

# 港 湾 技 研 資 料

TECHNICAL NOTE OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 657      Sept. 1989

攪拌槽での水表面からの酸素溶解実験

細	川	恭	史
関	根	好	幸
古	川	恵	太
堀	江		毅

運輸省港湾技術研究所



## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	3
2. 酸素溶解の理論 .....	4
2.1 二境膜モデルと表面更新率 .....	4
2.2 表面乱れと表面更新率の結びつけ .....	5
3. 曝気実験の方法 .....	6
3.1 実験装置 .....	6
3.2 実験方法と実験ケース .....	8
3.3 データの処理方法 .....	8
4. 実験結果 .....	10
4.1 流れと乱れの分布 .....	10
4.2 乱れのスペクトル形 .....	19
4.3 乱れのエネルギー逸散 .....	24
4.4 再曝気係数の測得値 .....	28
5. 水理量と酸素移動係数との関係 .....	30
5.1 水理量の代表値 .....	30
5.2 平均流速と酸素移動係数との関係 .....	31
5.3 乱れの強さと酸素移動係数との関係 .....	31
5.4 エネルギー逸散率と酸素移動係数との関係 .....	33
5.5 水理量と再曝気係数との関係 .....	33
6. 二種の攪乱生起機構の共存下での再曝気係数 .....	34
6.1 実験方法 .....	34
6.2 実験結果 .....	35
6.3 解 析 .....	36
7. ま と め .....	37
参考文献 .....	37
使用記号一欄 .....	38
付録 A 乱れ発生子の形状 .....	39
付録 B 水理量の計測結果一欄 .....	39

## Experiments on Oxygen Dissolution through Water Surface in Mixing Basin

Yasushi HOSOKAWA\*, Yoshiyuki SEKINE\*\*  
Keita FURUKAWA\*\*\*, Takeshi HORIE\*\*\*\*

### Synopsis

Experiments are conducted to measure the oxygen dissolution rate through water surface. Several kinds of agitation are given into the water basin by paddle rotation or shaking. The velocity field and strength of turbulence are observed using the hot-film anemometer as well as the recovery of the dissolved oxygen concentration by DO meters.

The oxygen transfer coefficient ( $K_L$ ) is found closely related to the surface mean velocity ( $\bar{U}$ ), the strength of turbulence at surface ( $u'$ ,  $v'$ ) and the energy dissipation rate due to turbulence ( $\epsilon$ ). Plotting the observed data on log-log charts, we obtain following relations.

$$K_L \sim (u')^{1.0}$$

$$K_L \sim (v')^{0.9} \quad \text{for rotation.}$$

$$K_L \sim (\epsilon)^{0.4} \quad \text{for rotation.}$$

Due to the interaction between the two kinds of agitation, shaking superposed on the flow field is found to make  $K_L$  much larger, especially under the bigger velocity.

**Key Words:** aeration, oxygen transfer coefficient, hot-film anemometer, turbulence

---

\* Chief of Coastal Disaster Prevention Laboratory, Hydraulic Engineering Division

\*\* Expert Engineer of Construction, Keihin Port Construction Office, Second District Port construction Bureau

\*\*\* Member of Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\*\*\* Chief of Purification Hydraulics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

# 攪拌槽での水表面からの酸素溶解実験

細川 恭史\*  
関根 好幸\*\*  
古川 恵太\*\*\*  
堀江 毅\*\*\*\*

## 要 旨

直径35 cmのローリーき水槽を用い、表面付近に種々の攪乱を起こすことにより水表面からの酸素の溶解速度を測定した。攪乱は、回転子を底部で回転させて作り出した他、振とう子をゆっくり上下振とうさせて作り出すケースも実施した。水面下0.5 cmの深さで、ホットフィルム流速計を用いて乱れを測定した。必要に応じて流れや乱れの水平分布・鉛直分布を測定した。薬品を用いて脱酸素し、その後攪乱を与えて水表面からの酸素溶解を促進させた。溶存酸素計を用い濃度の回復をモニターし、再曝気係数を算定した。

得られた再曝気係数は、 $0.1 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$  (1/s) と広い範囲にわたっている。計測された表層での水理量と再曝気係数とを比較したところ、平均主流流速、乱れ強さ、乱れによるエネルギー逸散率と再曝気係数とが関係を有していることがわかった。種々の異なる攪乱に対し、乱れ強さと再曝気係数とは両対数グラフ上の1つの直線のまわりに分布することが示された。指数回帰分析によれば、再曝気係数は表層乱れ強さの0.9~1.0乗に比例しており、ややばらつくものの表層エネルギー逸散率の0.39乗に比例することがわかった。また、流れと共存した時には、振とう攪乱は単独の時よりも大きな曝気効果があることがわかった。

河川での再曝気係数は、流速分布に対するエネルギー的な考察から断面平均流速・河床勾配・有効水深等の関数として検討されてきている。水深が深く往復流の効果も大きな海域では、同じ扱いはむづかしく、曝気現象の生じている水表面付近の水理量との結びつきを考える必要がある。再曝気は、1秒程度以下の乱れに関連し、水表面に流れと乱れとを与える現象（砕波、風波の発達）下で大きくなる事が示唆された。実用的な再曝気係数の予測式を得るためには、二次元水路実験等の積重ねが必要である。

キーワード：再曝気係数、酸素移動係数、回転流、ホットフィルム流速計、乱れ強さ、エネルギー逸散率、酸素

## 1. はじめに

閉鎖性内湾では、夏期の成層期に底層に貧酸素水塊が発生し、底生生物が死滅するなどの問題が生じている。海水中での溶存酸素は、多くの生物の生存にとって不可欠なものである。溶存酸素の供給は、植物プランクトンの光合成活動の他、水表面を横切った大気からの溶入によるものがある。著者らは大気からの溶入を促進する手段として、①コンプレッサーにより水中に空気を吹き込

む方法<sup>1)</sup>や波の消波による方法<sup>2,3)</sup>について室内実験を重ねてきた。その結果、気-液の接触面が広く、接触時間が長いほど溶解量が大きくなること、波の消波時には入射波高が高く反射率が低いほど再曝気係数が大きくなることなどが示された。しかし、大気と水面との境界でどのような現象が生起し、酸素の溶解を支配しているのかは不明のままであった。このため、似たような反射率を与える異なる消波構造物間の再曝気係数の差などについて検討が進んでいない。

\* 水工部 沿岸防災研究室長

\*\* 第二港湾建設局 京浜港工事事務局（前 海洋水理部 海水浄化研究室）

\*\*\* 海洋水理部 海水浄化研究室

\*\*\*\* 海洋水理部 海水浄化研究室長

また、海面からの酸素の溶解の予測式に河川の予測式を援用することが多い。開水路流れにおける酸素溶解速度については、ガストレーサー手法の開発とともに小河川での実験を実施した<sup>4)</sup>。その結果、断面平均流速と実効的な水深との関数で示される河川予測式で再曝気係数がよく表現されることを確認した。しかし、海域では開水路と異なり断面平均流速が把握しにくく、流速分布形を決める水深という概念が適用しにくい。実測濃度を参考に予測式や海面再曝気係数値を修正して用いること<sup>5)</sup>もあり、海域に適した再曝気係数予測式が望まれている。このためにも、海面での水理現象と酸素溶解との関係性の検討が必要である。

そこで、比較的小さい領域で種々の攪乱を与え、流れと再曝気係数とを測定する実験を試みた。

## 2. 酸素溶解の理論

### 2.1 二境膜モデルと表面更新率

大気中のガスが水に溶解したり、水中で余剰となった物質がガスとして揮発してゆく速さは、いずれも飽和平衡濃度  $C_s$  と水中濃度  $C$  との差に比例する。水中濃度の増減速度は次式で表わせる。

$$\frac{dC}{dt} = K_L \cdot \frac{A}{V} \cdot (C_s - C) \quad (1)$$

ここで、 $t$  は時間、 $A$  は気-液界面の面積、 $V$  は液体の体積、 $K_L$  は比例定数。 $K_L$  は  $[L/T]$  の次元 (速度の次元) を有し、物質移動係数と呼ばれる。 $A$  の測定が困難な場合も多いことから、 $K_L \cdot A/V$  をまとめて  $k_2$ 、もしくは  $k_2$  と表示し、再曝気係数と呼ぶ。

$$k_2 = K_L \cdot \frac{A}{V} \quad (2)$$

ガスの溶解・揮発が定常に達し、水中の濃度変化が起しなくなる時には、水中濃度  $C$  は飽和平衡濃度  $C_s$  に等しくなる。飽和平衡濃度  $C_s$  は、ガスの種類によって異なる。大気中の当該ガスの分圧が高いほど、またガスの物性が水に溶解しやすいものほど、 $C_s$  値は大きくなる。各ガスの水に対する溶解のしやすさはヘンリー定数で示される。

同じガスが同じ圧力下で水に接していても、水と大気の接しかたによって溶解や揮発の速さが変わる。水表面を攪拌すると、静置時に比べ異なるオーダーの大きさで溶解することが知られている。攪拌による水表面積  $A$  の増加のみでは説明できず、物質移動係数  $K_L$  が氷表面の状態によって変化しているとされている。気-液の境界でのガスの移動については、いくつかのモデルが示されており、その中で  $K_L$  と水表面の状態とが関係づけられてい

る。

Lewis と Whitman<sup>6)</sup> の二重境膜モデルは、様々の溶解度のガスの移動を次のように説明している。気-液の界面の気相側と液相側とのそれぞれに薄い層 (境膜) があると、ガスはこれらの境膜を通過して気-液間を移動する。移動は境膜の通過速さで律則され、大気本体、液本体の内では混合はすばやく起こる。境膜内は分子拡散によりガスが移動する。気相境膜の気相側端は大気濃度と等しく、液相境膜の液相側端は液本体の濃度と等しい。気相境膜と液相境膜との接触面は、ガスの溶解度に応じた平衡関係が成立している。酸素のように溶解度の極めて低いガスでは、気相境膜の寄与が無視でき、図-1 のように液膜の状態のみに依存して移動係数  $K_L$  が決まってくる。液膜の液本体側濃度は液濃度と等しい  $C$  であり、大気と接している側では常に大気分圧に見合う飽和濃度  $C_s$  となっている。液膜内の拡散係数を  $D_m$ 、液膜の厚さを  $L$  とすると、液膜内のガスの移動フラックスは、

$$\frac{1}{A} \frac{d(CV)}{dt} = \frac{D_m}{L} (C_s - C) \quad (3)$$

となる。式(1)と比較すれば、 $K_L$  について、

$$K_L = \frac{D_m}{L} \quad (4)$$

が得られる。このモデルは、水表面の状態を液膜厚  $L$  で表示していることとなり、水表面が動的な状態になると

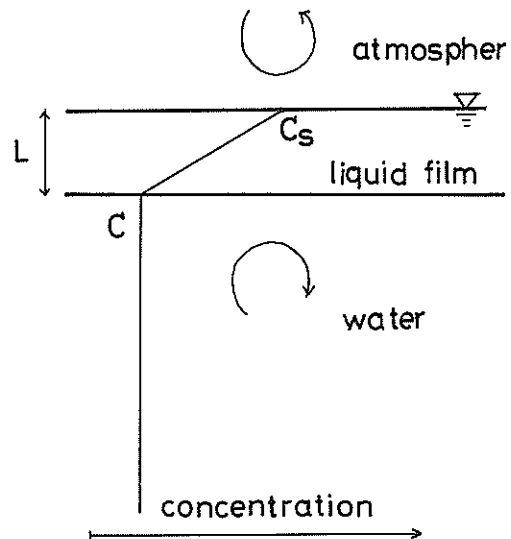


図-1 液膜におけるガスの濃度分布  
 $C_s$  は大気中のガス分圧と平衡した飽和濃度、 $C$  は水塊本体中の溶存濃度、 $L$  は液膜の膜厚。

$L$ が小さくなってゆくこととなる。実体的な液膜の存在確認や $L$ の実測は困難である。

一方、液膜の存在を仮定せず、水表面で大気と接しガスをとり込んだ水塊が液本体の水塊と入れ代わるモデルが考えられている。水表面の水塊が次々と交代し新しくなることから更新モデルと呼ばれている。Higbie<sup>7)</sup>の更新モデルをもとに Danckwerts<sup>8)</sup>は、水表面で大気に接触している時間(寿命)の分布を次のように仮定した。

$$f(t) = r \cdot \exp(-rt) \quad (5)$$

ここで、 $f(t)$ は接触時間が $t$ である割合を示す接触時間分布関数、 $r$ は単位時間あたりに表面が更新される回数(表面更新率)である。また、液本体は十分に深とし、水深方向の一次元拡散式を以下の境界条件で解き、表面付近の濃度勾配を求めている。

$$\begin{aligned} C &= C_L : t = 0, y > 0 \\ C &= C_s : t > 0, y = 0 \\ C &= C_L : t > 0, y = \infty \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $C_L$ は液本体中のガスの初期濃度、 $y$ は水表面から下向きにとった水深である。こうして得られた表面付近の濃度勾配と接触時間、接触水塊中のガスの分子拡散係数 $D_m$ とからガスの移動速度を記述した。結局、物質移動速度として次式を得た。

$$K_L = \sqrt{D_m \cdot r} \quad (7)$$

Dankwertsの求めた上式では、水表面が攪拌されると更新率 $r$ が大きくなることになる。

更に、Dobbins<sup>9)</sup>は、液膜の存在を仮定し、液膜厚 $L$ の内での境界条件を以下のように与えて一次元拡散式を解いた。

$$\begin{aligned} C &= C_L : t = 0, L > y > 0 \\ C &= C_s : t > 0, y = 0 \\ C &= C_L : t > 0, y = L \end{aligned} \quad (8)$$

この解より、 $K_L$ を求めると次式となる。

$$K_L = \sqrt{D_m \cdot r} \cdot \coth \sqrt{\frac{r \cdot L^2}{D_m}} \quad (9)$$

上式は、 $r$ が小さく0に近いときには、LewisとWhitmanの得た式(4)になり、 $r$ が大きいつきにはDanckwertsの式(7)となる。

液膜を仮定した境界膜モデルでも、表面水塊の更新を仮定した更新モデルでも、物質移動係数 $K_L$ は次の2因子によって、左右されることとなる。1)対象としているガスの液中での分子拡散係数、2)気液境界での水理的状況を

代表する液膜厚もしくは表面更新率である。

## 2.2 表面乱れと表面更新率の結びつけ

酸素の溶解を記述する式では、 $K_L$ の評価が重要であり、 $K_L$ は、水表面付近での表面更新率 $r$ と結びつけられる。実際の水域での水理量で $K_L$ を俵わす試みが、 $r$ の物理的な解釈の上に半理論的に行なわれた。

O'ConnorとDobbins<sup>10)</sup>は、鉛直方向の乱れ $v'$ と乱れのスケール $l$ とから、次式を仮定した。

$$r = \frac{v'}{l} \quad (10)$$

等方性、非等方性の流れに分け、 $v'$ 、 $l$ をそれぞれ流下方向の平均流速、平均水深、河床勾配などで表わそうとした。実河川に適用する式として有名な次式が導びかれている。

$$k_2 = 4.2U^{0.5}H^{-1.5} \quad (\text{等方性流水}) \quad (11)$$

$$k_2 = 10.9s^{0.25}H^{-1.25} \quad (\text{非等方性流水}) \quad (12)$$

ここで $U$ は平均流速、 $H$ は平均水深、 $s$ は河床勾配。

更にDobbinsは、表面が更新されるためには表通張力に抗した仕事が必要であり、乱れのエネルギー逸散を伴うとした。また、更新される水塊の長さのスケールは、コルモゴルフの最小渦径に関係していると考え、更新に必要なエネルギー逸散は流れ全体のエネルギー逸散率( $\epsilon$ )に比例していると仮定した。こうした仮定を式(9)に代入し、 $K_L$ について $\epsilon$ との関係を求めた。これによると、 $K_L$ は $r$ が大きければ流れのエネルギー逸散率の3/8乗に比例することになる。

一方、村上<sup>12)</sup>は、表面張力により乱れが減衰する表面深さを考えた。式(10)に似せて、この深さに対する乱れの強さの比が表面更新率 $r$ を決めるとした。乱れの強さがコルモゴルフの最小渦の流速スケールに比例すると考え、やはり $K_L$ が $\epsilon$ の3/8乗に比例するという関係を得た。

パイプ中の気泡上昇時における気泡中のガスの溶解を調べたLamontら<sup>13)</sup>は、溶解は気泡径よりも気泡表面の水の乱れに左右されるとした。乱れのうちでも最小渦径近くの小さなスケールの乱れがガスの移動を主に左右しているとし、渦セルを考えたモデルから、 $K_L$ が $\epsilon$ の1/4乗に比例するとしている。

$K_L$ と $\epsilon$ を関係づける試みは、微視的な機構の次元解析をもとに関数形を想定し、実際の $K_L$ 値などからパラメータ値を推定している。 $\epsilon$ としては、流れ全体のエネルギー逸散率を想定しており、河床勾配や平均流速などと関係づけられている。特に水表面付近に限ったエネルギー逸散を測定している訳ではない。

一方、これとは別に、 $K_L$ を乱れの強さ( $v'$ )と結びつけ

で検討した例として、Levich<sup>14)</sup>の解析がある。表面付近では表面張力の影響を受け、影響深さは表面張力の他、密度、鉛直方向の乱れ( $v'$ )によって示されるとした。境界厚 $L$ は、この深さと乱れ( $v'$ )とで変化するとし、結局、 $K_L$ は $v'$ の $3/2$ 乗に比例するとしている。

また、Fortescue<sup>15)</sup>は、やや大きな渦径 (energy containing eddies) がガス溶解をコントロールしているとし、 $K_L$ は乱れの $2$ 乗 ( $u'^2$ ) をインテグラルスケールで除した値に比例するとしている。

乱れと結びつける試みは、 $\varepsilon$  と結びつける試みと似た手法によることが多い。水表面付近では、表面の存在が乱れの非等方向性を引き起こしており、水深により  $u'$ 、 $v'$  の値が変化している可能性がある。開水路流れでは測定水深により、 $K_L$  との関係性が変わる恐れが大きい。

平山<sup>16)</sup>は、 $K_L$  を  $\varepsilon$  で評価する方法と  $v'$  で評価する方法とを比較した。 $\varepsilon$  で評価する方法は、 $K_L$  に対する粘性逸散の効果に重きを置いている方法であるのに対し、 $v'$  で評価する方法は、乱れの運動エネルギーの影響を重視している方法であるとしている。水槽実験の結果より、 $K_L$  は  $v'$  により大きく依存しているとした。ただし、 $\varepsilon$  の評価には種々の困難さがあるため、液体に加えらるる機械的なエネルギーをトルクメータなどから算定している。

このように、再曝気係数 ( $k_2$ ) もしくは酸素移動係数 ( $K_L$ ) を水理量で記述し、実用的な予測式を得ようとする努力が試みられてきている。開水路もしくは河川への実用式は、O'Connor と Dobbins の式 (11)、(12) 以外にも、類似の式が指数の値や定数の値を変えていくつか提案されており、その多くは河川や水路での実測データより統計的に評価したものである。水深がより深くなり、流れに対して浮力や風の影響が出てくる水域での実用式は、現在までのところ見当たらない。 $K_L$  と水理量との関係については、未だ統一的な表現を得るに至っていない<sup>17)</sup> といえる。水表面付近での水理量の測定や  $K_L$  との関係づけの検討が更に必要であろう。

### 3. 曝気実験の方法

#### 3.1 実験装置

水表面付近の水理量を調べやすいこと、再曝気係数や酸素移動係数の測定が容易なことなどから、小規模な水槽を用いて実験を行なうこととした。水槽は、直径 35 cm 深さ 40 cm のホロービキ円柱型容器を用い、恒温室内に設置した。水道水をイオン交換樹脂カラムを通過させ、イオン交換水 (純水) を作り、実験にはすべてこの純水を用いている。

水表面付近の攪乱は、水表面で気泡の混入や水滴の飛び出しのないように注意しながら、回転による方法と振とうによる方法との 2 種の方法で与えている。回転による方法では、90 ~ 250 r. p. m. (1.5 ~ 4.2 Hz) の範囲で任意の回転数で定速回転できるモーターを用い、回転子を水中で定速回転させて流れを起こしている。回転子は、水槽内の酸素濃度分布が一様となるようになるべく底に近い深さで回転させているが、ケースによっては表面近くで回転させてもいる。また、水面形をなるべく波だてないように、扁平な板を寝かせて回転させるなどの回転子形状を採用している。一方、振とうによる方法では、周期 0.2 ~ 2 秒 (0.5 ~ 5 Hz) の往復振とうが起こせる振とう器を用い、クランクアームの先に振とう子を取りつけて攪乱を起こしている。振とう子は水中を上下し、振とう子全体が水表面から出てしまうことはない。両方法の攪乱の起こし方の概念図を図-2 に示す。回転子は 6 種の異なる形状・材質のものを用意し、振とう子は 2 種の異なる形状・材質のものを用意した。形状・材質を表-1 にまとめて示す。各回転子と振とう子の形状の詳細は本文末の付図-1 に示す。回転数、振とう周期、振とう振幅は、各実験ごとにストップウォッチ・物差などを用いて検定し設定している。

水理量の測定は、次のような装置を用いている。流れの測定は、ホットフィルム流速計 (DISA 社製 55M01, 55M25) を用いている。プローブは V プローブを用いているが、シングルセンサーを併用したケースもある。専用の円形の検定水路を臨接して設置し、測定ごとに定法<sup>18)</sup> に従って検定を行なっている。流速計の出力は、データレコーダーに記録し、実験終了後データ処理装置 (TEAC 社製 PS-9000) を用いて解析している。水面形はサーボ式精密水位計 (計測技研社製 SW-201) を用いて測定している。流速計および水位計の測定位置は、以下のとおり。水槽の中心と水槽の内壁とを結ぶ半径上に、中心から距離 3 cm, 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm の点をとる。これを測定位置とし、順に st. 1 ~ 5 までの番号を与えている。水位はこの位置で測定する。各測定位置ごとに、深さ - 0.5 cm, - 1.5 cm, - 2.5 cm, - 3.5 cm および - 9.5 cm の層を流速測定点とする。実験ケースによっては、これらすべての測定点、測定位置での測定をしておらず、測定を省略している点がある。

また、再曝気係数の算定のため、2 種の溶存酸素計 (YSI 社製 57 型, Nester 社製 8500 型) を用い、深さ 5 cm の水槽内壁近くで溶存酸素濃度の経時変化を測定している。濃度の変化はペン書きの記録紙上に記録し、実験終了後に適当な時間間隔で記録を読みとり濃度値に換

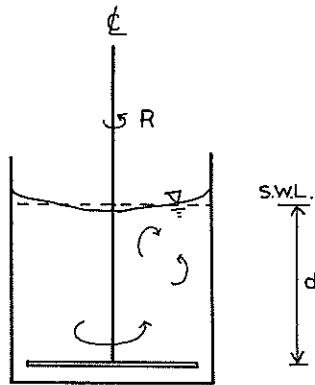


図-2 a 攪乱の与え方の概念図(回転系の攪乱)

$d$ は回転子の設置水深、 $R$ は単位時間あたりの回転数S.W.L.は静水面。

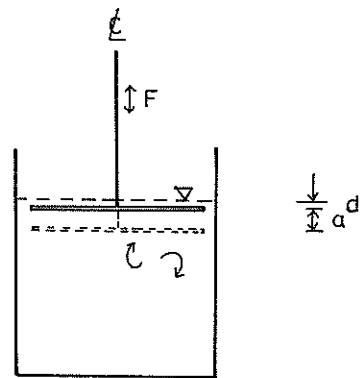


図-2 b 攪乱の与え方の概念図(振とう系の攪乱)

$d$ は振とう子の設置水深(最も浅い時の水深)、 $a$ は振とう振幅(最も浅い時と最も深い時との水深差)、 $F$ は振とう周波数。

表-1 攪乱発生子の形状・材質一欄(a)

#(番号)	攪乱発生子	形状	材質	大きさ (cm) (回転直径×短辺×厚)	動く方向
10	十字スライド	薄い長方形板を2枚 十字型に組み合せ	プラスチック	30.7 × 3 × 0.2	十字を寝かせ薄い板で 水を切るように回転
11	スライド	薄い長方形板1枚	プラスチック	30.7 × 3 × 0.2	薄い板で水を切るよう に回転
12	メッシュ	波線を格子に組んだ 丸形金網	鉄線 ( $\phi$ 1.6 mm)	23.5 × - × 0.3 格子間隔 1.9 × 1.9	円板を寝かせ水を切る ように回転
13	細丸棒	細長い丸棒	木製表面塗装	30 × - × 0.8	丸棒を寝かせて回転
14	太丸棒	やや太い丸棒	塩化ビニル管	30 × - × 2.6	丸棒を寝かせて回転
15	水面パドル	正方形の板1枚	アクリル	7 × - × - 正方形板 3 × 3 × 0.2	正方形板をたてて水面 付近を回転

回転直径の欄は、回転させてできる軌跡の外周円の直径を示す。

表-1 攪乱発生子の形状・材質一欄(b)

#(番号)	攪乱発生子	形状	材質	大きさ (cm) (長辺×短辺×厚)	動く方向
21	なす	下がふくらんだ首の 細長いなす形	ガラス	最大径 4.8 × 最小径 1.4 高さ 4.8	なすの首を上にし、上 下に振とう
22	メッシュ	波線を格子に組んだ 丸形金網 (回転系発生子 (の#12と同形))	鉄線 ( $\phi$ 1.6 mm)	径 23.5 × 厚 0.3 格子間隔 1.9 × 1.9	円板を寝かせ、上下に 振とう



算している。これらの測得データの処理法は、3.3に示す。

### 3.2 実験方法と実験ケース

実験は、1ケースごとに水理計測と再曝気係数計測とから成る。実験手順は次のとおりである。

まず、純水を実験水槽に所定の31cm深さまで注ぐ。水体積は約30lである。恒温室温となるように、そのまま一晩放置する。同時に検定水路にも水を満たしておく。翌朝、ホットフィルム流速計を検定水路を用いて検定後、流速測定点にセットする。水位計をセットし、回転子もしくは振とう子を作動させ乱れを発生させる。順次各測定点での測定を続ける。水理計測終了後に、流速計センサー、水位計センサーを水槽より取り出す。水槽に溶存酸素計センサーを入れ溶存酸素濃度を測定し、この濃度に見合う亜硫酸ナトリウム ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) を添加する。更に触媒として塩化コバルト ( $\text{CoCl}_2$ ) を少量 (0.1g程度) 加え、水槽内でゆっくり攪拌混合させる。溶存酸素計で水槽内の溶存酸素をモニターし、水槽内溶存酸素が低下し0 (ゼロ) に近づいていることを確認する。回転子もしくは振とう子を作動させ乱れを発生させる。溶存酸素計にて連続して溶存酸素濃度を記録する。濃度が十分回復するまで、2時間から一昼夜程度測定後、実験を終了させる。途中、水温、気温、湿度をチェックしてい

る。実験終了後、水槽内の水をビーカーに分けとり、小型エアポンプにて空気を十分吹き込み飽和濃度を測定している。飽和濃度は、水温の他気圧、湿度によっても微妙に変化するため、実測値を用いて解析することとした。水槽内に添加した量程度では、亜硫酸ナトリウム (2g程度)・塩化コバルト (0.1g程度) は表面張力・粘性・密度などの水の物性にはほとんど影響を及ぼさない。

回転子の回転数、回転水深などを変え、1つの形状の回転子に対していくつかの実験を実施している。実験ケースの一欄を表-2に示す。各ケースに対し、流速の測定位置、水深を示している。測定位置は、水槽の中央から壁へ向かってのst.番号、水深は乱れを起こしている状態での水表面からの深さでそれぞれ表わしている。

### 3.3 データの処理方法

#### 3.3.1 流速のデータ (乱れの強さの算定)

ホットフィルム流速計の出力は、いったんデータレコーダーに記録された後、データ処理装置によりA/D変換される。再曝気係数に関連する乱れは、比較的高周波の小さい乱れであることも予想されるので、なるべくサンプリング間隔を短くすることが望ましい。しかし、データレコーダーの性能の制約から、通常100Hz (0.01s) でサンプリングしている。一部の実験については、

表-2 実験ケース一欄

攪乱方式	実験番号	発生子番号	設置水深 d (cm)	回転数又は 振とう周波数 (r.p.m)/Hz	振幅 a (cm)	流速測定点 (各位置での測定水深) (cm)	備考
回転	100	なし	(静止水)	—	—	なし	溶存酸素変化のみ測定 } 溶存酸素の測定なし
	101	# 10	} -28	90	}	st.1~5の各位置で -0.5, -1.5, -2.5, -3.5, -9.5の水深	
	102			120			
	103			150			
	104			180			
	105			220			
	111	# 11	} -28	90	}	st.3'の位置で -0.5, -9.5の水深	
	112			120			
	113			150			
	114			180			
	121	# 12	-28	90	}	st.1~5の各位置で-0.5の水深	
	122		-15	90			
	123		-2	90			
	131	# 13	-28	90	}	st.1, 3, 5で-0.5, -2.5, -9.5の水深	
	132		-3	90			
141	# 14	-28	90	}	st.1で-0.5, -1.5, -2.5, -3.5, -9.5の水深		
151		-2	90				
振とう	200	なし	(静止水)	—	—	なし	溶存酸素変化のみ測定 } 水位は各位置で測定 } シングルセンサーで測流
	211	# 21	-1~ -4.6	0.5	}	st.3'の位置で-0.5の水深	
	212			1			
	213			1.25			
	214			2			
	215			2.22			
	216			2.5			
	217			2.86			
	221	# 22	-1~ -4.7	1	}	st.1~5の各位置で-0.5の水深	
	222			2			
	223			2.5			

発生子番号は、表-1の番号と対応。

200 Hz から 400 Hz でのサンプリングができるように、データレコーダーを変えて記録している。また、サンプル個数  $N = 2048$  ずつ 3 系列を確保できるように記録時間を採っているが、一部のものは  $N = 1024$  個ずつとなったものもある。

デジタル化した流速値データより、流れの主流方向成分と鉛直方向成分を算出し、それぞれの算術平均から水平平均流速、鉛直平均流速を求めている。各時刻の流速と平均流速との差より、各時刻の乱れを求め、この二乗平均の平方根を乱れの強さ ( $u'$ ,  $v'$ ) として求めている。例えば、主流方向については、次式の処理を施している。

$$\bar{U} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n u(t) \quad (13)$$

$$u'(t) = u(t) - \bar{U} \quad (14)$$

$$u' = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n u'^2(t) \right\}^{1/2} \quad (15)$$

ここで、 $\bar{U}$  は平均流速、 $n$  はデータの個数、 $u(t)$  は時刻  $t$  での流速測得値、 $u'(t)$  は時刻  $t$  での乱れ、 $u'$  は  $u$  成分の乱れの強さ。

$u'(t)$  については、FFT 法によりパワースペクトルを算出している。 $N = 2048$  個ずつのデータより、それぞれパワースペクトルを求めた上で、3 系列のデータにつきスペクトル各成分を算術平均し更に三角形フィルターをかけ、自由度を得ている。三角形フィルターの数は、いくつかの試みの後、高周波域の見やすさなどから 20 個とした。この結果、数 Hz から 50 Hz 程度の範囲でのスペクトル形が比較できる。

### 3.3.2 流速のデータ (エネルギー逸散率の算定)

表面付近の乱れのエネルギー逸散率 ( $\epsilon$ ) は、再曝気係数と関係が深いと予想されるため、精度良く求めることが要請される。 $\epsilon$  の求め方には、次のようないくつかの方法<sup>19)</sup>がある。1) 乱れエネルギーの波数スペクトルから 2 次モーメント法により求める方法、2) 乱れエネルギーの波数スペクトルの慣性小領域の値から求める方法、3) 乱れエネルギーの波数スペクトルの粘性小領域の値から求める方法<sup>20)</sup> などである。また、表面付近の乱れのエネルギー逸散を直接測定するものではないが、機械的な運動により乱れを発生させる場合の機械の仕事量や消費エネルギーを求める方法などもある。ここでは、上記 1) ~ 3) の 3 つの方法について比較検討する。

水槽内の 1 固定点での観測では、オイラー的な乱れの測定となり、3.3.1 の処理により周波数スペクトルが得られる。この周波数スペクトルからは乱れの空間構造を知ることはできない。空間構造を知るためには、観測点

を空間的に数多く配置して同時に観測することにより波数スペクトルを求める必要がある。しかし、現実の計測は不可能である。一般には、テイラーの凍結乱流の仮定を用いることにより、周波数スペクトルを波数スペクトルに変換している。凍結乱流の仮定は、固定点での観測乱れの様子は、平均流に乗って離れた距離にそのまま移され、離れた距離で測定すると同じ乱れの様子が観測されるとした仮定である。変換は次式<sup>21)</sup>で行なう。

$$S(k) = \frac{\bar{U}}{2\pi} \cdot E(f) \quad (16)$$

$$k = \frac{2\pi f}{\bar{U}} \quad (17)$$

ここで、 $E(f)$  は、周波数  $f$  の関数として表示した周波数スペクトル、 $S(k)$  は波数  $k$  の関数として表示した波数スペクトル、 $\bar{U}$  は平均流速、 $\pi$  は円周率。

この変換では、 $f$  と  $k$  とが比例関係にあるから、周波数スペクトルで  $-5/13$  乗、 $-13/3$  乗といった領域が認められれば、波数スペクトルでも表われることとなる。

コルモゴロフの局所等方性の理論によると、大きな渦として与えられた乱れは、徐々に周波数の高い乱れへとエネルギーを移し、乱れの与えられかたに依存しない慣性項の卓越した領域を経て、粘性項の卓越した領域へと運ばれる。粘性領域では、水の粘性により小さな渦のエネルギーは消費され逸散する。乱れによる単位体積あたり単位時間あたりのエネルギー逸散率  $\epsilon$  は、波数スペクトルから直接次式<sup>19)</sup>で求められる。

$$\epsilon = 15 \nu \int_0^{\infty} k^2 \cdot S_u(k) dk \quad (18)$$

ここで、 $\nu$  は水の分子動粘性係数、 $k$  は波数、 $S_u(k)$  は  $u$  成分 (流れの主流成分) の波数スペクトル。各波数に対して  $k^2 \cdot S_u(k)$  が計算でき、これを逸散スペクトルと呼ぶ。逸散スペクトルにより、 $\epsilon$  に対する各波数の乱れの寄与が把握できる。式 (18) により  $\epsilon$  を算定するのが 1) の方法である。

レイノルズ数の大きい場合は慣性領域の始まる周波数と粘性領域の始まる周波数が離れ、慣性小領域がスペクトル上に認められる。慣性小領域では、波数スペクトルは、波数の  $-5/3$  乗に比例した次式<sup>19)</sup>で表わされるとされている。

$$S(k) = A \cdot \epsilon^{2/3} \cdot k^{-5/3} \quad (19)$$

ここで、 $A$  は定数、 $\epsilon$  は乱れによる単位体積あたりのエネルギー逸散率。 $A$  は、レイノルズ数が大きければほぼ 0.5 前後の値となり、今本<sup>22)</sup>によれば  $A = 0.47$  とされている。 $S(k)$ ,  $k$  値をスペクトルから読みとり、 $\epsilon$  値を算

定するのが2)の方法である。

また、粘性領域では、波数との間に-3乗もしくは-7乗の関係<sup>21)</sup>が示されている。最近、小松<sup>20)</sup>らは、粘性領域に対し-13/3乗則を示し、次式を提案している。

$$S(k) = A' \cdot \frac{\varepsilon^{4/3} \cdot k^{-13/3}}{\nu^2} \quad (20)$$

ここで、 $A'$ は定数、 $\varepsilon$ はエネルギー逸散率、 $\nu$ は水の動粘性係数。様々な開水路乱れについての観測から $A'$ がほぼ一定の値をとり、慣性小領域を表わす式(19)の定数 $A$ との比の検討から、小松らは $A' = 0.007$ といった値を示している。スペクトルの-13/3乗域を見つけ $S(k)$ 、 $k$ を読みとり、 $\varepsilon$ を算定するのが3)の方法である。

3つの方法を比較する。1)の方法は、最もオーソドックスな式を用いているが、逸散スペクトルでピークが求められていることは勿論、かなり大きな波数までの波数スペクトルが得られている事が必要となる。また、高波数域での測定上のイノズが大きな誤差要因となる。1)と2)とを比較した鶴谷の検討例<sup>19)</sup>では、1)の方法では-7乗則の範囲まで波数スペクトルが求まっていなと、積分範囲により $\varepsilon$ 値が大きく変わってしまう事が示されている。また、低い波数での周期性の影響は移動平均操作で除去してから積分する方法もある。2)の方法は、 $A$ の値に対し若干の議論があるようだが、大方の共通の認識として $\varepsilon$ を求められるとされている。レイノルズ数が小さいと、-5/3乗の領域が見つけにくくなる。3)の方法は、未だ共通の認識とはなっていない点もあるようで、今回の実験のような小さな水槽内での周期性の極めて高い乱れにも応用できる手法かどうか確認できていない。

ここでは、水槽内で凍結乱流の仮定が成立するものとして2)、3)の方法により算定することとし、両方法に依りたがたい場合は、逸散スペクトルのピークを確認後1)の方法による値も参考値として用いることとする。算定の手順は、次の通りとする。通常の方法で周波数スペクトルを求めた後、波数スペクトルに変換する。流れの主流成分の平均流速が他の方向の平均流速に比して大きく卓越していることを確認後、変換には主流成分の平均流速を用いる。両対数でえがいた波数スペクトル図上で-5/3乗領域もしくは-13/3乗領域を定規を用いて探し、目視で式(19)もしくは式(20)をあてはめる。この式(19)、式(20)の回帰直線が通る( $k, S(k)$ )座標を読みとり、式に代入して $\varepsilon$ 値を求める。読みとり誤差をへらし計算を簡易にするために、なるべく $k = 1$ を切る $S(k)$ 値を読みとるようにする。

### 3.3.3 水位のデータ

水位記録も、同様に $A/D$ 変換する。いずれのケースで

も水位変動は小さいと想定され、水位計の検知限界(公称0.1mm)近い場合には変動の解析はできない。

### 3.3.4 溶存酸素濃度のデータ

溶存酸素濃度の経時変化は、流速変動に比してゆっくりしているため、記録紙上の記録の高さを5~20分間隔で読みとった。濃度変化は、式(1)で記述されるから、再曝気係数( $k_2$ )は、次の手順で算出される。飽和濃度との各時刻の濃度との差を、各時刻の不足濃度として求める。これを、飽和濃度と初期濃度との濃度差で除して無次元化する。横軸に時間をとり、縦軸に無次元不足濃度の対数値をとって各時刻の値をプロットすると直線となる。直線の傾きを、最小二乗法による一次回帰式より求め $k_2$ とする。即ち、初期濃度を $C_0$ 、飽和濃度を $C_s$ 、時刻 $t$ における濃度を $C(t)$ とすると、式(1)より。

$$\frac{\partial D^*(t)}{\partial t} = -k_2 D^*(t) \quad (21)$$

ただし、 $D^*$ は次式で定義される無次元不足濃度。

$$D^*(t) = \frac{C_s - C(t)}{C_s - C_0} \quad (22)$$

式(21)を、 $t = 0$ で $D^* = 1$ との条件下で解くと、

$$k_2 = -[\ln D^*(t)] / t \quad (23)$$

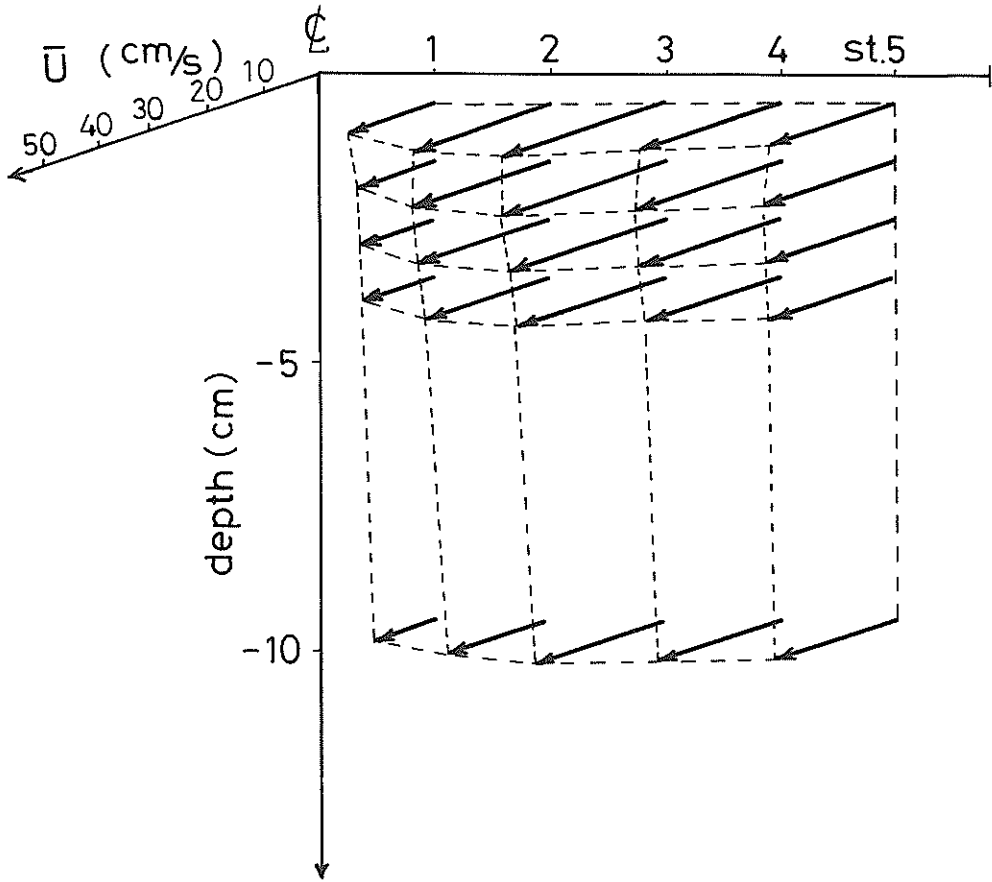
$k_2$ は、溶存濃度 $C$ には依存しない。しかし、水槽内の濃度が均一でないと、測定位置によっては見かけ上 $C$ によって $k_2$ 値が徐々に変化することが観察<sup>23)</sup>される。今回用いた水槽では、濃度分布は考えにくく濃度の一様性を溶存酸素計で確認している。しかし、念のため、 $k_2$ の算定には、 $C$ の小さな初期の区間のみを用いている。 $C$ の小さな時期では、 $C_s - C$ の値も大きく、濃度測定上の誤差が $k_2$ に与える影響も少ない。

## 4. 実験結果

### 4.1 流れと乱れの分布

#### 4.1.1 回転系の攪乱

流れは回転流れとなる。主流方向の平均流速( $\bar{U}$ )、乱れの強さ( $u'$ )、鉛直方向の平均流速( $\bar{V}$ )、乱れの強さ( $v'$ )の各測定点での測定結果は、本文末尾の付表-1に示す。これらは、サンプリング周波数100Hzで $A/D$ 変換した20秒間(2048個)の流速値より算定している。主流と直角な水平成分(半径方向)の流れについては測定していない。平均流速( $\bar{U}$ )について、典型的な分布例を図-3に示す。この例は、表-2の実験番号101での測定値であり、表-1の#10回転子(十字スライド)を底面上3cm(水深-28cm)の位置で90r.p.m.の回転数で回転させている。回転の中心から水槽内壁までの5測定



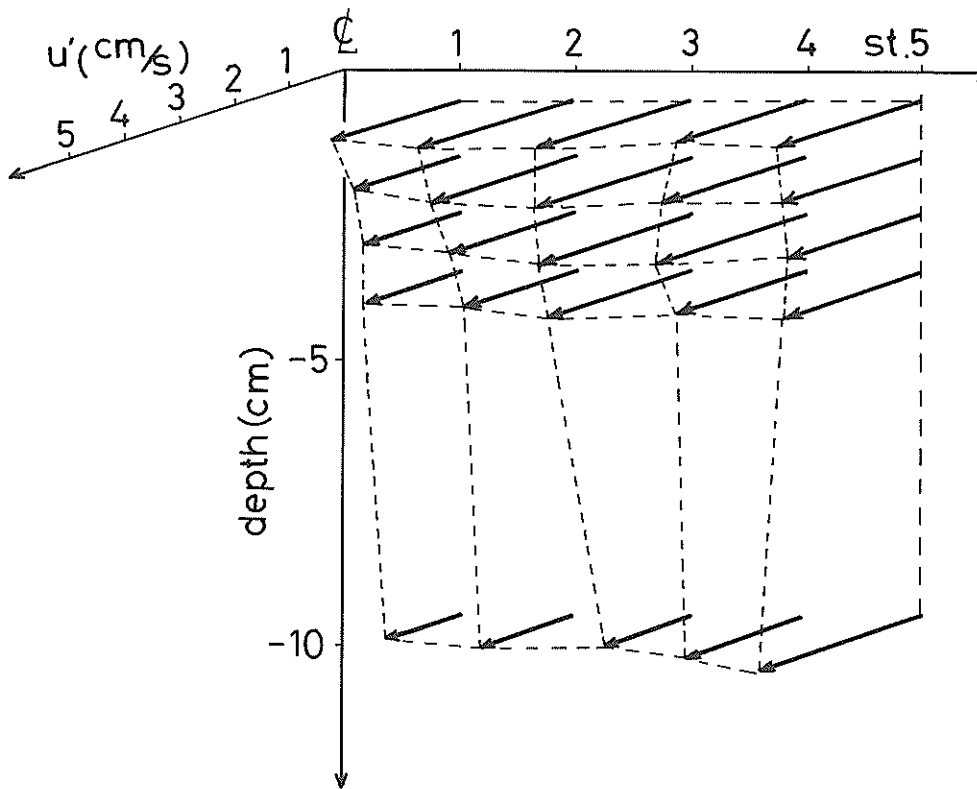
### EXP.101

図-3 主流成分平均流速( $\bar{U}$ )の水槽内分布  
 — 回転子#10の回転(水深28cm位置で90 r.p.m.)での測定例 —

位置(st.1~5)について、水面下-0.5cmから-9.5cmまでの5層ずつの測定値がある。水面下-0.5cmの最も水面に近い層では、回転中心に近いst.1で15cm/sとやや遅く、st.2~5では23~30cm/sの流速となっている。この水深では、st.3で最も速い $\bar{U}$ 値が得られており、内壁に向かって徐々に流速がおちている。他の水深でも、st.3で最大流速となっており、回転中心近くのst.1では最大流速の5割程度の流速、内壁近くのst.5では最大流速の7~8割程度の流速となっている。内壁近くでの最大流速の減少は、壁面の影響および水槽径(35cm)よりも回転子回転径(30.7cm)が短いことの影響によると思われる。一方、深さ方向の変化を見てみると、水表面近くで流速が大きいものの、水深-2.5cmまではほぼ似た値となっているが、水深-9.5cmでは、どの地

点でも流速値がわずかに減少する。

水平方向の乱れの強さ( $u'$ )の分布を図-4に示す。図-4の流速軸座標は、図-3の1/10のスケールでとっている。半径方向の $u'$ の分布を見てみる。回転の中心軸に近いst.1でも $u'$ の値はそれほど小さくはならない。-0.5cm水深ではst.1で2.3cm/s、st.3で最大値2.9cm/sとなり、st.5にかけてやや減少する。水表面近くの-0.5~-3.5cm水深では、st.3で $u'$ も最大値となっている。深さ方向の分布を見ると、-3.5cmまではあまり変化せず、-9.5cmでやや小さな値となっている。-9.5cm深では最も外側のst.5で乱れの強さが強くなってきている。ここには分布を示さないが、鉛直方向の平均流速( $\bar{V}$ )は、 $\bar{U}$ に比して1/10程度の小さな値となっている。図-3、4に示した実験(実験番号101)では、すべて上向



## EXP. 101

図-4 主流成分乱れ強さ ( $u'$ ) の水槽内分布  
 — 回転子 #10 の回転 (水深 28 cm 位置で 90 r.p.m.) での測定例 —

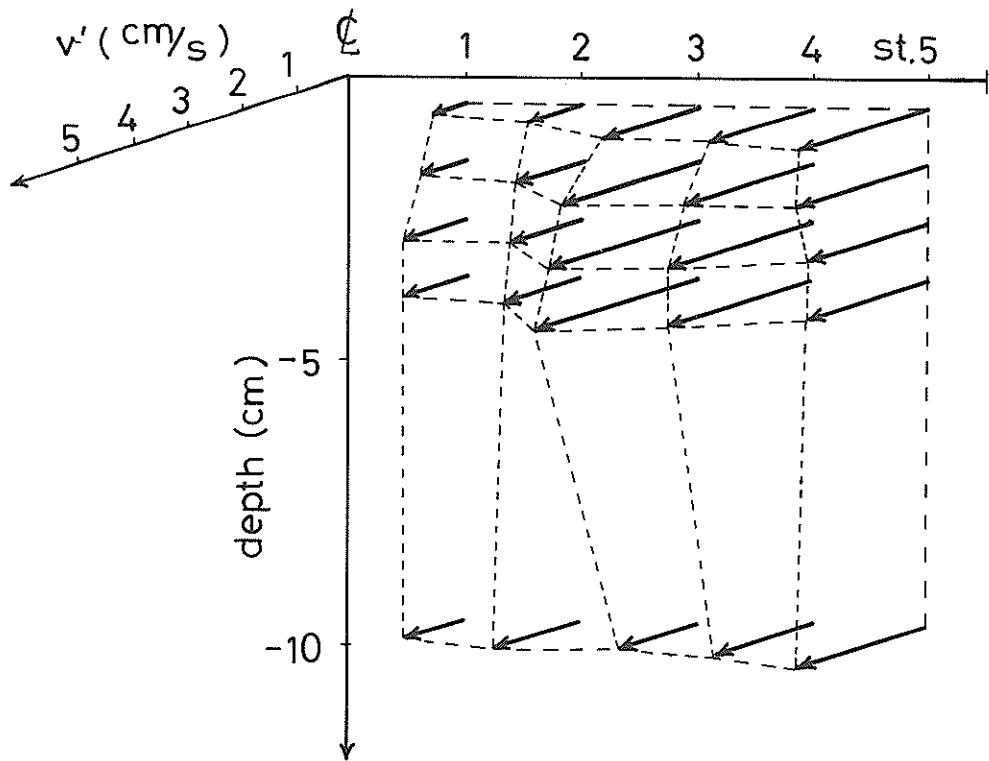
の流速となっているが、流速値が小さく分布傾向はよく判からない。最も外側の st.5 では、4 ~ 5 cm/s のはっきりした湧昇が認められる。赤インクをトレーサーとして投入してみると、表層付近では水槽壁にそったゆっくりとした湧昇と、回転軸付近での沈み込みとが観察される。水深が深い地点での鉛直方向のインクの動きはよく解からない。

鉛直方向の乱れ ( $v'$ ) の分布を図-5 に示す。 $v'$  は  $\bar{v}$  と同程度からやや小さい値となっている。この図では、更直上、 $v'$  の向きを  $\bar{u}$  や  $u'$  と同じ方向にとっている。速度の座標軸は、 $u$  を表示した図-4 と同じスケールである。分布を半径方向に見ると、軸から外壁に向かって  $v'$  は大きくなっている。また、水深方向に見ると、水表面付近で小さく、深くなるにつれ少しずつ大きくなる。-9.5 cm 深では、外壁近くの st.5 (2.5 cm/s) を除いて、半径方向にはほぼ似た  $v'$  の値 (1.2 ~ 1.9 cm/s) をとるよ

うになる。図-4 の  $u'$  と図-5 の  $v'$  の値とを比べてみる。表面付近の層では、外壁近くの st.5 を除いて、いずれの点でも  $v'$  は  $u'$  より小さく、非等方性が強い。特に回転の軸近くの st.1 では、 $v'$  は  $u'$  に比して極めて小さい。しかし、-3 cm 程度まで下がると  $u'$ ,  $v'$  の両者は回転の中心を除いて徐々に似た値となってくる。 $u'$  と  $v'$  の各時刻の積の平均の平方 ( $\sqrt{|u'v'|}$ ) で示されるレイノルズ応力については、特に算定していない。

### 4.1.2 回転数, 回転子による差異

実験番号 101 について図-3 ~ 5 に見てきた特徴が、回転数によってどう変わるか見てみる。同じ回転子を用いて回転数を変えた時の表層 (= 0.5 cm 深) の平均流速 ( $\bar{U}$ ) を各 st. についてプロットすると、図-6 a のようになる。 $\bar{U}$  の値は、回転数とともに約 2 倍に増加しているものの、 $\bar{U}$  の半径方向の分布形はよく似ている。最大流速となっている st.3 の流速値 ( $\bar{U}_3$ ) で無次元化して速



EXP.101

図-5 鉛直分乱れ強さ ( $v'$ ) の水槽内分布  
 — 回転子 #10 の回転 (水深28cm 位置で90 r.p.m.) での測定例 —

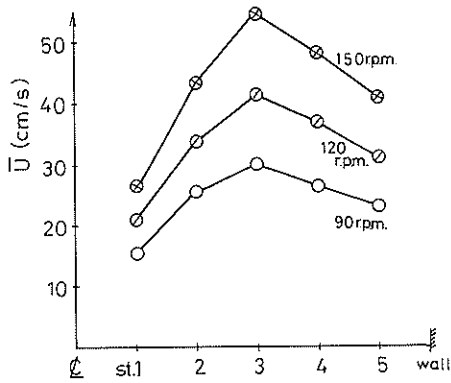


図-6 a 回転系攪乱での回転数の増減による  $\bar{U}$  の分布の変化  
 — 回転子 #10 の回転 (水深28 cm 位置で, 90~150 r.p.m.) 時の表層 (-0.5 cm 深) での測定例 —

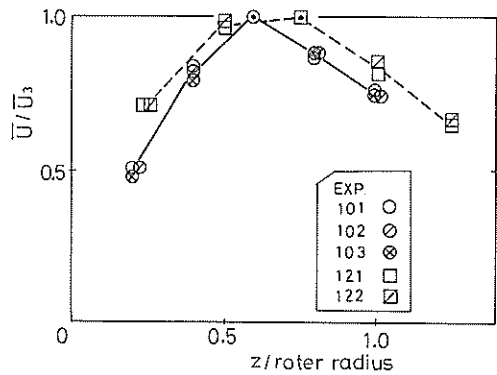


図-6 b 回転系攪乱での回転数の増減による相対平均流速 ( $\bar{U}/\bar{U}_3$ ) の変化  
 — st.3 での平均流速を1としたときの相対位置での平均流速比 — 横軸は回転子 (#10, #12) の回転径で中心から測定位置までの距離を無次元化してある。

度比 ( $\bar{U}/\bar{U}_0$ ) をプロットすると、図-6 b のように分布形が一致する。図-6 b には他の回転子の例として、#12 金網での測定値についても回転子径で距離を無次元化して同様にプロットしてある。回転子ごとに分布形はやや異なるが、同一の回転子で起こした流れは、ほぼ相似の平均流分布となることがわかる。回転数による平均流速の増加を  $\bar{U}_3$  を代表に調べてみると、図-7 a のようになる。この図には、回転子形状 #10 (十字スライド)、#11 (スライド) の 2 種での測定値をプロットしてある。回転子によって流速の増加率は異なるものの、回転数とともに流速値のほぼ直線的な上昇が見られる。同じ st. 3、-0.5 cm 深での乱れ強さ ( $u', v'$ ) を、回転数に対してプロットすると図-7 b となる。 $u'$  は、 $\bar{U}$  と似た増加のしかたをしているが、 $v'$  は、回転数の増加とともに急増することがある。

$u'$  と  $\bar{U}$  がよく似た増加を示していることから、 $u'$  と  $\bar{U}$  との強い結びつきが示唆される。各種の回転子、回転数での -0.5 cm 深の  $u', v'$  と  $\bar{U}$  との関係を示したのが図-8 である。図中の破線は、 $u'/\bar{U}=0.1$  もしくは  $v'/\bar{U}=0.1$  を示す。-0.5 cm 水深での  $u'$  は、回転子・回転数に拘らずほぼ  $\bar{U}$  の 1/10 程度の値となっている。一方、 $v'$  は  $\bar{U}$  の 1/10 に達することはまれで小さな値をばらつかしていることがわかる。水表面という境界により鉛直乱れがおさえられており、非等方向性が強くあらわれたものと思われる。より詳しく  $u'/\bar{U}, v'/\bar{U}$  の水表面付近 (-0.5 cm 深) での分布を、回転子 #10 (十字スライド)、#12

(金網)、#13 (細丸棒) などについて示すと図-9 ととなる。図中の横軸は、回転子半径で無次元化した距離を示してある。各測定点 (st.) の値を横につなぐと半径方向の分布となる。 $u'/\bar{U}$  の分布を図-9 の左図で見ると、回転の中心付近と回転子半径をはずれた外縁でやや大きくなっている。一方、 $v'/\bar{U}$  の分布を右図で見ると、回転の中心からはずれるにつれて徐々に増加し、外縁に近づくほど大きくなっている。回転子半径をはずれた外側では弱い増加となっている。少々の変動やばらつきはあるものの、回転子が同一であれば  $u'/\bar{U}, v'/\bar{U}$  の分布は似ていることもわかる。また、回転に伴う回転軸付近の場所と回転子の回転径外縁から水槽壁にかけての場所とは、他の場所とは違うやや特異な乱れの様子がみられることがわかる。回転子ごとの差異は、図-6 の  $\bar{U}$  の分布と同様に、回転子の形状やそれに伴う水との摩擦や攪乱の大きさの変化、および回転子の回転径の差異などに起因しているようである。

鉛直の分布を見てみる。各回転流れの様子を、st. 3 での流れで代表させ、st. 3 での  $\bar{U}$  の鉛直分布を比べてみる。回転子番号 #10 の形状での分布は、各回転数に対して図-10 のようになる。水面近くでは、やや速い  $\bar{U}$  であり水深が深くなるとともに徐々に流速値が小さくなる。ある水深まで達すると流速値のへりかたは少なくなってくる。発達した開水路流れとは、やや様子が異なる。-9.5 cm 深では、水深が多少変化しても  $\bar{U}$  の変化は小さく、 $\bar{U}$  値は安定しているようである。そこで -9.5 cm での  $\bar{U}$  値で

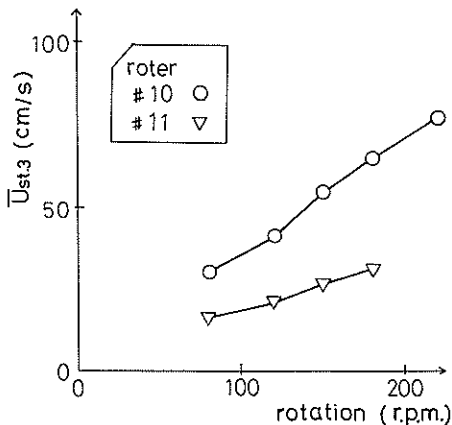


図-7 a 回転系乱れの回転数の増減による st. 3 表層での主流平均流速 ( $\bar{U}_3$ ) の変化  
— 2 種の回転子 (#10, #11) の例 —

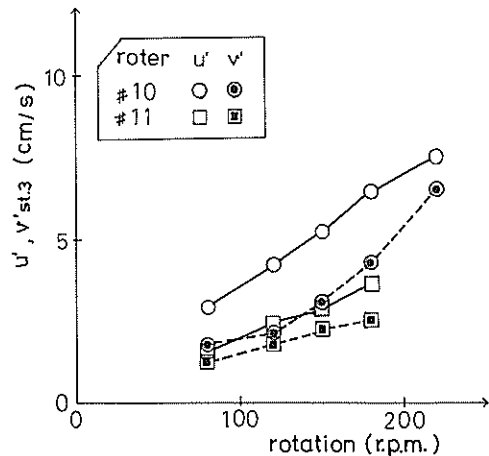


図-7 b 回転系攪乱での回転数の増減による st. 3 表層での主流成分乱れ強さ ( $u'$ ) と鉛直成分乱れ強さ ( $v'$ ) の変化  
— 2 種の回転子 (#10, #11) の例 —

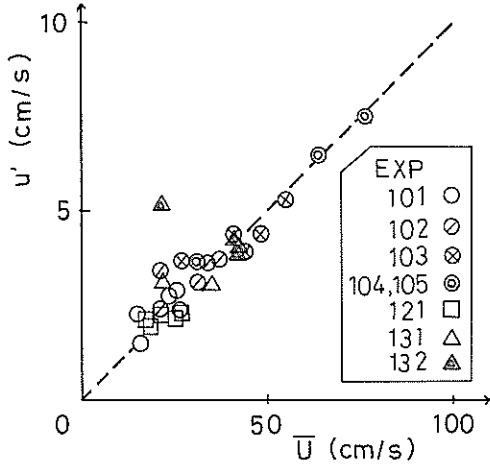


図-8 a 回転系攪乱を与えた表層(-0.5 cm深)での $\bar{U}$ と $u'$ との関係 (破線は $u' = 0.1\bar{U}$ )

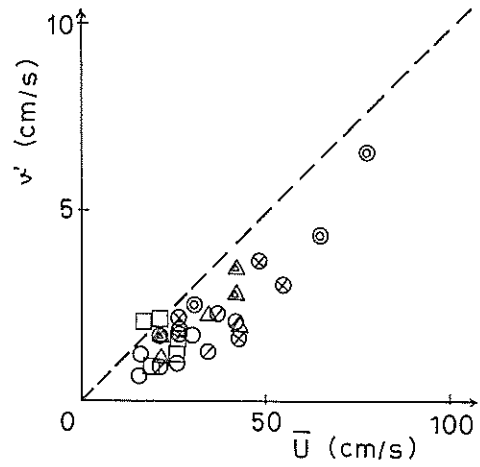


図-8 b 回転系攪乱を与えた表層(-0.5 cm深)での $\bar{U}$ と $v'$ との関係 (破線は $v' = 0.1\bar{U}$ )

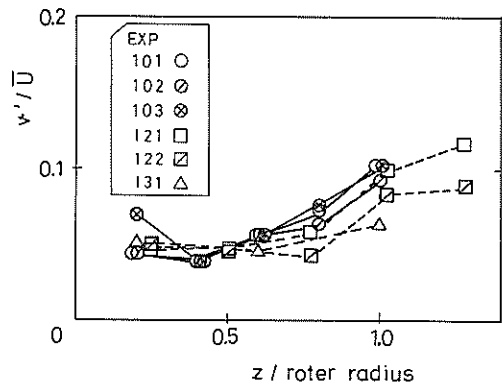
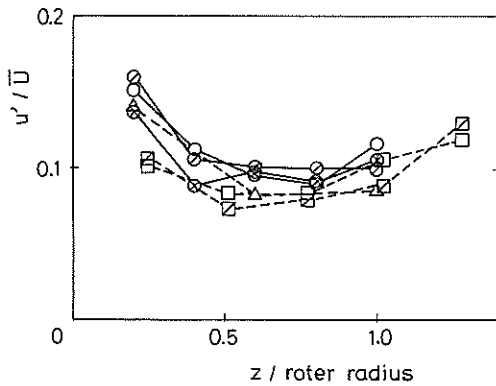


図-9 表層(-0.5 cm深)での相対乱れ強さ( $u'/\bar{U}$ ,  $v'/\bar{U}$ )の水槽半径方向への分布  
— 回転子番号#10, #12, #13の例, 各回転子の回転半径で距離を無次元化し相対位置として表示 —

無次元化し、相対平均流速の鉛直分布を抽いてみると、図-11のようになる。ごく表層に近い-0.5 cmでややばらつくが、-1.5 cm~-3.5 cm(水槽の深さ(H))で無次元化した相対水深( $y/H$ )で0.05~0.11)では相似の流速分布となる。また、同じ#10の回転子で、相対乱れ強さ( $u'/\bar{U}$ ,  $v'/\bar{U}$ )の鉛直分布をプロットすると図-12のようになる。相対乱れ強さは、表層に向かって増加するが、鉛直方向の相対乱れ( $v'/\bar{U}$ )は、水面下-3 cm程度より浅くなると急減し水面に近づくほど小さくなっている。

$u'/\bar{U}$ は、-3 cm 以浅ではあまり大きな変動もなく、いずれの回転数でも0.1に近い値となっている。一方、 $v'/\bar{U}$ は-3 cm~-1 cm層ではばらついていても、-0.5 cm層で0.05~0.06に収束してくる。回転数の違いによる $v'/\bar{U}$ の作られ方の差異よりも、水表面に近づくことによる鉛直乱れのおさえられる効果が強くあらわれてきているためと思われる。ただし、どの回転数でも、水深-0.5 cm層で $v'/\bar{U}$ が0.05~0.06に収束する訳ではなく、#11の回転子(スライド)では0.08に近づくなどの差が



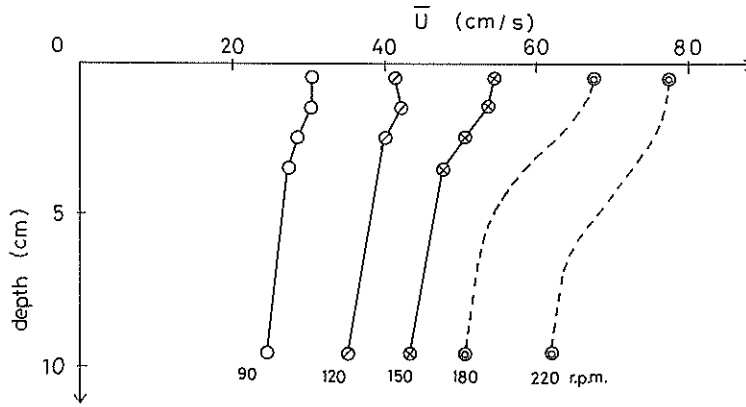


図-10 平均主流流速 ( $\bar{U}$ ) の水面付近での鉛直分布  
 — 回転子 #10 を 90 ~ 220 r.p.m. で回転させた時の, st.3 での測定値 —

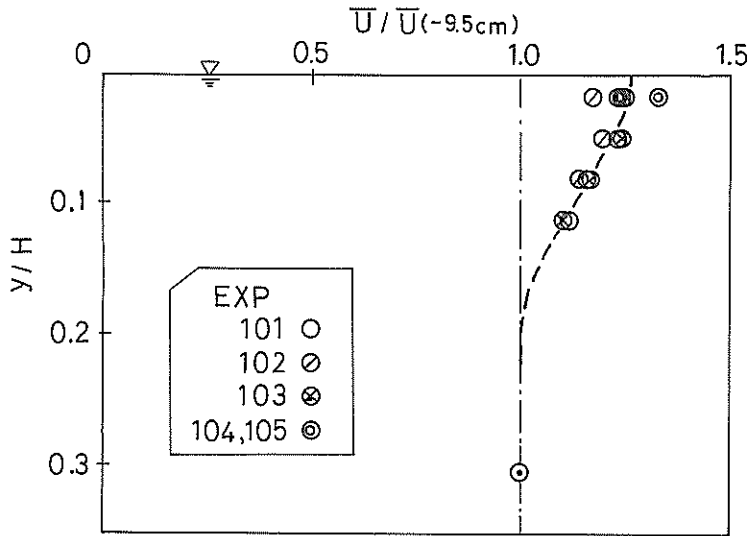


図-11 相対平均流速の鉛直分布  
 — 回転子 #10 を 90 ~ 220 r.p.m. で回転させた時の, st.3 での測定値を各々水深 - 9.5 cm での  $\bar{U}$  で無次元化し相対流速として表示している。鉛直のスケールは, 水槽水深 31 cm で無次元化し相対水深として表示している。

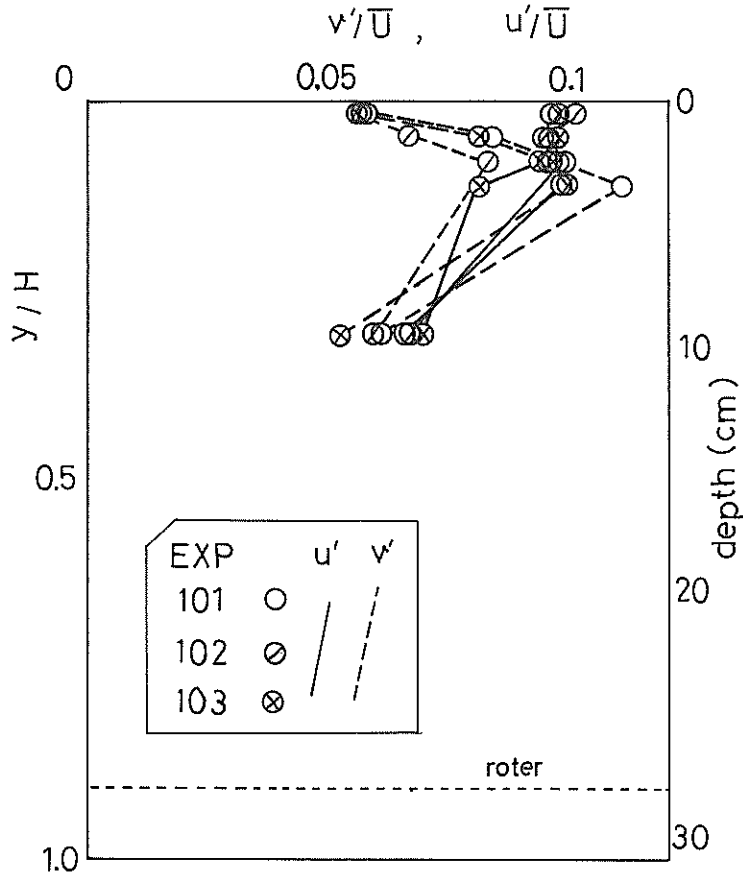


図-12 相対乱れ強さ ( $u'/\bar{U}, v'/\bar{U}$ ) の鉛直分布

— 回転子#10を90~150r.p.m.で回転させた時のst.3での測定値。鉛直のスケールは水槽水深で無次元化し、回転子の回転深さを破線で示してある。

ある。

#### 4.1.3 回転系での乱れの特徴

今回用いた回転子の回転径は、表-1に示すように#15の1つを除いていずれも20cm(半径10cm)以上のものである。半径と回転角速度とから作られるレイノルズ数は $10^5 \sim 10^6$ のオーダーである。回転子の回転により水槽内の水も回転し、遠心力により半径方向外向きの分速度が生起する。連続の条件を満たすため、回転面に対して直角の鉛直流も生じてくる。

無限に広い静止水中で半径 $r_0$ の円板を一定の角速度 $\omega$ で回転させると、高い $Re$ 数では円板表面に境界層が生じ、境界層内の水は粘性のため円板の回転に引きずられて回転する。円板表面水と半径 $r$ 、幅 $dr$ のドーナツ状の円板

環との間に働く片面の表面摩擦によるモーメント $dM$ は次式で表わせる。

$$dM = f \cdot \frac{\rho (r\omega)^2}{2} \cdot r \cdot 2\pi r dr \quad (24)$$

ここで、 $f$ は摩擦抵抗係数、 $\rho$ は水の単位体積あたりの質量である。円板の片面全体でのモーメント $M$ は次式となる。

$$M = \int_0^{r_0} dM = \frac{\pi}{5} \cdot f \cdot \rho \omega^2 \cdot r_0^5 \quad (25)$$

この式中の $(2/5) \cdot \pi \cdot f$ を回転円板のモーメント係数と呼び、回転 $Re$ 数に対応したモーメント係数が得られている。ここでは、モーメントが回転径の5乗に比例し、角速度の2乗に比例することが理解される。円板以外の

形状の回転子でも、形状により  $f$  の値、 $r_0$  の関数型などが異なるものの、主に摩擦によりモーメントがやりとりされる場には、角速度の2乗に比例することは変わらないと思われる。

ここでの実験ケースでは、回転子形状や回転径が種々に変わるため、回転子ごとに  $M$  の関数型が異なってくる。また、水槽径が回転径に近い場合、水槽壁近くで鉛直流が目だつようになる。回転子ごとに平均流の分布が少しずつ異なるのは、こうした理由によるものと思われる。また、回転数による平均流の変化も、水に与えられるモーメントの変化から理解できる。乱れの強さは、平均流速と側壁や水表面からの距離とに影響を受けている。

#### 4.1.4 振とう系の攪乱

振とう系の振とう子は、上下動をくり返す。上下の振とうは、0.3~2 秒程度の周期である。周期に比して長い時間スケールで見ると、上下の振とうも含めて乱れとして扱える。振とう子は上下の軸に対して回転体となっており、長い時間スケールでの平均流は発生しにくい。

$\bar{U}$ 、 $\bar{V}$  の測定値は、非常に小さな値となっている。しかし、振とう子のセットのひずみ、クランクアームの偏心により往復運動に回転運動成分が残っていること、などに起因し、ゼロとはならない。乱れの強さ  $u'$ 、 $v'$  は、振とう子の上下動により直接生成される。

網状振とう子による生成乱れを見てみる。水平に置かれた格子を上下振動させた時に作られる乱れは、振とう子から少し離れば同一水平面内ではほぼ一様であると言われ、鉛直距離の5/4乗に比例して距離とともに減衰する<sup>2)</sup>。そこで、表-1の振とう子番号#22の格子(網目格子間隔1.9 cm, ワイヤ径1.6 mm)を、上下振幅3.7 cm (水深-1 cm~-4.7 cm), 周波数2.5 Hzで振動させたとき、振動中心(-2.85 cm)から2.35 cm上方の、-0.5 cm深での流速( $\bar{U}$ )、乱れ強さ( $u'$ ,  $v'$ )の平面分布を図-13に示す。 $\bar{U}$ は極めて小さい。 $u'$ は、st.3で大きく、 $v'$ はst.1で大きい。振とう径より外に位置するst.5では、 $\bar{U}$ は更に小さく、 $u'$ もやや小さいが $v'$ はそれほど小さくない。振動格子による乱れでも、水面近くになる

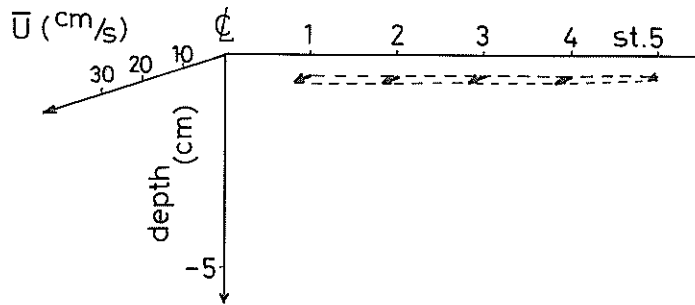


図-13 a 主流成分平均流速( $\bar{U}$ )の水槽内分布  
— 振とう子#22の振とう(-1~-4.7 cm間で2.5 Hz)での測定例 —

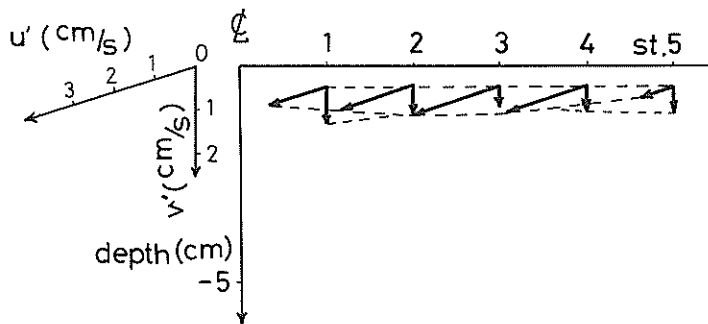


図-13 b 主流成分乱れ強さ( $u'$ )、鉛直成分乱れ強さ( $v'$ )の水槽内分布  
— 振とう子#22の振とう(-1~-4.7 cm間で2.5 Hz)での測定例 —

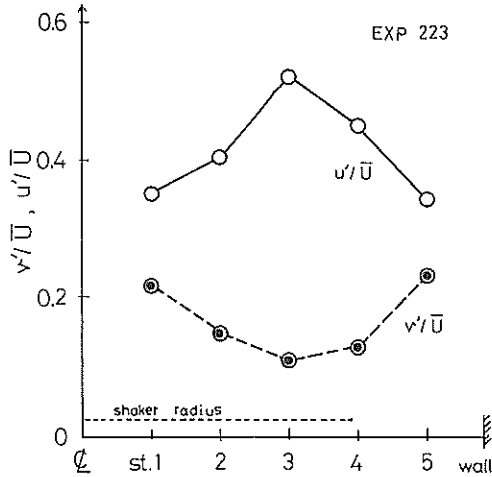


図-14 相対乱れ強さ ( $u'/\bar{U}$ ,  $v'/\bar{U}$ ) の半径方向の分布  
 — 振とう子 #22 の振とう (-1~4.7 cm 間で 2.5 Hz) での表層 (-0.5 cm 深) での測定例 —

と、非等方性があらわれはじめ、 $u' > v'$  となってくる。回転系の乱れとは異なり  $u'$ ,  $v'$  は平均流 ( $\bar{U}$ ) に因って作られたものではないが、相対乱れ強さ ( $u'/\bar{U}$ ,  $v'/\bar{U}$ ) の分布を求めると図-14 のようになる。 $u'/\bar{U}$  は st.3 で大きく、 $v'/\bar{U}$  は水槽の中央と端部 (内壁近く) で大きい。

もう一つの振とう子であるなす型振とうでは、水表面が波だが、水面下 -0.5 cm での流速値は小さい。上記と同じ 2.5 Hz で振とうさせると  $\bar{U}$ ,  $u'$  は上記メッシュ振とう例の更に 1/2 程度の値となる。 $\bar{V}$  は 1/2 ~ 1/5 であり  $v'$  は振とう格子とほぼ似たオーダとなる。なす型の振とう例では、造波による水粒子の運動という性格が強く、乱れとしてはかなり特殊なものとなる。

表層 (-0.5 cm 深) で測得された  $u'$ ,  $v'$  と振とう周波数との関係を図-15 に示す。ばらつきがあるものの、周波数の増大とともに  $u'$  が増加する傾向が確認できる。

#### 4.1.5 水位の変動

水位の変動は、ごく小さい。振とう系の攪乱では、振とう子の振幅 3.6 cm (なす型振とう子) もしくは 3.7 cm (メッシュ振とう子) に対し、水面の上下の幅は、4 mm ~ 16 mm であった。特に、水中でメッシュを振とうするケースでは、水面の上下は小さかった。波は、外壁の反射で重複波となり、複雑な分布となっている。一方、回転系の攪乱では、水面の上下は高々 2 mm 程度であり、回転数が 120 r.p.m. 以下では、1 mm を超すことはほとんどない。また、水面形は回転の中心を軸として放物線に

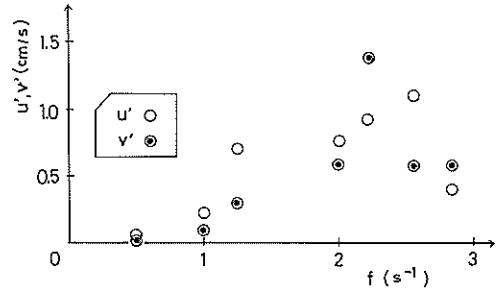


図-15 乱れ強さ ( $u'$ ,  $v'$ ) と振とう周波数 ( $f$ ) との関係  
 — 振とう子 #21 による表層 (-0.5 cm 深) st.3 での測定例 —

近いなべ底形を描くが、水槽外壁では静水面より高々 2 cm の平均水位の上昇となっている。

## 4.2 乱れのスペクトル形

### 4.2.1 回転系での乱れ

$\bar{U}$ ,  $u'$  などの分布を示した図-3, 4 と同じケースについて流速の変動の周期性をしてみる。図-16 は、水槽の中央と外壁との中間に位置する st.3 の水深 -0.5 cm, -9.5 cm の 2ヶ所での主流方向の流速変動から求めた自己相関図である。いずれの深さでも、時間が隔たると相関性が急減しており、-0.5 cm 深では 0.5 秒離れると相関係数が時間軸 (ゼロ) を切っている。-9.5 cm 深ではやや速く、0.3 秒離れると自己相関係数が 0 となっている。しかし、更に時間が隔たってゆくと、わずかな相関性がいつまでも残っており 0 に収束しない。自己相関図からは流速変動に明瞭な周期性は認められないが、限られた水塊に対し定速回転で攪乱を与えている影響が残っているものと思われる。

水槽の内部の乱流の構造を知る上で、スペクトル解析の手法は有力である。 $u'$ ,  $v'$  について FFT 法によりパワースペクトルを求めてみる。水深 -0.5 cm での 5 地点 st.1 ~ st.5 のスペクトルを図-17 に示す。 $u'$  のスペクトルを直線で  $v'$  のスペクトルを破線で表わしてある。いずれの地点でも回転周波数 1.5 Hz (90 r.p.m. ÷ 60 秒) より低い周波数で高い値をとり、1 Hz 前後から急激に減少している。また、 $u'$  と  $v'$  のスペクトルが重なるのは、おおむね 20 Hz より高周波数側であり、これより低周波数側では  $v'$  のスペクトル値は  $u'$  に比して低くなっている。また外壁に近い st.5 では、 $v'$  のスペクトル値は他の地点に比して全体に高く、 $u'$  と  $v'$  とのスペクトルも数 Hz 前後から重なっている。 $u'$  に比べて  $v'$  のスペクトルが低周波数側で小さいのは、水表面に近いため水面により鉛直方向の大きな乱れがおさえられているためと思われる。

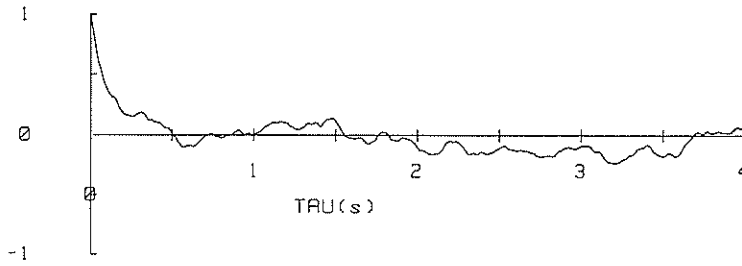


図-16a 主流成分流速変動の自己相関関 (st.3, -0.5 cm 深)  
 — 回転子#10の回転 (水深28cm位置で90 r.p.m.)での測定例 —

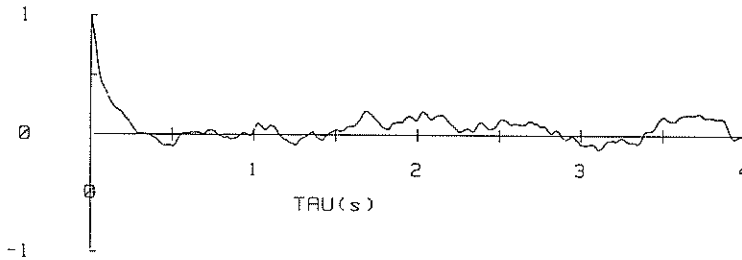


図-16b 主流成分流速変動の自己相関関 (st.3, -9.5 cm 深)  
 — 回転子#10の回転 (水深28cm位置で90 r.p.m.)での測定例 —

外壁近傍では、水槽内の流れの鉛直循環などの影響で鉛直方向の乱れがやや大きいため、スペクトルが大き目になっていると思われる。

水面による鉛直方向乱れの制約を確認するため、st.3の地点での-0.5 cm~-9.5 cmの各水深での測定値より求めたスペクトルを図-18に示す。1Hz以上の周波数域を比べる。主流方向の成分 ( $u'$ ) は、水深が深くなるとやや低下している。鉛直方向の乱れ ( $v'$ ) は、水深が-3.5 cmまでは深くなると低周波数側で徐々に大きくなっていく様子が見られる。-9.5 cmの深さでは、1~10Hzの区間でも、 $u'$ 、 $v'$ の両スペクトルの高さがごく近づいており、-2.5 cmより深い第三層以下では10Hzより高周波数側で重なっている。

等方性の乱れでは、 $u'$ 、 $v'$ の各成分の1次元スペクトル  $S_u(k)$ 、 $S_v(k)$ には次の関係が成立する<sup>21)</sup>

$$S_v(k) = \frac{1}{2} \left[ S_u(k) - k \frac{\partial S_u(k)}{\partial k} \right] \quad (26)$$

ここで、 $k = 2\pi f/\bar{U}$  は波数、 $f$  は周波数、 $\pi$  は円周率。慣性小領域では  $S_v(k)$  は  $k$  に対し  $-5/3$  乗の勾配となり、上式に代入すると、

$$S_v(k) = \frac{4}{3} S_u(k) \quad (27)$$

図-18では、 $-5/3$  乗の勾配は周波数  $f$  に対し、10~20 Hz から50 Hz にかけて認められる。この区間での  $u'$  と  $v'$  のスペクトルは、グラフ上で重なっており、式(27)の関係はほぼ成立していると見なせる。しかし、両対数グラフ上なので、スペクトルの高さが  $4/3$  倍となっているかどうかは、はっきりしない。

図-17、18などで、 $u'$ 、 $v'$ の両スペクトルの重なりをもって乱れの等方性域とする。この実験ケースでは、水表面付近の表層 (-0.5 cm 深) ではほぼ20 Hz 以上、-9.5 cm 深ではほぼ10 Hz 以上の高周波数帯で等方性域となっていることになる。等方性域とみなされる区間でのスペクトルの傾きは、 $-5/3$  から更にはより急なものとなっ

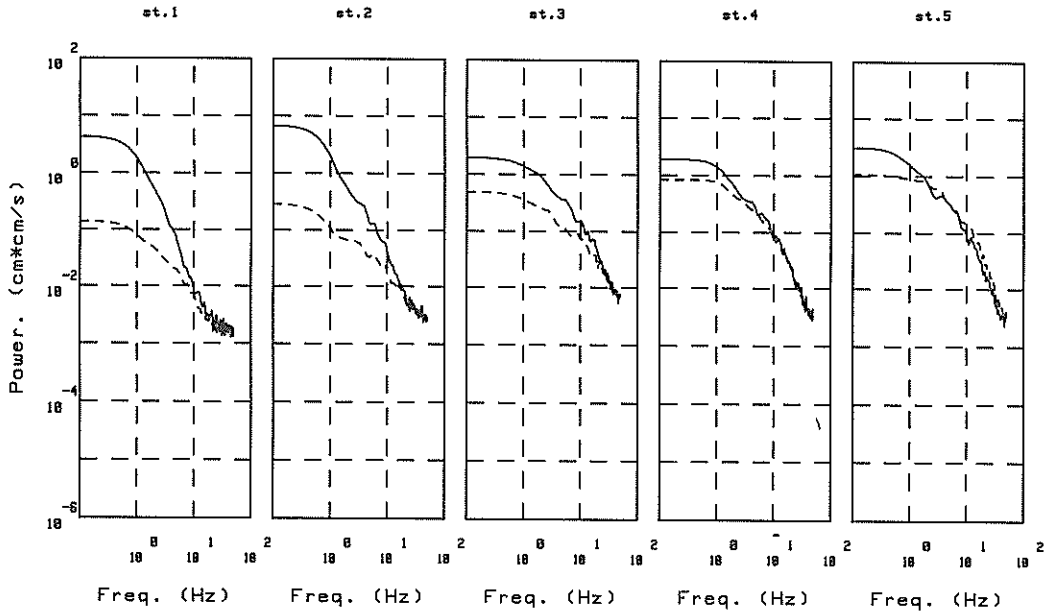


図-17 表層(-0.5 cm 深)での各点の流速変動のパワースペクトル(左から st. 1, 2, 3, 4, 5 の測定点について, 各々主流成分( $u'$ )を実線で鉛直成分( $v'$ )を破線で示している。)

— 回転子 #10 の回転 (水深 28 cm 位置で 90 r.p.m.) での測定例 —

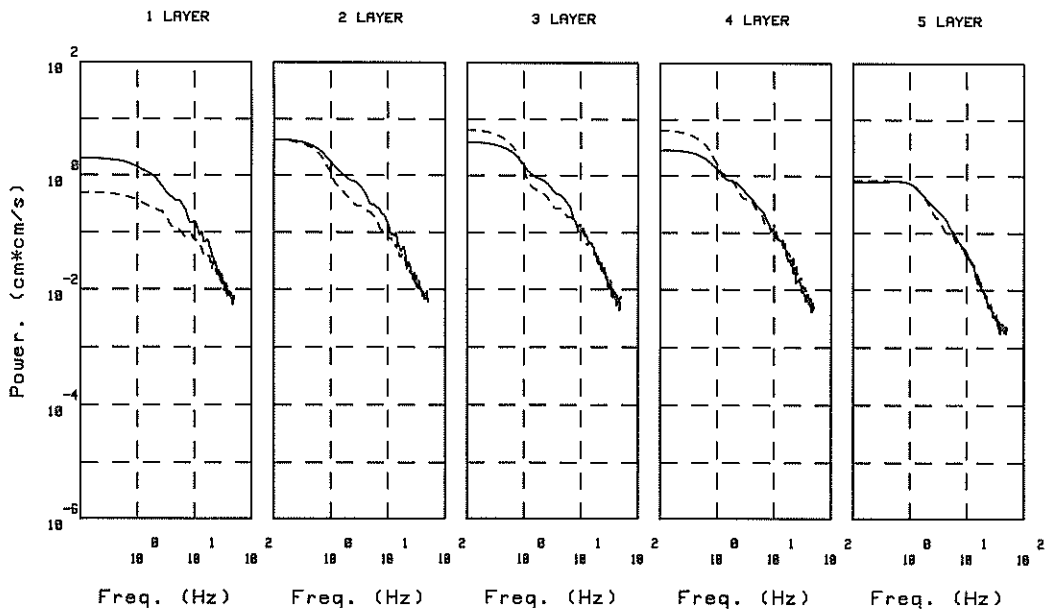


図-18 st.3 での各深さでの流速変動のパワースペクトル(左から表層(-0.5 cm), 第二層, ..., 第五層(-9.5 cm)の各深さについて, 各々主流成分( $u'$ )を実線で鉛直成分( $v'$ )を破線で示している。)

— 回転子 #10 の回転 (水深 28 cm 位置で 90 r.p.m.) での測定例 —

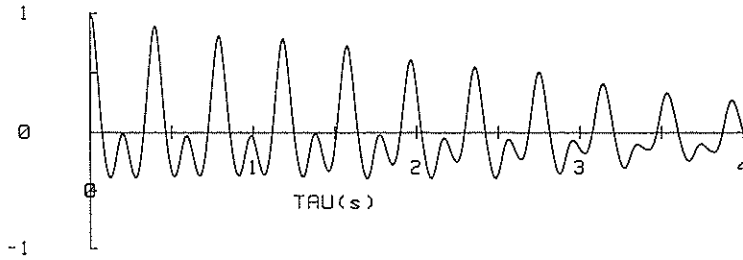


図-19 主流成分流速変動の自己相関図 (st.3,-0.5 cm 深)  
 — 振とう子#22の振とう(-1~4.7 cm間で2.5 Hz)での測定例 —

ている。

#### 4.2.2 振とう系での乱れ

メッシュを振とうして作った乱れの流速変動について自己相関をみる。図-13に示したケースにつき、st.3の水深-0.5 cmでの測定値についての自己相関図を図-19に示す。これは、流れの主流方向の流速変動についての自己相関である。起振周期2.5 Hz(0.4秒)ごとの高いピークが明瞭に見とれる他、0.2秒ごとに上下のピークが規則的にならんでいる。時間が隔ってもピーク高さが減るものの自己相関の波形は似ており、強い周期性を示している。

$u'$ と $v'$ について、同じ測定点でのデータよりパワースペクトルを描くと、図-20のようになる。起振周波数より低周波数に高い値があり、5 Hzより高周波数側でスペクトル値が急減している。パワースペクトル図でも見られるように、2.5 Hzより高周波側では、倍周期ごとのスペクトルのピークが20~30 Hzあたりまで残っている。また、 $v'$ のスペクトルは常に $u'$ のスペクトルに比して低い。 $u'$ 、 $v'$ ともにスペクトル高さは、ほぼ、周波数の $-13/3$ 乗に比例して減少している。40 Hzより高周波数域では測定上もしくは処理上のノイズが顕著となっている。起振周波数から発生する倍周期ごとのスペクトルのピークは、流速の変動がかなり周期性の強いものであることを示している。起振周波数による強い周期性を消すために、移動平均操作を行なってみた。各測定時刻の前後 $M$ 個ずつ合計 $2M+1$ 個の流速値を加えて算術平均をとり、その

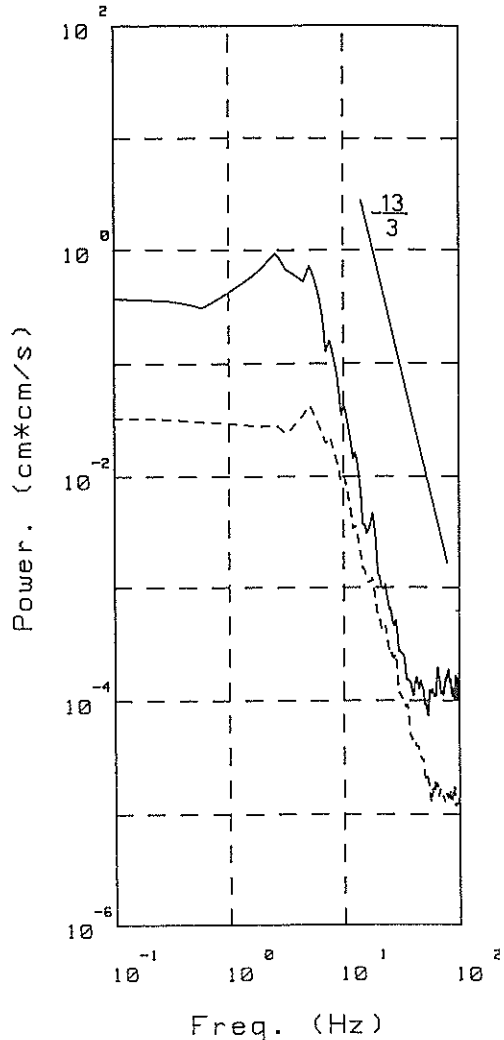


図-20 st.3,-0.5 cm 深での流速変動のパワースペクトル (実線は $u'$ 、破線は $v'$ についてのスペクトル)  
 — 振とう子#22の振とう(-1~4.7 cm間で2.5 Hz)での測定例 —

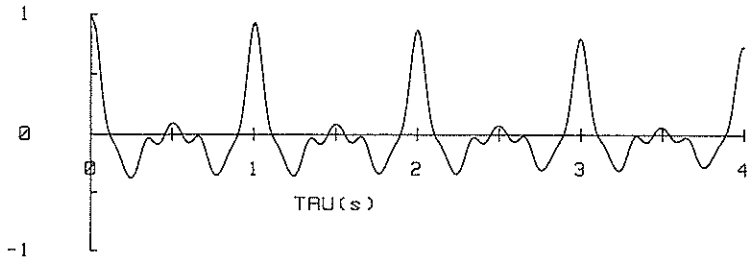


図-21 主流成分流速変動の自己相関図 (st.3, -0.5 cm 深)  
 — 振とう子#21の振とう (-1~4.6 cm間で1.0Hz)での測定例—

時刻の移動平均流速とする。各時刻の測定流速と移動平均流速との差を乱れとし、この乱れについて検討した。 $M$ として5個(0.11秒間の平均)から24個(0.49秒間の平均)まで選んでみたが、いずれの場合にも起振周期(0.4秒)から3倍周波数(0.1秒)程度までの著しい周期性が移動平均残差にも残っていた。ここには示していないが、移動平均残差の成分のパワースペクトルでは、低周波数域のレベルが大きく減少する。起振によると思われるスペクトル上のピークは高周波側でも残存しているが、ピーク高さはややおさえられ、更にスペクトル全体のレベルが低下する。移動平均操作による残差を乱れとしても、低周波域での周期性をへらすことはできても高周波側でのスペクトル形の見やすさの改善にはつながらないようであった。以後の検討に際しては、移動平均操作をかけないで処理したグラフを用いることとする。

なす型振とう子を振とうさせたケースの自己相関図を図-21に示す。図は周期1秒で振とうさせたケースのst.3の水深-0.5cmでの測定結果より算定したものである。自己相関図から強い周期性が見とれる点は、メッシュの振とうケースと同じである。図-22にパワースペクトルを示す。周波数スペクトルを見ると、起振周波数で著しく高いピークが見られ、他の周波数でのスペクトルのレベルは低い。5 Hzより高周波数側では、スペクトルの高さが急減し、減少の傾きは $-13/3$ 乗からそれ以上の減少のように見える。鉛直成分のスペクトルは、低周波数側で低く、10Hz前後で主流成分の

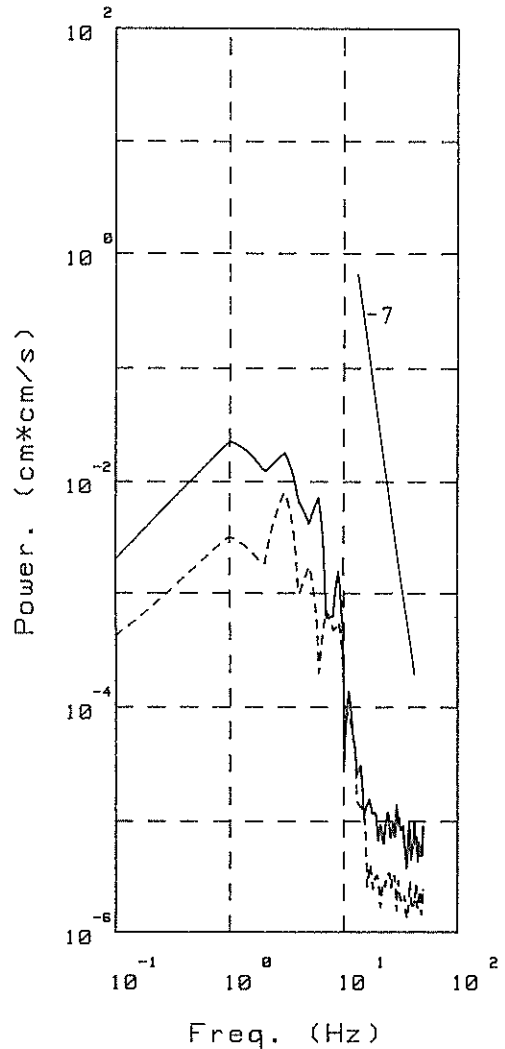


図-22 st.3,-0.5 cm 深での流速変動のパワースペクトル (実線は  $u'$ , 破線は  $v'$  についてのスペクトル)  
 — 振とう子#21の振とう (-1~4.6 cm間で1 Hz)での測定例—



スペクトルの高さに接近する。さらに高周波数側では、急減している。なす型振とう子による乱れは、主に形成重複波の水粒子軌道運動による成分が大きいことが推察される。深さ方向の測定を実施しておらず、波高に比べてかなり深い場所での乱れの様子は不明である。

### 4.3 乱れのエネルギー逸散

#### 4.3.1 回転系での乱れのエネルギー逸散率

図-17に示した周波数スペクトルのうち、st.3、-0.5 cm深での測定データについて波数スペクトルと逸散スペ

クトルを図-23に示す。波数スペクトルでは $-5/3$ 乗則に従う部分が高波数側に見られる。また逸散スペクトルでは、波数3.5 (1/cm)でピークが生じている。ピークを与えている波数は、径0.3 cmに相当する。

図-23の波数スペクトルの高波数域に $-5/3$ 乗の直線をあてはめ、直線の切片を求め $\epsilon$ 値を算定すると $7.1$  ( $\text{cm}^2/\text{s}^3$ )となる。一方、二次モーメント法により積分計算すると $5.6$  ( $\text{cm}^2/\text{s}^3$ )となり、やや小さな値となる。他のいくつかの例を比較すると、逸散スペクトル上

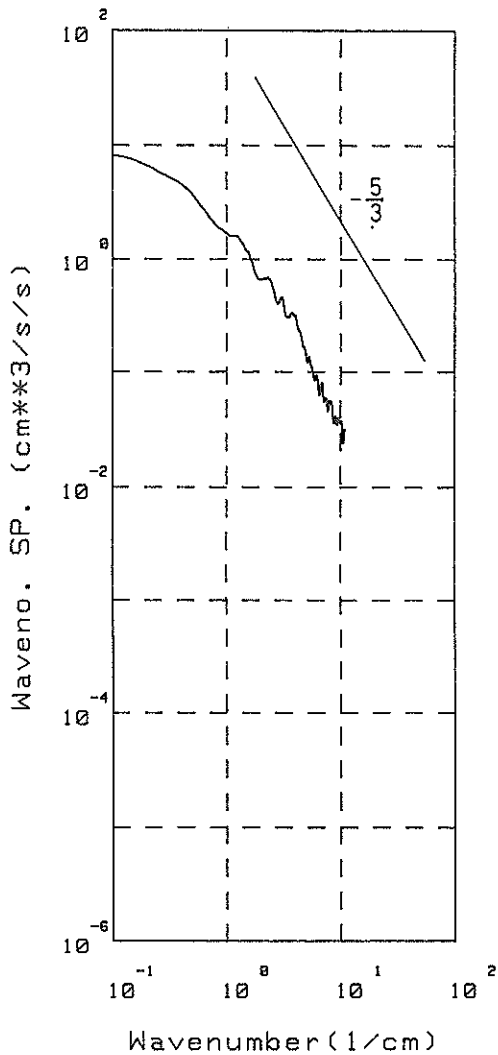


図-23 a 主流成分の波数スペクトル

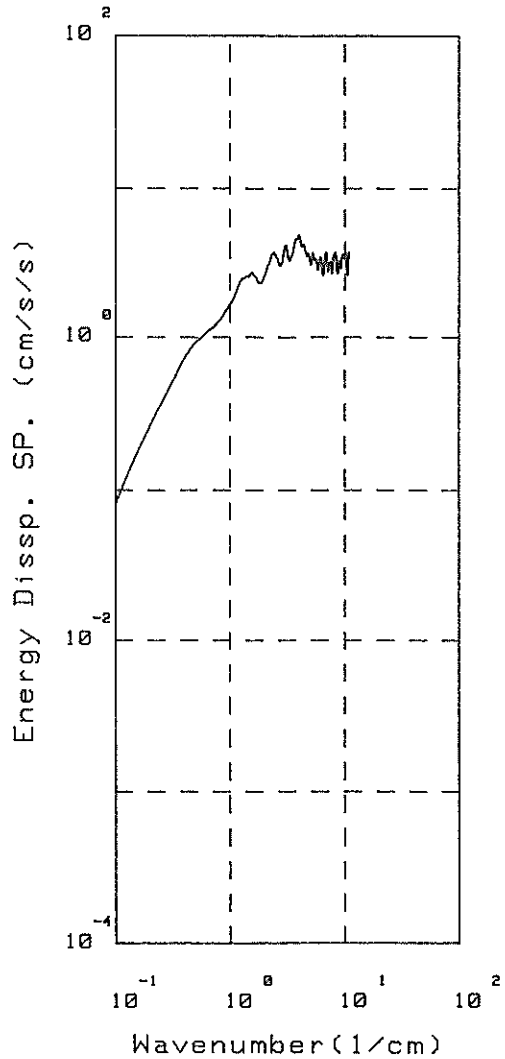


図-23 b 主流成分の逸散スペクトル

— 回転子#10の回転(水深28cm位置で90 r.p.m.)における  
st.3, 表層(-0.5 cm深)での測定例 —

でピークが認められている場合でも、 $-5/3$ 乗則による方法で算定した $\epsilon$ 値の方が大きくなる傾向が認められた。回転系の実験では、ほとんどの場合波数スペクトル上に等方な $-5/3$ 乗領域が認められ、 $-5/3$ 乗則をあてはめて $\epsilon$ を算出した。算出結果は、付表-1に測定点ごとに示している。ただし、逸散スペクトル上にピークが見つからない場合や、波数スペクトル上で $-5/3$ 乗域の判断が困難な場合については $\epsilon$ 値を求めていない。また、サンプリングの周波数を高くすると、高周波数域での波数スペクトルが見やすくなることを確認したが、スペクトルのレベルが常法の処理によるものとやがずれることがあり、 $\epsilon$ 値算定には用いなかった。

算定した $\epsilon$ 値の分布を見ている。図-24は、実験ケース#101(図-3などと同じケース)での分布を示したものである。平面分布は、 $-0.5$ cm深のものを、鉛直分布は、st.3の位置のものを示してある。回転軸付近のst.1,2では外側の位置での値よりも、 $\epsilon$ 値が半減している。また、表層近傍から $-2.5$ cm水深あたりまでは、ほぼ同じ $\epsilon$ 値であるが、水深 $-3.5$ cmから $-9.5$ cmにか

けて大きく減少している。回転数を変えたケースでも比べてみたが、 $-9.5$ cm深での $\epsilon$ 値は $-0.5$ cmでの $\epsilon$ 値の $1/3 \sim 1/5$ 程度の小さな値となっている。水槽内でも $\epsilon$ 値は場所によって変化し、図-3と見比べると $\bar{U}$ の大きな場所で大きな $\epsilon$ 値となっているようである。

そこで、同じ回転子(#10)で回転数が異なる3ケースについて、 $\bar{U}$ と $\epsilon$ との関係をプロットしてみる。表層( $-0.5$ cm深)での値を比べたものが、図-25aである。

st.2で、 $\bar{U}$ に比して $\epsilon$ がやや小さくなるものの、 $\bar{U}$ が大きくなるにつれて $\epsilon$ も増加し、増加の割合は回転数ごとに異なり回転数が大きいほど急増していることが明らかである。また、st.3での各深さの $\epsilon$ 値を $\bar{U}$ に対してプロットしたのが、図-25bである。 $\bar{U}$ に対して $\epsilon$ の増加割合は表層測点間(図-25a)での傾きよりもかなり大きい。表層に近づくほど $\epsilon$ も $\bar{U}$ も急に大きくなるようであるが、#103(150 r.p.m.)のケースでは表層での $\epsilon$ 値が得られていない。3ケースの値での比較からではあるが、 $\bar{U}$ が大きくなると乱れのエネルギー-逸散の機構を通して $\epsilon$ が著しく増加するものと思われる。

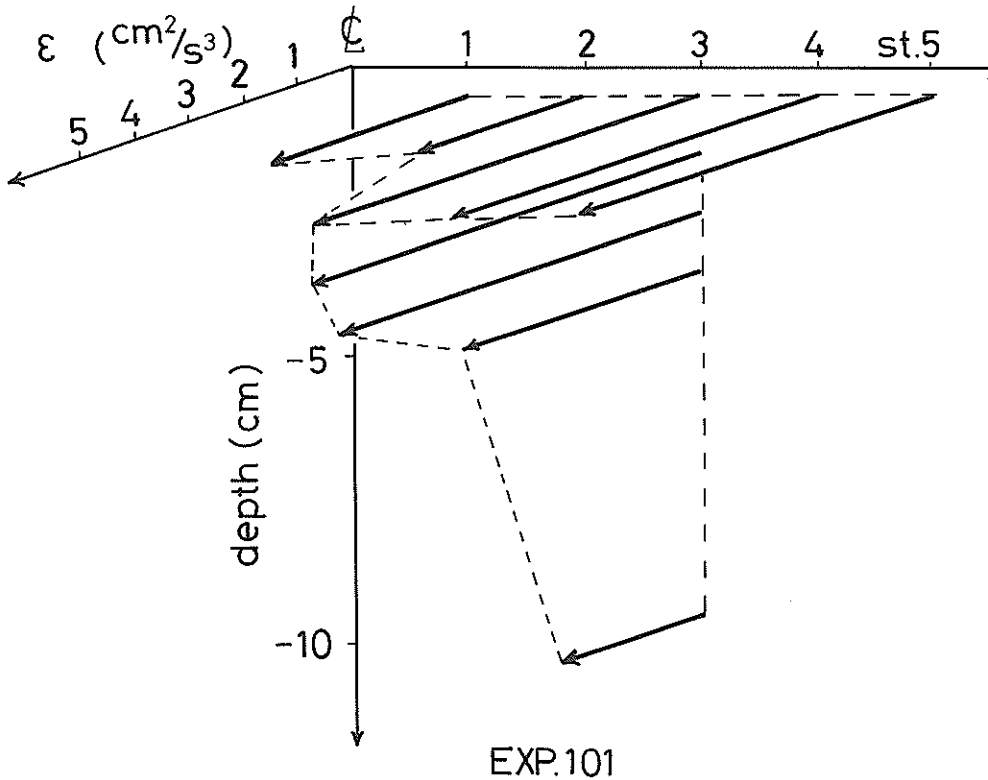


図-24 エネルギー逸散率( $\epsilon$ )の水槽内分布  
— 回転子#10の回転(水深28cm位置で90 r.p.m.)での測定例 —

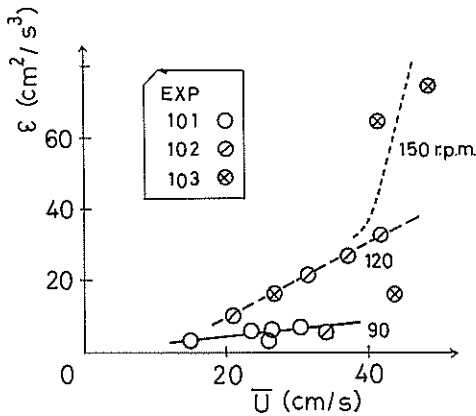


図-25 a 平均流速 ( $\bar{U}$ ) とエネルギー逸散率 ( $\epsilon$ ) との関係

— 回転子 #10 の回転 (水深 28 cm 位置で 90 ~ 150 r.p.m.) における表層 (-0.5 cm 深) 各点での測定値比較 —

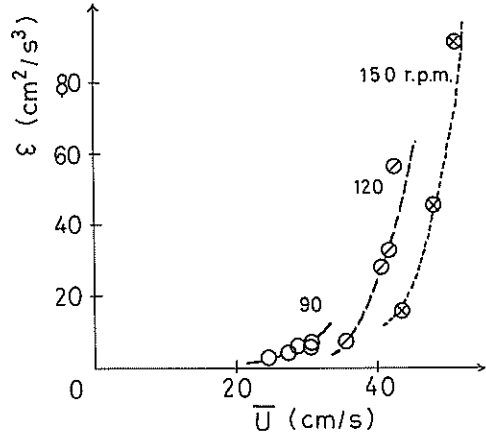


図-25 b 平均流速 ( $\bar{U}$ ) とエネルギー逸散率 ( $\epsilon$ ) との関係

— 回転子 #10 の回転 (水深 28 cm 位置で 90 ~ 150 r.p.m.) における st.3 各水深での測定値比較 —

#### 4.3.2 振とう系での乱れのエネルギー逸散率

メッシュ振とう (起振周波数 2.5 Hz) の波数スペクトルの例を図-26a に示す。また、この時の逸散スペクトルを図-26b に示す。波数 8 (1/cm) より高波数にかけて -13/3 乗則に合う領域が認められる。式 (20) より  $\epsilon$  を求めると 17 (cm<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>) となる。波数 60 (1/cm) より高波数側では、ノイズが著しい。逸散スペクトルを見ると、波数 8 (1/cm) でピークとなり、高波数側では 1 オーダ以上小さくなっている様子がわかる。波数 8 (1/cm) は周波数 5 Hz に相当し、起振周波数 2.5 Hz の 2 倍周波数である。起振の影響を強く受けた流速変動が逸散スペクトルのピークとなっていることや高波数側での大きなノイズのため、2 次モーメントから式 (18) で求めた  $\epsilon$  の値は、-13/3 乗則への直線あてはめから求めた値よりもかなり大きく 49 (cm<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>) となっている。起振の影響を除くため、移動平均操作や 2 次モーメントの積分区間の調整などを施せば  $\epsilon$  の値は小さくなる。しかし、どの波数以上を起振の影響を受けない乱れとするのが議論が別かれるところであり、結局、積分区間や移動平均のとりかたで  $\epsilon$  の値が大きく変わってしまうことになる。ここでは、曝気への寄与が、高波数側の渦で大きいと想定されるので -13/3 乗則へのあてはめから求めた値を用いることとする。なす型振とう子による振とう攪乱でも、同じく起振の影響が波数スペクトル上に顕著に表われる。そこで、-13/3 乗則が認められる場合には、式 (20) より  $\epsilon$  を求めることとする。算定した  $\epsilon$  を付表-1 中に示す。

振とう系攪乱の場合、-13/3 乗のあてはめが可能な実

験例がごく極られており、 $\epsilon$  と他の水量との比較がむずかしい。また、 $\epsilon$  の分布についても検討ができない。なす型振とう子を用いた場合、高波数帯でのスペクトルの傾きは -13/3 乗をこえた急な勾配となる例がほとんどであった。

#### 4.3.3 エネルギー逸散のスケール

エネルギー逸散  $\epsilon$  が求まると、乱れに関する次の量が算定できる。

$$\eta = \left( \frac{\nu^3}{\epsilon} \right)^{1/4} \quad (28)$$

$$v = (\nu \epsilon)^{1/4} \quad (29)$$

$$\lambda = \left( \frac{30 \nu}{\epsilon} \right)^{1/2} \quad (30)$$

ここで、 $\eta$  はコルモゴロフの渦のスケール、 $v$  はコルモゴロフの渦の速度スケール、 $\lambda$  は逸散スケール、 $\nu$  は水の動粘性係数である。逸散スケール ( $\lambda$ ) とコルモゴロフの渦のスケール ( $\eta$ ) は、それぞれエネルギー逸散に関する渦、最小径の渦の大きさを代表し、長さ (cm) の次元を有している。コルモゴロフの渦の速度スケール ( $v$ ) は最小渦の速度を代表し、速度 (cm/s) の次元を有している。2.2 で示した理論式の展開の中で、Dobbins, 村上, Lamout らは、長さのスケールや速度のスケールに  $\eta$  や  $v$  を用いている。

ここでは、求められた  $\epsilon$  より、 $\eta$ 、 $\lambda$  などのスケールを算定してみた。結果は付表-1 にかかげてある。いずれも、逸散スケール ( $\lambda$ ) は mm のオーダ、コルモゴロフの

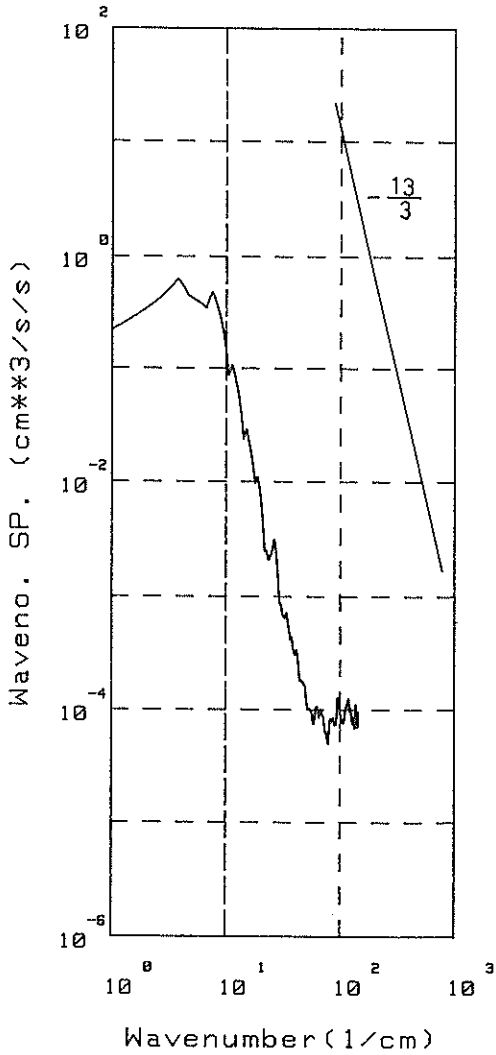


図-26 a 主流成分の波数スペクトル

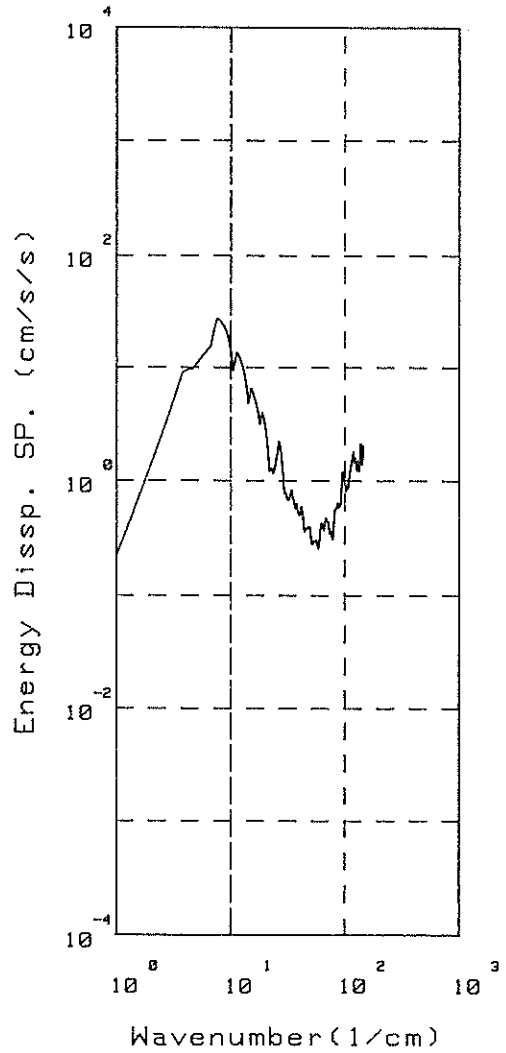


図-26 b 主流成分の逸散スペクトル

— 振とう子#22の振とう(-1~4.7 cm間で2.5 Hz)における st.3, 表層(-0.5 cm深)での測定例。高波数側はノイズが大きい —

最小渦径  $\lambda$  は 0.1 mm のオーダーとなっている。また、逸散スペクトルのピーク波数に相当する長さは mm のオーダーであった。各実験ケース内では、測定場所や水深が変わってもあまり変化していない。

乱れの強さ ( $u'$ ) と逸散スケール ( $\lambda$ ) とから作られる乱れに関するレイノルズ数を次式で算定する。

$$R_\epsilon = \frac{u' \lambda}{\nu} \quad (31)$$

回転系の乱れでは、ほとんどの測定点で  $R_\epsilon$  が 30~90 程度である。また、振とう系での乱れでは、 $\epsilon$  の算定がむずかしくなっているが、この  $R_\epsilon$  数が小さく慣性小領域が認められにくくなっているためと思われる。二次モーメント法で  $\epsilon$  を推定し  $R_\epsilon$  を見積ると、なす型振とう子では 1 のオーダーとなる。

#### 4.4 再曝気係数の測得値

##### 4.4.1 2種の溶存酸素計の比較

ここでは、Y S I社57型溶存酸素計とNester社8500型の溶存酸素計との2種の溶存酸素計を用いている。この2種は、溶存酸素濃度の測定原理がやや異なる。Y S I社のものは極くわずかながらセンサー部で酸素を消費するため、正確な濃度を測定するためにはセンサー部で常に水が交換される必要がありある程度以上の流速が必要とされている。一方、Nester社製のものは、静止に近い水中でも濃度を測定できるとされているが、センサー投入から濃度指示値が安定するまでの時間がわずかに永く、90%値まで25秒を要する。両者の性能を表-3にまとめておく。

表-3 二種の溶存酸素計の性能比較

項目	Nester社 8500型	Y S I社 57型
測定範囲(DO)	0~20 (mg/l)	0~5 (mg/l)
精 度	温度補償を含む最終精度 0.2 mg/l	±0.1 mg/l
分 解 能	最小目盛 0.1 mg/l	-
応 用 時 間	BODプローブでは90%応答まで 25秒 プローブの汚れにより遅延影響あり。	90%応答まで10秒

-: 性能の表示なし。

ここでは、再曝気係数の測定値に両者で差異を生じるか否かの確認を行なう。回転系の攪乱を与えた水槽に、2種の溶存酸素計のセンサーを臨接してセットする。酸素濃度の回復状況を記録し、3~5分毎の濃度を読みとる。式(23)に従って再曝気係数 $k_2$ を算定する。初期値と飽和濃度値は、それぞれ水槽内に初期状態、飽和状態を作り全く同様に測定する。こうして測定された再曝気係数値( $k_2$ )を比較したものが、図-27である。図中には45°の直線を示してある。 $k_2$ が $1 \times 10^{-4}/s$ までは両者に差がなく、 $k_2 = 4 \times 10^{-4}/s$ ではY S I社の溶存酸素計で10%ほど大きな値が得られている。

また、Nester社の応答時間の永さは、今回の実験の程度の濃度回復の速さでは、無視できる。ちなみに、ここで測定された $k_2$ 値を用い、濃度変化の最も速い時の変化速度を推算してみる。濃度変化は、式(1)によるから、 $C = 0 \text{ mg/l}$ の時に最も速くなる。 $C_s = 10 \text{ mg/l}$ 、 $k_2 = 1 \times 10^{-4} / s$  などとして変化速度を見積もる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} \Big|_{C=0} = k_2 \cdot C_s = 1 \times 10^{-3} \text{ mg/l/s} \quad (32)$$

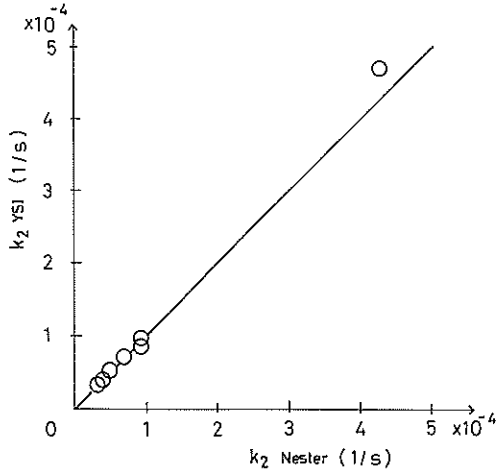


図-27 二種の溶存酸素濃度計より得られた再曝気係数( $k_2$ )値の比較

となり、25秒間では濃度が $0.02 \sim 0.03 \text{ mg/l}$ 程度上昇する。分解能( $0.1 \text{ mg/l}$ )や精度( $0.2 \text{ mg/l}$ )に比して十分小さい。 $k_2$ が $4 \times 10^{-4}/s$ まで大きくなると、分解能程度の濃度上昇が最初の25秒間で生起することになる。しかし、①水中に予め置かれたセンサーの水中濃度変化への追従は空中より投入した場合の安定時間よりも速いこと。② $k_2$ の算定には、飽和濃度と溶解濃度との差の対数が用いられ、飽和濃度に対して分解能( $0.1 \text{ mg/l}$ )は1%程度と小さいこと、などから $k_2$ 値の算定への影響はほとんどない。図-27で、 $k_2$ が $4 \times 10^{-4}/s$ の場合の両者の差10%は、両者の計器の応答時間の差のみでは説明できない、同一機種を用いて $k_2$ を測定した時のばらつきについては、後述する。

##### 4.4.2 再曝気係数値

回転系、振とう系の乱れを起こした時の $k_2$ 値の測定結果を表-4に示す。表中には、二種の計器ごとに算定 $k_2$ 値を分けて載せている。同一の条件で2回測定した場合には、計4個の $k_2$ 値が得られている。Y S I社製溶存酸素計は、センサー部の不調により途中から使用を止めている。異機種間の測定値の差はないとしてよいので測定機種に拘らず、得られた値の算術平均をその乱れに対する $k_2$ 値とした。同時に2個以上の測得値があるものについては、次式で変動係数(c. v.)を求め示している。

$$c. v. = \sigma_{n-1} / \bar{x} \quad (33)$$

ここで $\sigma_{n-1}$ は測得値の標準偏差、 $\bar{x}$ は測得値の算術平均。変動係数はほぼ5%前後となっているが、なす型の振とうによる乱れ発生ケースのみで10%を越えており、ばら

表-4 再曝気係数 ( $k_2$ ) の測定結果と酸素移動係数 ( $K_L$ )

攪乱方式 実験番号	発生子	位置 (d) (cm)	回転数又は 振とう周波数 (r.p.m.)/(Hz)	再曝気係数 ( $k_2$ ) (1/s)				酸素移動係数 ( $K_L$ ) (cm/s)	
				Nester 社 8500 型	Y S I 社 57 型	平均	変動係数 (e.v.)	見かけの値	正味の値 (静止水との差)
回転			r.p.m.	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$		(%)	$\times 10^{-4}$	$\times 10^{-4}$
100	なし	静止水	—	—	0.06, 0.06, 0.06	0.06	(0)	1.9	—
105	# 10	- 28	220	4.2	4.7	4.5	(8)	138.	136.
111	# 11	- 28	90	0.34, 0.33	0.33, 0.35,	0.34	(3)	10.5	8.6
112			120	0.40, 0.37	0.40, 0.42,	0.40	(5)	12.3	10.4
113			150	0.52, 0.48	0.49, 0.59,	0.52	(10)	16.1	14.2
114			180	1.2	—	1.2	—	37.2	35.3
121	# 12	- 28	90	1.18, 1.10	—	1.14	(5)	35.3	33.4
122		- 15	90	1.06, 1.03	—	1.05	(2)	32.4	30.5
123		- 2	90	1.79, 1.73	—	1.76	(2)	54.6	52.7
131	# 13	- 28	90	1.59, 1.79	—	1.69	(8)	52.4	50.5
132		- 3	90	2.20	—	2.20	—	68.2	66.3
141	# 14	- 28	90	2.65, 2.55, 2.49	—	2.56	(3)	79.5	77.6
151	# 15	- 2	90	0.91, 0.95	0.86	0.91	(5)	28.1	26.2
振とう			Hz						
200	なし	静止水	—	0.021, 0.070, 0.055	—	0.05	(52)	1.5	—
211	# 21	- 1 ~ - 4.6	0.5	0.065	—	0.065	—	2.0	0.5
212			1.0	0.13,	—	0.13	—	4.0	2.5
213			1.25	0.18, 0.13	—	0.15	—	4.8	3.3
214			2.0	0.27, 0.23	—	0.25	(11)	7.8	6.3
215			2.22	0.45	—	0.45	—	14.0	12.5
216			2.5	0.31, 0.39, 0.31, 0.29	—	0.33	(14)	10.1	8.6
217			2.86	0.48	—	0.48	—	14.9	13.4
221	# 22	- 1 ~ - 4.7	1.	0.31, 0.27	—	0.29	(10)	9.0	7.5
222			2.	0.56, 0.54	—	0.55	(3)	17.1	15.6
223			2.5	0.72, 0.68	—	0.70	(4)	21.7	20.2

つきがやや大きいことがわかる。 $k_2$  の比較に際して 5 ~ 10% 程度の誤差を考慮しておく必要がある。

再曝気係数  $k_2$  が、回転数や振とう数に対しどう変化するか見てみる。同一回転子に対しプロットすると図-28a のようになる。同一振とう子に対しプロットすると図-28b となる。回転数や振とう回数が増加し、水槽へ投入した時間あたりのエネルギー量が増大するにつれ、 $k_2$  値が上昇することが明瞭である。

また、人為的な乱れを全く与えずに静止させた状態で測定した  $k_2$  値も  $0.05 \times 10^{-4} \sim 0.06 \times 10^{-4}$  (1/s) 程度となっている。これは、恒温室内に伝わる外部からの振動やわずかの空気のゆれなど環境に起因する攪乱が原因であると思われる。この値に比して、測得  $k_2$  値が近い値となる実験ケースでは、人為的な乱れと環境の変動等に起因する乱れとの分離がむずかしい。振とう系の実験のうち、周波数 0.5 ~ 1 Hz (周期 1 ~ 2 秒) といったゆっくりした振とうでは、静置時と似た小さな  $k_2$  値となっている。1 Hz 以下の振とうではほとんど曝気的作用が見られないことがわかる。

式(2)より、移動係数  $K_L$  値の算定には、水の表面積  $A$  と

体積  $V$  とを知る必要がある。 $V$  は、実験のつど一定量 (29.8 l) を用いている。 $A$  は水表面形の凹凸の影響と、回転系攪乱時の外縁でのせりあがったなべ底形の影響とを考慮する必要がある。そこで、水面の変動が  $A$  値に及ぼす変化の大きさを考えてみる。

振とう系での乱れ生起時には、振とう周期が短くなるにつれ水表面の波高が高くなり、周期 0.4 秒では、8mm 程度に達する。波は重複波の様相が強くなり、波高は不安定であるが、最も波高が高い場所で 16mm 程度である。また、目視観測によれば、波の峯部は水槽内に環状に数ヶ所作られる。峯と峯との半径の差 (距離) はおおむね 5 ~ 8 cm 程度である。そこで、水面形を底辺 5 cm、高さ 16mm の直角三角形の組み合わせで近似し、斜辺と底辺との比を計算してみる。斜辺の方が底辺に比して 5% 程度長くなる。従って、ここでの振とう系の攪乱では、静水時に比して表面積が高々 5% ほど増加すると考えてよく、 $k_2$  値の測定上のばらつきよりやや小さいことがわかる。

回転系での乱れ生起時には、波だちによる水位変動はほぼ 1 mm 以下であるが、水面が放物線に近いなべ底形を抽く。水槽壁近傍では、回転の中心に比べて 1.5 cm ~ 2 cm

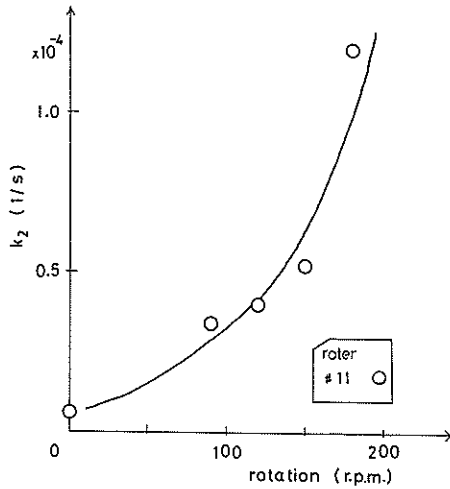


図-28 a 回転数の増加による再曝気係数 ( $k_2$ ) の変化  
 — 回転子#11の回転(水深28cm位置で90~220 r.p.m.)での測定例。回転数0には静止水での測定値を示してある。—

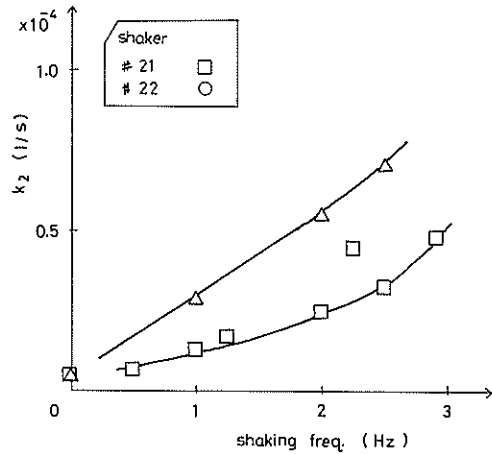


図-28 b 振とう数の増加による再曝気係数 ( $k_2$ ) の変化  
 — 振とう子#21の振とう(-1~-4.7 cm, 0.5~2.9 Hz)および#22の振とう(-1~-4.6 cm, 1~2.5 Hz)での測定例。振とう周波数0には静止水での測定値を示してある。

程度の水位上昇がみられる。水槽の半径を17.5 cm, 中心と壁部との水位差を2 cmとすると, 放物線  $y = ax^2$  の曲率  $a$  は  $7 \times 10^{-3}$  程度となる。この放物線を水面形と考え, 水面の延長と水槽半径との比を求める。水面が半径よりも3%程度長くなる。水位差が2.5 cm, 3 cm となると, 13%, 24%ずつ水表面積が静止時表面積より長くなる。ここでの回転系の流れでは, 回転子径が水槽径より短いことや壁と水との摩擦の作用などから, 水位差が2 cm以上になることはなかった。水面形が放物型になることによる水表面積の増加は, やはり  $k_2$  値の測定上のばらつきよりやや小さいことがわかる。

そこで, ここでは,  $A$  として静止水時の水表面積を採り,  $A/V$  の値として水深31 cmを用いて  $k_2$  値より  $K_L$  値を算定することとした。算定した  $K_L$  値を表-4 にかかげてある。 $K_L$  値も5~10%程度のばらつきを有し, 乱れが強い状況下では, 5%前後過大となっている可能性がある。さらに, 静止水で得られた  $K_L$  値を差し引き, 与えた攪乱による正味の  $K_L$  値も表中にかかげてある。 $K_L$  値は, すべて18°Cでの値に次式で換算してある。

$$K_L = K_L(T) \cdot \theta^{(18-T)} \quad (34)$$

ここで,  $T$  は実験した水温(°C),  $\theta$  は温度変化に関する係数(1.024)<sup>1)</sup>である。水温は, 16~20°Cの範囲内であった。

## 5. 水理量と酸素移動係数との関係

### 5.1 水理量の代表値

既に4.1~4.3に示したように, 水槽内の水理量は,  $\bar{U}, \bar{V}, u', v', \varepsilon$  のいずれも平面分布, 鉛直分布を有する。表層-0.5 cmから深さ-2 cm程度までは鉛直方向には大きな差異はないが, 半径方向には中心と外壁とで差が大きい。酸素移動係数( $K_L$ )もしくは再曝気係数( $k_2$ )と, 水表面付近での水理量との関係を検討する際には, 表面付近の何らかの代表値が必要となる。しかし, 平面分布における  $\bar{U}, u'$  などの分布形については, 回転子や振とう子の形状, などによって少しずつ変化し, 統一的に理解するに至っていない。代表値が備え持つべき要件は, ①曝気の機構に関連が深く  $K_L$  値と結びつきが大きいこと, ②水槽内の乱れについてその様子を示しており, 水槽内の極めて特異な現象や地点の値ではないこと, ③実験で生じた  $K_L$  の差をもたらず水理量の変化や差異がはっきり把握できること, などであろう。平面分布がある場合, 分布の平均値もしくは, 分布の中の1地点の値, などが代表値として考えられる。

平均値をもって代表させる場合を考える。具備要件の①から, 測得値を水表面積の重みをつけて平均化する方法が考えられる。この際,  $K_L$  値との関係性が推定できていれば, 測得水理量のべき乗値の重みつき平均を用いる

こととなる。しかし、 $K_L$  値と水量との関係が不明でべき乗の指数値が不詳である時は、いくつかの指数値について平均値を求め比較するなどの必要が生じ、解析が複雑になりすぎる。そこで、ここでは1点の値で代表させることを考える。②の要件から中心付近と壁付近との地点を除外し、③の要件から $\bar{U}$ や $u'$ が最も大きくなり様相の差が強く表われる地点を選ぶこととする。中心と外壁とのほぼ中間に位置し、 $\bar{U}$ などの最大値が得られたst.3の値を代表値として用いることにする。 $\bar{U}$ などの最大地点は $K_L$  もかなり大きいと予想され、酸素移動に重要な役割を果たしている地点でもある。

st.3での値と、面積で重みをつけた平均値との差異を回転子#10の例で見ている。面積で重みをつける方法を示す。今、ある水量 $P_i$ ;とそれが代表する面積 $a_i$ ;とが $i=1$ から $N$ までの $N$ 個測定されたとする。面積の重み付きの平均値を次式で定義する。

$$A = \sum_{i=1}^N a_i \quad (35)$$

$$P = \left( \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N P_i^n \cdot a_i \right)^{1/n} \quad (36)$$

ここで、 $m$ は水量 $P$ にかかる指数。  
 $m=0.5, 1, 2, 3$  に対する平均値を、 $\bar{U}, u', \varepsilon$  についていくつかの実験例で比較すると、表-5のようになる。st.3での測定値は、重みつき平均値より大きな値となっている。平均値に対するst.3の値の比は、 $m$ の値によっても変化し、 $\bar{U}$ に対しては2割増、 $u'$ では1~2割増、 $\varepsilon$ では2~4割増となっている。

## 5.2. 平均流速と酸素移動係数との関係

4.1で表層の平均流速( $\bar{U}$ )が測定されかつ4.4で $K_L$ 値が求まっている実験ケースについて両者をプロットすると図-29のようになる。図中左上部には、傾き1の勾配を示してある。振とう系、スライド回転系、その他の

回転子による回転系の3グループにプロット点がわかれている。各グループ内での指数回帰式による相関係数は0.95を越え、同一直線上によくのっている。回転子#11(スライド)のグループでは傾き1.0、その他の回転子のグループでは傾き1.3、振とう子グループでは傾き0.75となる。しかし、異なるグループ間では、同じ $\bar{U}$ 値に対しても違う $K_L$ 値となる。 $\bar{U}$ は、乱れの強さを表す指標として $K_L$ と深い関係が生じているが、異なる方法で起こした流れの場での乱れの構造の差異までは表示していないものと解釈できる。

## 5.3 乱れの強さと酸素移動係数との関係

$u'$ に対し $K_L$ をプロットすると図-30のようになる。鉛直方向の乱れ $v'$ に対しては、図-31のようになる。両図とも、プロットの点はばらついているが、乱れの与え方によるグループ別けは生じていない。 $\bar{U}$ との対応図よりもより統一的に $K_L$ 値を説明しているように思われる。既に4.4で述べたように、 $k_2$ 値の小さい範囲では、与えた乱れに起因する正味の $k_2$ 値は、誤差が大きい。そのため図中の左下のプロット点の位置は、誤差を含んでいる。

図中のプロット点の傾きは、Levich<sup>14)</sup>の示した1.5乗、平山ら<sup>16)</sup>の1.25乗よりもやや緩く、0.9~1乗程度となっている。データ数n17での指数回帰式を以下に示す。

$$K_L = 9.83 \times 10^{-4} \cdot u'^{0.980} \quad (r = .905) \quad (37)$$

$$K_L = 15.11 \times 10^{-4} \cdot v'^{0.897} \quad (r = .901) \quad (38)$$

表-5で見てきたように、面積で重みをつけた平均値とst.3での測定値とは、 $u'$ に関し1.2倍程度の差がある。 $\varepsilon$ に関しては、1.2~1.5倍とややばらつく。 $K_L$ と $u', v'$ との関係について、べき乗の指数に関しては図-30, 31の指数回帰式からほぼ推定できるものの、比例定数に関しては更に検討を要する。st.3での $u'$ が、水槽表面の平

表-5 水面積で重みをつけた表層(-0.5 cm深) 水量の平均値と、st.3での測定値 (mは、平均の際に水量にかかる指数)

水 理 量 m	ケース番号 (r.p.m.)	$\bar{U}$ (cm / s)				$u'$ (cm / s)				$\varepsilon$ (cm <sup>2</sup> / s <sup>3</sup> )			
		101 (90)	102 (120)	103 (150)	223	101 (90)	102 (120)	103 (150)	223	101 (90)	102 (120)	103 (150)	223
0.5		24.9	33.9	44.2	3.46	2.7	3.5	4.4	1.4	5.9	21.0	—	—
1		25.0	34.1	44.5	3.54	2.7	3.5	4.4	1.5	6.1	22.0	—	—
2		25.3	34.5	45.0	3.68	2.7	3.6	4.5	1.6	6.2	23.4	—	—
3		25.5	34.8	45.5	3.80	2.7	3.6	4.5	1.7	6.3	24.3	—	—
st.3の値		30.3	41.5	54.6	4.23	2.9	4.2	5.3	2.2	7.1	32.4	—	17

—は、一部欠測のため算定不能を示す。



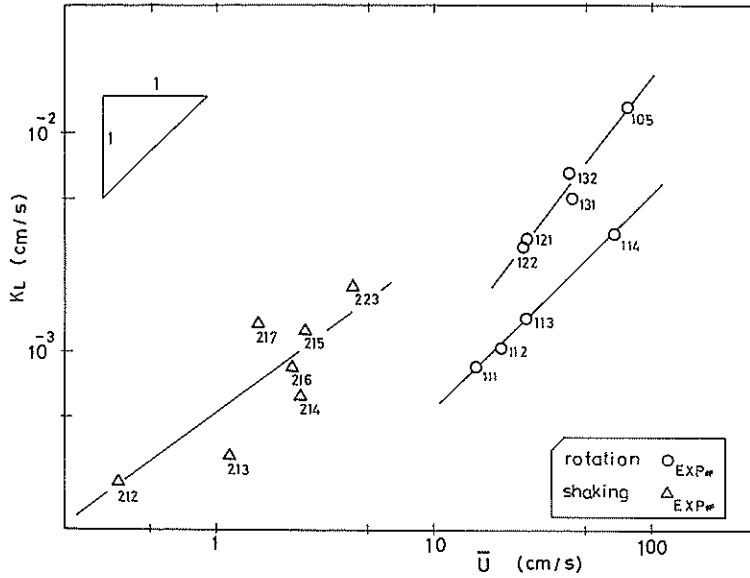


図-29 st.3, 表層での平均流速 ( $\bar{U}$ ) と酸素移動係数 ( $K_L$ ) との比較  
 — 白丸は回転系, 三角は振とう系攪乱を示す。(図中の数字は実験番号) —

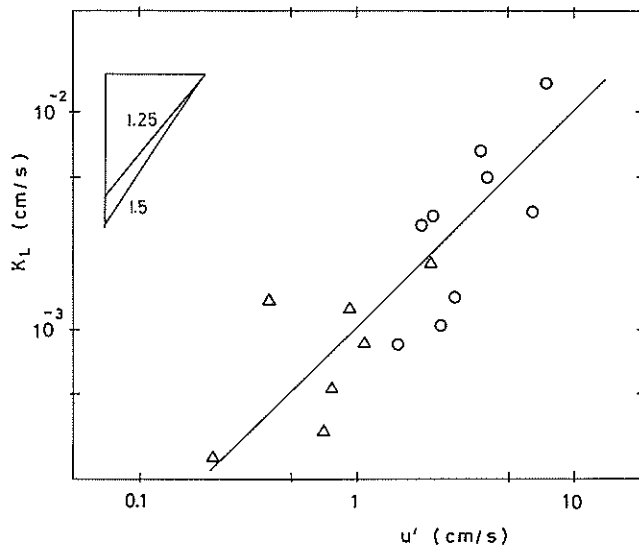


図-30 st.3, 表層での主流方向の乱れ強さ ( $u'$ ) と酸素移動係数 ( $K_L$ ) との比較  
 — 白丸は回転系, 三角は振とう系攪乱。図中の直線は指数回帰直線。 —

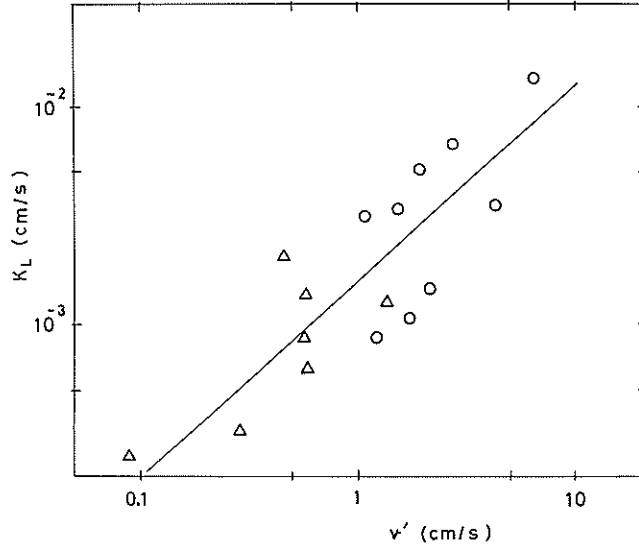


図-31 st.3, 表層での鉛直方向の乱れ強さ( $v'$ )と酸素移動係数( $K_L$ )との比較  
— 白丸は回転系, 三角は振とう系攪乱。図中の直線は指数回帰直線。—

均的  $u'$  の 1.2 倍であるなら, 回帰式で得られた定数値を (1.2)<sup>10</sup> で除せば水槽表面の平均的  $u'$  に対する  $K_L$  算定式となる。海域では, 回転流や微小振幅の均一乱れ場などは一般的でなく,  $K_L$  予測式の検討のためには二次元水路を用いた実験などによる確認が必要である。

#### 5.4 エネルギー逸散率と酸素移動係数との関係

振とう系のエネルギー逸散率  $\epsilon$  は, 見積もりが難しく, メッシュ振とうについて 1 ケースのみ算定されている。この値と, 回転系での  $\epsilon$  値とを用い,  $K_L$  との対応をプロットすると図-32 のようになる。点はばらつくが,  $\epsilon$  の増加につれ  $K_L$  が増大していることがわかる。データ数 9 に対して, 次の指数回帰式を得る。

$$K_L = 9.82 \times 10^{-4} \cdot \epsilon^{0.386} \quad (r = .606) \quad (39)$$

$\epsilon$  の指数値 0.386 は, 平山ら<sup>10)</sup>の類似の実験よりもやや大きい。村上<sup>12)</sup> Dobbins<sup>11)</sup> がそれぞれ半理論的に示した 3/8 乗 (0.375 乗) に近い値となっている。

#### 5.5 水理量と再曝気係数との関係

水理量として, 水槽半径の中点付近の表層 (-0.5 cm 深) での測定値を乱れの代表値とした。この時,  $\bar{U}$ ,  $u'$ ,  $v'$ ,  $\epsilon$  と,  $K_L$  との対応を対数グラフ用紙上にプロットして回帰分析を試みた。 $\bar{U}$  と  $K_L$  との関係は, 類似の乱れの間では極めて良い相関を示すが, 攪乱の与え方が異なると同じ  $\bar{U}$  値でも違う  $K_L$  値を示すことがある。 $u'$ ,  $v'$  は

攪乱の与え方が異なっても,  $K_L$  値をより統一的に説明できている。 $\epsilon$  は, 振とう系での乱れで測定がむずかしく, 回転系での乱れに対してもまだばらつきが大きい。 $K_L$  もしくは  $k_2$  を,  $u'$ ,  $v'$ ,  $\epsilon$  の指数関数で表わした時, 各関係の指数には次のような値が最も適していた。

$$\begin{aligned} k_2 &\sim (u')^{1.0} \\ k_2 &\sim (v')^{0.9} \\ k_2 &\sim (\epsilon)^{0.4} \end{aligned}$$

乱れ強さ ( $u'$ ,  $v'$ ) が  $K_L$  と強い結びつきがあったことの原因を考えてみる。 $u'$ ,  $v'$  は, 20 秒程度の流速記録の平均値を求め, 各時刻の流速値から平均値を差し引いて求めた変動成分の二乗と平均の平方根である。流速値は移動平均操作をほどこしていない。従って, ゆっくりした変化から高周波の変化までを含んだ変動の大きさを示している。振とう系の実験ケースでは, 周期 2 秒のゆっくりした変化での測定も含んでいる。永い周期の実験では,  $K_L$  値は極めて小さいが, そこで測定された  $u'$ ,  $v'$  と  $K_L$  との関係は, 回帰式上に分布し他の周期での値と類似の  $K_L$  との関係となっている。永い周期での値も短い周期での値も同一の式に載ってくることは, 同じ機構が作用していると考えられる。永い周期の大きな渦が徐々に小さな渦にエネルギーを転移してゆく機構も含めて, かなり広い範囲の周期の乱れが曝気に関与しているものと思わ

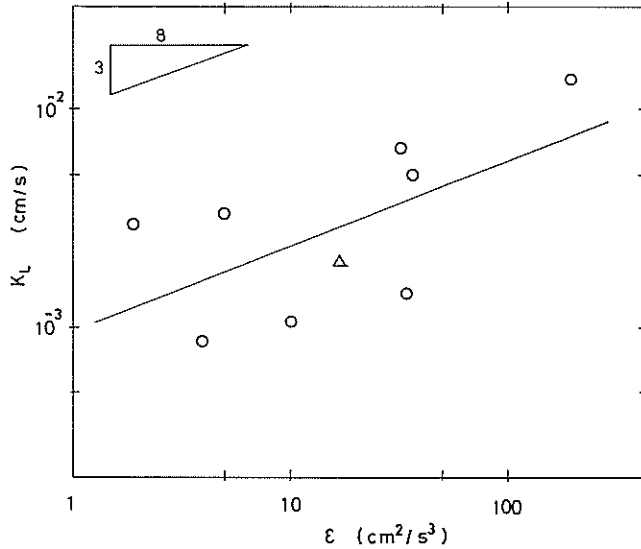


図-32 st.3, 表層でのエネルギー逸散率( $\epsilon$ )と酸素移動係数( $K_L$ )との比較  
 — 白丸は回転系, 三角は振とう系攪乱。図中の直線は指数回帰直線。—

れる。ただし、渦がスケールをカスケードダウンさせているので、大きな渦そのものが曝気を生じさせているのか、大きな渦から生成された小さな渦が曝気を生じさせているのか、ここでは区別できない。

一方、 $\epsilon$ と $K_L$ との関係がばらつくことの理由も考えてみる。 $\epsilon$ の算定は、もっぱら高波数での粘性逸散に起因するスペクトル上の位置から行なっている。従って、比較的小さな渦の作用と $K_L$ とを結びつけようとしたものである。 $\epsilon$ と $K_L$ との関係がばらついたのは、小さな渦の作用のみが曝気を生じさせるものではないという可能性を示している。しかし、 $\epsilon$ の算定そのものが誤差を生じやすいものであり、サンプリング周波数や水槽内の $\epsilon$ の分布( $\epsilon$ の代表性)についても更に詳細な検討を行う必要がある。 $\epsilon$ の算定の誤差に起因して、 $K_L$ との関係がばらついている可能性も否定できない。

平山ら<sup>16)</sup>が試みているような、曝気に寄与する効果的な渦のスケールについては、今回の実験からは判断できない。 $k_2$ や $K_L$ 値を予測する水理量としては、測定が比較的容易で安定しておりかつ $K_L$ 値とも結びつきの強い $w'$ 、 $v'$ が妥当な指標である。ただし、 $w'$ 、 $v'$ からは乱れの構造や周波数組成などをうかがい知ることはできない。曝気を直接になっている渦径の検討のためには、特定の高周波数乱れのみを与える装置などの工夫が必要であろう。

## 6. 二種の攪乱生起機構の共存下での再曝気係数

### 6.1 実験方法

あまり広がりを持たない振とう子を用い、水面近くでゆっくり振とうさせると、水槽内には平均流として測定される定常的な流れがほとんど作られない。また、振とう周波数が小さいと、 $k_2$ 値はきわめて小さいことが3での実験から示された。ここでは、水槽内にある程度の流れが既に存在する時に、振とう子をゆっくり振とうさせた場合の $k_2$ 値の測定を試みる。

4.1において、振とう子を振とうさせたケースでの平均流速は、水面下-0.5 cmで0.5~4 cm/sと測定されている。溶存酸素計で、水槽内の溶存酸素濃度の均一性を確認しているものの、誘起流速は小さい。もし、水槽内の混合が不十分であると、①境膜の厚さが厚くなり溶存酸素濃度測定点が膜内に入ってしまった、②水塊本体中での拡散が弱く、与えている振とう乱れ以外の要因(水塊本体中の偶発的な揺動など)によって更新率 $\tau$ が大きく左右される、などの可能性が全くない訳ではないと思われる。一般には、境膜中でのガスの移動は水塊中での移動に比べてきわめて小さく、それ故境膜中でのガスの移動がガスの溶解の律則となっている。表-4に示した静水時の $k_2$   $0.06 \times 10^{-4}$  / s ( $K_L = 2 \times 10^{-4}$  cm/s)に

対し、酸素の分子拡散係数  $2.4 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}^{(4)}$  (20 °C) を与えて式3)より膜厚  $L$  を求めると、約 1.3mm程度となる。静水時ですら、この程度のオーダーの薄さであり、静水に波高数mmの表面波動を与えたときの水粒子の運動は、 $r$  を与える主たる要因たり得ると理解できる。ここでは、上記の②の可能性について、水塊本体中に流れを与えた条件下での  $k_2$  値から検討し、4.4 で得られた振とう周波数の低いケースでの  $k_2$  値が妥当なものであるかどうか検討する。

実験装置は、3.1 に示したのと同じ水槽を2台用いている。1台は、スライド型回転子を用い回転系での乱れを作る。残りの1台は、同型回転子を用い回転系での乱れを作り、更になす型振とう子を用い振とう系での攪乱を加えている。回転子の回転軸は、水槽の中心に据えてある。振とう子は、水槽の中心から3cm離して設置してあるため、作られた波は点対称には分布していない。振とう系の攪乱のみを与える水槽は用意されていない。

測定は、水位変動、水平方向平均流速、溶存酸素濃度の3項目について実施している。水位計はよく洗浄した容量式波高計を、流速計は電磁流速計を毎回検定後用いている。乱れについては測定していない。溶存酸素計はY S I社57型を利用している。水位は、振とう系乱れが与えられている水槽の中心から、半径方向へ4cm, 9cm, 13.5cm離れた場所で測定されている。流速は、中心から9cm離れた水深-3cmの位置で測定されている。溶存酸素計センサーの設置位置は、水深-10cmの水槽内壁近くである。

実験は、回転子の回転数3ケース(90, 120, 150 r.p.m.) に対し、振とう周波数2ケース(1, 2Hz)の計6ケース

について行なった。実験手順は、3.2 に記述してあるものとはほぼ同じである。

## 6.2 実験結果

水位変動は、振とう周期の1/2の周期が顕著である。2Hzの場合水槽外縁近くで2mm弱、水槽半径の中間で1mm強の変動幅を示している。計測器の性能上、水位変動の追従性が悪く、mm単位の水位変動では測定精度が良くない。

主流方向の平均流速の測定値を表-6に示す。電磁流速計は水質を選ばず広く使用できるが、純水では電導性が低いため、不安定となりやすいようである。表-6にはcm/sまでの、2桁の値に丸めた結果を示してある。また、4.1で、同じ条件下の乱れに対しホットフィルム流速計を用いて計測した値を、表-6の中にカッコ書きで示してある。電磁流速計との同時測定ではないが、ほぼ同じ条件ではホットフィルム流速計に比して電磁流速計の方が2割ほど大きな値となっている。

表を見ると、平均流速は回転系攪乱のみのケースに近い値であり、二種の攪乱を共存させても平均流速は回転系の攪乱の与え方に大きく左右されていることがわかる。振とう系の攪乱は平均流を作るに大きな寄与はしていない。しかし、同じ回転系攪乱でも、振とう系攪乱が重なると平均流は2~5割増加する。90および120 r.p.m.の回転乱れに対しては、振とう周波数1~2Hzの差はほとんどない。150 r.p.m.になると流れが速くなり、振とう周波数が大きい方が流速が大きくなっている。振とう系攪乱を重ねた時の流速の増加量は、振とう系攪乱のみの時の流速値よりも大きい、特に回転数が高く流速が速い場に振とう系攪乱を重ねると、振とう系攪乱のみ

表-6 回転系攪乱と振とう系攪乱の共存時の平均流速と再曝気係数

外壁より8cm水深-3cmでの平均主流流速  
(単位: cm/s)

振とう子 周波数 回転子 回転数	振とう子 周波数		
	0Hz	1Hz	2Hz
0 r.p.m.	0	(0.5)	(2)
90 r.p.m.	19 (16)	23	23
120 r.p.m.	27 (21)	32	32
150 r.p.m.	30 (26)	39	45

水深-5cmでのDO変化から算定した  $k_2$  値  
(単位: 1/s)

振とう子 周波数 回転子 回転数	振とう子 周波数		
	0Hz	1Hz	2Hz
0 r.p.m.	(0.06)	(0.13)	(0.25)
90 r.p.m.	0.34	0.43	0.48
120 r.p.m.	0.41	0.53	0.62
150 r.p.m.	0.54	0.70	0.87

( )はホットフィルム流速計による測定値

での流速値 (0.5~2 cm/s) の 7~20倍といった大きな流速がみられる。

溶存酸素計の経時変化から再曝気係数 ( $k_2$ ) を算定し同じく表-6にまとめた。4.4の実験で求められた  $k_2$  値もカッコ内に示してある。二種の攪乱を重ねると、単独に与えたケースよりも  $k_2$  値が増加する。水塊に与えられるエネルギーが増加しているためである。二種の攪乱を重ねた右下の6ケースと、上段もしくは左端の単独乱れの6ケースとを比較する。二種の攪乱の重ね合わさったケースの  $k_2$  値は、対応する回転系攪乱のみ与えた時の  $k_2$  値と振とう系攪乱のみ与えた時の  $k_2$  値の和に近い値となっており、平均流速で見られたような著しい重ね合わせ効果は見られない。

### 6.3 解析

$k_2$  値に水深 (31 cm) を乗ずると温度未補正の  $K_L$  値が概算される。平均流速を  $\bar{v}$  とみなし、図-29上にプロットすると、この実験値は右下の回帰直線の近くにおちる。曝気構造が回転系攪乱による場と似ていることを示唆している。

回転系での乱れ場に振とう攪乱が作用すると、振とうがない時より  $k_2$  が増大する。二種の乱れの共存時の  $k_2$  値から、回転系攪乱のみ与えた時の  $k_2$  値を差し引いて、振とう系攪乱があることによる  $k_2$  の増加分 ( $\Delta k_2$ ) をプロットすると図-33のようになる。図は、横軸に回転系

乱れの回転数をとっており横軸を右に進むと水槽内流速が速くなっていることになる。回転数90 r.p.m.では、表-6によれば流速は20 cm/s 以上あり、振とうのみ与えた時の流速 (0.5~2 cm/s) よりも1オーダー大きい。横軸で回転数0の位置には、振とう攪乱のみを与えた時の測得  $k_2$  値と静水での測得  $k_2$  値との差をプロットしてある。

図-33を詳しく見ると、回転数が増加するにつれて、 $\Delta k_2$  値が大きくなる傾向がうかがえる。流速が20 cm/s から40 cm/s と大きくなるにつれ、同じ振とうを与えても、 $k_2$  への寄与が大きくなっていると判断される。このカーブを左へ外挿すれば、流速が極めて小さい場での振とうによる  $k_2$  値の増分が見積もれる。振とう周波数2 Hzに対して  $\Delta k_2 = 0.12 \times 10^{-4}$  (1/s)、1 Hzに対して  $\Delta k_2 = 0.08 \times 10^{-4}$  (1/s) と読みとれる。この値は、振とうのみ与えて実測した  $k_2$  値から静水の  $k_2$  値を差し引いた値 ( $0.20 \times 10^{-4}$ ,  $0.08 \times 10^{-4}$ ) の0.6~1.0倍となっている。振とうのみを与えて測定した  $k_2$  値は、水塊内での誘起流速が小さくまた静水時  $k_2$  に近い  $k_2$  値の場合、やや高めの値となる可能性があることになる。乱れの小さな場へ混入する外乱は、充分乱れている場へ混入する場合に比べて、 $k_2$  へ大きく影響するためと思われる。

また、図-33でカーブを右へ外挿すると流速がもっと速い場での  $k_2$  の変化が予想される。流速が速くなると振

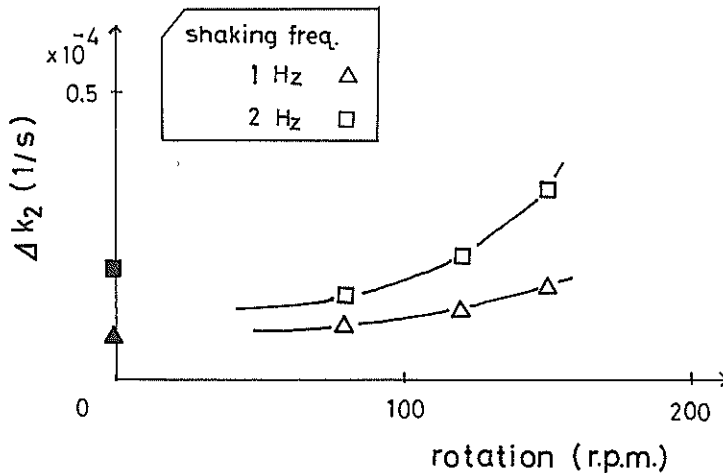


図-33 振とう系攪乱を加えたことによる再曝気係数の増分 ( $\Delta k_2$ ) と回転子回転数との関係

— パラメーターは、振とう周波数 ( $F$ )。三角形は振とう周波数1 Hz、四角形は2 Hzでの増分を示す。回転数0の位置に、振とうのみを作用させた時の  $k_2$  値と静止水の  $k_2$  値との差をプロットしてある。—

とう攪乱を加えた効果がより大きくなると推定される。また、振とう周波数を大きくするとカーブが上方へ移り、やはり振とう攪乱を重ねた効果が著しくなると推定される。乱れの測定を実施していないので、 $k_2$  値の増大の機構については検討できない。スペクトル形の形状の変化の可能性もある。風波の発達時の曝気現象など、流水へじょう乱を加えた際の  $k_2$  の見積りには、こうした点への考慮も必要であろう。

以上の解析結果をまとめると次のようになる。 $k_2$  の測得値が静水時の値に近い静穏な水の場合、外乱による  $k_2$  の過大評価の恐れがあり、今回の実験例では1~1.5倍程度の値となる可能性がわかった。また、水表面があまり波立たない流れを起こした時、流れのある場に加えられた水表面の攪乱は、流れのない場に加えられた同じ攪乱よりも曝気を大きく促進する。この効果は、流速が大きく乱れの周波数が高いほど大きいようである。

## 7. ま と め

水表面付近の乱れと再曝気係数との関係を検討するために、水槽実験を実施した。再曝気係数 ( $k_2$ ) もしくは酸素移動係数 ( $K_L$ ) は、水表面付近の主流平均流速 ( $\bar{U}$ )、乱れ強さ ( $u', v'$ )、乱れによるエネルギー逸散率  $\epsilon$  が大きくなるにつれ、大きな値となることを確認した。主流流速に関しては、攪乱の与え方が異なると同じ平均流速値でも異なる再曝気係数となる場合がある。類似の攪乱相互間の比較には都合が良いが、異なる構造の乱れとの比較には注意を要する。乱れ強さと再曝気係数との関係は、異なる攪乱の与え方であっても両対数グラフ用紙にプロットするとほぼ1つの直線に載っている。この直線から傾きを読むと、 $k_2$  は  $u'$  の1.0乗、 $v'$  の0.9乗に比例していると推定される。この傾きは従来の実験値や理論値に比べるとやや小さい。また、エネルギー逸散率をスペクトルの慣性小領域などから算定し再曝気係数との関係を検討してみた。振とう系攪乱では、乱れの周期性が強く、エネルギー逸散が急激に生じているため、エネルギー逸散率の推定が困難である例が多かった。回転系の攪乱を中心に限られた実験ケースについて検討した結果、 $k_2$  は  $\epsilon$  の0.39乗に比例する関係がうかがえた。エネルギー逸散率にかかる指数0.39は、従来理論的に云われていた  $3/8$  (0.375) に近いが、消波・砕波による再曝気係数の測定を試みた水路実験での値 (約0.5) より小さな値となった。小水槽内での再曝気係数は、表層の  $u'$ 、 $v'$  などと比較的よく予測できることがわかった。

また、流れの場に振とう攪乱を与えたところ、振とう攪乱のみを与えた場合に比べて大きな  $k_2$  値が観測され

た。今回の実験の範囲では、流れのみの場合の  $k_2$  値と振とう乱れのみ  $k_2$  値の和に近い  $k_2$  値となっている。しかし、流速が大きく、振とう周波数が大きくなると、振とう攪乱を重ね合わせることによる  $k_2$  値の増え方が、やや大きくなる傾向を見た。風波による曝気速度の水路実験において、上空の風の速度分布のみでは再曝気係数の説明がむずかしく、吹送流についての配慮も重要であることが理解できた。

今回の実験では、①再曝気係数に対してどの周波数帯もしくは波数域が大きく寄与しているのか、②再曝気係数の予測には、乱れ強さとエネルギー逸散率とのどちらが現象を良く表示しているのか、などの点については依然不明な点が残された。

本実験の実施にあたり、当所の他研究室より機器を借りている。測定装置のうち、ホットフィルム流速計のリニアライザー、アンプ等は、当所水理研究室および海域環境研究室所有のものを借用した。データの記録・処理・解析は海域環境研究室所有のデータ処理装置 (TEAC-PS9000) 等を借用した。また、解析に際し水理研究室長鶴谷広一博士より貴重な助言をいただいた。ホットフィルム流速計の使用法について、水理研究室・海域環境研究室の皆様より助言をいただいた。ここに記して深く感謝いたします。

(1989年4月28日受付)

## 参 考 文 献

- 1) 細川恭史・加藤道康・堀江 毅；平面水槽を用いた曝気、散気管の効率比較実験、港湾技研資料 No. 437, (1982).
- 2) 細川恭史・三好英一・菊池 洽；直立消波護岸の水理特性および曝気能実験、港湾技研資料 No. 312, (1979)
- 3) 堀江 毅ら；構造物によるエアレーション効果比較模型実験、港湾技研資料 No. 573, (1987).
- 4) 細川恭史；ガストレーサーを用いた流水の再曝気係数の測定、港湾技研資料 No. 562, (1986).
- 5) 堀江 毅；海域の物質循環過程のモデル化と浄化効果の予測手法について、港湾技術研究所報告、第26巻 第4号、(1987), pp. 57~123.
- 6) Lewis, W.K. and W.C. Whitman；Principles of gas absorption, *Ind. Engrg. Chem.*, Vol. 26, No. 12, 1924, pp. 1215~1220.
- 7) Higbie, R.; The rate of absorption of a pure gas in a still liquid during short period of exposure, *Trans. A. I. Ch. E.* Vol. 31, 1935, pp. 365~389.
- 8) Danckwerts, P.V.; Significance of liquid film coefficients in gas absorption, *Ind. Engrg. Chem.*, Vol. 43, 1951, pp. 1460~1467.
- 9) Dobbins, W.E.; BOD and oxygen relationship in streams, *Jour. San. Eng. Div. Prac. A.S.C.E.* Vol. 90, No. SA 3, 1964, pp. 53~78

- 10) O'Connor, D. J. and W. E. Dobbins : Mechanism of reoeration in natural streams, *Trans. A.S.C.E.*, Vol.123, 1958, pp.641~684.
- 11) Dobbins, W. E. : BOD and oxygen relationship in streams, *Jour. San. Eng. Div., Proc. A.S.C.E.* Vol. 90, No. SA3, 1964, pp.53~78.
- 12) 村上 健 : 河川における再曝気, 第6回衛生工学討論会講演集, 1970, pp.45~52.
- 13) Lamont, J. C. and D. S. Scott : An eddy cell model of mass transfer into the surface of a turbulent liquid, *Jour. A. I. Ch. E.* Vol.16, No.4, 1970, pp.513~519.
- 14) Levich, V. G. : Physico chemical Hydrodynamics, Prentice-Hall Inc., 1962, pp.689~700.
- 15) Fortescue, G. E. and J. R. A. Pearson : On gas absorption into a turbulent liquid, *Chemical Eng. Sci.*, Vol.22, 1967, pp.1163~1176.
- 16) 平山公明, 今岡正美, 松尾友矩 : 表面ばっ気における酸素吸収, 下水道協会誌, 第17巻, 第197号, 1980, pp.21~30.
- 17) この間の事情をとりまとめたものに次の文献がある。  
Härtel, L und H. J. P. Popel : Einflw der Windgeschwindigkeit bei Wieder belü flungsvorgängen, *Wasser . Abwasser*, Nr. 129, H. 7, 1988, pp.456~464.
- 18) 加藤 始・佐野喜久雄・高松恭文 : 水中の乱流測定のための Hot - film 流速計の特性, 港湾技研資料, No.157, 1973, 21p.
- 19) 鶴谷広一 : 海域における乱れと物質輸送に与える風の効果に関する研究, 東京工業大学学位論文, 1987, pp.78~91.
- 20) 小松利光・柴田敏彦・松本泰司 : 粘性域における乱れエネルギーのスペクトルについて, 第30回水理講演会論文集, 1986, pp.523~528.
- 21) Hinze, J. O. : Turbulence, 2nd ed., McGraw-Hill, 1975.
- 22) 今本博健 : 開水路流れの乱流構造, 京都大学防災研究所年報, 第20号 A, 1977, pp.1~20.
- 23) 堀江 毅ら : 構造物によるエアレーション効果比較模型実験, 第34回海岸工学講演会論文集, 1987, pp.651~655.
- 24) 浦 勝・小松利光・松永信博 : 振動格子の乱れによる密度界面の変動特性と連行現象, 土木学会論文集, 第345号 II - 1, 1984, pp.91~99.

#### 使用記号一欄

A : 気-液の接触面積  
 A : 慣性小領域を示す式(10)の比例定数  
 A' : 粘性領域を示す式(18)の比例定数  
 a : 振とう系乱れを与える時の振とう振幅  
 a<sub>i</sub> : 区間 i の分担する水面積  
 C : 溶解酸素濃度

C<sub>s</sub> : 飽和溶解酸素濃度  
 C<sub>0</sub> : 初期溶解酸素濃度  
 c. v. : 変動係数  
 D<sub>m</sub> : 分子拡散係数  
 D\* : 無次元溶存酸素不足濃度  
 d : 乱れ発生子の設置水深  
 E(f) : 周波数スペクトル  
 F : 振とう系乱れを与える時の振とう周波数  
 f : 周波数  
 f : 式(2)での円板の摩擦係数  
 H : 河川(開水路)の平均水深  
 K<sub>L</sub> : 酸素移動係数  
 k : 波数  
 k<sub>2</sub> : 再曝気係数  
 L : 液膜の厚さ  
 l : 乱れのスケール, 式(9)において用いる。  
 M : 円板の片面によるモーメント  
 P<sub>i</sub> : 区間 i での代表水理量  
 P : 面積の重みつき平均  
 R : 回転系乱れの回転数  
 R<sub>s</sub> : 乱れの強さと逸散スケールとから作られるレイノルズ数  
 r : 表面更新率  
 r : 回転円板の半径方向の中心からの距離  
 r<sub>0</sub> : 回転円板の半径  
 S(k) : 波数スペクトル  
 S<sub>u</sub>(k), S<sub>v</sub>(k) : 主流方向の波数スペクトル  
 s : 河川の河床勾配  
 t : 時間  
 T : 水温  
 $\bar{U}$  : 河川の断面平均流速  
 $\bar{U}$  : 時間平均して求めたある測点での主流成分の平均流速  
 u(t) : 主流成分の流速  
 u'(t) : 時刻 t における u(t) と  $\bar{U}$  との差  
 u' : 主流成分の乱れ強さ  
 V : 水溶積  
 $\bar{V}$  : 時間平均して求めたある測点での鉛直成分の平均流速  
 v : コルモゴルフの渦の速度スケール  
 v' : 鉛直成分の乱れ強さ  
 y : 鉛直座標  
 ε : エネルギー逸散率  
 η : コルモゴルフの最小渦のスケール  
 λ : 逸散スケール  
 ν : 水の動粘性係数  
 π : 円周率  
 ρ : 水の単位体積あたりの質量(密度)  
 σ<sub>n-1</sub> : n 個の試料の標準偏差  
 ω : 回転の角速度

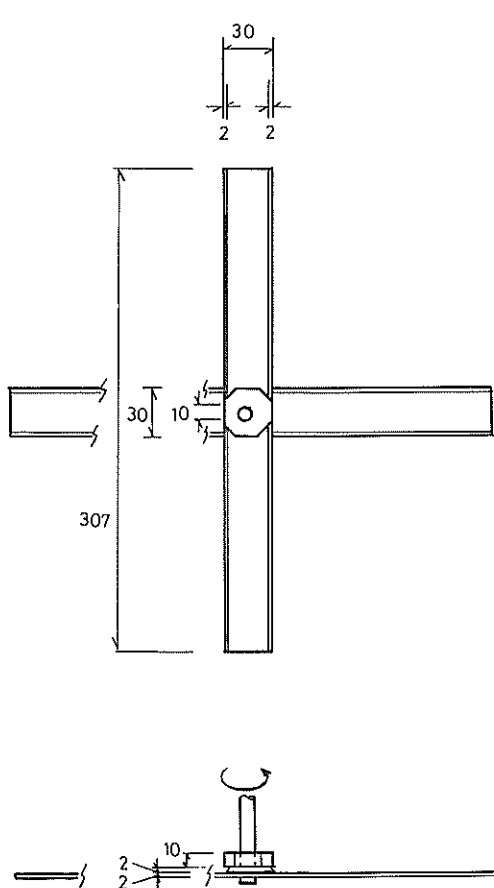
付録-A 乱れ発生子の形状

乱れを発生させるために水中に据えた乱れ発生子の形状を、付図-1に示す。回転系の乱れ発生に用いた回転子は、各形状の中心に回転軸をとりつけている。振とう系の乱れ発生に用いた振とう子は、各形状の中心に振とう用のアームをとりつけている。とりつけ部の形状も同

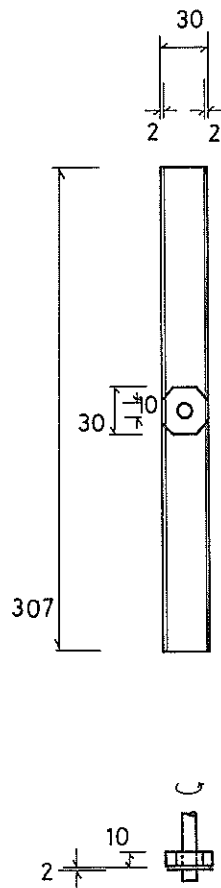
時に示してある。

付録-B 水理量の計測結果

本文4で得られた計測結果を付表-1にとりまとめて示してある。付表-1は、回転系乱れ、振とう系乱れに分かれ、それぞれ実験ごとと測定点ごとに結果を示している。

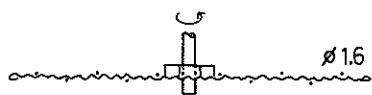
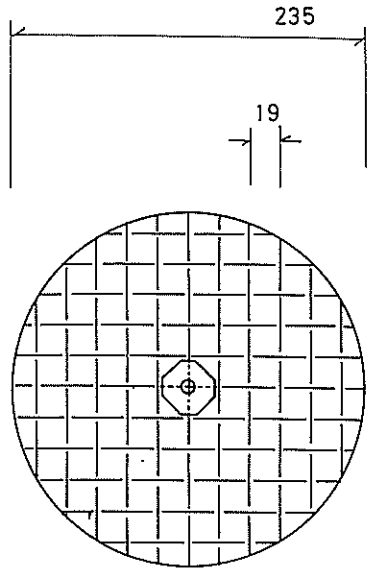


付図-1 a 乱れ発生子形状図（#10十字スライド型）（単位：mm）

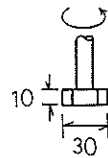
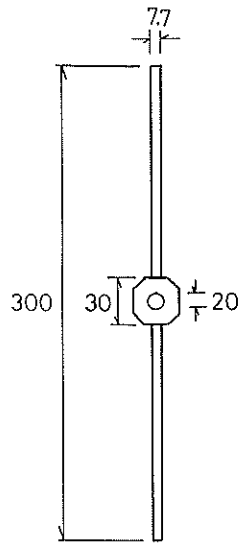


付図-1 b 乱れ発生子形状図（#11スライド型）（単位：mm）

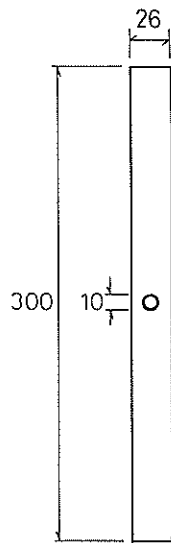




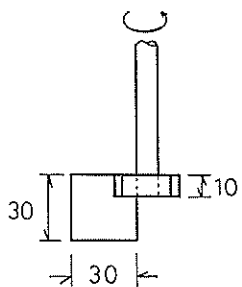
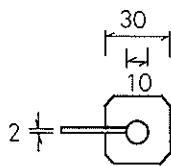
付図-1 c 乱れ発生子形状図 (#12, #22メッシュ型) (単位: mm)



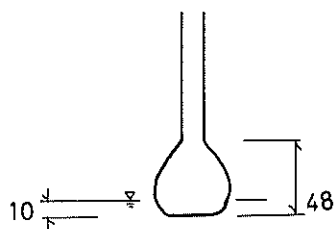
付図-1 d 乱れ発生子形状図 (#13細丸棒型) (単位: mm)



付図-1 e 乱れ発生子形状図 (#14太丸棒型) (単位: mm)



付図-1 f 乱れ発生子形状図 (#15水面パドル型) (単位: mm)



付図-1 g 乱れ発生子形状図 (#21なす型) (単位: mm)

付表-1 a 回転系攪乱(回転子形状・#10)の水利特性

実験 番号	回転子 水 深 (cm)	回転数 (r.p.m.)	測定 水深 (cm)	測定 st.	$\bar{U}$ (cm/s)	$u'$ (cm/s)	$\bar{v}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\epsilon$ ( $cm^2/s^3$ )	逸散スペクトル のピーク相当 (cm)	$\eta$ (cm)	$\lambda$ (cm)	$R_s$	備考
101	-28	90	-0.5	1	15.38	2.34	2.15	.65	3.6	0.5	0.02	0.3	70	RA
				2	25.62	2.91	3.04	1.02	3.1	0.4	0.02	0.3	90	
				3	30.34	2.90	3.26	1.76	7.1	0.3	0.02	0.2	60	
				4	26.49	2.39	1.81	1.91	6.6	0.3	0.02	0.2	50	
				5	23.33	2.74	3.26	2.39	6.5	0.3	0.02	0.2	60	
			-1.5	1	14.31	1.92	1.91	.88	1.7	0.5	0.03	0.4	80	
				2	25.10	2.67	2.69	1.22	4.1	0.3	0.02	0.3	70	
				3	30.40	2.88	1.86	2.55	7.1	0.2	0.02	0.2	60	
				4	26.75	2.68	1.71	2.40	7.1	0.3	0.02	0.2	50	
				5	24.19	2.53	4.08	2.37	8.2	0.3	0.02	0.2	50	
			-2.5	1	13.66	1.70	2.00	1.19	1.8	0.4	0.03	0.4	70	
				2	24.12	2.25	2.52	1.26	4.1	0.3	0.02	0.3	60	
				3	28.68	2.84	1.47	2.71	6.6	0.2	0.02	0.2	60	
				4	25.86	2.80	1.69	2.72	7.1	0.3	0.02	0.2	60	
				5	24.09	2.42	4.81	2.20	8.2	0.3	0.02	0.2	50	
		-3.5	1	13.74	1.75	2.22	1.16	2.5	0.6	0.03	0.3	60		
			2	23.52	2.01	2.41	1.37	3.6	0.4	0.02	0.3	60		
			3	27.42	2.66	.86	3.03	4.4	0.2	0.02	0.3	70		
			4	24.81	2.40	1.62	2.64	6.6	0.2	0.02	0.2	50		
			5	23.42	2.57	4.52	2.25	6.9	0.2	0.02	0.2	50		
		-9.5	1	11.70	1.35	0.88	1.17	2.9	0.7	0.02	0.3	40		
			2	20.87	1.75	2.39	1.58	2.9	0.5	0.02	0.3	60		
			3	24.56	1.61	.99	1.47	2.6	0.3	0.02	0.3	50		
			4	22.63	2.25	.50	1.89	5.6	0.3	0.02	0.2	50		
			5	22.24	2.97	3.59	2.47	9.4	0.3	0.02	0.2	50		

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{1/4}, \lambda = \left(\frac{30\nu}{\epsilon}\right)^{1/2}, R_s = \frac{u'\lambda}{\nu}$$

付表-1 b 回転系攪乱(回転子形状・#10)の水利特性

実験 番号	回転子 水 深 (cm)	回転数 (r.p.m.)	測定 水深 (cm)	測定 st.	$\bar{U}$ (cm/s)	$u'$ (cm/s)	$\bar{v}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\epsilon$ ( $cm^2/s^3$ )	逸散スペクトル のピーク相当 (cm)	$\eta$ (cm)	$\lambda$ (cm)	$R_s$	備考
102	-28	120	-0.5	1	21.19	3.40	2.98	.92	10.0	1.0	0.02	0.2	60	RB
				2	34.25	3.65	3.89	1.34	5.8	0.3	0.02	0.2	80	
				3	41.49	4.20	5.01	2.10	32.4	-	0.01	0.1	40	
				4	36.95	3.70	3.19	2.30	26.4	0.2	0.01	0.1	40	
				5	31.27	3.14	3.49	2.90	21.5	0.3	0.02	0.1	40	
			-1.5	1	20.21	3.03	2.76	1.44	7.1	0.6	0.02	0.2	60	
				2	32.93	2.97	3.30	1.71	10.0	-	0.02	0.2	50	
				3	42.23	3.99	2.69	2.79	56.5	-	0.01	0.1	30	
				4	37.39	3.70	1.87	3.24	24.7	-	0.01	0.1	40	
				5	33.69	3.33	5.89	2.99	23.0	-	0.01	0.1	40	
			-2.5	1	18.76	2.69	2.63	1.52	-	0.4	-	-	-	
				2	31.30	2.61	2.90	1.72	9.7	-	0.02	0.2	50	
				3	40.26	3.97	1.71	3.32	28.3	-	0.01	0.1	40	
				4	35.93	3.54	1.60	3.76	23.0	-	0.01	0.1	40	
				5	33.16	3.27	6.52	3.07	18.7	-	0.02	0.1	40	
		-3.5	1	17.50	2.61	2.63	1.67	5.8	0.3	0.02	0.2	60		
			2	30.12	2.37	2.66	1.82	10.8	0.3	0.02	0.2	40		
			3	欠	欠	欠	欠	欠	欠	欠	欠	欠		
			4	34.28	3.57	1.97	3.63	24.7	-	0.01	0.1	40		
			5	32.47	3.67	6.78	3.00	23.0	-	0.01	0.1	40		
		-9.5	1	15.89	2.07	1.23	1.86	5.0	0.3	0.02	0.2	60		
			2	26.94	2.53	2.68	2.13	-	-	-	-	-		
			3	35.25	2.35	2.63	2.07	7.1	-	0.02	0.2	50		
			4	31.39	2.65	.44	2.38	16.3	-	0.02	0.1	40		
			5	31.33	4.15	5.89	3.67	34.8	-	0.01	0.1	40		

付表 - c 回転系特性 (回転子形状・#10) の水理特性

実験番号	回転子水深 (cm)	回転数 (r.p.m)	測定水深 (cm)	測定 st.	$\bar{v}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\bar{v}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\epsilon$ (cd/s <sup>3</sup> )	逸散ベクトルのピーク相当 (cm)	$\eta$ (cm)	$\lambda$ (cm)	$R_e$	備考	
103	-28	150	-0.5	1	26.65	3.67	3.55	1.86	16.3	—	0.02	0.1	50	RC	
				2	43.62	3.87	4.65	1.68	16.3	0.5	0.02	0.1	50		
				3	54.56	5.31	5.37	3.04	—	—	—	—	—		—
				4	48.33	4.37	3.14	3.69	74.4	—	0.01	0.06	30		
				5	41.04	4.38	5.76	4.20	64.8	—	0.01	0.07	30		
			-1.5	1	24.45	4.16	3.21	2.17	9.4	0.4	0.02	0.2	70		
				2	41.80	3.97	3.88	1.97	16.0	—	0.02	0.1	50		
				3	53.81	5.22	2.13	4.33	—	—	—	—	—		
				4	47.69	4.44	2.14	4.46	45.9	—	0.01	0.08	40		
				5	42.50	4.31	7.57	3.82	40.0	—	0.01	0.09	40		
			-2.5	1	22.81	3.73	3.64	2.22	—	0.8	—	—	—		
				2	40.07	3.29	3.51	2.43	24.7	—	0.01	0.1	40		
				3	50.64	4.73	1.07	4.81	91.6	—	0.01	0.06	30		
				4	45.04	4.25	2.53	4.79	60.5	—	0.01	0.07	30		
				5	42.15	4.32	8.36	3.52	56.5	—	0.01	0.07	30		
			-3.5	1	21.60	3.67	3.72	2.35	—	0.3	—	—	—		
				2	38.60	3.34	3.13	2.61	25.5	—	0.01	0.1	40		
				3	47.78	3.86	1.66	4.74	45.9	—	0.01	0.08	40		
				4	43.31	4.01	3.46	4.14	64.8	—	0.01	0.07	30		
				5	41.24	4.42	8.56	3.59	60.5	—	0.01	0.07	30		
			-9.5	1	20.45	2.48	.92	2.16	7.1	0.4	0.02	0.2	50		
				2	32.88	3.12	2.57	2.97	13.2	—	0.02	0.2	50		
				3	43.36	3.01	3.92	2.26	15.5	—	0.02	0.1	40		
				4	40.38	3.18	.02	2.86	25.5	—	0.01	0.1	30		
				5	40.13	4.76	7.27	4.34	77.1	—	0.01	0.06	30		

付表 - 1 d 回転系攪乱 (回転子形状・#10) の水理特性

実験番号	回転子水深 (cm)	回転数 (r.p.m)	測定水深 (cm)	測定 st.	$\bar{v}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\bar{v}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\epsilon$ (cd/s <sup>3</sup> )	逸散ベクトルのピーク相当 (cm)	$\eta$ (cm)	$\lambda$ (cm)	$R_e$	備考
104	-28	180	-0.5	3	67.41	6.52	5.67	4.32	—	—	—	—	—	RD
				3	50.57	3.77	4.25	2.80	24.7	0.01	0.1	40		
105	-28	220	-0.5	3	77.53	7.57	1.88	6.55	196.	—	0.008	0.04	30	RE
				3	62.23	4.72	4.13	3.57	100.	0.01	0.05	30		

付表 - 1 e 回転系攪乱 (回転子形状・#11スライド) の水理特性

実験番号	回転子水深 (cm)	回転数 (r.p.m)	測定水深 (cm)	測定 st.	$\bar{v}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\bar{v}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\epsilon$ (cd/s <sup>3</sup> )	逸散ベクトルのピーク相当 (cm)	$\eta$ (cm)	$\lambda$ (cm)	$R_e$	備考
111	-28	90	-0.5	3	15.9	1.54	-0.2	1.21	4.0	0.3	0.02	0.3	40	RAA
112	112-2	120			20.9	2.40	-1.4	1.68	9.4	0.2	0.02	0.2	40	RBA
20.5					2.50	-1.5	1.75	10.8	0.1	0.02	0.2	40	REA	
113		150			26.4	2.85	-1.9	2.17	34.8	0.1	0.01	0.09	30	RCA
114		180			31.3	3.62	-2.7	2.52	91.6	0.1	0.01	0.06	20	RPA

付表-1 f 回転系攪乱(回転子形状・#12メッシュ)の水利特性

実験番号	回転子水深 (cm)	回転数 (r.p.m)	測定水深 (cm)	測定 st.	$\bar{u}$ (cm/s)	$u'$ (cm/s)	$\bar{v}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\epsilon$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	逸散スペクトルのピーク相当 (cm)	$\eta$ (cm)	$\lambda$ (cm)	$R_s$	備考
121	-28	90	-0.5	1	19.15	1.94	- .21	.91	4.1	0.2	0.02	0.3	50	WL3
				2	25.56	2.10	.67	1.21	3.8	0.2	0.02	0.3	50	
				3	26.64	2.24	.27	1.55	5.0	0.2	0.02	0.2	50	
				4	21.73	2.26	-.29	2.15	6.2	0.2	0.02	0.2	50	
				5	17.36	2.07	-.69	2.05	4.4	0.2	0.02	0.3	50	
122	-15	90	-0.5	1	18.53	1.97	-.02	.92	5.0	0.2	0.02	0.2	50	WL1
				2	25.62	1.86	.74	1.22	6.0	0.2	0.02	0.2	40	
				3	25.76	2.00	1.05	1.08	1.9	0.2	0.03	0.4	80	
				4	22.16	2.01	.12	1.81	2.7	0.1	0.02	0.3	70	
				5	17.21	2.24	-.33	1.54	3.8	0.3	0.02	0.3	60	
123	-2	90	-0.5	1	19.91	4.85	-.13	1.35						WL2
				2	x	x	x	x						
				3	x <sup>1)</sup>	x	x	x						
				4	x	x	x	x						
				5	21.75	3.54	-.60	2.86						

1), : # 123, st. 2~4 は測定範囲を超えた信号となったため、欠測とした。

付表-1 g 回転系攪乱(回転子形状・#13細丸棒)の水利特性

実験番号	回転子水深 (cm)	回転数 (r.p.m)	測定水深 (cm)	測定 st.	$\bar{u}$ (cm/s)	$u'$ (cm/s)	$\bar{v}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\epsilon$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	逸散スペクトルのピーク相当 (cm)	$\eta$ (cm)	$\lambda$ (cm)	$R_s$	備考
131	-28	90	-0.5	1	22.32	3.12	.18	1.18	3.1	-				RF
				3	43.46	4.00	.48	1.95	37.3					
				5	34.90	3.01	.76	2.23	21.5					
			-1.5	1	20.64	2.70	.26	1.36		-				
				3	40.81	3.16	-1.27	3.44	21.5					
			-2.5	1	19.87	2.63	.25	1.52		-				
				3	40.81	3.16	-1.27	3.44	21.5					
				5	36.48	3.50	2.30	2.72						
			-3.5	1	19.40	2.49	.51	1.79		-				
				3	40.81	3.16	-1.27	3.44	21.5					
-9.5	1	19.81	1.46	-.82	1.85		-							
	3	38.16	2.83	-1.67	2.66	20.0								
	5	35.70	3.41	.96	3.11									
132	-3	90	-1.0	1	22.12	5.08	-.14	1.70	6.6	-			RG	
				3	41.92	3.78	-.10	2.79	32.5					
				5	41.36	4.28	-.10	3.49	36.1					

付表-1 h 回転系攪乱(回転子形状・#14太丸棒)の水利特性

実験番号	回転子水深 (cm)	回転数 (r.p.m)	測定水深 (cm)	測定 st.	$\bar{u}$ (cm/s)	$u'$ (cm/s)	$\bar{v}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\epsilon$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	逸散スペクトルのピーク相当 (cm)	$\eta$ (cm)	$\lambda$ (cm)	$R_s$	備考
141	-28	90	-0.5	1	26.42	5.12	.45	1.96						RH
				1	25.58	3.95	.63	2.20						
				1	25.38	3.89	.34	2.49						
				1	26.68	3.49	1.00	2.77						
				1	24.94	3.07	.47	2.74						

付表-1 i 回転系攪乱(回転子形状・#15水面パドル)の水利特性

実験番号	回転子水深 (cm)	回転数 (r.p.m)	測定水深 (cm)	測定 st.	$\bar{U}$ (cm/s)	$u'$ (cm/s)	$\bar{V}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\epsilon$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )	逸散スペクトルのピーク相当 (cm)	$\eta$ (cm)	$\lambda$ (cm)	$R_s$	備考
151	-28	90	-0.5	2	5.83 <sup>1)</sup>	1.72	—	—	—	—	—	—	—	WL63
				3	4.31	.87	—	—	—	—				
				4	4.60	1.32	—	—	—	—				
				5	3.80	.93	—	—	—	—				

1) : # 151 シングルセンサーで測定, st.1は測定不能。

付表-1 j 振とう系攪乱(振とう子形状・#21なす型)の水利特性

実験番号	振とう子水深 (cm)	振とう周波数 (Hz)	測定水深 (cm)	測定 st.	$\bar{U}$ (cm/s)	$u'$ (cm/s)	$\bar{V}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\epsilon$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )	逸散スペクトルのピーク時径 (cm)	$\eta$ (cm)	$\lambda$ (cm)	$R_s$	備考
211	-1~-4.6	0.5 <sup>1)</sup>	0.5	3	.04	.06	.12	.03	— <sup>2)</sup>	—	—	—	—	FA
212		1.0			.36	.22	.17	.09	—	0.01~3	—	—	—	GA
213		1.25			1.13	.71	-.02	.29	—	—	—	—	—	BA
214		2.0			2.45	.77	-.50	.59	—	—	—	—	—	CA
215		2.22			2.54	.93	.02	1.37	—	—	—	—	—	KA
216		2.56			2.24	1.10	-.12	.57	—	—	—	—	—	EA
217		2.84			1.58	.40	.09	.58	—	—	—	—	—	MA

1) : 振とう周波数は、実測値。 2) : 二次モーメント法により求めた  $\epsilon$  値は30~60cm<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>であり、対応する  $\lambda$ ,  $R_s$  はそれぞれ 0.1~0.07 cm, 2~8 となる。

付表-1 k 振とう系攪乱(振とう子形状・#22メッシュ)の水利特性

実験番号	振とう子水深 (cm)	振とう周波数 (Hz)	測定水深 (cm)	測定 st.	$\bar{U}$ (cm/s)	$u'$ (cm/s)	$\bar{V}$ (cm/s)	$v'$ (cm/s)	$\epsilon$ (cm <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )	逸散スペクトルのピーク時径 (cm)	$\eta$ (cm)	$\lambda$ (cm)	$R_s$	備考
221	-1~-4.7	1	0.5	1	(2.49) <sup>1)</sup>	(.29)	—	—	—	—	—	—	—	WL6
				2	(2.85)	(.21)	—	—	—	—	—	—	—	
				3	(2.17)	(.17)	—	—	—	—	—	—	—	
				4	(2.89)	(.17)	—	—	—	—	—	—	—	
				5	(3.74)	(1.35)	—	—	—	—	—	—	—	
222		2		1	(2.22)	(.49)	—	—	—	—	—	—	—	WL5
				2	(2.85)	(.80)	—	—	—	—	—	—	—	
				3	(2.33)	(.45)	—	—	—	—	—	—	—	
				4	(2.52)	(.51)	—	—	—	—	—	—	—	
				5	(3.45)	(1.16)	—	—	—	—	—	—	—	
223		2.5		1	4.15	1.45	-.96	.90	35	0.04	0.01	0.09	10	WL4
				2	4.44	1.80	-.66	.65	13	0.15	0.02	0.2	30	
				3	4.23	2.20	-.51	.46	17	0.13	0.02	0.3	70	
				4	4.51	2.04	-.66	.58	23	0.09	0.01	0.1	20	
				5	2.32	.80	-.20	.54	27	0.08	0.01	0.1	8	

1) : # 221, 222はシングルセンサーによる流速測定値。 # 223はVプローブセンサーによる流速測定値

港湾技研資料 No.657

1989・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 日青工業株式会社

Published by the Port and Harbour Research Institute  
Nagase, Yokosuka, Japan.