地における現象を統一的に評価できるまでには至っていない。さらに，この種の研究において，数値シミュレーションに用いられるパラメータは，物理的諸量のみを用いる場合がほとんどであり，水域周辺を取り巻く生物量は考慮されていない。

本研究は，とくに浮葉性植物および沈水生植物が水域内に繁茂し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乱流構造について水理実験を行い検討した。

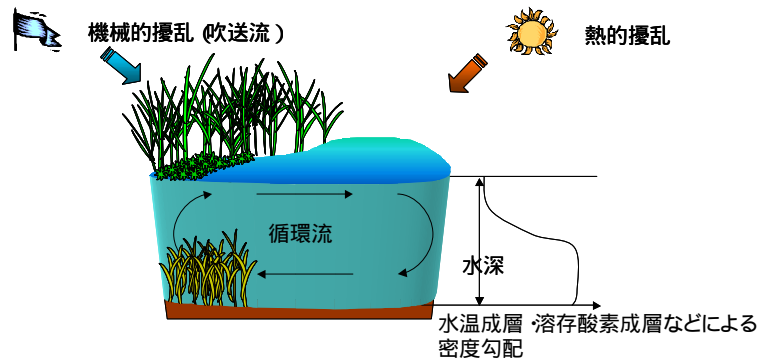


Fig.1-1 閉鎖性水域における水環境物質挙動概念図

### 1.3 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いたるまで多くの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（生嶋ら1974）。

### 1.4 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、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・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。

### 1.5 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（生嶋ら 1974）。

#### ○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。

#### ○浮葉植物優占型

浮葉植物帯が優占し、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。岸辺にはヨシ・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湖沼がこの型である。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湖沼で、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。

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．さらに，浮葉性植物は
 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．(飯泉ら 1984，浜島ら
 1983，福島ら 1983)そこで本研究では，比較的水質が良いと考えられる浮
 葉・沈水植物帯優占型 ( Fig,1-3 参照 )，およびこの形態の水域の水質が悪化
 した場合に遷移する浮葉植物帯優占型 ( Fig,1-2 参照 )の湖沼を対象に，浮
 葉性植物および沈水性植物が湖沼の水面を占有する場合について室内実験に
 より比較検討を行った．この室内実験の実験結果を評価することにより，閉
 鎖性水域内部において植生遷移が進行していくに従って，内部流体の水環境
 物質の循環がどのように変化するかを考察した．

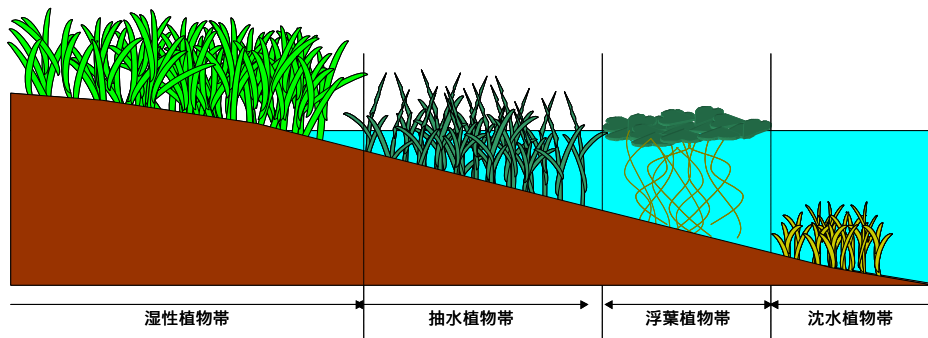


Fig.1-2 浮葉・沈水植物優占型植生分布図

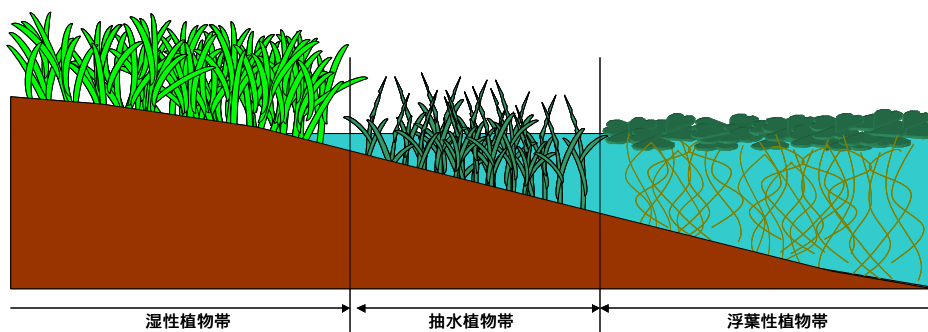


Fig.1-3 浮葉植物優占型植生分布図

## 1.6 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.1-4 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.1-5 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．

本研究ではとくに，淡水と塩水を用いた上下2層からなる密度2成層について，風波による外乱に対する上下2層間の混合現象について実験を行った．

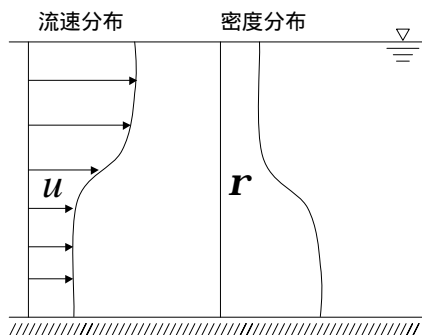


Fig.1-4 連続成層概念図

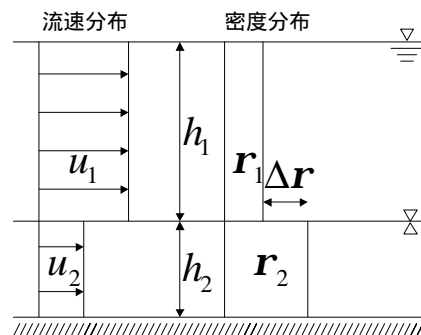


Fig.1-5 密度2成層概念図

## 1.7 成層水域に及ぼす風の効果

成層水域の水面に風が作用すると鉛直循環流が形成される。以下に風の吹送による鉛直循環流の形成過程を示す（有田ら 1995）。

### ・第 1 段階

上層水が風下側に吹き寄せられ，上層深水層底部では逆方向の補償流れが生じる。

### ・第 2 段階

吹き寄せとともに風下側の水位は上昇（セットアップ）し，風上側では低下（セットダウン）する。このとき密度界面での変位は非常に大きくなる。吹送流が風下端に到達するまで流速は増加し続け，密度界面での内部せん断力が増大する。これによりせん断不安定型の強い鉛直混合が生じる。

### ・第 3 段階

セットアップ，セット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に到達する（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大量に死滅することがある。

### ・第 4 段階

風の吹送が止まると水面と密度界面が揺り戻されてセイシュおよび内部セイシュが発生する。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 段階が現われない場合や、第 1 段階だけで終了する場合、第 2 段階から第 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な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、三次元で複雑になっている。

本研究では、実験水槽に作製した上層淡水、下層塩水の密度 2 成層流に対して水平鉛直二次元の流速分布を測定し、実験を行った。

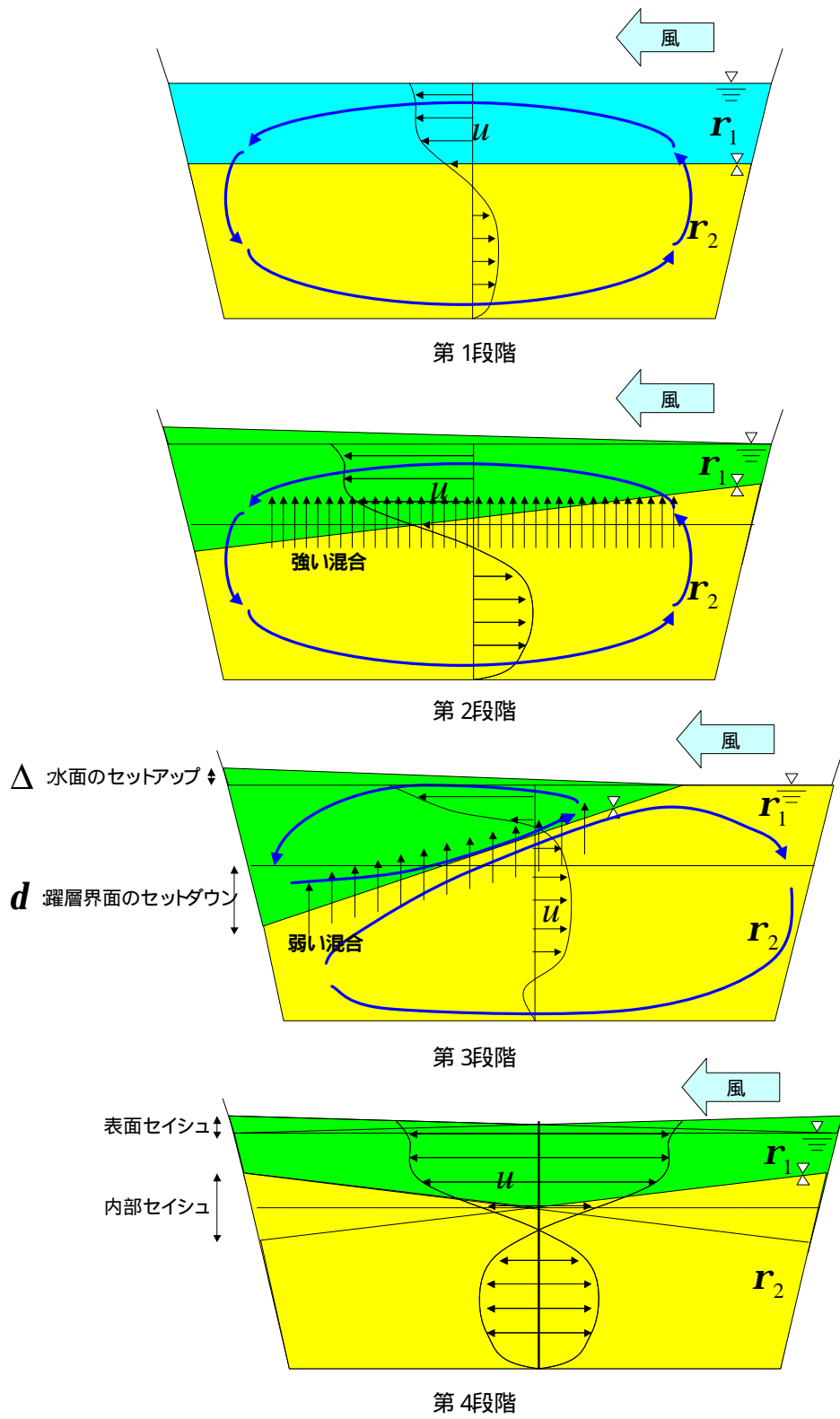


Fig.1-7 吹送流による鉛直循環流形成過程

## 第2章 密度界面の連行現象に関する実験

### 2.1 浮葉性植物に関する実験

実験装置は、Fig.2-1 および Photo.2-1 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。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、 $g$  は重力の加速度、 $r_a$  は空気の密度である。実験条件を Table 2-1 に示す。測定項目は風速の鉛直分布、塩分濃度および水温の鉛直分布である。風速は熱線風速計、塩分濃度は電気伝導度計、水温は熱電対を用いて測定した。Fig.2-1 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。浮葉性植物は Fig.2-2 および Photo.2-2 に示すように厚さ 3mm の 30cm  $\times$  30cm の発砲スチロール板で模擬し、実験装置の両端から順に 10%、20%、30% と被覆率を増加させ、被覆率 10% の場合は両端にそれぞれの発泡スチロールを 1 枚ずつ、20% の場合は 2 枚ずつ、30% の場合は 3 枚ずつ水面に浮かべて実験を行った。



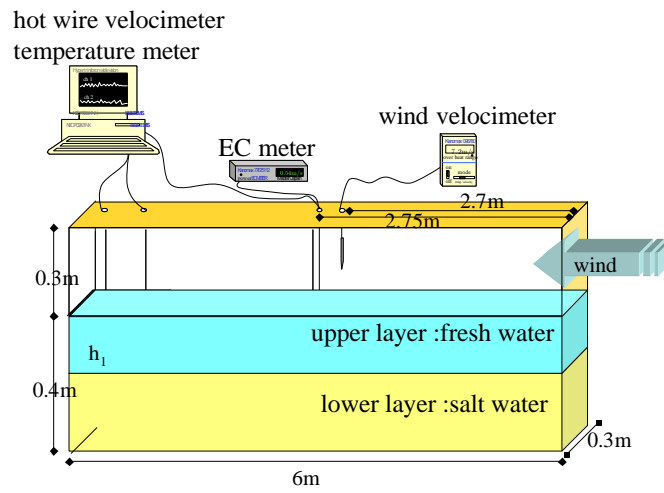


Fig.2-1 浮葉性植物の連行現象に関する実験装置

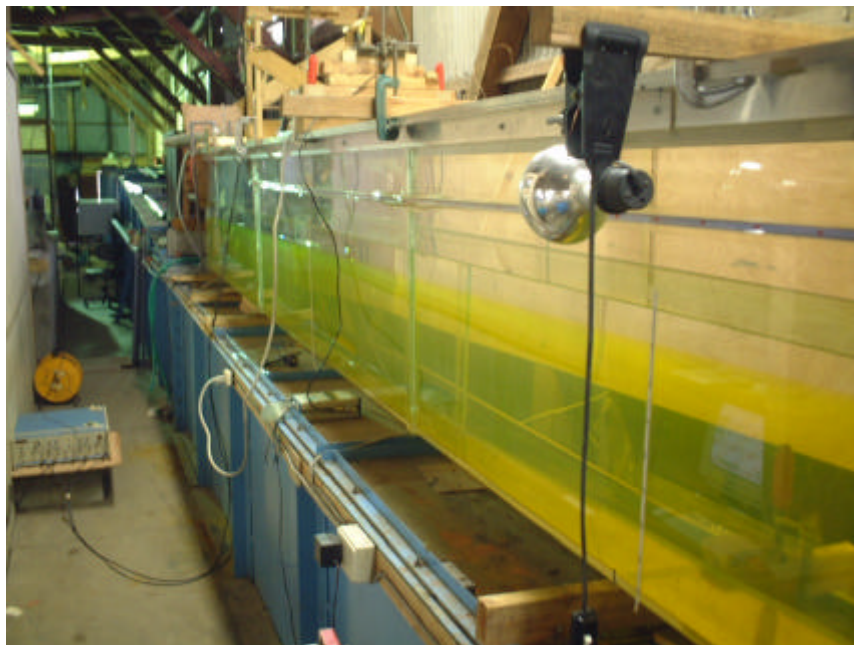


Photo.2-1 実験装置

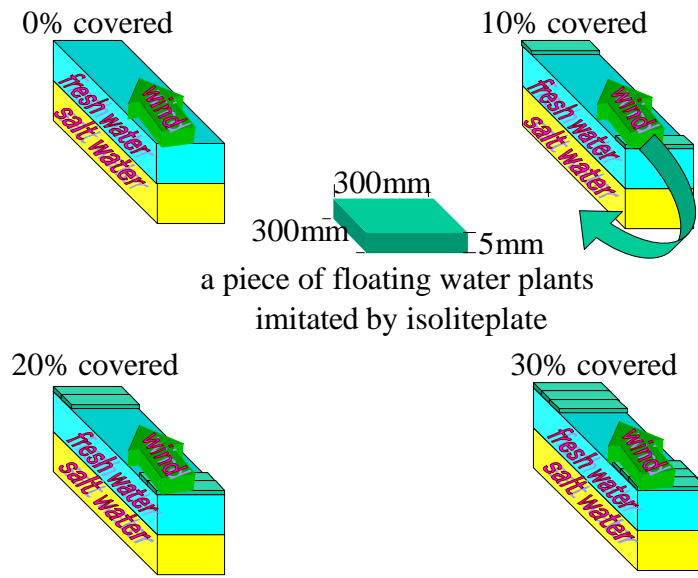


Fig.2-2 浮葉性植物模擬方法

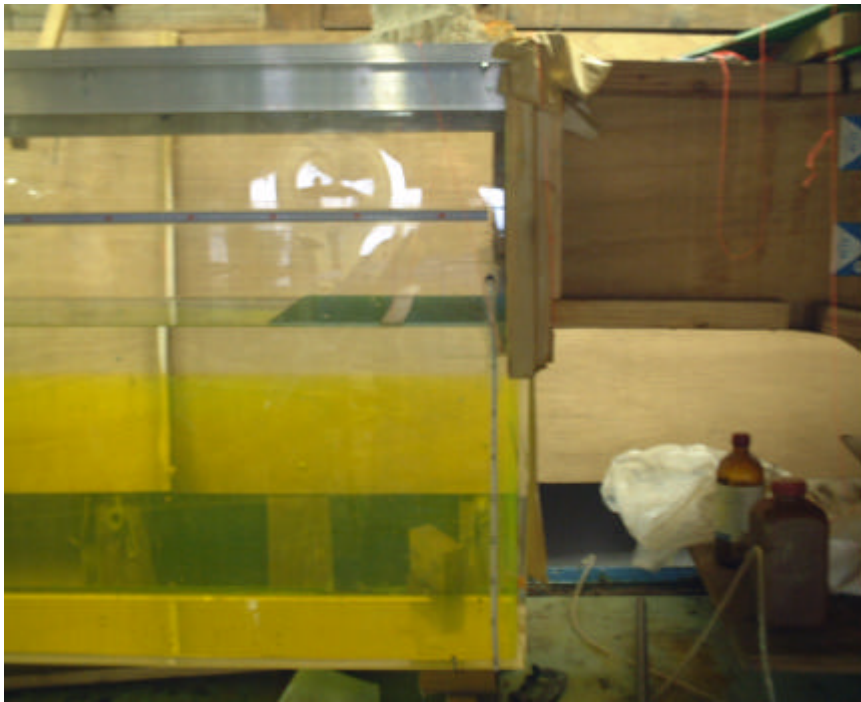


Photo.2-2 浮葉性植物を模擬した発砲スチロール板

Table2-1 浮葉性植物の連行速度に関する実験条件

Run No.	Covered Rate	Wind Velocity (m/s)	$\times 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )	<sup>a</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	h <sub>1</sub> (m)	U <sub>*a</sub> (m/s)	R <sub>ia</sub>
-1	=0%	5.9	0.0052	1.168	0.100	0.282	54.3
-2		6.3	0.0018	1.169	0.116	0.307	18.3
-3		7.9	0.0045	1.171	0.120	0.407	27.0
-4		6.2	0.0043	1.208	0.104	0.301	40.0
-5		7.6	0.0062	1.226	0.108	0.388	35.6
-6		8.8	0.0081	1.238	0.110	0.463	32.7
-7	=10%	6.2	0.0027	1.173	0.106	0.272	31.1
-8		7.2	0.0018	1.181	0.110	0.312	25.4
-9		6.0	0.0013	1.168	0.100	0.261	21.1
-10		8.3	0.0076	1.173	0.116	0.432	39.6
-11		6.8	0.0057	1.173	0.090	0.301	47.6
-12		7.4	0.0049	1.175	0.110	0.376	32.3
-13		7.7	0.0021	1.198	0.158	0.395	17.6
-14		7.9	0.0112	1.196	0.101	0.407	55.9
-15		7.8	0.0107	1.195	0.084	0.401	45.8
-16	=20%	6.0	0.0076	1.190	0.100	0.261	90.1
-17		6.0	0.0059	1.190	0.110	0.261	80.9
-18		6.0	0.0028	1.176	0.104	0.261	41.2
-19		7.5	0.0080	1.183	0.107	0.488	48.8
-20		8.1	0.0047	1.190	0.109	0.244	24.4
-21		7.9	0.0037	1.173	0.115	0.217	21.7
-22		7.7	0.0027	1.194	0.141	0.201	20.1
-23		7.8	0.0020	1.192	0.113	0.401	12.1
-24		5.2	0.0081	1.197	0.094	0.232	116.5
-25		5.5	0.0058	1.203	0.108	0.257	77.4
-26	=30%	5.9	0.0058	1.188	0.101	0.258	68.4
-27		6.4	0.0033	1.189	0.108	0.265	35.1
-28		5.9	0.0027	1.173	0.102	0.258	32.9
-29		7.5	0.0059	1.194	0.094	0.382	31.4
-30		7.7	0.0053	1.208	0.100	0.395	27.9
-31		8.1	0.0037	1.202	0.100	0.419	16.9
-32		7.9	0.0028	1.197	0.110	0.408	15.3

## 2.2 沈水性植物に関する実験

実験水槽に関しては，浮葉性植物の連行現象に関する実験の場合と同様の水槽を用い，同様の手順で，測定を行った．沈水性植物の模擬は Fig.2-3 に示すように，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た．繁茂状況は，Fig.2-3 に示すように，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 ) の場合について実験を行った．このようにして作成した 30cm×30cm の模擬沈水性植物を 1 つとし，水槽の風上側と風下側にそれぞれ 1 つ沈めて実験を行った．( Fig.2-4 参照 ) 実験条件を Table 2-2 に示す．

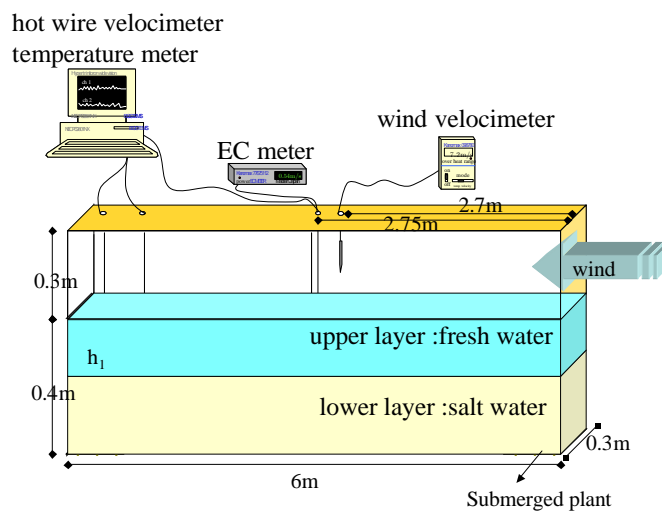


Fig.2-3 沈水性植物の連行現象に関する実験装置

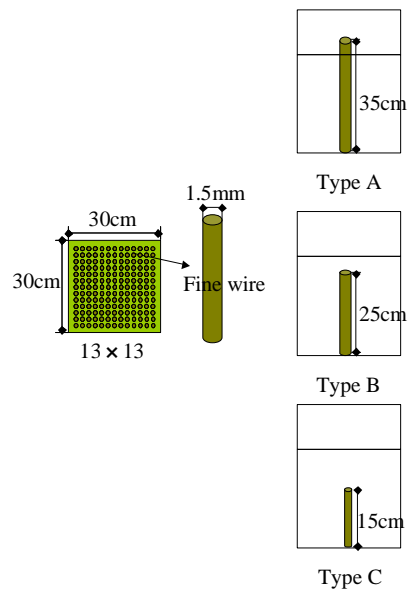


Fig.2-4 沈水性植物模擬方法

Table2-2 沈水性植物の連行速度に関する実験条件

Run No.	Experimental Type	Wind Velocity (m/s)	$\times 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	$h_1$ (m)	$U_{*a}$ (m/s)	$R_{ia}$
-1	Type	5.8	0.0112	1.174	0.106	0.276	131.0
-2		5.7	0.0095	1.174	0.106	0.270	115.9
-3		6.2	0.0080	1.168	0.106	0.301	78.9
-4		7.5	0.0072	1.172	0.106	0.382	43.7
-5		5.6	0.0178	1.170	0.111	0.264	238.7
-6		6.1	0.0084	1.176	0.116	0.295	94.1
-7	Type	5.0	0.0129	1.172	0.106	0.223	230.1
-8		6.2	0.0036	1.168	0.106	0.301	35.6
-9		3.2	0.0046	1.710	0.126	0.114	261.4
-10		4.4	0.0021	1.750	0.116	0.187	39.6
-11		4.4	0.0050	1.760	0.121	0.189	95.9
-12		4.3	0.0024	1.180	0.126	0.183	75.6
-13	Type	5.4	0.0051	1.281	0.118	0.254	71.6
-14		5.2	0.0019	1.230	0.153	0.236	42.9
-15		5.3	0.0030	1.225	0.141	0.243	57.7
-16		4.4	0.0014	1.223	0.141	0.189	46.2

### 2.3 塩分濃度と電圧の関係

本実験では、密度界面の時間変化を計測するために、電気伝導度計を用いて水槽内の塩分濃度を電気伝導度計の電圧により計測した。塩分濃度と電圧の較正手順を以下に示す。

Fig.2-5 に示すように、塩化ビニールパイプを 6 本たてた水槽を用いる。水槽は保温効果を有するようにするために発砲スチロールで囲い保温する。

並塩 (NaCl) を 1g, 3g, 5g, 7.5g, 10g, 秤量する。

それぞれを 1l の純水に溶解させる。溶解させた塩水を Fig. に示す水槽にそれぞれ入れる。ただし、1 本には純水を入れる。

それぞれの電圧を計測する。このとき水槽内に冷水をいれ 10℃ まで温度を下げ徐々に温度を上げていき 30℃ までを 2℃ きざみに計測していく。

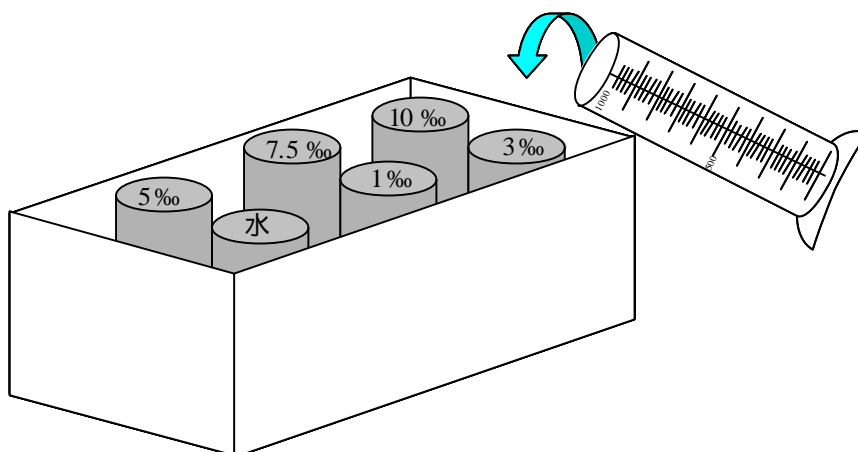


Fig.2-5 電圧 塩分濃度校正装置

## 2.4 塩水の密度の決定方法

今回の実験において、塩分濃度の決定は、主成分イオンが塩水中に一定の比で存在するという仮定の下に、塩素 ( $Cl$ ) の量より塩分  $S$  を求める方法であるクヌーツセンの式を用いた。塩分  $S$  (‰) と塩素量  $Cl_s$  (‰) との関係式は以下のとおりである。

$$S = 0.0305 + 1.805Cl_s$$

塩水の密度  $r_s$  [ $g/cm^3$ ] は、塩分  $S$  (‰) と水温  $t$  ( ) の関数である。そこで、 $Cl_s$  と  $t$  から  $r_s$  を算出する方法が以下のとおりである。

まず、塩水の密度  $r_s$  を

$$r_s = 1 + 10^{-3}s_s$$

とし塩水の密度を  $r_s$  の代わりに  $s_s$  と表現する。

そこで、水温  $t=0$  ( ) における  $s_s : s_{s0}$  は  $Cl_s$  の関数として次式で表現できる。

$$s_{s0} = -0.069 + 1.4708Cl_s - 0.001570Cl_s^2 + 0.0000389Cl_s^3$$

また、水温  $t$  ( ) の時の  $s_s : s_{st}$  は次式で与えられる。

$$s_{st} = -\frac{(t-3.98)^2}{503.570} \cdot \frac{t+283.0}{t+67.26} + (s_{s0} + 0.1344) \{1 - A_t + B_t(s_{s0} - 0.13224)\}$$

ここに、

$$A_t = t(4.7869 - 0.098185t + 0.0010843t^2) \times 10^{-3}$$

$$B_t = t(18.030 - 0.8164t + 0.01667t^2) \times 10^{-6}$$

である。以上の式より、塩水の密度  $r_s$  が塩素量  $Cl_s$  と水温  $t$  を与えることによって計算できる。

## 2.5 空気の密度の決定方法

今回の実験において，工業規格として与えられる気温  $t$  ( ) と空気の密度  $r_a$  ( $kg/m^3$ ) の関係から求めた，以下の近似式により算出した．

$$r_a = 0.0097t^2 - 4.3801t + 1290.8$$

## 2.6 密度界面の決定方法

密度界面は，目視できる密度界面の，上方 2cm と下方 2cm の間の電気伝導度を 1cm 間隔で測定し，得られた鉛直濃度分布から求めた上、下層の平均濃度の位置を密度界面とした．

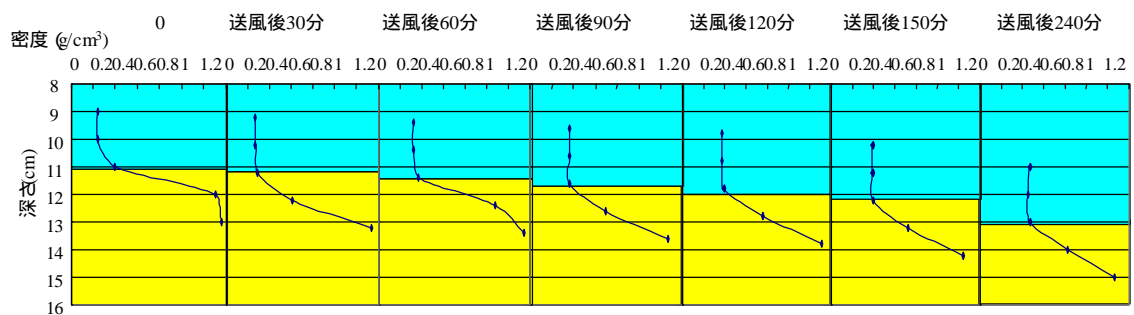


Fig.2-6 密度界面の時間変化測定例 (Run12)

## 2.7 代表風速と空気の摩擦速度

Fig.2-7 は風速分布の測定結果のうち吹送距離が 275cm のものについて示したものである．そこで空気の摩擦速度  $u_{*a}$  は風速分布の対数則である次式より算出した．

$$\frac{U(z)}{u_{*a}} = \frac{1}{k} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2-1)$$

$U(z)$  は高さ  $z$  における風速， $k$  はカルマン定数， $z_0$  は粗度定数である．Fig.2-7 に描かれている斜線は (2-1) 式を用いるために求めた回帰線である．Fig.2-8. は  $z=15$ cm に



おける代表風速  $U_{15}$  とし,これと上述の方法で求められる空気の摩擦速度  $u_{*a}$  の関係を示したものである.この図より本実験で用いたものと浦ら(1983)および古本ら(1991)の研究で得られている代表風速と空気の摩擦速度の関係と一致している.

また, Fig.2-9 は本実験で用いた風洞の風洞特性を表したものであるが,風洞上部で天井の影響を受けているが水面付近では対数分布則が成立している.

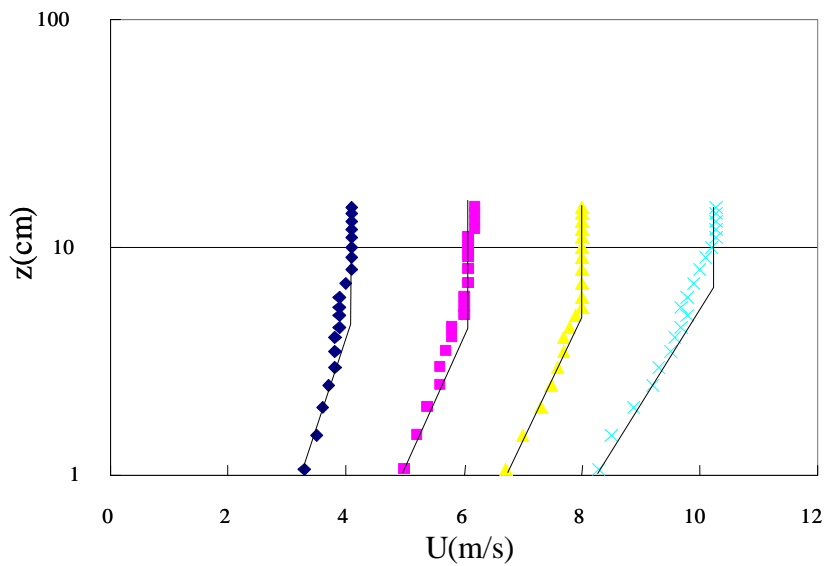


Fig.2-7 風速分布 (x=275cm)

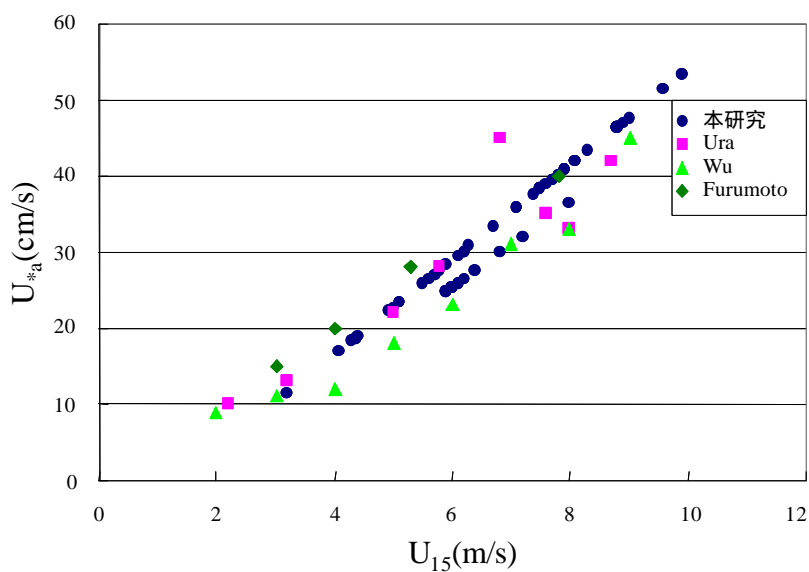


Fig.2-8 x=275cmにおける代表風速と空気の摩擦速度の関係

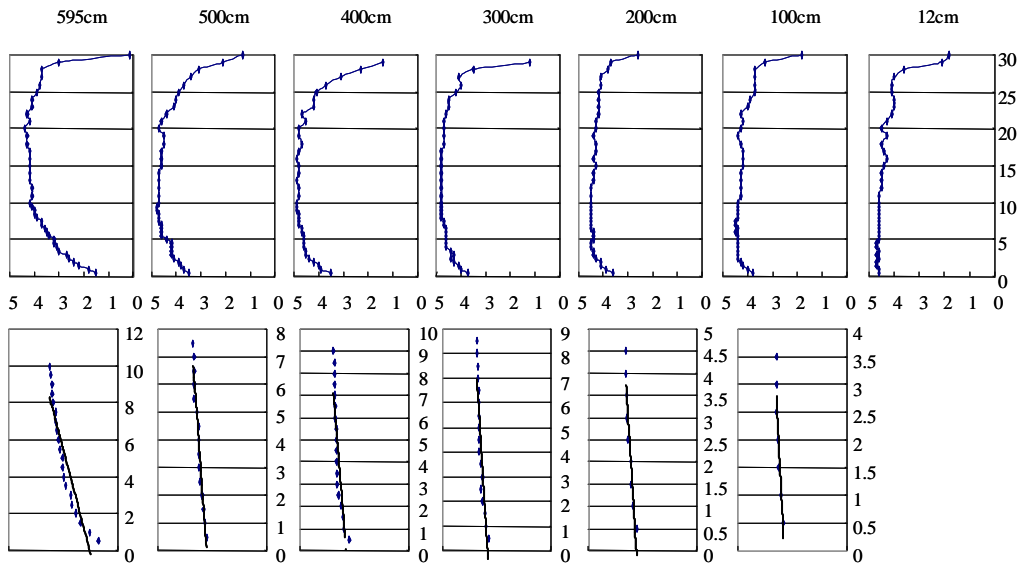


Fig.2-9 風洞特性図 (Hz)

## 2.8 連行係数とリチャードソン数

一般に、連行速度は次式で定義される連行係数  $E$  と層平均リチャードソン数  $R_{io}$  の関係として表現されている。

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{u_e}{V} \\ R_{io} &= \frac{\Delta r g H}{r V^2} \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

ここに、 $u_e$  は連行速度、 $V$ 、 $H$  および  $r$  はそれぞれ代表の速度、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。いま、流れが2次元であり、かつ流水断面を矩形とすれば、上層の流量の連続式および密度保存則は次式となる。

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \frac{\partial (u_1 h_1)}{\partial x} = u_e \quad (2-3)$$

$$\frac{\partial (r_1 h_1)}{\partial t} + \frac{\partial (r_1 u_1 h_1)}{\partial x} = r_2 u_e \quad (2-4)$$

ここに， $u_1$ は上層の断面平均流速， $h_1$ は上層水深， $r_1$ ， $r_2$ はそれぞれ上，下層の密度， $x$ は主流方向， $t$ は時間を表す．吹送流の場合，(2-3)式の右辺第2項はきわめて微小であるから，

$$\frac{dh_1}{dt} = u_e \quad (2-5)$$

となり，連行速度は上層水深の時間変化，すなわち密度界面の低下速度として求められる．(2-3)式および $\Delta r = r_2 - r_1$ を用いると，(2-4)式は次式となる．

$$\frac{\partial r_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial r_1}{\partial t} = \frac{\Delta r}{h_1} \quad (2-6)$$

密度界面を介して上層へ連行された下層水は鉛直・水平方向に速やかに混合し，一様化されるものとする，(2-6)式は

$$\frac{dr_1}{dt} = u_e \frac{\Delta r}{h_1} \quad (2-7)$$

となる．(2-5)式，(2-7)式から， $r_2$  = 一定の条件のもとで積分すれば，

$$h_1 \Delta r = h_{10} \Delta r_0 = \text{const.} \quad (2-8)$$

を得る．ここに， $h_{10}$ および $\Delta r_0$ は初期の上層水深および上，下層の密度差である．そこで，(2-2)式において， $H \rightarrow h_{10}$ ， $\Delta r \rightarrow \Delta r_0$ ， $r \rightarrow r_a$ ， $V \rightarrow u_{*a}$ を用いて層平均リチャードソン数を表すと

$$R_{ia} = \frac{\Delta r_0 g h_{10}}{r_a u_{*a}^2} \quad (2-9)$$

となり，これは時間的に変化しないので都合が良い．このとき，連行係数は

$$E = \frac{dh_1/dt}{u_{*a}} = \frac{u_e}{u_{*a}} \quad (2-10)$$

として求められる(森ら 1984)．

### 第3章 連行現象に関する実験結果および考察

#### 3.1 浮葉性植物に関する連行現象の実験結果

吹送流による上層水深の時間変化は、Fig.3-1 に示すように、風の作用後しばらくは循環流の形成および内部波の発達のため、変動が大きいですが、時間の経過とともに時間に正比例する傾向を示した。これは水面に水草のない既往の吹送流による密度界面の連行現象の場合と同様であり、実験初期を除いて密度界面の低下速度は一定であることを示している。

本実験においても Fig.3-1 に示しているように、密度界面の低下速度は実験初期を除いて一定であるので、連行速度  $u_e = dh_1/dt = const.$  となり時間に依存しない（森ら、1989）。

本研究で対象としている浮葉性植物のある場合における吹送流による密度界面の連行速度についても、既往の浮葉性植物のない場合のそれと同様に、連行速度  $u_e = dh_1/dt = const.$  であることがわかる。このようにして得られた本実験における連行係数と層平均リチャードソン数の関係を図示したのが Fig.3-2 である。図中の○印は浮葉性植物のない密度2成層場の吹送流による密度界面の連行速度に関する森ら(1989)の実験結果を示している。Fig.3-2 からわかるように本実験結果は、 $R_{ia} < 100$  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いること、また、浮葉性植物のある場合の連行速度は、同じ  $R_{ia}$  に対して浮葉性植物のない場合のそれに比べてかなり小さくなることが示されている。さらに、水草の占有率  $b$  が大きくなるにつれて連行速度が小さくなっていることがわかる。そこで、 $E = K_b R_{ia}^{-3/2}$  とおいて、比例係数  $K_b$  を実験結果から推定した結果を Fig.3-3 に示している。Fig.3-3 から、浮葉性植物の水面占有率  $b$  が大きくなるにつれて  $K_b$  が指数的に低下する傾向にあることがわ

かる．いま，風の吹送による上層の循環流が確立した後の2成層密度界面の連行速度は，密度界面近傍の乱流構造すなわち風の剪断に基づいて水面近傍で生成された乱流エネルギーが界面近傍へ拡散・輸送された量に依存するものと考えられる．浮葉性植物が水面を占有する場合の水面に付加される風の剪断力は，浮葉性植物がない場合に比べて水草が占める割合だけ小さくなるものと考えられる．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浮葉性植物のない場合に比べて減少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小さくなるものと推察される．したがって，浮葉性植物の水面占有率  $b$  の変化に伴う  $K_b$  の変化を説明するには，各占有率における上層の乱流構造の定量的な把握が必要となる．

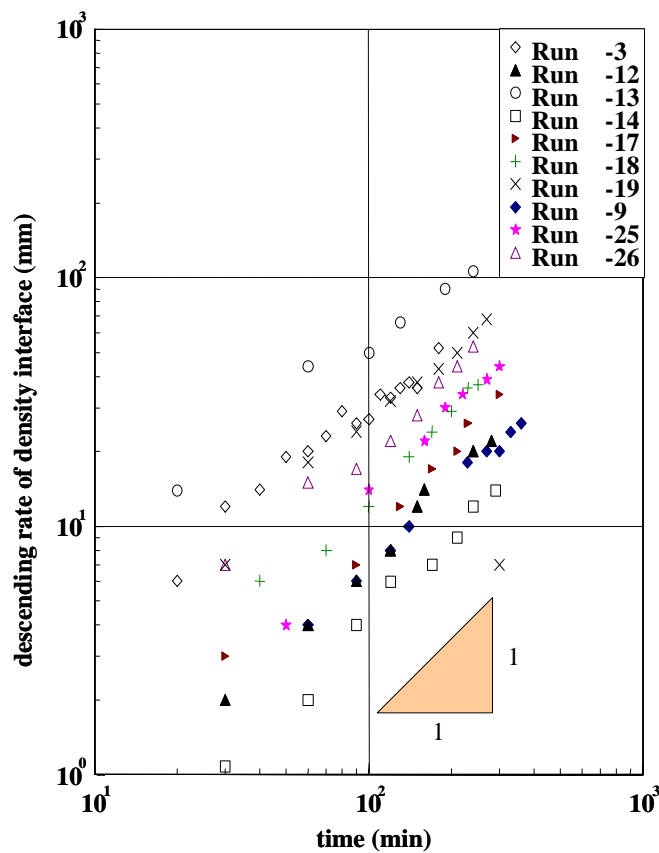


Fig.3-1 浮葉性植物に関する密度界面の時間変化

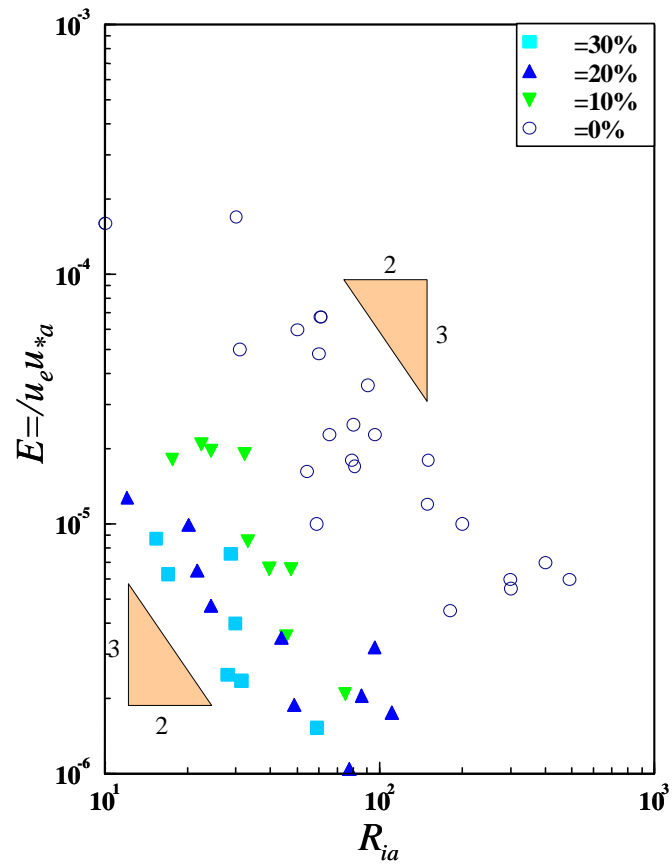


Fig.3-2 浮葉性植物に関する連行係数とリチャードソン数

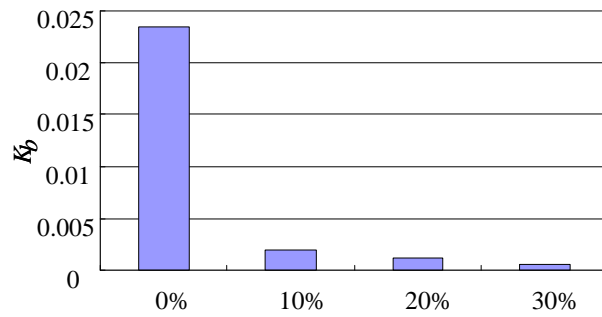


Fig.3-3 浮葉性植物水面占有率と $K_b$

### 3.2 沈水性植物に関する連行現象の実験結果

沈水性植物に関する連行現象の実験についても，既往の研究および浮葉性植物に関する連行現象の実験結果と同様に，吹送流による上層水深の時間変化は，時間の経過とともに時間に正比例する傾向を示した（Fig.3-4 参照）．つまり既往の研究および浮葉性植物に関する実験と同様に連行速度  $u_e = dh_1/dt = const.$  となる．また，Fig.3-5 連行係数と層平均リチャードソン数の関係についても同様に， $E \propto R_{ia}^{-3/2}$  の関係をほぼ満たしていることがわかる．しかし，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が示されている．そこで，浮葉性植物に関する実験の場合と同様に  $E = K_b R_{ia}^{-3/2}$  とおいて，比例係数  $K_b$  を実験結果から推定した結果を Fig.3-6 に示す．Fig.3-6 から，沈水性植物が繁茂すると， $K_b$  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る．

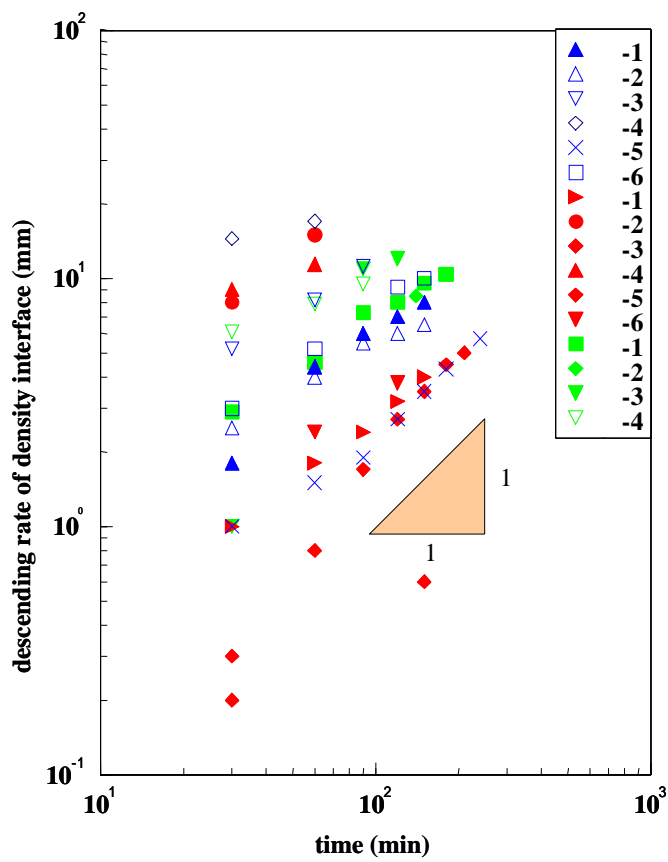


Fig.3-4 沈水性植物に関する密度界面の時間変化



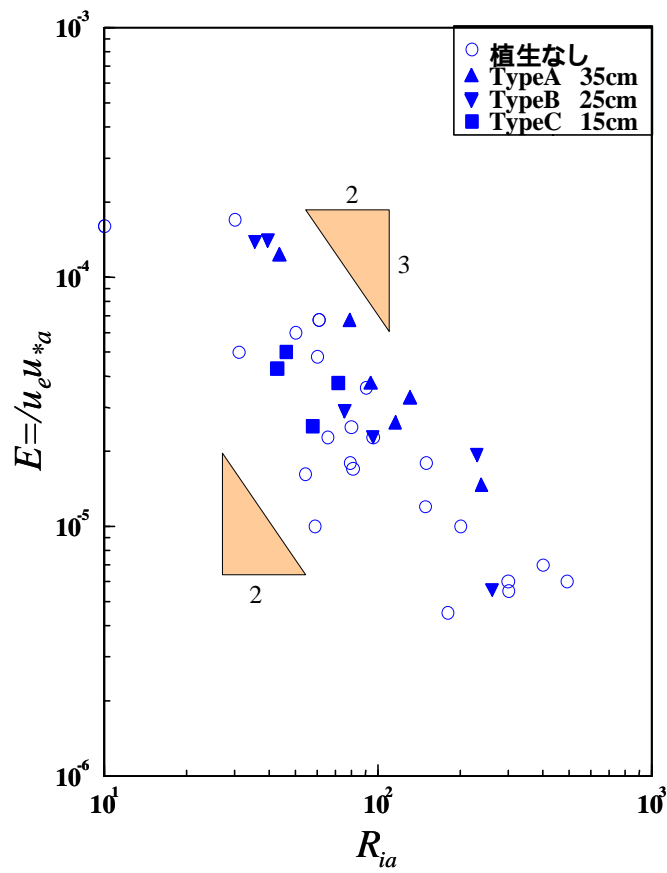


Fig.3-5 沈水性植物に関する連行係数とリチャードン数

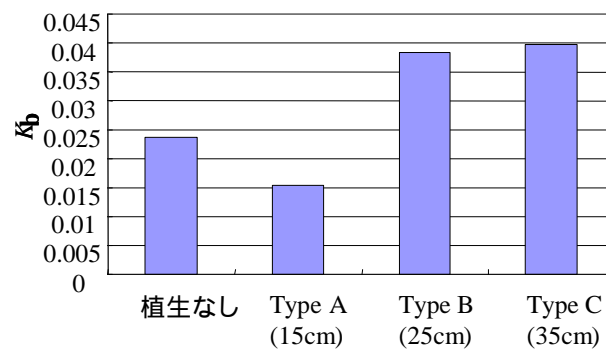


Fig.3-6 沈水性植物高さどK

## 第4章 乱流構造に関する実験

### 4.1 実験目的

第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現れるが予測される．外部からの擾乱による自浄作用に依存す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，水生植物の繁茂状況と密度2成層流の乱流構造の解明を進めることは重要である．本研究では特に浮葉性植物および沈水性植物が水域内に存在す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 浮葉性植物に関する乱流構造の実験装置

実験装置は，Fig.4-1に示すように連行現象に関する実験に用いた水槽と同様の長さ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（Photo.4-1参照）を使用し，流速計を支えるゲージは風洞上部を自由に移動できるようにした（Photo.4-2参照）．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．Fig.4-1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．流速計の設置地点は，浮葉性植物に関する実験では水槽中央部のPointA<sub>f</sub>，水槽後方部の水草端のPointB<sub>f</sub>の2点について，沈水性植物に関する実験では水槽中央部のPointA<sub>s</sub>と水草端のPointB<sub>s</sub>および水草直

上の PointC<sub>s</sub> の 3 点について計測を行った。( Fig.4-1 および Fig.4-2 参照 )

浮葉性植物に関する実験条件を Table4-1 に ,沈水性植物に関する実験条件を Table4-2 に示す .

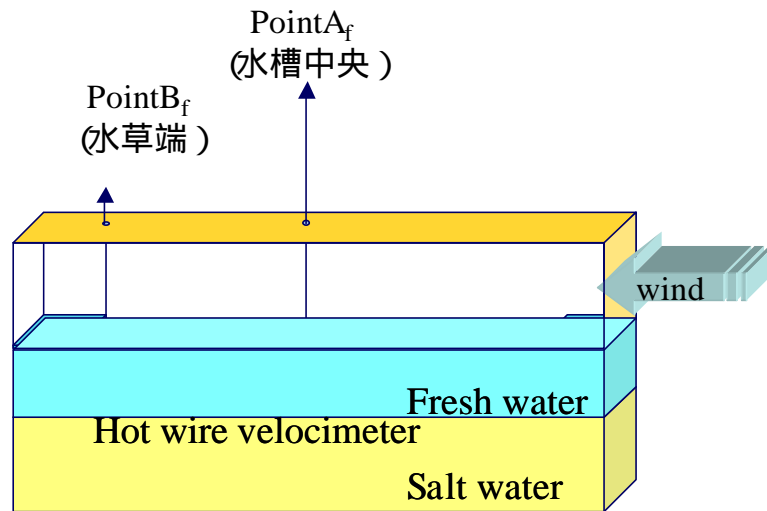


Fig.4-1 浮葉性植物の乱流構造に関する実験装置

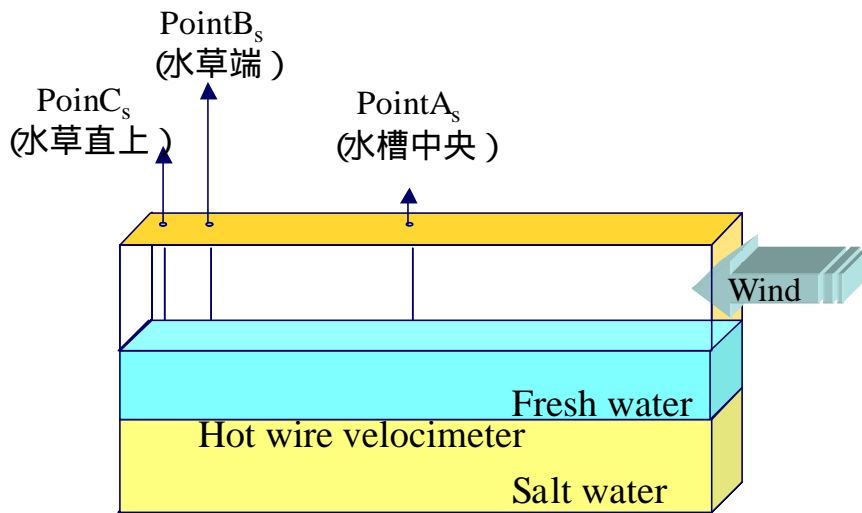


Fig.4-2 沈水性植物の乱流構造に関する実験装置

Table4-1 浮葉性植物の乱流構造に関する実験条件

Run No.	Measurement Point	Wind (m/s)	$\times 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )	<sup>a</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	$h_1$ (m)	$u_{*a}$ (m/s)	$u_*$ (m/s)	$R_{ia}$
-1	0%-PointA <sub>f</sub>	8.5	0.01175	1.2365	0.126	0.445	0.0156	59.3
-2	0%-PointB <sub>f</sub>	8.5	0.01175	1.2365	0.135	0.445	0.0156	63.6
-3	10%-PointA <sub>f</sub>	8.3	0.01154	1.2528	0.096	0.432	0.0152	46.4
-4	10%-PointB <sub>f</sub>	8.3	0.01154	1.2528	0.115	0.432	0.0152	56.6
-5	20%-PointA <sub>f</sub>	8.3	0.01062	1.2360	0.101	0.432	0.0152	45.5
-6	20%-PointB <sub>f</sub>	8.3	0.01062	1.2360	0.115	0.432	0.0152	51.8
-7	30%-PointA <sub>f</sub>	8.5	0.01111	1.2365	0.108	0.445	0.0156	48.1
-8	30%-PointB <sub>f</sub>	8.5	0.01111	1.2365	0.115	0.445	0.0156	51.2

Table4-2 沈水性植物の乱流構造に関する実験条件

Run No.	Measurement Point	Wind (m/s)	$\times 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )	<sup>a</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	$h_1$ (m)	$u_{*a}$ (m/s)	$u_*$ (m/s)	$R_{ia}$
-1	NothingPointA <sub>s</sub>	4.4	0.0083	1.267	0.11	0.189	0.0019	198.9
-2	NothingPointB <sub>s</sub>	4.4	0.0083	1.267	0.14	0.189	0.0019	253.1
-3	NothingPointC <sub>s</sub>	4.4	0.0083	1.267	0.14	0.189	0.0019	253.1
-4	15cmPointA <sub>s</sub>	4.5	0.0074	1.245	0.12	0.195	0.0069	182.9
-5	15cmPointB <sub>s</sub>	4.5	0.0074	1.245	0.14	0.195	0.0069	213.4
-6	15cmPointC <sub>s</sub>	4.5	0.0074	1.245	0.15	0.195	0.0069	228.6
-7	25cmPointA <sub>s</sub>	4.5	0.0095	1.243	0.11	0.195	0.0069	215.7
-8	25cmPointB <sub>s</sub>	4.5	0.0095	1.243	0.13	0.195	0.0069	254.9
-9	25cmPointC <sub>s</sub>	4.5	0.0095	1.243	0.14	0.195	0.0069	264.7
-10	35cmPointA <sub>s</sub>	4.4	0.0081	1.261	0.12	0.189	0.0067	202.3
-11	35cmPointB <sub>s</sub>	4.4	0.0081	1.261	0.14	0.189	0.0067	246.3
-12	35cmPointC <sub>s</sub>	4.4	0.0081	1.261	0.15	0.189	0.0067	263.9



Photo.4-1 X型ホットフィルム流速計

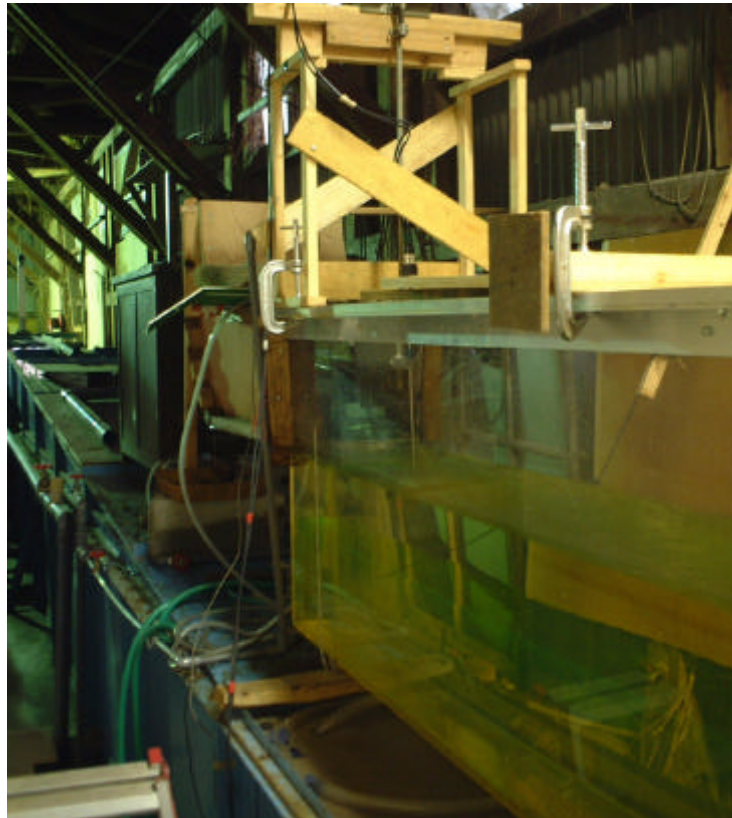


Photo.4-2 風洞上部に設置したゲージと流速計

#### 4.4 乱流構造に関する実験方法

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．計測は各地点ともサンプリング周波数 100Hz でデータ集録時間 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  $\hat{u} = \sqrt{u'^2}$ ，鉛直方向乱れ強度  $\hat{v} = \sqrt{v'^2}$ ，レイノルズストレス  $-\overline{u'v'}$  を求めて，上層の乱流構造を定量的に把握した（椿 1995，森ら 1984）．

## 第5章 乱流構造に関する実験結果および考察

### 5-1 浮葉性植物に関する乱流構造の実験結果

Fig.5-1 および Fig.5-2 は水平方向時間平均流速の鉛直分布について表したものであり、横軸、縦軸はそれぞれ空気の摩擦速度  $u_{*a}$ 、上層水深  $h_1$  を用いて無次元表示している。以下、Fig.5-3 ~ Fig.5-10 の横軸、縦軸は  $u_{*a}$ 、 $h_1$  を用いて無次元化している。図において風向は図の右から左であり、 $z_1/h_1=1$  は水面、 $z_1/h_1=0$  が密度界面を表している。図から、PointA<sub>f</sub>、PointB<sub>f</sub> のいずれの場合についても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。また、分布形状については水面から境界面に向かうにつれて減少し、水面から上層水深の3割程度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わかる。順流部から逆流部への移行水深は浮葉性植物の水面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。つぎに、各占有率での PointA<sub>f</sub> と PointB<sub>f</sub> を比較すると、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比べて、風下端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を考慮に入れなければならない。

Fig.5-3 および Fig5-4 の鉛直方向時間平均流速の鉛直分布については、密度界面近傍を除いて上層全域負の値、すなわち水面から沈み込む向きの流れが卓越していることがわかる。

乱れ強度は各点での乱れの強さを表す指標であるが、Fig.5-5 および Fig.5-6 より水平方向乱れ強度の鉛直分布は、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各点での乱れの強さが減少する傾向を示している。

また、PointA<sub>f</sub>と PoinB<sub>f</sub>を比較すると、PoinB<sub>f</sub>では PointA<sub>f</sub>よりも乱れは小さく、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。Fig.5-7および Fig.5-8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.5-9および Fig.5-10に示す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、その鉛直分布は水槽中心で水面付近に大きな乱れの発生がみられるのに対し、水草の端で水面付近に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レイノルズストレスは大きく、水深が2cmを越えるとほぼ0となっている。これは乱れエネルギーの発生が水面での風のせん断のみに依存していることを示すものである。



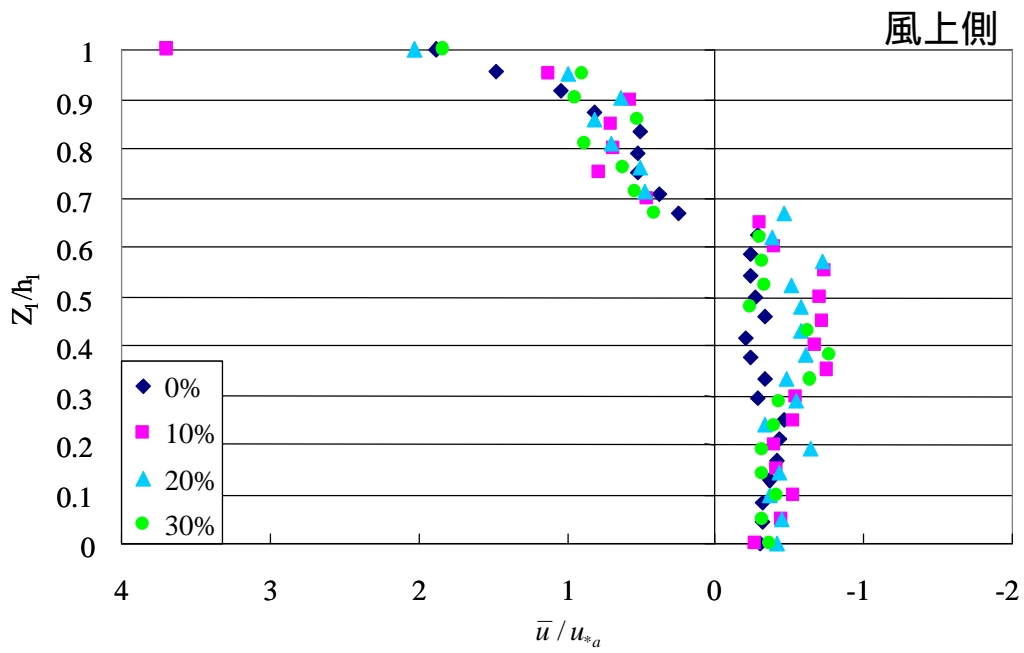


Fig.5-1 水平方向時間平均流速 (PointA<sub>f</sub>)

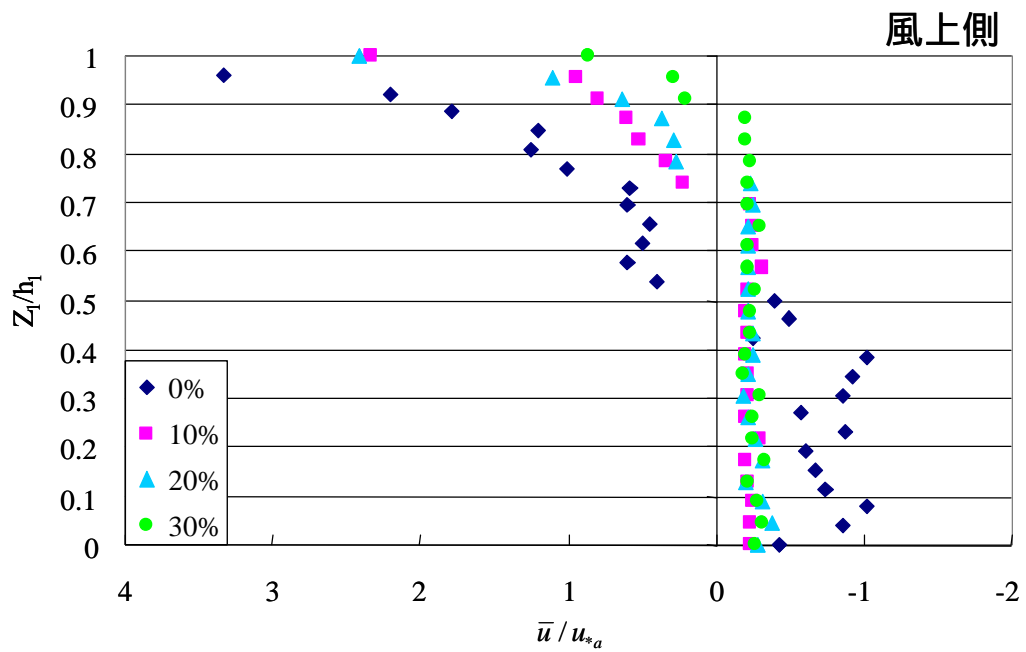


Fig.5-2 水平方向時間平均流速 (PointB<sub>f</sub>)

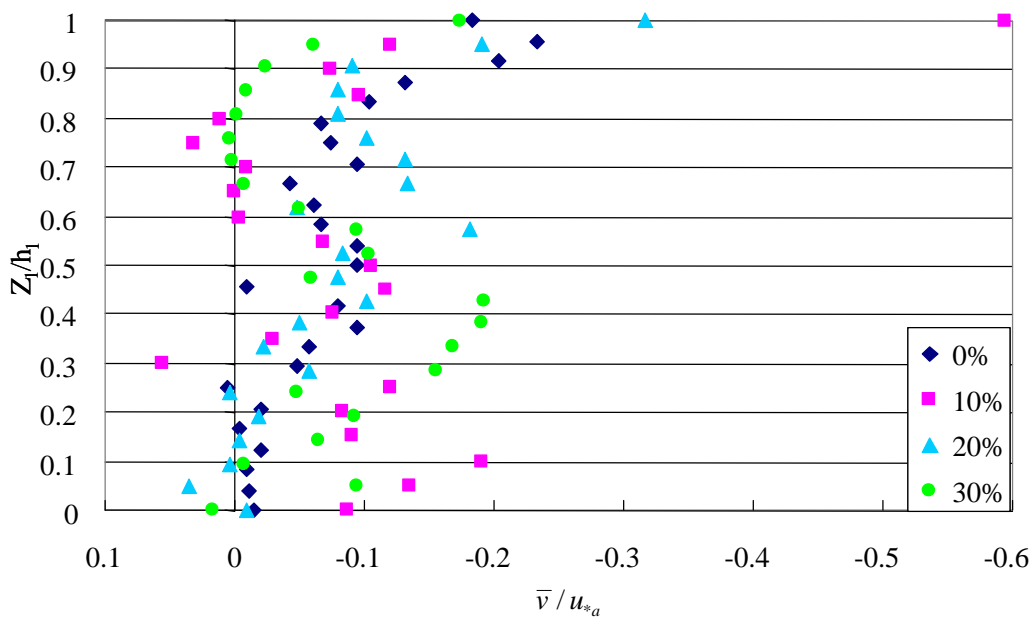


Fig.5-3 鉛直方向時間平均流速 (PointA<sub>f</sub>)

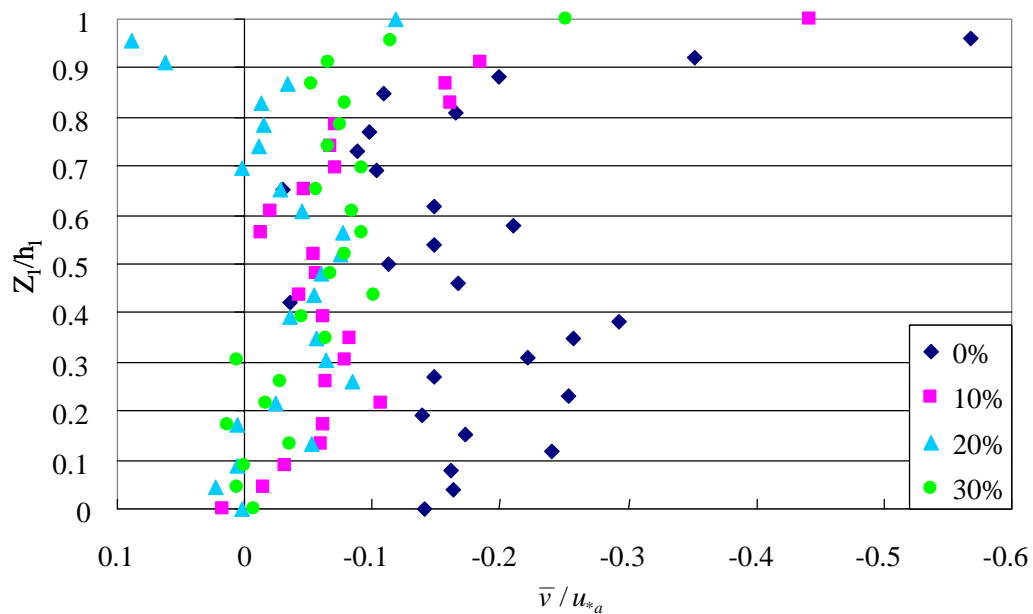


Fig.5-4 鉛直方向時間平均流速 (PointB<sub>f</sub>)

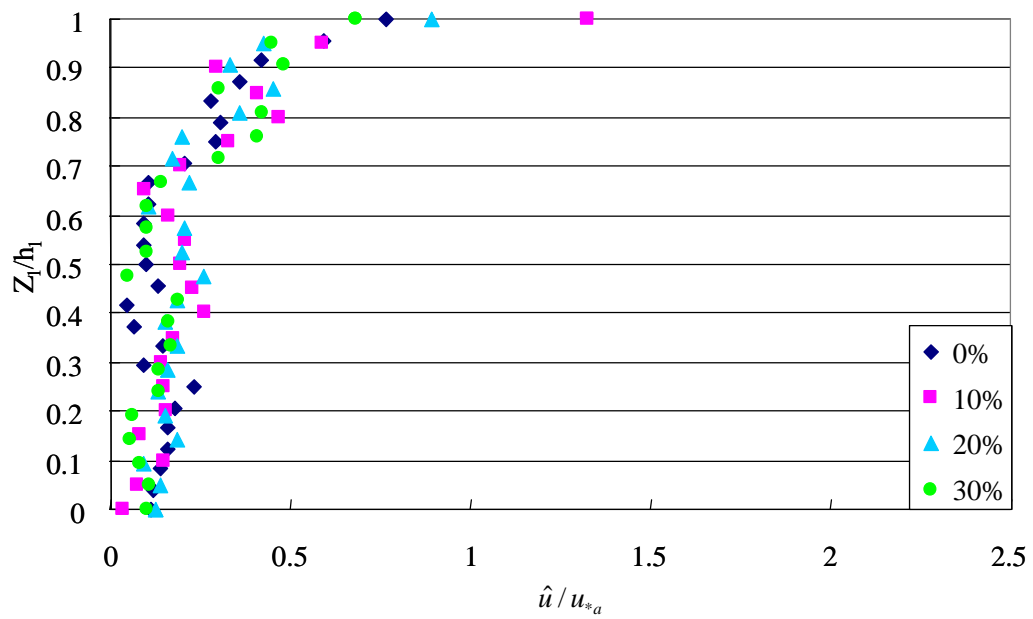


Fig.5-5 水平方向乱れ強度 (PointA<sub>f</sub>)

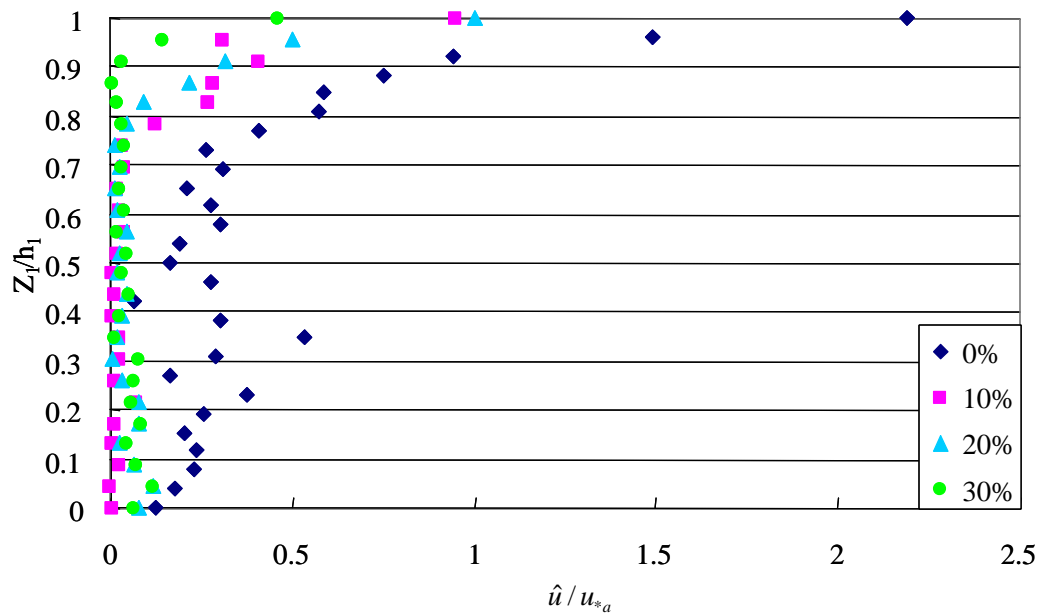


Fig.5-6 水平方向乱れ強度 (PointB<sub>f</sub>)

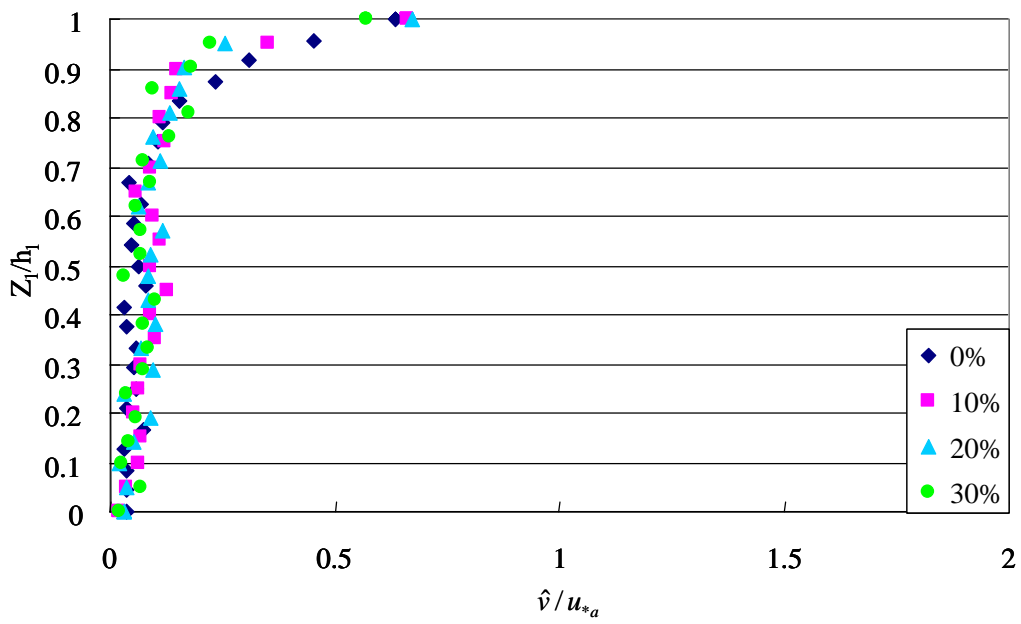


Fig.5-7 鉛直方向乱れ強度 (PointA<sub>r</sub>)

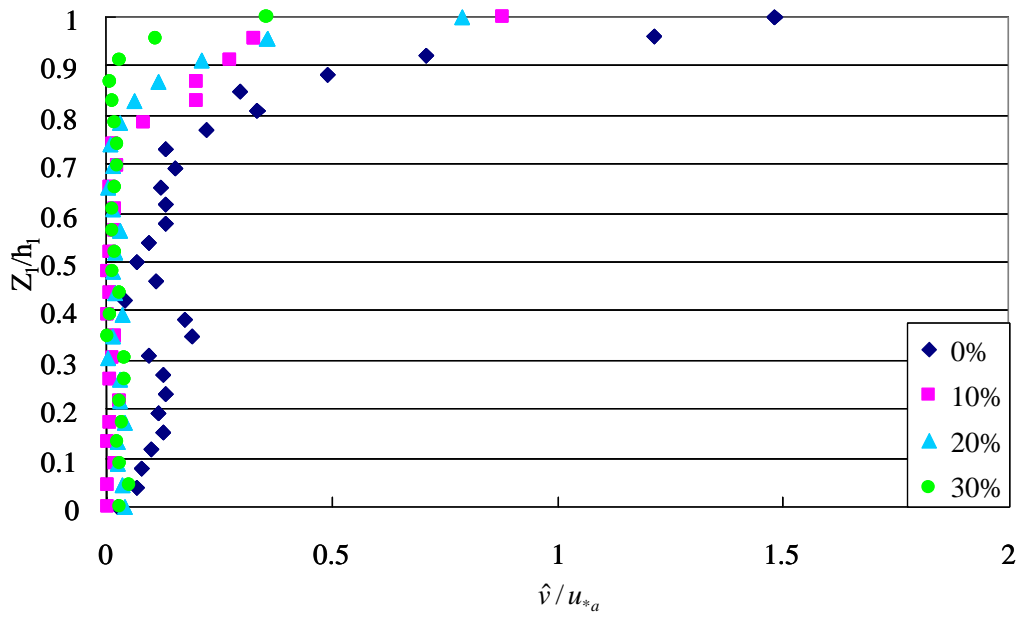


Fig.5-8 鉛直方向乱れ強度 (PointB<sub>r</sub>)

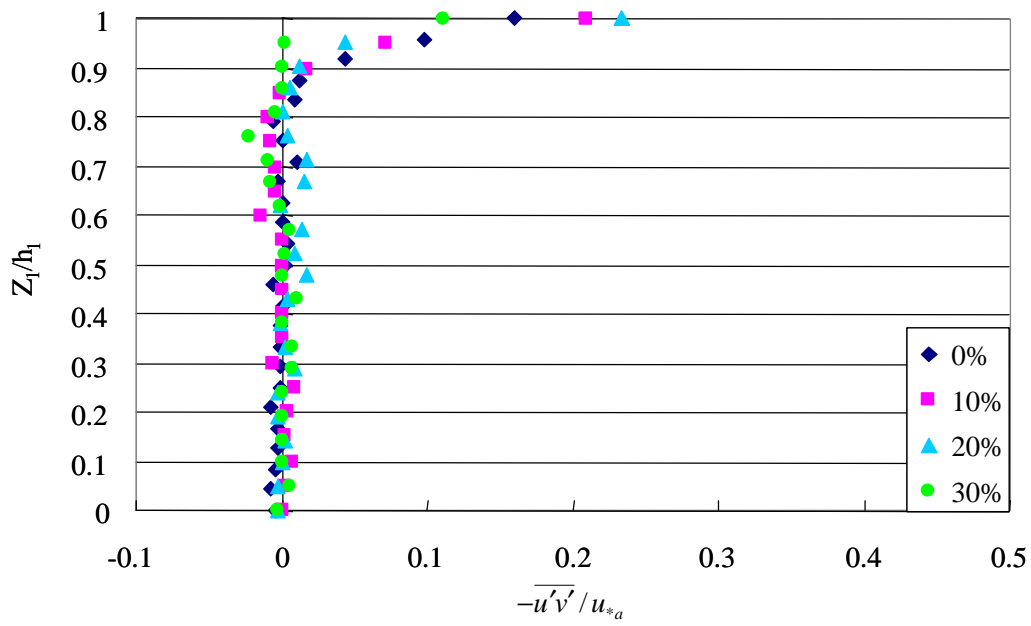


Fig.5-9 レイノルズストレス (PointA<sub>f</sub>)

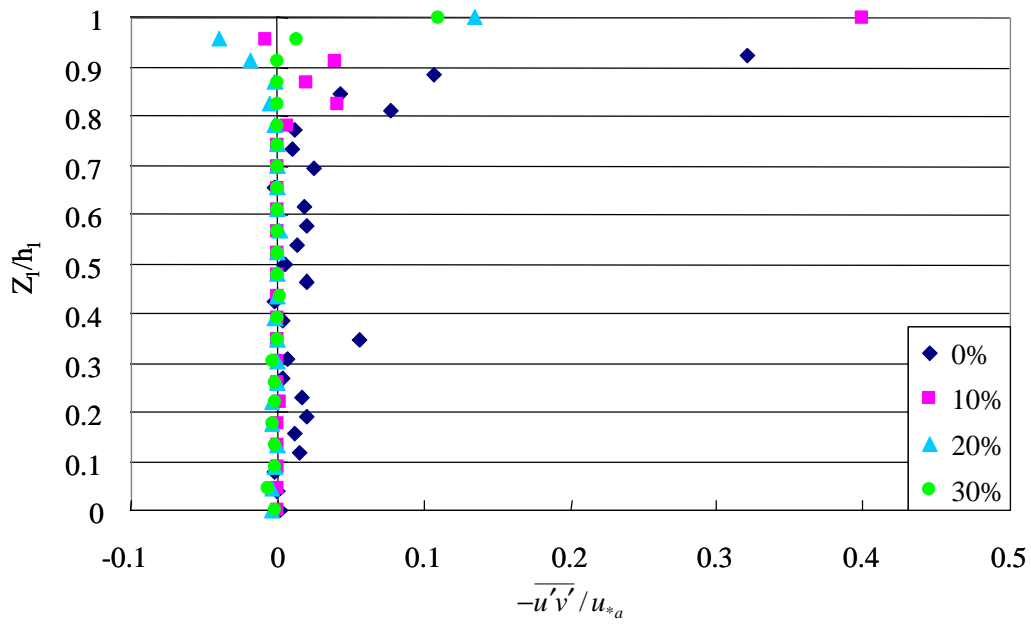


Fig.5-10 レイノルズストレス (PointB<sub>f</sub>)

## 5.2 沈水性植物に関する乱流構造の実験結果

Fig.5-11 , Fig.5-12 および Fig.5-13 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 , PointA<sub>s</sub> , PoinB<sub>s</sub> および PointC<sub>s</sub> のいずれの場合も各水深での水平方向流速は若干増加する傾向にあると言える．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 4 割程度まで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わかる．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る．この傾向は水槽後方で顕著に現れている．また , 境界面近くの流速はほぼ 0 である．

Fig.5-14 , Fig.5-15 および Fig5-16 の鉛直方向時間平均流速の鉛直分布については , 密度界面近傍を除いて上層全域負の値 , すなわち水面から沈み込む向きの流れが卓越していることがわかる．

乱れ強度は各点での乱れの強さを表す指標であるが , Fig.5-17 , Fig5-18 および Fig.5-19 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している．PoinB<sub>s</sub> では PointA<sub>s</sub> 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．また , Fig.5-20 , Fig.5-21 および Fig.5-22 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.5-23 , Fig.5-24 および Fig.5-25 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となっている．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 , 乱れエネルギーが強められた結果であると考えられる．

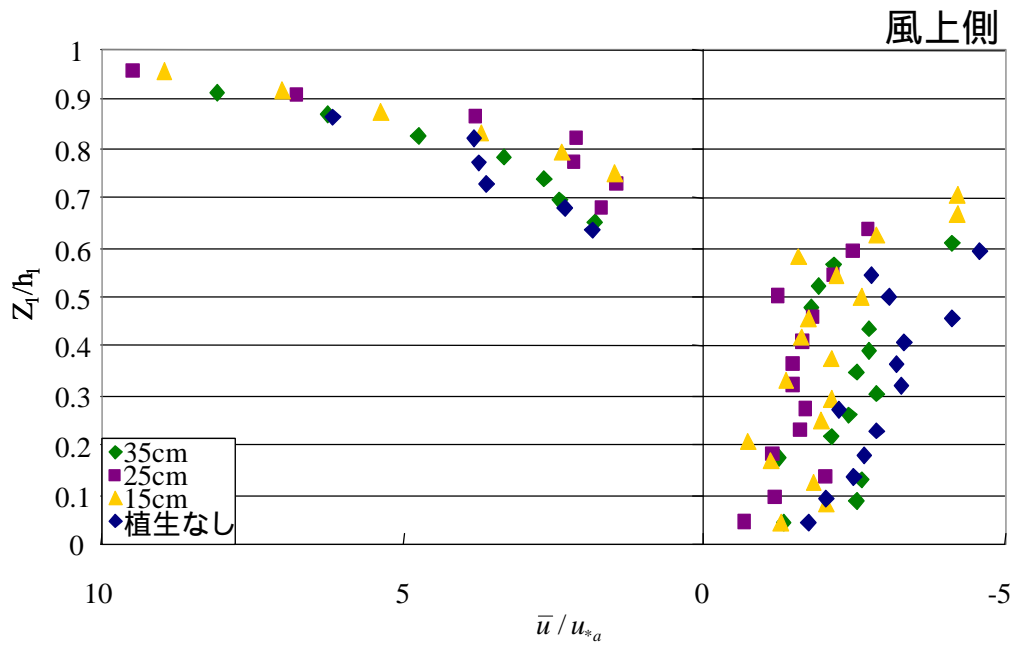


Fig.5-11 水平方向時間平均流速 (PointA<sub>s</sub>)

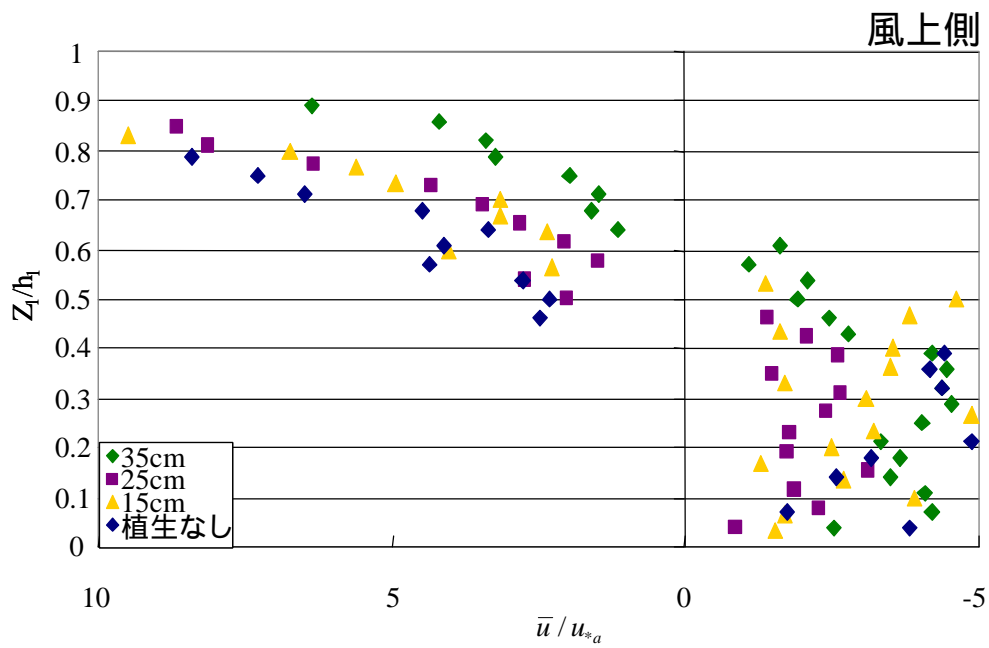


Fig.5-12 水平方向時間平均流速 (PointB<sub>s</sub>)

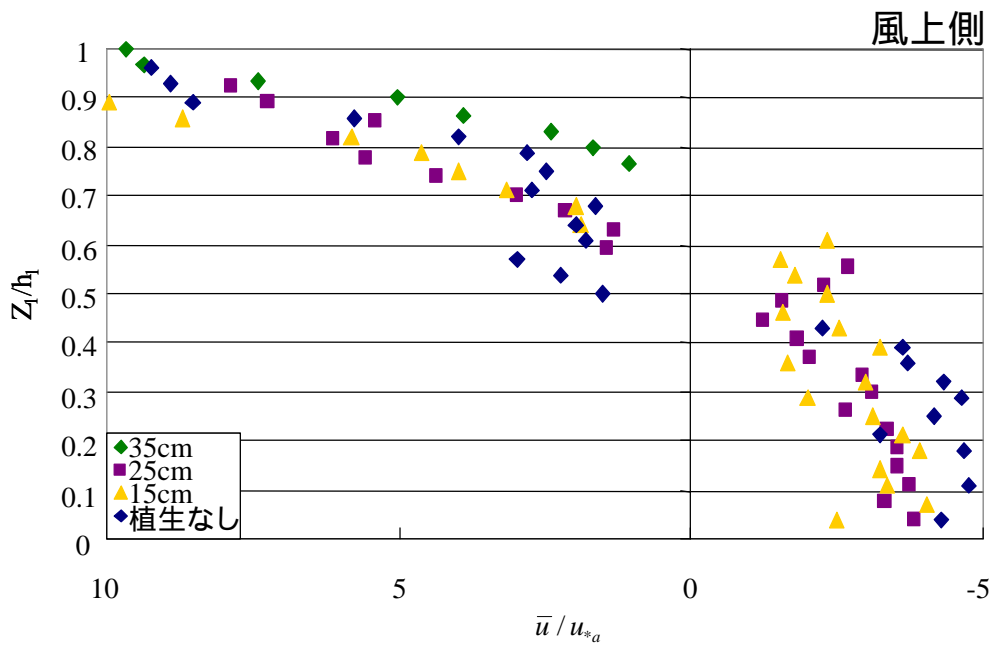


Fig.5-13 水平方向時間平均流速 (PointC<sub>s</sub>)

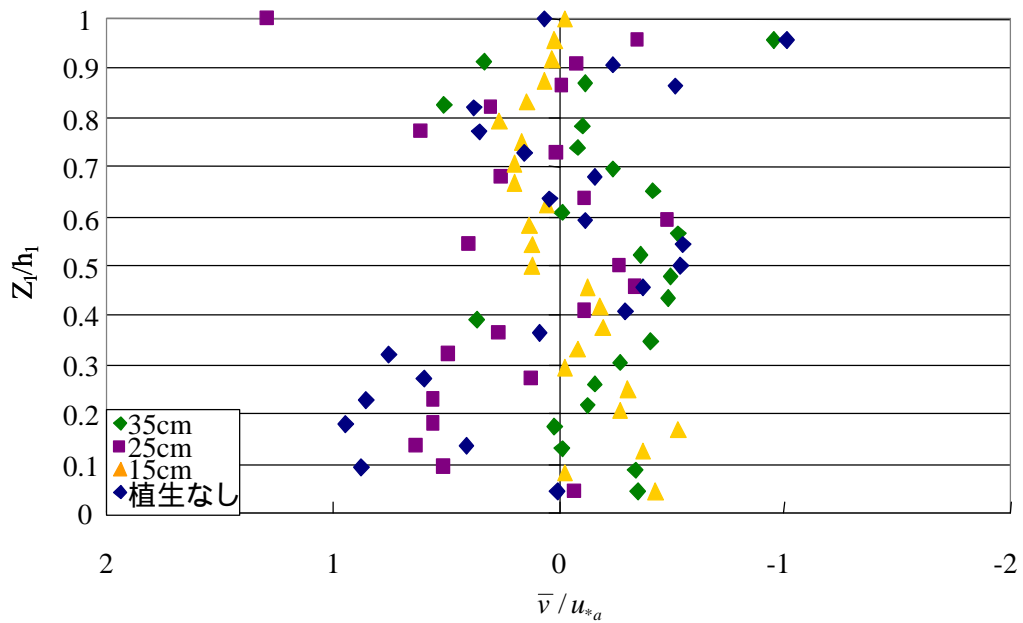


Fig.5-14 鉛直方向時間平均流速 (PointA<sub>s</sub>)



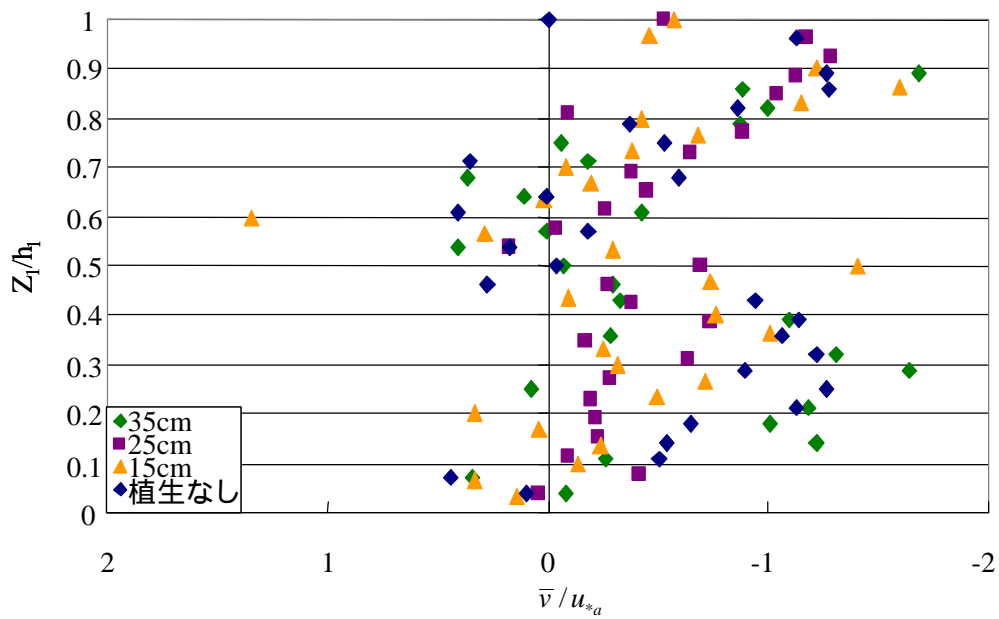


Fig.5-15 鉛直方向時間平均流速 (PointB<sub>s</sub>)

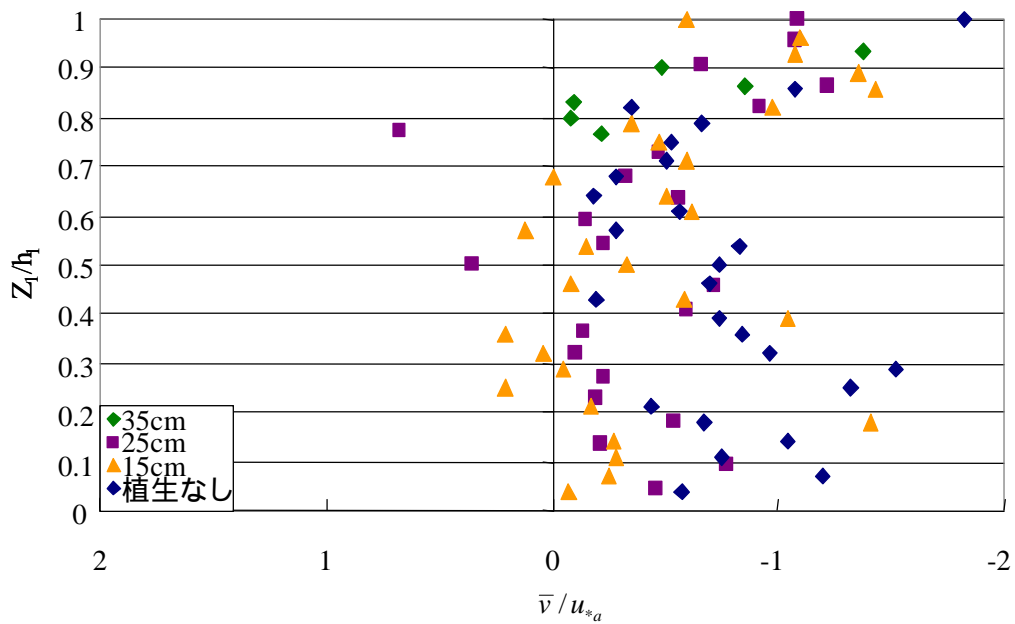


Fig.5-16 鉛直方向時間平均流速 (PointC<sub>s</sub>)

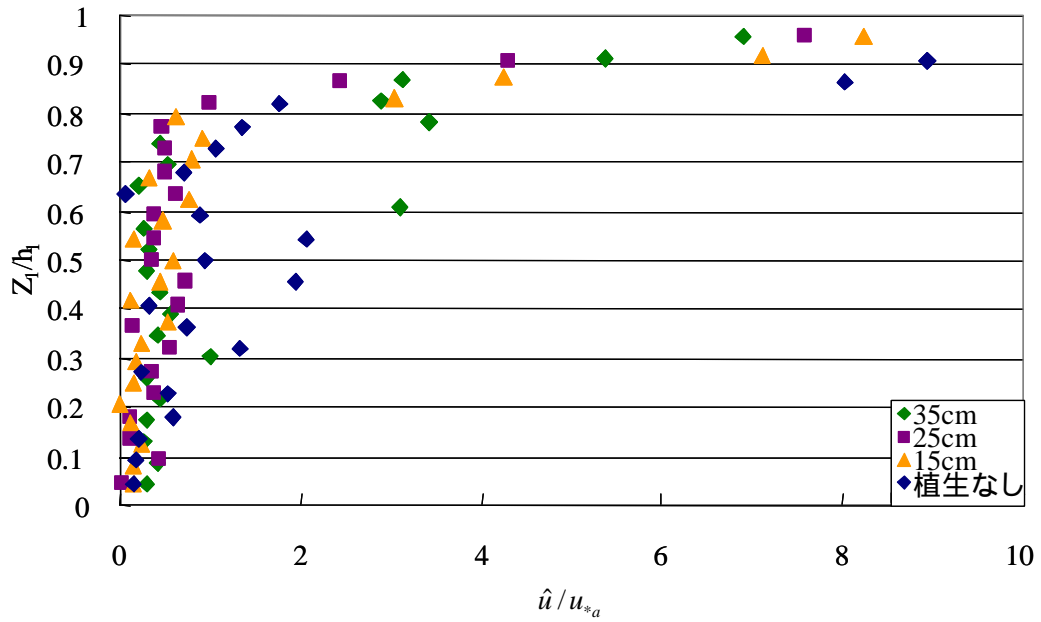


Fig.5-17 水平方向乱れ強度 (PointA<sub>s</sub>)

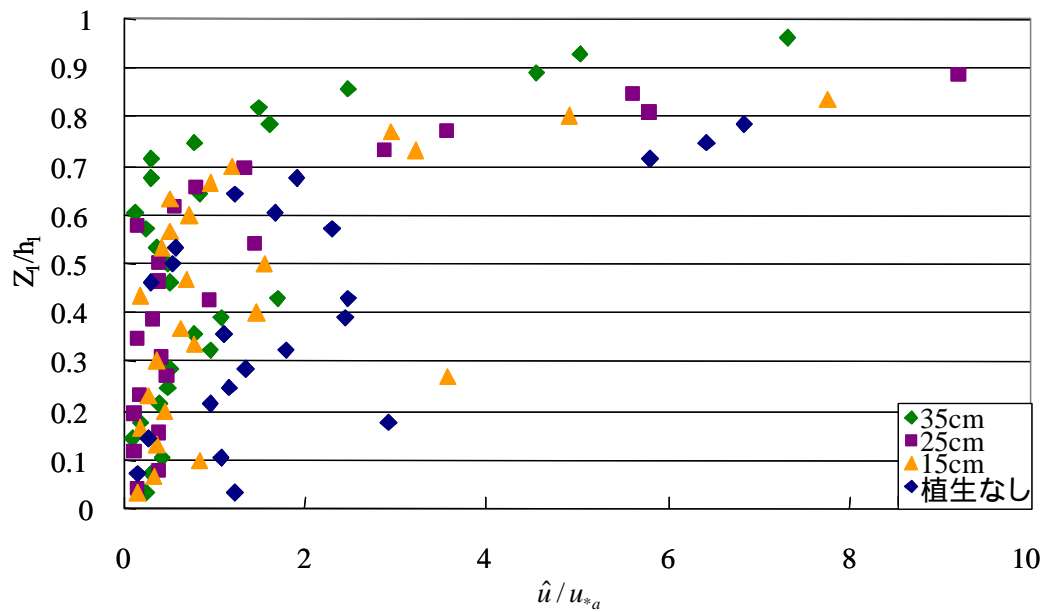


Fig.5-18 水平方向乱れ強度 (PointB<sub>s</sub>)

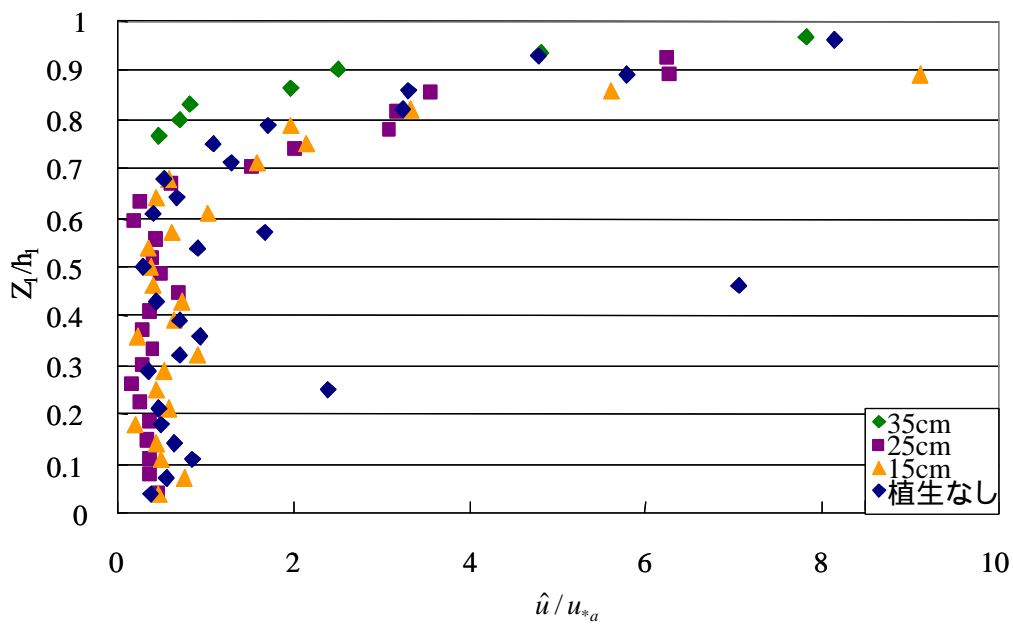


Fig.5-19 水平方向乱れ強度 (PointC<sub>s</sub>)

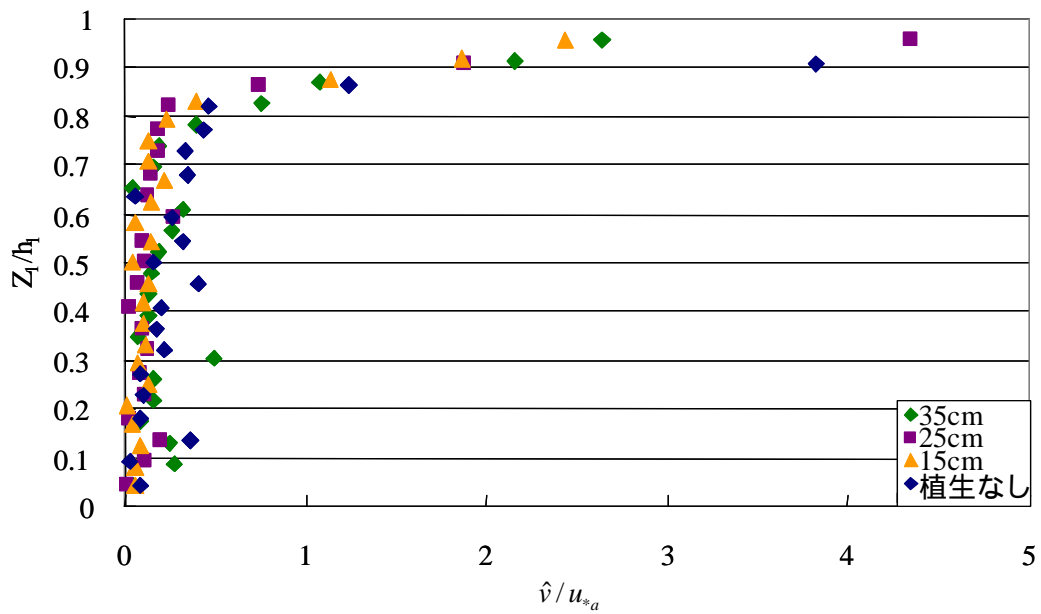


Fig.5-20 鉛直方向乱れ強度 (PointA<sub>s</sub>)

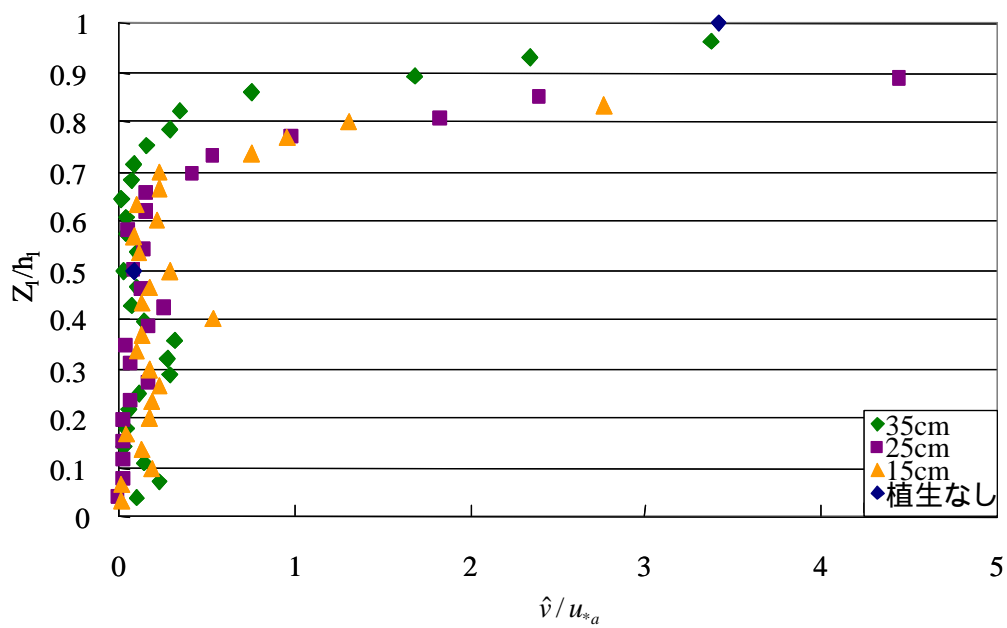


Fig.5-21 鉛直方向乱れ強度 (PointB<sub>s</sub>)

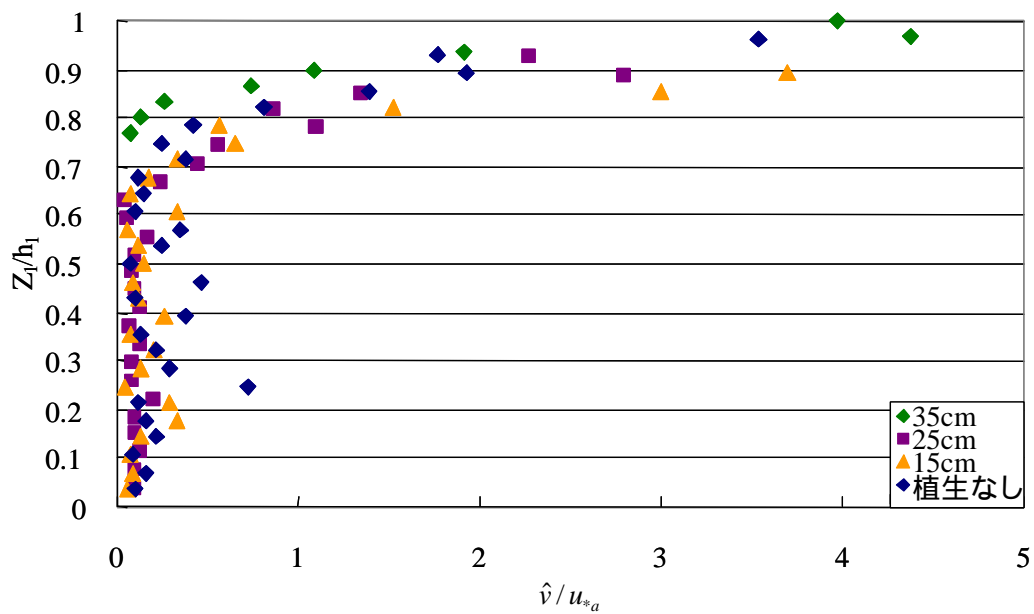


Fig.5-22 鉛直方向乱れ強度 (PointC<sub>s</sub>)

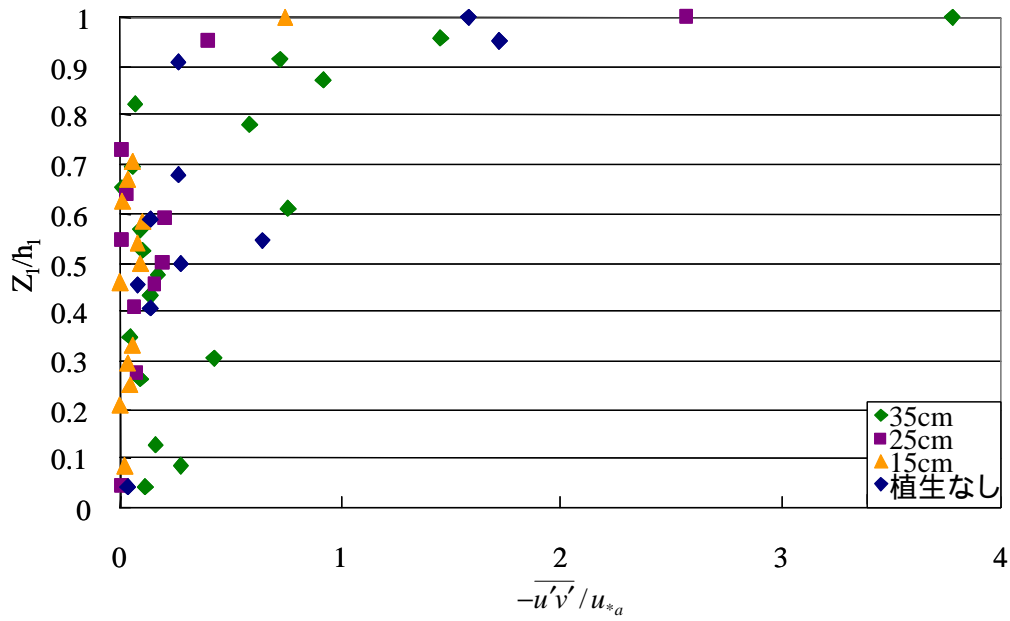


Fig.5-23 レイノルズストレス (PointA<sub>s</sub>)

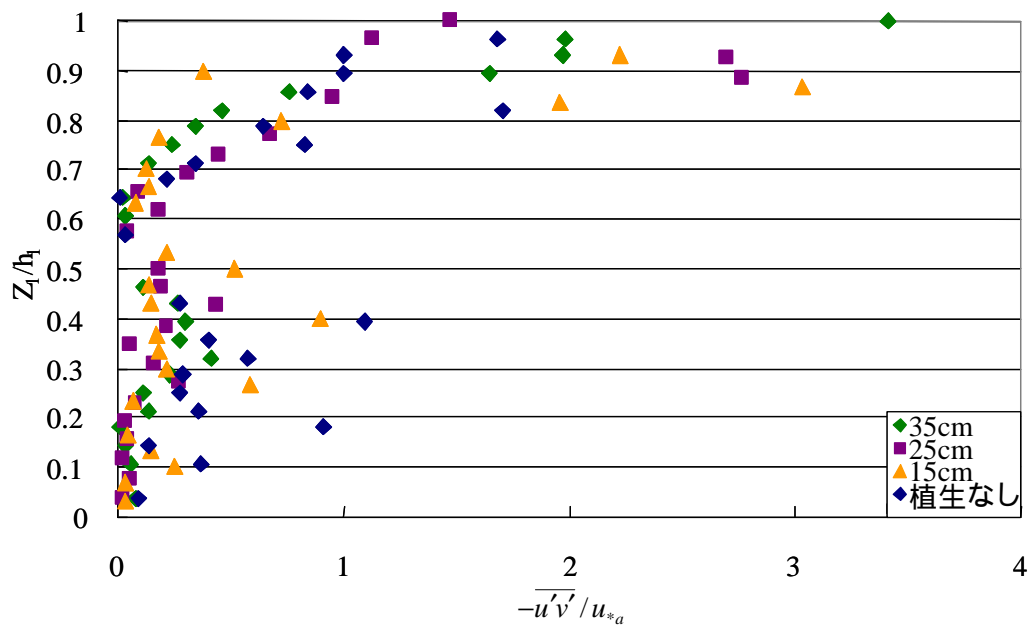


Fig.5-24 レイノルズストレス (PointB<sub>s</sub>)

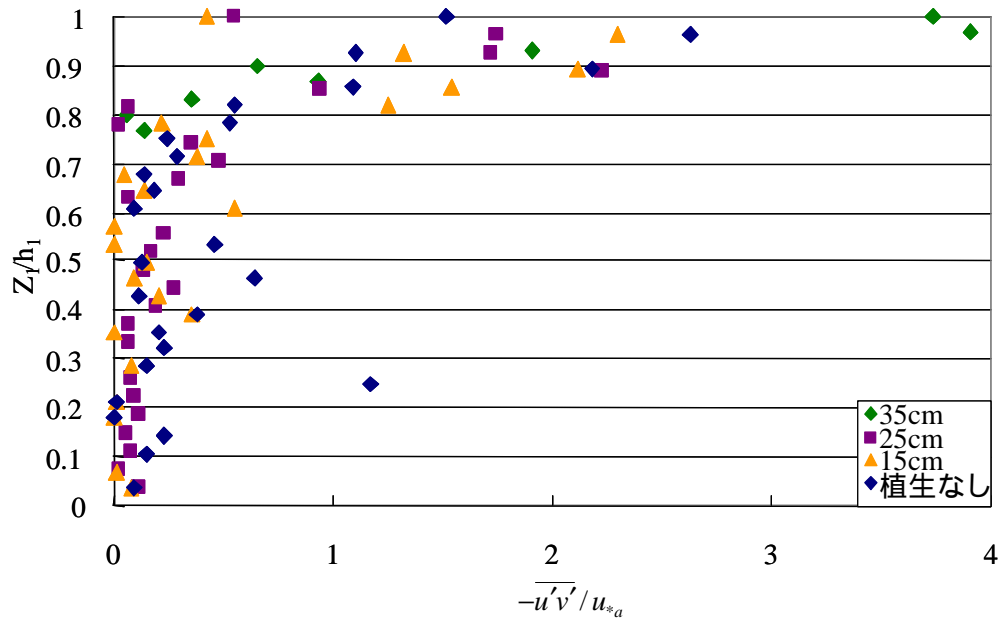


Fig.5-25 レイナルズストレス (PointC<sub>s</sub>)

## 第6章 乱流構造に関する実験に基づく連行現象規模の評価

### 6.1 浮葉性植物の乱流構造と連行現象の関係

浮葉性植物に関する乱流構造の実験結果について、とくに乱れ強度と浮葉性植物に関する連行現象との関係について検討するために、水平および鉛直方向乱れ強度の水深平均  $\bar{u}$  と浮葉性植物の水面占有率との関係を表したものが Fig.6-1 である。乱れ強度の水深平均は水平方向、鉛直方向ともに、浮葉性植物による水面占有率が大きくなるにつれて小さくなっている。この図は連行現象に関する実験値から得た  $k_b$  の変化にほぼ一致している。浮葉性植物による水面占有率が大きくなると、上層の乱流構造が変化し、すなわち乱れ強度の大きさが小さくなっていることによって、上下層間の鉛直混合能力が低下することを表している。

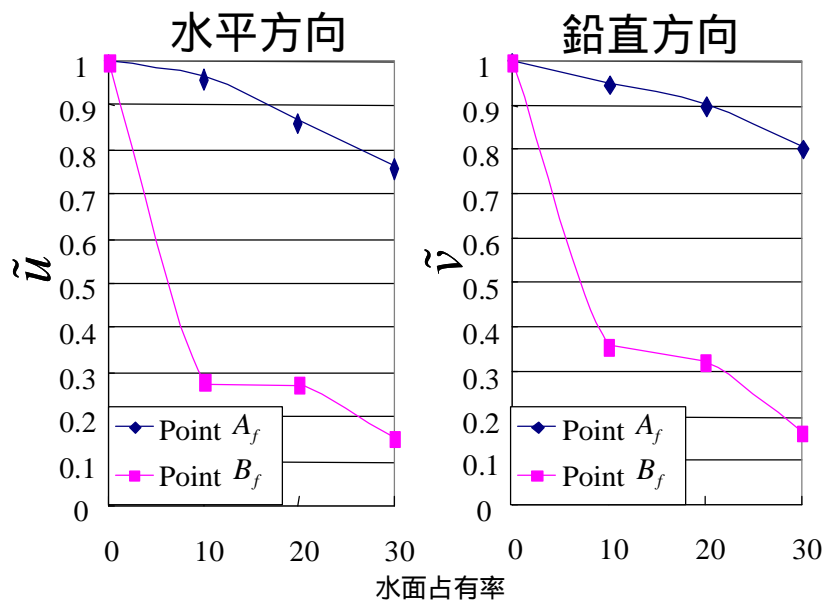


Fig.6-1 浮葉性植物に関する乱れ強度水深平均

## 6.2 沈水性植物の乱流構造と連行現象の関係

浮葉性植物の場合と同様に，水平および鉛直方向乱れ強度の水深平均  $\bar{u}$  と沈水性植物の繁茂状況との関係を表したものが Fig.6-2 である．乱れ強度の水深平均は水平方向，鉛直方向ともに、沈水性植物による沈水性植物の草丈が高くなるにつれて大きくなるにつれて大きい値になっている．この図は連行現象に関する実験値からえた  $k_b$  の変化にほぼ一致し，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ことを表している．

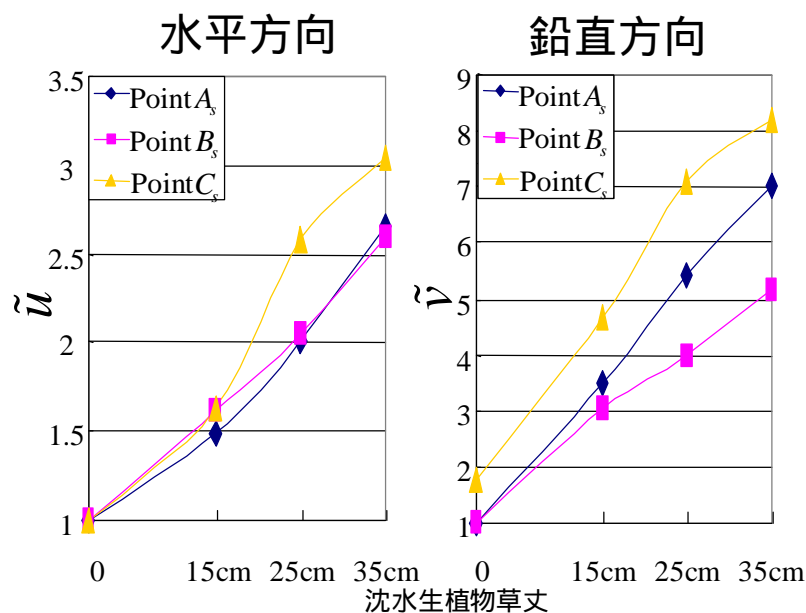


Fig.6-2 沈水性植物に関する乱れ強度水深平均



## 第7章 結論

本研究では、化学的浄化作用をもつが物理的に弊害になる恐れがある水生植物が閉鎖性密度成層水域に生息した場合、これらが内部循環流の形成にどのように影響を及ぼすかについて水理実験を行い検討した。すなわち、浮葉性植物および沈水性植物が水域内に繁茂し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乱流構造について検討を行った。その結果、以下のようなことが明らかになった。

(1) 連行現象に関する実験から、水生植物が存在する場合の密度界面における連行速度は既往の研究の場合と同様に、 $dh/dt \equiv const$  で求められる。

(2) 連行現象に関する実験から、水生植物が存在する場合の連行現象とリチャードソン数の関係は、既往の研究の場合と同様に  $E \propto R_{ia}^{-3/2} (R_{ia} < 100)$  となる。

(3) 密度2成層水域において吹送流が発生する場合、浮葉性植物が水面に存在する場合には、浮葉性植物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する。また、沈水性植物が水域内部に存在する場合には、密度界面に出る草丈の長さが大きくなるほど連行速度は増加する。

(4) 乱流構造に関する実験より、浮葉性植物の存在は吹送流によって生じる乱流エネルギー量を減少させ、鉛直混合能力を低下させる。これにより連行速度が小さくなる。また、沈水性植物の存在は、密度界面近傍に作用する乱流エネルギー量を維持あるいは増加するように働き、鉛直混合能力を増大させる。これにより連行速度が大きくなる。

今後の課題としては、さらに水生植物の繁茂状況に対する連行速度実験を進め、閉鎖性水域に付加される外乱に対して、その水環境を良好に維持できる水生植物繁茂量を規定する指標を求めたい。

## 謝辞

本論文の作成にあたり，御多忙の中，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研究室森 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．

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，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研究室修士課程村松 亮介氏には，本研究を進めるに当たり実験の補助，助言等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生産環境情報学研究室の博士課程衛藤 鑑氏，松井 正実氏，平井 康丸氏，修士課程炭本 祥生氏，福島 崇志氏，丸谷 一郎氏，中島 央晶氏，中島 敬太郎氏，すべての皆様に深く感謝いたします．

さらに，修士課程入学以来，本日に至るまで励ましあい，助け合った光岡 宗司氏，桑野 朋子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．

## 参考文献

- 有田 正光：水圏の環境，東京電気大学出版局，1995
- 飯泉 茂：植物群落とその生活，1986 東海大学出版会
- 生嶋 功：水界植物群落の物質生産 共立出版，1974
- 池永 均：汽水湖成層界面の挙動と吹送循環流の形成に関する研究，土木学会論文集 No,614/ -46，pp.77-96，1999
- 浦 勝：風のせん断力による密度界面の変動と連行速度 第30回海洋工学講演会論文集，pp.561~565，1983
- 玉井 信行：連行概念の統一化と連行係数の評価法土木学会論文集 第381号/ -7,1987
- 椿 東一郎：水理学，森北出版株式会社，1995
- 椿 東一郎：水理学，森北出版株式会社，1995
- 浜島 繁隆：池沼植物の生態と観察，ニューサイエンス社，1983
- 福島 博：淡水植物プランクトン，ニューサイエンス社，1983
- 古本 勝弘：二成層閉鎖水域の風に対する内部静振応答 土木学会論文集 No,429/ -15，pp.37-46，1991
- 道奥 康治：成層型貯水池に生起する内部変動の観測とその解析，土木学会論文集 No,485/ -26，pp.65-73，1994
- 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，第144号，pp.85~93，1988
- 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