

# 港 湾 技 研 資 料

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

No. 437      Dec. 1982

平面水槽を用いた曝気用散気管の効率比較実験

細    川    恭    史  
加    藤    道    康  
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. 実験の目的 .....	4
3. 曝気の機構 .....	4
3.1 発生気泡と誘起流れ .....	4
3.2 酸素溶解機構と曝気効率指標 .....	5
4. 二次元水路による予備実験 .....	8
4.1 実験装置 .....	8
4.2 発生気泡の状況 .....	9
4.3 誘起流れの状況 .....	10
4.4 溶存酸素の回復状況 .....	14
4.5 予備実験結果のまとめ .....	15
5. 平面水槽実験 .....	15
5.1 実験装置 .....	15
5.2 実験ケース .....	17
5.3 誘起流れの状況 .....	18
5.4 酸素の溶解状況 .....	19
5.5 曝気効率の比較 .....	23
5.6 平面水槽実験結果のまとめ .....	24
6. 現地への適用 .....	25
6.1 酸素溶解の相似律 .....	25
6.2 溶存酸素収支式 .....	26
7. おわりに .....	27
参 考 文 献 .....	27
使 用 記 号 一 覧 .....	28
付録A 総括酸素移動係数の温度・塩分依存性実験 .....	28
付録B 平面水槽実験における溶存酸素の回復状況と溶解効率 .....	29

# Experiments on Oxygen Solution Efficiency from Diffuser Pipe in Laboratory Basin

Yasushi HOSOKAWA\*  
Michiyasu KATO\*\*  
Takeshi HORIE\*\*\*

## Synopsis

Aeration experiments are conducted in the laboratory wide basin (10m × 10m × 1m). Compressed air is injected into the oxygen deficit water through the diffuser pipe at the bottom. The oxygen solution rate and the induced flow by the air bubbling are measured. The following points are made clear.

1. The induced vertical circulation flow is influenced by both the air supply rate and the orifice diameter. The maximum horizontal surface current in the basin can be estimated by the Kobus' equation. In the water area surrounded by diffuser pipes, vertical mixing is promoted well.
2. The oxygen solution is increased in rate owing to both the increase of the air injection rate and the decrease of the orifice diameter.  $KLa$  (overall oxygen transfer coefficient) in the basin can be predicted by the Eckenfelder's equation as well as that in the aeration tank. Oxygen absorption efficiency (absorption/supply ratio) becomes lower, as the air supply increased in rate and as the DO concentration becomes higher.

---

\* Senior Research Engineer, Marine Hydrodynamics Division

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

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

# 平面水槽を用いた曝気用散気管の効率比較実験

細川 恭史\*  
加藤 道康\*\*  
堀江 毅\*\*\*

## 要 旨

水質改善のために人工的に空気を吹込む曝気工法が考えられる。曝気用の散気管形状につき、散気孔径、散気孔面積、散気管配置形、吹込み空気量などが誘起流れと酸素溶解におよぼす影響について比較している。

二次元水路を用いた予備実験より、以下の点が明らかになった。散気孔列から発生する気泡につき、気泡径は散気孔径に左右され吹込み空気量のべき乗に比例する。誘起流れは大きな循環流を形成し、表層の水平最大流速は吹込み空気量に左右され吹込み圧に影響されない。酸素溶解のはやさは吹込み空気量に左右され吹込み圧に影響されない。

平面水槽実験より以下の点が明らかになった。誘起流れは、吹込み空気量に影響されKobus式が成立する。さらに、小さな穴を密に並べると流れははやくなり、二本の散気管にはさまれた水域では鉛直混合が良くなる。酸素溶解は、吹込み空気量がふえるとはやくなりEckenfelder式が成立する。さらに、小さな穴を密に並べると溶解のはやくなる。また、短時間に大量の空気を吹込むよりも少量ずつ長期にわたって吹込んだ方が、溶解速度は遅くなるが吹込み酸素の吸収・溶解効率は良くなる。

ここでは、水深の影響につき十分検討されておらず、酸素溶解のスケール効果は不明である。いくつかの仮定下で酸素溶解の相似性を考え、現地への適用法について検討を試みている。

## 1. はじめに

港湾諸機能を波浪から防護する防波堤は、波浪の進入のみならず、港内水と外海水との交換をも制限することがある。後背都市域から港内への流入廃水は、閉鎖的な水域に滞留し、その結果水・底質の悪化を招きがちである。

閉鎖水域に滞留した有機物は、好気性微生物の分解作用により酸化分解され、やがて無機の炭酸ガスや水などに变化する。酸化分解には溶解している酸素が利用・消費される。陸域からの流入点や粒状有機物が沈積する底泥近くでは、有機物濃度が高く、分解作用も活発であるため溶存酸素の消費も大きい。

水域の生物活動や生態系にとって水中の溶存酸素は不

可欠のものであり、溶存酸素の不足や嫌気化の進行は、魚貝類や好気性生物などの生息を直接危くする。溶存酸素は多く水面を通して大気から供給され、水域の溶存酸素濃度は供給と消費とのバランスによって決まってくる。従って、有機物濃度が高く消費が大きい場所や溶存酸素が運ばれにくい場所では、溶存酸素濃度の維持に注意を払う必要がある。特に、夏期の成層時には、成層により水塊の鉛直混合が起こらず溶存酸素の底層への供給が小さくなる一方、表層で増殖したプランクトンやその分解途上の粒状有機物が底泥上に沈積し、高温下で活発な分解作用を受け溶存酸素の消費が大きくなる。このため底層付近に貧酸素水塊が発生することがある。底生生物への影響や、貧酸素水塊の風等による湧昇時の魚類等への影響が考えられる。

\* 海洋水理部 主任研究官（水質解析担当）

\*\* 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

こうした水域の水質を良好に保つためには、有機物濃度の削減と必要溶存酸素の確保とが必要である。有機物濃度の削減には、流入負荷の減少、滞留有機物の除去、プランクトン増殖の抑制のための栄養塩の除去、外海清澄水の導入などが考えられる。溶存酸素の増加のためには、水域の鉛直混合の促進、底層への酸素の吹込み、溶存酸素濃度の高い外海水の導入などが考えられる。

ガスの中へへの溶解機構は、化学工学における単位操作の1つとして古くから基礎的研究が実施されてきた。溶解機構の室内実験やモデル化などについても多くの研究がなされてきている。特に酸素の溶解については、廃水処理プロセスにおける曝気槽の設計のために衛生工学の分野で広く研究が実施されてきている。しかし、多くの研究が実験室内における環境を制御した小さな水槽での実験か、曝気槽での調査に限られており、自然水系を対象とした大規模な水槽による実験例はほとんどない。

また、空気吹込みによる誘起流れについては、特殊防波堤の1種として消波機能との関連で調べられてきている。最近では魚場環境の改善や浮遊ゴミ対策などの手段としても誘起流れが注目されてきている。

自然水の水質改善のために人工的に空気を吹込む試みは、水が滞留する貯水池や湖沼などで例<sup>1)</sup>があり、また都市河川の悪臭防止のために実施されたこともある。海域に対しては、瀬戸内海に面する観音寺沖で試みられたことがある程度である。

ここでは、動力を用いて人工的に空気を吹込み、溶存酸素濃度を改善しようとする時に、吹込み用散気管の形状や配置により誘起流れや溶解速度がどう変わるのかについて、二次元水路および平面水槽実験にて検討している。

## 2. 実験の目的

水深5~6m程度の湾奥部で、人工的空気吹込みによる曝気実験が計画されている。この水域での現地実験に対し用いるべき散気管形状の選定と、必要空気圧および吹込み空気量の見積もりのために室内実験を実施した。室内実験では、曝気による水中への酸素溶解効率の比較を試みている。この室内実験では、同時に誘起流れについても測定を行なっている。誘起流れについては、別途数値解析のためのモデル化の検討を既に実施している。

## 3. 曝気の機構

### 3.1 発生気泡と誘起流れ

散気孔から水中へ空気を吹込むと、気泡が発生し水中を上昇する。気泡の上昇に伴いそのまわりの水にも上向する流れが誘起される。誘起上昇流は、水面までのぼ

りつめると重力の作用により横方向へ逃げる水平流となる。気泡の発生・上昇点付近の流れを考えてみる。

散気孔を離れた気泡の大きさは、散気装置の穴の径と吹込み空気量とに関係する。吹込み量がきわめて小さいと、気泡体積は、穴の径や表面張力に関係し、吹込み空気量には左右されない。吹込み量がやや大きくなると、気泡の放出頻度が一定となり、気泡体積は吹込み量に左右されるようになる。さらに気泡径が2mm程度を超えると、気泡径は吹込み量の関数となり、次式で表わされるようになる<sup>2)</sup>。

$$d_b \sim (G_a)^n \quad (1)$$

ここで、 $d_b$ は気泡径、 $G_a$ は単位時間あたりの吹込み空気量、 $n$ は散気装置などによって変化する指数である。

生成した気泡の上昇速度や形は、気泡径を代表長さにとったレイノルズ数によって主に分類される。気泡径が大きくなると浮力も大きくなり上昇速度も大きくなるが、形が球から扁平化し、流跡を乱し左右にゆれながら上昇する。発生孔を通る鉛直中心線から気泡が左右に離れて存在する確率は、中心線から離れるほどまた上昇距離が短いほど小さい。気泡の存在密度は中心線上で最も高く、従って気液混相した見かけ比重は中心線上で最も小さい。見かけの浮力の分布も中心線上で最も高く、気泡の存在密度や浮力などの分布は、ガウス分布に似た型をとるとされている<sup>3)</sup>。

気泡の上昇に伴いまわりの水も上昇運動をはじめ、上向流が発生する。この上昇流は水表面で水平流となり、散気孔付近では上昇流を補償する流れが生ずる。気泡による上昇流の水平分布も、中心線から左右に離れるにつれ流速値が小さくなり、中心線上でその水深での最大上昇流速値となる。水深により最大上昇流速の変化が見られ、散気孔からの上昇距離の関数となる。

空気吹込みによる誘起流れ場の解析は、空気防波堤の消波機能の解析と関連して研究されてきている。水表面での水平流速は、消波機構上重要な因子であること、誘起上昇流に直接左右されること、誘起上昇流や水中の補償流に比して流速値が大きいかつ測定しやすいこと、などから流れ場を特徴づける値となっている。

水表面の水平流速の最大値 $U_{max}$ は、吹込み空気量、散気水深などに関係している。Kobus<sup>3)</sup>は、散気管上に一列にあげた穴からの散気場を次のよう解析している。まず、誘起上昇流の水平分布にガウス分布を仮定し、運動量を浮力から求め、気泡中心線上の上昇流速値を求めている。更に、水面での上昇流速値から水表面での水平流速を直接求め、水平流速は流下により流速を減少させる

としている。つまり、気泡中心線上の水表面で最大流速  $U_{max}$  になるとしており、 $U_{max}$  を次式で表わした。

$$\frac{U_{max}}{\sqrt[3]{g \cdot G_s}} = 1.75 \left\{ \frac{P_{atm}/\rho_w g}{H + \gamma_0} \ln \left( 1 + \frac{H}{P_{atm}/\rho_w g} \right) \right\}^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 $U_{max}$  は水平最大流速、 $P_{atm}$  は水表面上の大気圧、 $\rho_w$  は水の密度、 $g$  は重力加速度、従って  $P_{atm}/\rho_w g$  は水柱ではなかった大気圧となる。また、 $H$  は散気孔の設置水深、 $\gamma_0$  は上昇流速にガウス分布を仮定した時の仮定の気泡発生点源水深（ガウス分布の偏差  $\sigma$  が 0 となり、流速分布が 1 点のみに集中しているとされる水深）と  $H$  との差である。Kobus は、上昇流速の分布幅（ガウス分布における  $\sigma$ ）は水深とともに直線的に増えたとし、外捜により散気孔水深より更に 0.8 m 下がった点を仮定の気泡発生点とし、 $\gamma_0$  に 0.8 m を与えている。 $G_s$  は散気管単位長さあたりの空気吹込み量である。

また、栗原<sup>4)</sup>、Bulson<sup>5)</sup>などは、散気孔水深  $H$  の影響を大気圧で補正した水深の  $-1/3$  乗に比例するとして、それぞれ次式を示している。

$$\text{栗原式} \quad \frac{U_{max}}{\sqrt[3]{g \cdot G_s}} = 1.994 \left( \frac{H + H_0}{H_0} \right)^{-1/3} \quad (3)$$

$$\text{Bulson式} \quad \frac{U_{max}}{\sqrt[3]{g \cdot G_s}} = 1.46 \left( \frac{H + H_0}{H_0} \right)^{-1/3} \quad (4)$$

ここで、 $H_0$  は水柱ではなかった大気圧である。

列状に並んだ散気孔から気泡を発生させると Kobus の解析とは異なり、実際には  $U_{max}$  は、気泡がのぼりつめた水面ではなくそこからやや流下した位置で測定される。流下距離は、水深の半分ないし水深相当の長さとしてされる。

表面流速は、 $U_{max}$  に達した後減少し、下層水をつれ込むことにより表層流の厚さは増加する。一方、底層では、補償流れとして散気孔へ向かうゆっくりとした逆向の水平流が形成される。さらに散気孔位置より離れると表層流れがほとんどなくなり、表層流れのつれ込みはゆっくりした下方への流れに変わる。こうして、散気孔から far field までの全体として、大きなゆるやかな循環流を形成する。

流れの場合は、溶存物質 — ここでは溶存酸素 — の混合状態を規定する。混合が十分ではなく対象水域の中に溶存酸素の濃度分布が生じている時は、移流・拡散場と

して溶存酸素の移動と分布を解析することになる。また、混合が十分で濃度がほぼ一様とみなせる時は、完全混合水塊として解析できる。溶存酸素の不足が問題となる地点は、成層した海域の下層部に特に底泥面近くであることが多い。こうした位置への酸素の供給を考える際には、鉛直の流れや混合が重要となってくる。

### 3.2 酸素溶解機構と曝気効率指標

#### (1) 酸素溶解機構

水中への気体の溶解度は温度の上昇とともに小さくなり、一定の温度では気体の圧力が高まるとともに大きくなる。気体の圧力と平衡している溶解濃度を飽和濃度とよぶ。気体の溶解は、平衡状態を維持し飽和濃度となるように起こる。溶解速度は、平衡状態から離れているほど早く、酸素などの溶解度の小さい気体の溶解速度は、次式で示される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_{La} (C_s - C) \quad (5)$$

ここで、 $C$  は溶存酸素濃度、 $t$  は時間、 $C_s$  は飽和溶存酸素濃度、 $K_{La}$  は溶解効率を示す係数で総括移動係数とよばれる。上式は、気液境界面付近で液側境膜と気側境膜との二重境膜を考え、各境膜内の拡散機構の比較から説明される。二重境膜説では、 $K_L$  は液側境膜での溶解ガス — ここでは溶存酸素 — の移動しやすさを表わす [  $L/T$  ] の次元を持つ係数として考え、液膜係数もしくは、ガス移動係数とよばれている。 $K_{La}$  は [  $1/T$  ] の次元を持つ係数で、溶解に関与する気液接触界面が広いほど、また液体体積が小さいほど、濃度上昇速度が大きいことから、 $K_L$  とは次の関係がある。

$$K_{La} = K_L \frac{A}{V} \quad (6)$$

ここで、 $A$  は気液界面面積、 $V$  は溶解液の体積である。液側境膜内での溶存酸素の移動は、濃度差による分子拡散の他、液表面での乱れなどによる境膜と液本体との混合によっても左右される。混合には境膜の浸透を考える説、境膜の乱れによる更新を考える説等があり、フィック型の拡散方程式をある境界条件下で解いて、 $K_L$  を説明している。表面更新説に基づいて Higbie<sup>6)</sup> は、 $K_L$  式として次式を導いている。

$$K_L \sim \sqrt{D_L/\tau} \quad (7)$$

ここで、 $D_L$  は液中での酸素ガス分子の分子拡散係数、 $\tau$  は境界が液本体により更新される更新時間である。

気液界面での酸素溶解機構は、微視的に見て、分子拡散係数や乱れ、気液接触面積や液体積、溶存濃度などに左右されることがわかる。

#### (2) 空気吹込みによる酸素溶解

空気吹込みにより発生した気泡を用いる気泡曝気では、水中の散気孔より気泡が生成され、この気泡が浮力により散気孔を離れて水中を上昇し、水表面に達して気泡が破裂する。酸素の水中への溶解は、気泡が生成された時に始まり、水中の上昇時および水表面での破壊時にも起こる。また、気泡の上昇に伴って誘起された水の鉛直流および表層流などにより水表面で乱れが生じ、水表面から大気中の酸素の溶解が付加的に起きている。

これらの諸現象に対しても式(5)を適用できる。以下に総括酸素移動係数( $K_{La}$ )に及ぼす影響因子と評価式を見てゆく。

#### (4) 気泡上昇時の曝気

気泡の上昇している時の液膜係数 $K_L$ も、 $D_L$ の他、気泡をおおっている境界が水本体と混合し更新する時間の1/2乗に反比例すると考えられる。境界の更新時間は、気泡径分だけ気泡が上昇するに要する時間のオーダーだと仮定し、Camp<sup>7)</sup>は次式を示している。

$$K_L \sim \sqrt{D_L \cdot \frac{v_B}{d_B}} \quad (8)$$

ここで、 $v_B$ は気泡の上昇速度、 $d_B$ は気泡径である。

また、Eckenfelder<sup>2)</sup>は、酸素移動に関する無次元数の関係として次式を示している。

$$\frac{K_L \cdot d_B}{D_L} = F \cdot \left( \frac{d_B \cdot v_B}{\nu} \right) \cdot \left( \frac{\nu}{D_L} \right)^{1/2} \quad (9)$$

ここで、 $\nu$ は水の動粘性係数、 $F$ は無次元係数である。左辺は、物質移動(ここでは溶解)と拡散との比を示すSherwood数である。右辺は、気泡上昇に関するReynolds数および、物質拡散と運動量移動の比を示すSchmidt数とで示されている。

$K_L$ の値は、気泡径が数mmの場合1~2 m/h程度となるようである。

曝気効率を知るためには $K_{La}$ を評価する必要がある。気泡上昇時の $A/V$ は次のように算定できる。

$$\frac{A}{V} = \frac{6 \cdot G_s}{d_B} \cdot \frac{H}{v_B} \cdot \frac{1}{V} \quad (10)$$

ここで、 $G_s$ は時間あたりの吹込み空気体積(標準状態換算)、 $H$ は気泡の上昇する深さすなわち散気孔の水深である。右辺第1項は時間あたりの気泡の総表面積を示している。これは、気泡1個あたりの表面積( $\pi \cdot d_B^2$ )と、時間あたりに発生する気泡個数( $G_s/(\pi/6)d_B^3$ )との積として求められる。右辺第2項は、水中での気泡と液体との接触時間を示している。

式(9)、(10)より気泡上昇時の $K_{La}$ を、Eckenfelderは次式のように示している。

$$K_{La} = K_L \frac{A}{V} = F' \frac{H \cdot G_s}{V \cdot d_B} \quad (11)$$

$$F' = 6 \times F \times \left( \frac{D_L}{\nu} \right)^{1/2}$$

一方、水深0.3~7.6mまで、気泡径0.25~0.51cmの各種スケールの曝気槽実験例を整理して、Kingは $K_{La}$ 式として次式を示している<sup>8)</sup>。

散気板の水槽表面積に対する比：5%の場合

$$K_{La} = 0.1026 \cdot H^{0.71} \cdot D^{y-1} \cdot G^z \cdot d_B^{-0.64} \cdot (1.024)^T \quad (12)$$

散気板の水槽表面積に対する比：10%の場合

$$K_{La} = 0.0820 \cdot H^{0.75} \cdot D^{y-1} \cdot G^z \cdot d_B^{-0.70} \cdot (1.024)^T \quad (13)$$

ここで、 $H$ は散気板(多孔質の平板で面全体から気泡が発生する)までの水深(m)、 $D$ は( $C_s - C$ )で示される溶存酸素不足濃度(mg/l)、 $d_B$ は気泡の平均径(cm)、 $G$ は、曝気水槽1000m<sup>3</sup>当り1分間あたりの吹込み空気量(m<sup>3</sup>)、 $T$ は水温(°C)である。また、指数 $x$ 、 $x'$ 、 $y$ は次式で表わしている。

$$\begin{aligned} x &= 0.801/H^{0.05} \\ x' &= 0.858/H^{0.04} \\ y &= 0.888/H^{0.1} \end{aligned} \quad (14)$$

King式は、溶存酸素濃度が低く $D$ の値が大きい場合にはよく合致するが、飽和濃度の50%程度まで回復すると実測値よりも大きい値を与えると云われている<sup>9)</sup>。

散気板でなく散気管を用いる場合は、散気孔部の面積



比は5%以下となり、式(12)が成立するか否かは不明である。

⑩ 端効果

気泡の生成や破壊時にも酸素溶解が起こる。水深に依存しない溶解効果を端効果(End Effect)とよぶ。

気泡の生成時の気泡表面は、気泡の生成により絶えず更新され、気液境界での攪乱が大きいため大きな物質移動を生起する。破壊消滅時も飽和に達した表面液膜が水中へ供給されるため大きな移動量となる。端効果の見積もりや理論的研究は少なく、定式化した例も少ない。

Eckenfelder<sup>2)</sup>は式(11)を改変し、端効果を含めた $K_{La}$ として次式を示している。

$$\frac{K_L \cdot d_B}{D_L} H^{1/3} = f' \cdot \left( \frac{d_B \cdot v_B}{\nu} \right) \cdot \left( \frac{U}{D_L} \right)^{1/2} \quad (15)$$

$f'$ は $[L]^{1/3}$ の次元を有する係数。また、 $d_B \sim G_s^n$ などを考慮し、 $H$ の指数を $2/3$ から $1-g$ へと一般化すると $K_{La}$ 式は、次のようになる。

$$K_{La} = f'' \cdot \frac{H^{2/3} \cdot G_s}{V \cdot d_B} = f \cdot G_s^{(1-n)} \cdot H^{(1-g)} \cdot V^{-1} \quad (16)$$

端効果は、水深の浅いほどその影響が大きく、見かけ上水深が数十cm深くなったことに相当するとして解析<sup>8)</sup>したり、水深 $H$ のべき数を1よりやや小さくするなどして適応をはかっていることが多い。King式は端効果も含んだ式として示されている。

⑪ 流れによる水表面からの再曝気

水表面付近での誘起流れにより、大気から水表面を通っての酸素溶解が起こる。この場合にも、式(5)の関係が成立する。流れに伴う大気からの溶解に対しては $K_{La}$ の代わりに $K_2$ と書くことが多く、 $K_2$ を再曝気係数などと呼んでいる。流れに伴う $K_2$ の評価については、河川の曝気能力の比較として古くから研究され、さまざまな算定式が提示されている。曝気機構としては式(6)、(7)などの成立を考え、溶解が水表面付近の微小な乱れによるエネルギー逸散と結びつけられる。

式(7)の表面更新時間 $\tau$ に対して、乱れの強さが大きいほどまた乱れのスケールが小さいほど $\tau$ が小さい、としたO'Connor-Dobbinsの式<sup>10)</sup>(等方性乱流に対する式)を次に示す。

$$K_2 = \frac{K_L}{H} = \sqrt{\frac{D_L}{\tau}} / H \quad (17)$$

$$\tau = U / H$$

ここで、 $H$ は水深、 $U$ は平均流速である。

さらに、水表面での乱れのエネルギー逸散が表面張力と関係するとして解いた村上の式<sup>11)</sup>は次のようになる。

$$K_2 = C' \cdot \frac{g^{3/8} \cdot \rho^{1/2} \cdot \nu^{3/8} \cdot D_L^{1/2} \cdot n^{3/4}}{\sigma^{1/2}} \cdot \frac{U^{3/8}}{H^{3/2}} \quad (18)$$

ここで $C'$ は定数、 $\rho$ は密度、 $\nu$ は動粘性係数、 $\sigma$ は表面張力、 $n$ はManningの粗度係数、 $H$ は水深、 $U$ は平均流速である。

いずれの式においても、流速が早く水深が浅いほど大きな再曝気が期待される。空気を吹込んだ場では、誘起流れ、対象域の水深と表層流れの厚さ、上下の混合などにより、水表面からの溶解の役割の大きさが変化する。水表面からの酸素溶解が、気泡による酸素溶解に比して大きければ、空気吹込みによる酸素溶解効率を比較するうえで十分考慮する必要がある。しかし、両者の分離は実験的にはむずかしい面があり、気泡による誘起流れと同じ流れを噴流等で再現してやる方法、水表面を油膜などでおってしまう方法などが考えられる。

⑫ その他の影響因子

$K_{La}$ は、酸素の分子拡散係数、水の動粘性係数、表面張力等に影響されると考えられる。そのため、 $K_{La}$ は、液温、溶解物質 — 特に表面活性剤 — に影響される。

温度の影響は次式で表わされる。

$$K_{La, T} = K_{La, 20} \cdot \Theta^{(T-20)} \quad (19)$$

ここで $K_{La, T}$ は $T^\circ\text{C}$ での $K_{La}$ の値、 $\Theta$ は温度係数である。 $\Theta$ としては、普通1.02程度の値が用いられている。King式では、Churchill<sup>12)</sup>らの精密な実験結果から $\Theta$ として1.024が用いられている。

溶解成分の影響式は、一般的定量的には扱えず、純水での $K_{La}$ 値と、対象水での $K_{La}$ 値との比を、各対象水ごとに調べ補正比を求めていく方法が多く用いられている。

水温および塩分の $K_{La}$ への影響を調べた実験結果を、付録Aにかかげておく。

(3) 効率比較指標

式(5)に示された総括酸素移動係数 $K_{La}$ により、溶解速度が比較できる。 $K_{La}$ は、吹込み空気量、水深、水槽体積、水温、散気装置などにより変化する。散気装置以



外の条件を同一にしてやれば、散気装置の効率比較が可能になる。

式(5)は、 $C_s - C$ を $D$ (溶存酸素不足濃度)とおけば、次のように解ける。

$$-\frac{dD}{dt} = K_{La} \cdot D$$

$$\therefore K_{La} = (-\ln D) / t + C / t \quad (20)$$

$C$ は、積分定数。従って、曝気時間 $t$ に対して $D$ の対数をプロットし、この直線の傾きを求めれば $K_{La}$ 値が算定できる。

室内実験での $K_{La}$ 値の差異が、現地スケールの値としてどれだけの差異になるのかについては、 $K_{La}$ の相似律の検討が必要となる。

この他の効率比較指標として、溶解効率、吸収数などがある。溶解効率 $\alpha$ は、吹込んだ酸素量に対する溶解酸素量の比として次式で定義される。

$$\alpha = \frac{\text{単位時間に溶解した酸素量 (mg/h)}}{\text{単位時間に吹込まれた酸素量 (mg/h)}} \\ = \frac{K_{La} \cdot (C_s - C) \cdot V}{10^6 \cdot G_s \cdot \rho_0 \cdot p_0} \quad (21)$$

ここで、 $G_s$ は標準状態での空気吹込み速度( $l/h$ )、 $\rho_0$ は酸素の比重、 $p_0$ は酸素分圧(0.232)である。 $\rho_0$ は標準状態で次の値となる。

$$\rho_0 = \frac{32}{22.4} \times 10^{-3} \quad (22)$$

$\alpha$ の値は溶液中の濃度 $C$ によって変わるが、特に $C=0$ のときの値を用いると散気装置の効率比較ができる。

吸収数 $N^2$ は、式(16)の係数 $f$ に相当し、次式で示される。

$$N = \frac{V \cdot K_{La}}{G_s^{(1-n)} \cdot H^{(1-g)}} \quad (23)$$

散気装置の設置水深や吹込空気量等が異なった場合でも装置自体の効率を比較できるが、そのためには、 $n$ 、 $g$ の値の正確な評価が必要である。

## 4. 二次元水路による予備実験

### 4.1 実験装置

当所水質化学実験棟にある長さ2.2m幅1m深さ2mの二次元水路を用いている。

曝気装置は、空気加圧用コンプレッサー、減圧弁、圧力計、空気流量計、散気管から構成されており、図-1

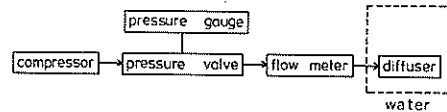


図-1 曝気装置の構成

に示すように組み立てられている。空気加圧用コンプレッサーは、3.7kwモーターで駆動するオイル混入のないオイルフリー型のものである。最大流量400Nl/min最大圧力7kg/cm<sup>2</sup>である。ここでNlは、1気圧0℃の標準状態に換算した時の気体容積をリットル(l)単位で示したもので、ノルマルリットルと呼ばれる単位である。空気流量計は、測定範囲100~10、30~3、10~1Nl/minの3本のフロー型流量計を必要に応じて交換しながら用いている。2Nl/min以上では流量の変動、圧力の変動はほとんどなく、安定した気泡形成が生じている。散気管は現地での適用を考え、塩化ビニル製パイプに一列に細孔をあけたものを水路床近くに設置している。塩化ビニル製パイプの外径は48mm(厚2.5mm)であり、散気孔は3cmごとに1mm径もしくは0.5mm径のものを一列にあけている。パイプの長さは水路幅に合わせてあり1mである。吹込み空気量は、この散気管1mあたり1分間あたりの値として表示する。

二次元水路では、主に気泡の発生状況と誘起流れについて観察している。気泡の発生状況は、目視による観察の他、カメラによる気泡径の測定を行っており、流れについては、主に3成分の超音波流速計による流速分布の測定を行なっている。また、溶存酸素の回復状況も測定している。

気泡径の測定は、水路ガラス側壁から約3m離れた位置から300mmズームレンズを用い写真撮影をしている。水中に垂下した物差しとともに気泡を撮影し、印画紙上に引きのばし、ノギスを用いて長さを測定している。

流速の測定は、散気管からの距離、水深を変え、超音波流速計にて水平・鉛直を測定している。気泡の発生・上昇地点ではこの方式の流速計では流速の測定ができない。流速計の出力はデータレコーダーに記録させ

A-D変換の後、流速値を算定している。気泡発生が非連続現象であることなどから、流速値は大きく変動し、変動は散気孔に近いほど大きいようである。このため、ここでは、1地点で6分間流速記録をとり、この平均値をもって流速値としている。A-D変換におけるサンプリング周期は1/30秒である。

水位の測定は、サーボ式水位計を用いている。散気管からの距離を変えて水位を測定している。流速と同様に水位をデーターレコーダーに記録し、6分間の平均をもって平均水位としている。

また、流速の観察に際しては、短い糸片を各水深に結びつけた棒や、染料などを用い、流向、流速や連行状況を見た。

酸素溶解実験は次のように実施した。付設高水槽にて、亜硫酸ナトリウムと塩化コバルトを用いて溶存酸素不足水を作り、静かに二次元水路に導びく。散気管より空気を吹込み、各位置における溶存酸素濃度の回復状況を溶存酸素計で経時的に測定する。ここでは、2台の溶存酸素計を用い、水深5, 25, 50, 75 cmの4層の濃度を散気管より15, 50, 100, 200, 300, 400 cmの位置で、1時間ごとに8時間にわたって測定している。実験開始時の当初濃度および飽和濃度を水温とともに実験ケースごとに測定している。

#### 4.2 発生気泡の状況

コンプレッサーを始動し通気しはじめると、散気孔より気泡が発生する。通気量が少ないと一部の散気孔から間歇的に気泡が発生するのみであるが、通気量の増加とともに散気管全体からほぼ同じ周期で気泡が形成される。

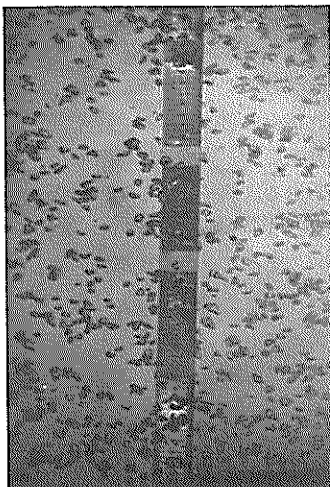


写真-1 気泡の発生と上昇の様子(水深45 cm, 散気孔径1.0 mm, 吹込み空気量30 Nl/m/min)

さらに通気量が増えると気泡の形成周期が短くなるが、ある周期以上には短くなりにくいようである。

気泡の形状、大きさは、散気孔の径や通気量により変わるとされている<sup>23)</sup>。目視観測では、散気孔径の大きいほど大きい気泡が生じ、気泡が大きくなると上昇時の形状は、球形ではなく横に扁平なくらげ形となり、左右に揺れながら上昇することがわかる。大きな気泡では、一部分裂により小さな気泡が生じているものも見られる。

写真撮影により気泡径  $d_B$  を測定し比較してみる。ななめ横から撮影した気泡発生状況を写真-1に示す。気泡状況は図-2に示すようなくらげ形であり、横から撮

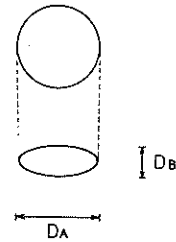


図-2 気泡の平面図(上図)と立面図(下図)

影した楕円の長径 ( $D_A$ ) と短径 ( $D_B$ ) を測定し、回転楕円体とみなして体積 ( $v_B$ ) を次式で求めた。これと同一体積の球の径をもって、その気泡の径 ( $d_B$ ) としている。

$$v_B = \frac{\pi}{6} (D_A)^2 \cdot D_B \quad (24)$$

$$d_B = \{ (D_A)^2 \cdot D_B \}^{1/3} \quad (25)$$

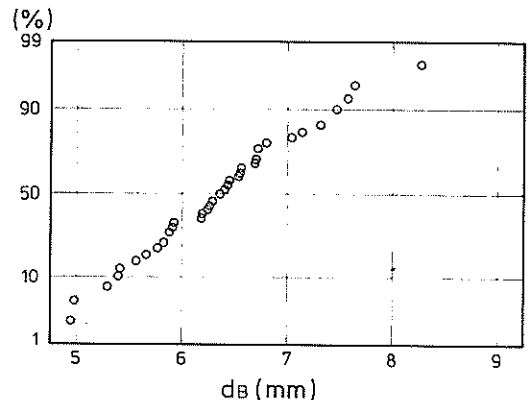


図-3 気泡径分布(水深90 cm, 散気孔径0.5 mm, 空気吹込み量30 Nl/m/min)

表-1 気泡径の変化

(平均径±標準偏差, 単位: mm)

散気孔径 水深	0.5 mm			1.0 mm		
	45 cm	90 cm	180 cm	45 cm	90 cm	180 cm
吹込み空気量						
2 Nl/m/min	5.60 ± 0.67	5.86 ± 0.57	6.30 ± 0.82	7.03 ± 0.61	7.00 ± 0.85	6.65 ± 0.85
5	6.23 ± 0.64	6.43 ± 0.76	7.01 ± 0.96	7.94 ± 1.30	7.00 ± 1.05	7.09 ± 1.13
10	5.95 ± 0.60	7.04 ± 0.84	6.90 ± 1.34	7.15 ± 0.86	7.21 ± 1.17	7.30 ± 1.21
20	6.61 ± 1.00	6.70 ± 0.92	6.92 ± 0.97	7.50 ± 1.16	7.70 ± 1.22	7.75 ± 1.53
30	6.24 ± 0.67	6.44 ± 0.82	6.35 ± 0.93	7.56 ± 1.41	6.98 ± 1.17	7.34 ± 1.27
40	5.74 ± 0.80	7.08 ± 0.84	6.77 ± 0.93	7.74 ± 1.39	6.99 ± 1.21	7.38 ± 1.24

気泡径 ( $d_B$ ) は、種々の径長にばらつく。分布状態は、例えば、図-3のように、5~8 mm の区間に分布している。図-3に示したのは、水深 90 cm, 吹込み空気量 30 Nl/m/min 散気孔径 0.5 mm での 40 個の  $d_B$  値を正規確率紙にプロットしたものである。

散気孔径, 水深, 吹込み空気量を変えて測定した  $d_B$  値を表-1に示す。ここでは、水深 180 cm のケースを除き各条件での 20 個の気泡の平均径を  $d_B$  として用いている。20 個の球相当径につき、標準偏差 ( $\sigma$ ) と平均値 ( $\bar{x}$ ) の比で示される変動係数 ( $\sigma/\bar{x}$ ) は 10~15% であった。

気泡径  $d_B$  の値はかなりばらつくが、散気孔径が、0.5 mm から 1.0 mm に増大すると、気泡径は明らかに増大す

る。水深が浅く、空気量が小さいケースでこの傾向は著しいようである。気泡径に対する水深の影響は、顕著ではない。水深 180 cm のケースでは、上・中・下層の 3 層に分けて、各層で 20 個の気泡の球相当径を測定している。しかし、気泡の存在する水深に依って気泡径が増大する傾向は見られない。水表面での大気圧(水柱で約 10 m に相当)に比して実験水深が浅いため、気泡の上昇に伴う圧力減少効果は極めて小さい。

散気管単位長さあたりの吹込み空気量 ( $G_s$ ) を横軸に、気泡径 ( $d_B$ ) を縦軸にとり、両対数グラフ用紙にプロットすると、気泡径に対する空気量の影響は図-4のようになる。空気量が 2~10 Nl/m/min の区間では、気泡径の増大傾向が読みとれるが、それ以上空気量がふえても気泡径の変化は小さいようである。式(1)によれば、気泡径は吹込み空気量のべき乗に比例することになる。図-4より  $n$  の値を算定すると、0.03~0.05 程度であることがわかる。水深が更に深くなると、 $n$  の値はやや小さくなると予想される。

### 4.3 誘起流れの状況

発生気泡は浮力により水中を上昇し、気泡群の上昇により水の流れが引き起こされる。

気泡の上昇速度は、気泡径、気泡形状によって決まってくると思われる。単一孔から気泡を発生させ上昇速度を測定すると、5~6 mm 径の気泡で 20~30 cm/s 程度の値となる<sup>13)</sup>。また、水の流れが引き起こされた場では、気泡の上昇は浮力による自身の上昇速度の他、誘起された水の上昇流速にも影響される。水に対する気泡の相対流速の測定は、気泡を含んだ水塊中での水の上昇流速の測定がむずかしく、特殊な流速計やトレーサーを利用しない限り困難が伴う。

水深 90 cm に水を張り、散気後十分に時間が経過し流れが定常に達した後、上昇流にのった気泡の見かけの上昇速度  $w_s$  を測定した。1 秒間に 24 コマの撮影後、8 コ

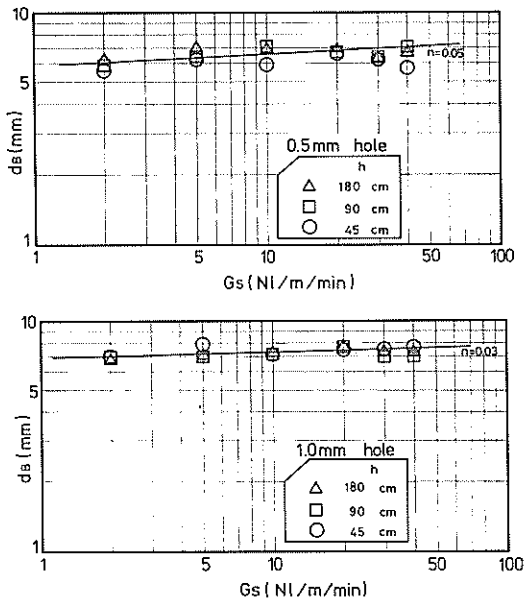


図-4 気泡径に及ぼす吹込み空気量の影響(上図: 散気孔径 0.5 mm, 下図: 散気孔径 1.0 mm)

マゴとの鉛直位置の変化より上昇速度を算定したものである。結果を表-2, 図-5に示す。吹込み空気量が多いほど, 散気孔径が大きいほど, 見かけの上昇速度は大

表-2 気泡の見かけ上昇速度

散気孔径 吹込み空気量	0.5 mm	1.0 mm
2 NI/m/min	37. cm/s	— cm/s
5	42.	45.
10	46.	48.
40	53.	54.

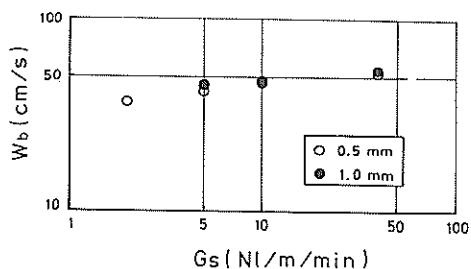


図-5 気泡の見かけ上昇速度に及ぼす吹込み空気量の影響(白丸:散気孔径0.5mm, 黒丸:散気孔径1.0mm)

きくなっている。プラスチック球を油粘土で包み径1cmの中立トレーサーを作り, 水の上昇流速を見ると, 0.5mm孔径, 10NI/m/minの吹込み時に約25cm/s程度である。

超音波流速計を用いて水路内の流速分布を測定した結果を図-6に示す。図-6aには水深90cm吹込み空気量10NI/m/min, 空気圧3 kg/cm<sup>2</sup>, 散気孔径0.5mmでの流れを示している。気泡が混合している水塊については超音波流速計が使用できず, 気泡が上昇しているすぐ近くの水域の流速値は測定していない。ここでは, 散気孔より水平方向に15cm離れた地点から175cm離れた地点までの区間につき, 水深1, 5, 10cm以後10cmごとに測定している。図より, 気泡による誘起上昇流は水表面に達した後, 散気部から離れるうすい水平流となって表層を流れていることがわかる。中~底層では散気部に向かう弱い流れが起きている。流れは, 散気部より2m程度離れると微弱になり, 大きな循環流を形成している。水平最大流速は, 散気管より30cmほど離れた表層で観測され, 流速値は17cm/sである。空気吹込み時の平均水位はかなりばらつくが, 散気開始前の静水面に

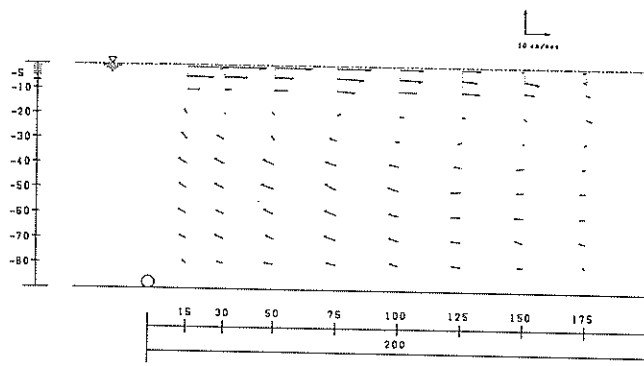


図-6a 二次元水路内の誘起流ベクトル図(吹込み空気量10NI/m/min, 空気圧3 kgf/cm<sup>2</sup>)

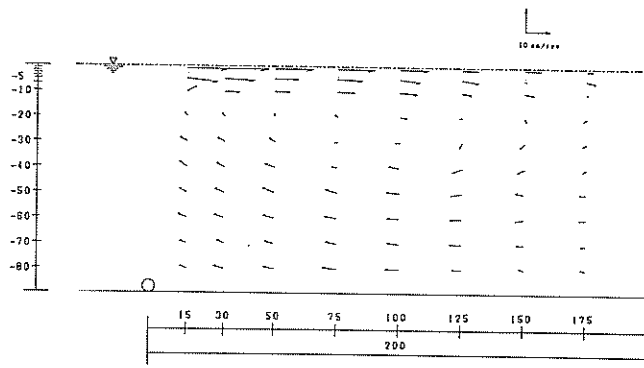


図-6b 二次元水路内の誘起流ベクトル図(吹込み空気量10NI/m/min, 空気圧4 kgf/cm<sup>2</sup>)

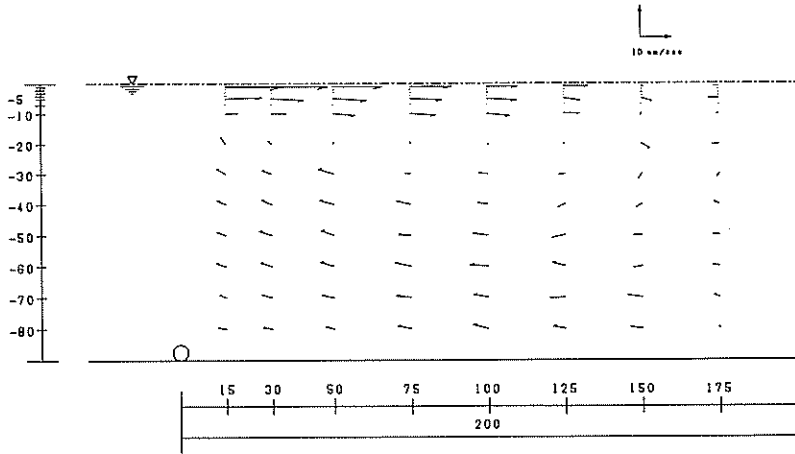


図-6 c 二次元水路内の誘起流ベクトル図(吹込み空気量 $10\text{ Nl/m/min}$ , 空気圧 $5\text{ kgf/cm}^2$ )

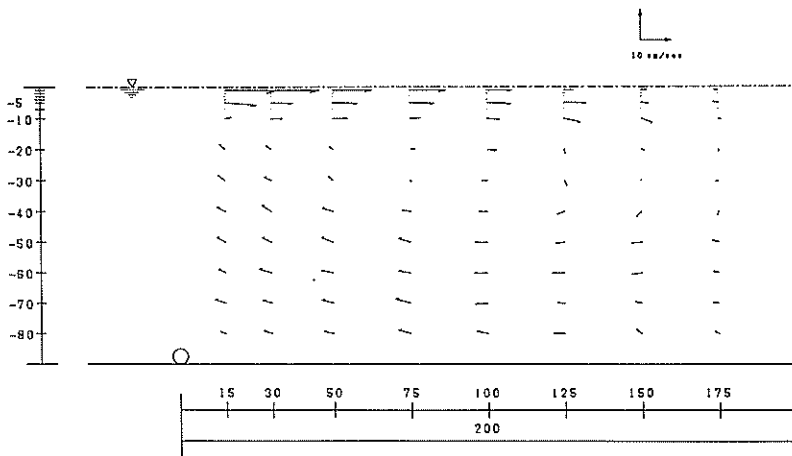


図-6 d 二次元水路内の誘起流ベクトル図(吹込み空気量 $7\text{ Nl/m/min}$ , 空気圧 $5\text{ kgf/cm}^2$ )

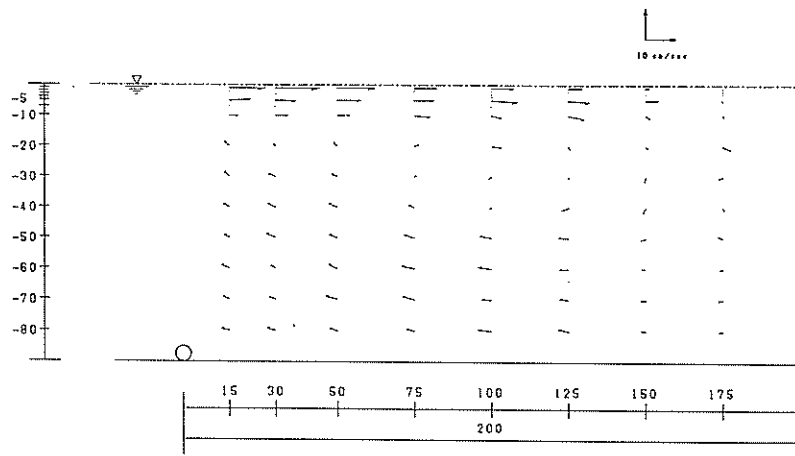


図-6 e 二次元水路内の誘起流ベクトル図(吹込み空気量 $5\text{ Nl/m/min}$ , 空気圧 $5\text{ kgf/cm}^2$ )

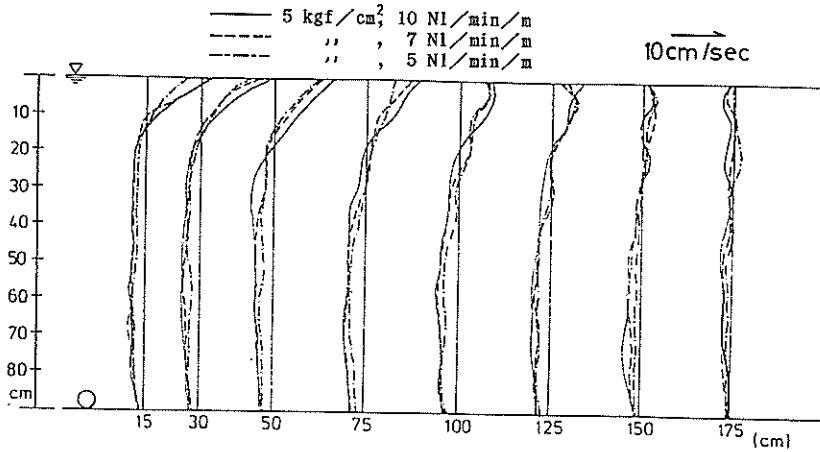


図-7 a 吹込み空気量を変えたときの水路内水平流速値の変化 (空気圧 5 kgf/cm<sup>2</sup>)

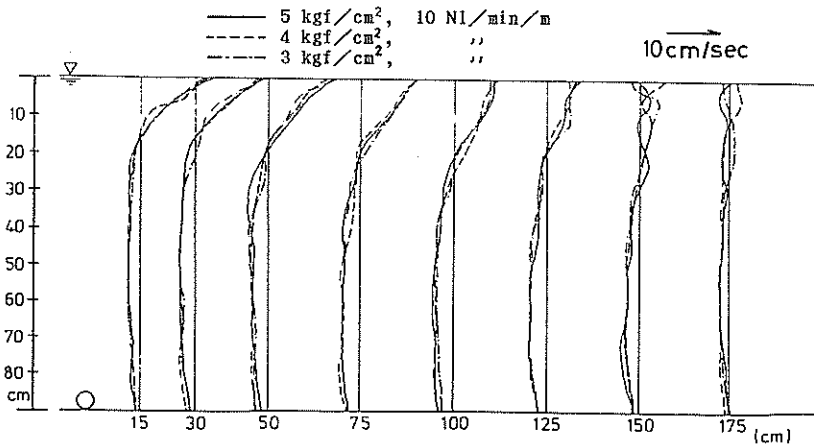


図-7 b 吹込み空気圧を変えたときの水路内水平流速値の変化 (空気量 10 NI/m/min)

対し、散気部より 15cm 離れた位置で 1.5mm、50cm 離れた位置で 1mm、175cm 離れた位置では 0.5mm 以下の水位上昇となっている。175cm より離れた位置での水位の測定は実施していない。

吹込み空気圧、吹込み空気量を変えた時の循環流の様子を、図-6 b~e に示す。また、各位置での水平流速の変化を比較すると、空気量、空気圧の変化に対しては図-7 のようになる。空気量は、圧力 5 kgf/cm<sup>2</sup> に対し、5, 7, 10 NI/m/min と変えてある。一方、空気圧は、流量 10 NI/m/min に対し、3, 4, 5 kgf/cm<sup>2</sup> と変えたケースで実施している。図-6 より、吹込み空気量がふえるにつれ、循環流の中心位置が上昇し浅くなっていることがわかる。図-7 からは、吹込み空気量がふえるにつれて、散気部近傍での最大水平流速が大きくなることがわかる。しかし、空気圧の変化に対しては、流況の変化はほとんど見られない。

水深 1 cm での水平最大流速の測定値と、式(2)~(4)

で算定される水表面での水平最大流速  $U_{max}$  値とを比較すると、表-3 のようになる。水柱ではかった大気圧を 10

表-3 水平最大流速値の比較

ケース	空気圧 kgf/cm <sup>2</sup>	空気量 NI/m/min	観測値 cm/s	$U_{max}$ 算定値		
				式(2) cm/s	式(3) cm/s	式(4) cm/s
1	5	10	18.5	14.7	22.8	16.7
2	5	7	17.2	13.0	20.3	14.8
3	5	5	14.4	11.7	18.1	13.3
4	4	10	17.4	14.7	22.8	16.7
5	3	10	16.9	14.7	22.8	16.7

m とした。また、式(2)の  $r_0$  は 0.8m とした。算定値は、式(3)、(4)、(2)の順に大きな値を与え、式(4)の値が水深 1 cm での実測値に近い。実測値は、式(2)~(4)に示されるように、吹込み空気量の 1/3 乗に比例するようである。 $r_0$  の与え方に注意すれば、水深 4 m 程度までなら式(2)

でほぼ  $U_{max}$  が算定できるとの実験報告<sup>14)</sup>もある。

#### 4.4 溶存酸素の回復状況

散気管から 4 m 流下した区間までの濃度分布をしらべると、5 時間経過後で最大 0.7 mg/l 程度の差がある。さらに離れた位置では濃度もさらに低下し、散気点との濃度差が大きくなっていると思われる。

当初濃度  $C_0$  と、飽和濃度  $C_s$  とで無次元化した無次元濃度  $C^*$  を次式で定義する。

$$C^* = \frac{C - C_0}{C_s - C_0} \quad (26)$$

ここで  $C$  は、実測溶存酸素濃度値である。

散気管より 15 cm 流下した位置の水深 5 cm での濃度値  $C$  のデータから  $C^*$  を算定し、時間に対してプロットすると、図-8 のようになる。図-8 a には、吹込み空気量を 5, 7, 10 Nl/m/min と変えた時の  $C^*$  の回復状況が描かれている。吹込み空気量が多いほど  $C^*$  の回

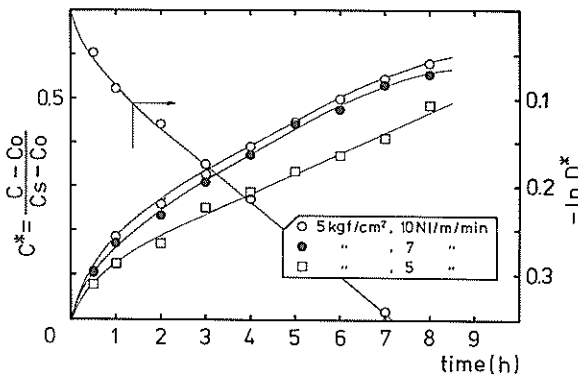


図-8 a 吹込み空気量を変えたときの溶存酸素濃度の回復のはやさ比較 (散気管より 15 cm 流下位置, 水深 5 cm, 空気圧 5 kg f/cm<sup>2</sup>)

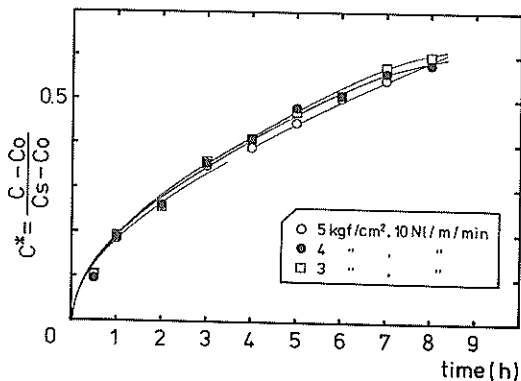


図-8 b 吹込み空気圧を変えたときの溶存酸素濃度の回復のはやさ比較 (散気管より 15 cm 流下位置, 水深 5 cm, 空気量 10 Nl/m/min)

復が早いことがわかる。無次元不足濃度  $D^*$  の変化も 1 ケースに限り同時に示してある。

また、吹込み圧力を、3, 4, 5 kg f/cm<sup>2</sup> と変えたときの、同位置での  $C^*$  の変化は図-8 b のようになる。圧力によっては酸素溶解の速度がほとんど変化しないことがわかる。

水路内の溶存酸素濃度の上昇は、端効果も含んだ気泡からの酸素溶解と、誘起表層流れによる水表面からの酸素溶解との両者の作用によるものである。溶解酸素量を示す式は従って次のように書ける。

$$\begin{aligned} \frac{dm}{dt} &= \frac{dC_r \cdot V_r}{dt} + \frac{dC_b \cdot V_b}{dt} \\ &= V_r \cdot K_2 (C_s - C_r) + V_b \cdot K_{L_0} (C_s - C_b) \end{aligned} \quad (27)$$

ここで、 $m$  は水路内の全溶解酸素量、 $C_r, C_b$  はそれぞれ水塊からの再曝気が行なわれている水塊の溶存酸素濃度と気泡からの曝気が行なわれている水塊の溶存酸素濃度とを示す。 $V_r, V_b$  は再曝気が行なわれている水塊体積と、気泡曝気が行なわれている水塊体積とを示す。

$K_2$  と  $K_{L_0}$  の分離測定がむずかしいが、 $K_2$  を既応式より流速の関数として見積もり、全溶入量に対する水表面からの再曝気による溶入量の比を大略見積もることができる。流下 4 m までの範囲では、水路内での濃度差が小さく、ほぼ同一と仮定する。すると、 $C_r = C_b$  であり、図-8 の  $C^*$  より  $-\ln D^*$  の経時変化を求め、散気直後の  $K_{L_0}$  を見積もると空気量 10 Nl/m/min のケースでほぼ 0.1 (1/h) となる。

表層水平流の認められる流下距離は、図-7 よりほぼ 2 m 程度と考えられる。この区間の水表面からの酸素の溶入を式(18)に示した村上の式で大略見積もってみる。

表層流は、厚さほぼ 20 cm、層内の平均流速はほぼ 10 cm として良いだろう。実験水路の粗度係数として  $n = 0.012$  とし、式中の諸係数を  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ ,  $\rho = 0.998 \times 10^3 \text{ kg f/m}^3$ ,  $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $D_L = 2.04 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $\sigma = 7.28 \times 10^{-2} \text{ kg f/s}^2$ , また実験値より  $C' = 7.39 \times 10^5$  などとする<sup>11)</sup>。 $e$  を底とする再曝気係数は次式で求められる。

$$\begin{aligned} K_2 &= 51.96 \frac{n^{3/4} \cdot U^{9/8}}{H^{3/2}} = 0.686 (1/d) \\ &= 0.0286 (1/h) \end{aligned} \quad (28)$$



一方、表層流により再曝気が行なわれている水塊の体積  $V_r$  は、距離 2 m 深さ 0.2 m の区間の体積と考えて良い。

すると、距離 4 m 深さ 0.9 m の区間の全溶入量に対する再曝気による溶入量の比は、次のようになる。

$$\frac{2 \times 0.2 \times 0.029 \times (C_s - C)}{4 \times 0.9 \times 0.1 \times (C_s - C)} = 0.03 \quad (29)$$

これにより、誘起流れによる水表面からの酸素の溶入は、水路内の溶入酸素のほぼ 3 % 程度を占めることがわかる。水深が深くなっても表層流の厚さはあまり変化せず、水深が深くなるほどこの比は小さくなると思われる。気泡による濃度上昇の測定や、 $K_{La}$  の算定に際して同程度の測定誤差は十分考えられるので、ここでの曝気状態に近い状況下では、誘起流れによる表層からの再曝気は特に考慮する必要はないであろう。

#### 4.5 予備実験結果のまとめ

二次元水路を用いて実施した予備実験により、気泡の発生状況、誘起流れの状況、溶存酸素の回復状況などを観察し、次の知見を得た。

気泡は、2~40 Nl/m/min の空気吹込み時には扁平なくらげ形になる。球相当径を求めると、ほぼ 6 mm 程度となる。気泡径は、水深 2 m 程度までは水深による影響はほとんどなく、散気孔径により変化する。吹込み空気量による影響はわずかに見られ、気泡径は吹込み空気量の 0.03~0.05 乗に比例する。

気泡の見かけの上昇速度は、40~50 cm/s 程度であり、90 cm 水深では 2 秒程度で水表面に達する。見かけの上昇速度は、吹込み空気量がふえるにつれ増加している。誘起された水の上昇速度は測定がむずかしいが、25 cm/s 前後とみられる。気泡径は吹込み空気量にあまり大きくは左右されておらず、気泡自体の浮力の増加は小さい。吹込み空気量がますと、気泡数が増加し誘起された水の上昇流速が増大するため、見かけの気泡上昇速度が増大していると思われる。

誘起された水の上昇流は、水表面に達した後水平流となり表層を流れる。表層水平流は、散気部からやや離れた位置で最大流速となり、その後流速は急減し散気部から 2 m 程度離れると微弱となる。中・低層部は、上昇流を補うゆっくりとした散気部へ向かう水平流が誘起され、全体として大きな循環流となる。表層の最大水平流速は、吹込み空気量がふえるほど大きくなり、吹込み空気量の 1/3 乗に比例するとの従来の解析例にあてはまるようである。吹込み空気圧には影響されない。

気泡発生による溶存酸素の回復状況を見ると、気泡発

生点付近でやや回復が早いものの、水路内での溶存酸素濃度の差は小さく循環路内ではよく混合していることがわかる。溶存酸素の回復は、吹込み空気量が大きいほど早く、吹込み空気圧には依らない。誘起表層流れによる水表面からの酸素溶解は、水路内の濃度上昇に対しあまり大きな寄与をしていない。水深 90 cm で 10 Nl/m/min の吹込み量の場合、水表面からの溶解量は、全溶解量の 3 % 前後と見積もられる。空気吹込みによる溶解効率を評価する際に、水表面からの溶解はとりあえずは無視して良いであろう。

## 5. 平面水槽実験

### 5.1 実験装置

当所海水浄化工法開発平面水槽上屋内にある、一辺が 10 m 深さ 1 m のブロック積の矩形平面水槽を用いている。この水面水槽には、貧酸素水の作成のための貯水槽が付設されている。両平面水槽とも、既設模型の上に砂をのせてその上に作成しているが、防水モルタル等により水密性は十分に良好である。両水槽の平面図を図-9 に示す。曝気用の水槽に水深 90 cm まで水を満して実験に用いている。

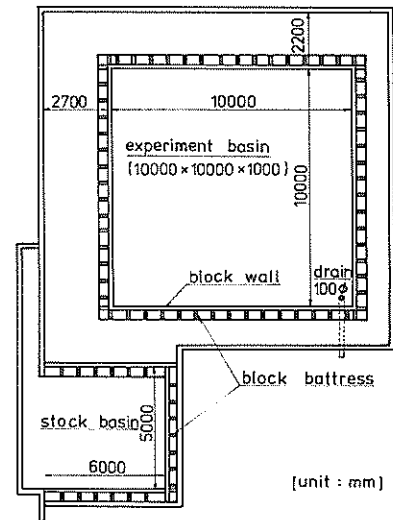


図-9 実験に用いた平面水槽(10m×10m×1m および 5m×6m×0.9m)平面図

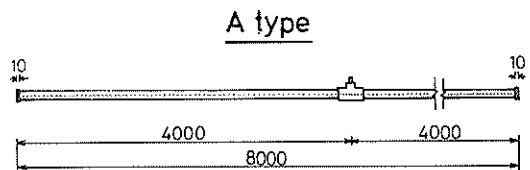


図-10a 実験に用いた散気管(Aタイプ)

B type

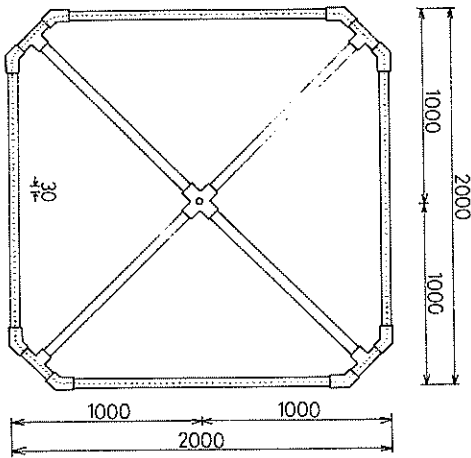


図-10b 実験に用いた散気管 (Bタイプ)

D type

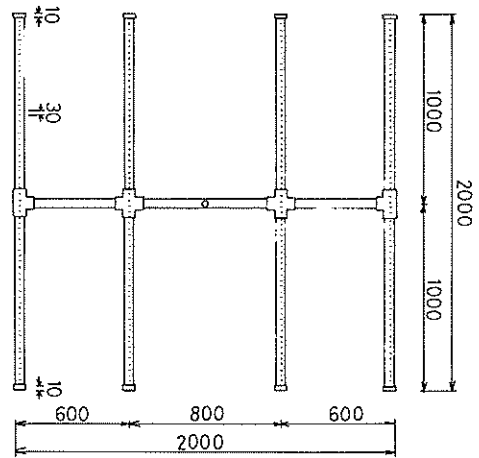


図-10d 実験に用いた散気管 (Dタイプ)

C type

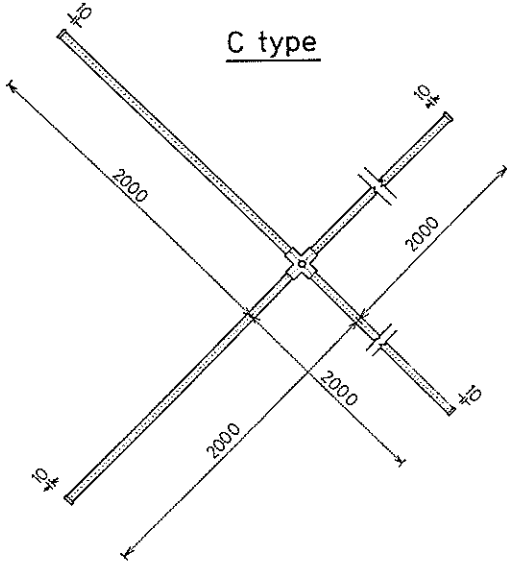


図-10c 実験に用いた散気管 (Cタイプ)

曝気装置は、二次元水路実験と同様な構成である。空気加圧用コンプレッサーも同一のものを流用している。散気管は、図-10に示す四種の形状のものを用いている。いずれも散気部分は8 mであり、30 mm 間隙で一列に散気孔をあけてある。散気孔径は0.5 mmであり、1部の形状については1.0 mmのものを製作してある。散気管は、曝気用平面水槽の中央に水平に設置し、水槽底床に強固に固定している。

平面水槽実験では、誘起流れの状況と溶存酸素の回復状況を測定した。測定は水槽の片面で実施している。

誘起流れは、3成分および2成分の超音波流速計により、散気管からの距離、水深を変え測定している。さらに水表面に径3 cmの浮子をうかべ、浮子の位置の変動を目視観察および写真撮影している。超音波流速計データの解析方法は二次元水路実験時と同様である。

水位の測定も、水槽内数地点で実施している。測定、解析方法は二次元水路実験時と同様である。

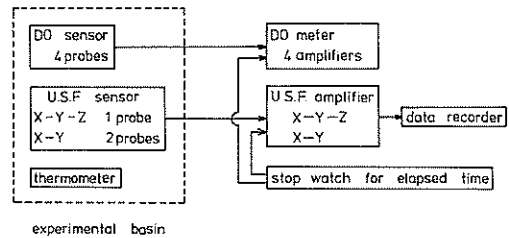


図-11 平面水槽データ測定方法

酸素溶解実験は、図-12に示す手順で実施している。付設水槽にて亜硫酸ナトリウムと塩化コバルトを用いて溶存酸素不足水を作り、静かに実験水槽に導びく。槽内十数地点で溶存酸素濃度を測定し、当初濃度を確認するとともに水槽内の混合均一状態を確認する。散気管より空気を吹込み、水槽内各位置・各水深における溶存酸素の回復状況を4台の溶存酸素計を用いて経時的に測定する。水深は、5、20、50、70 cmの4層とし、水槽内の10~20地点につき、30分~1時間おきに測定している。測定は8~9時間にわたり実施し、その後空気を吹

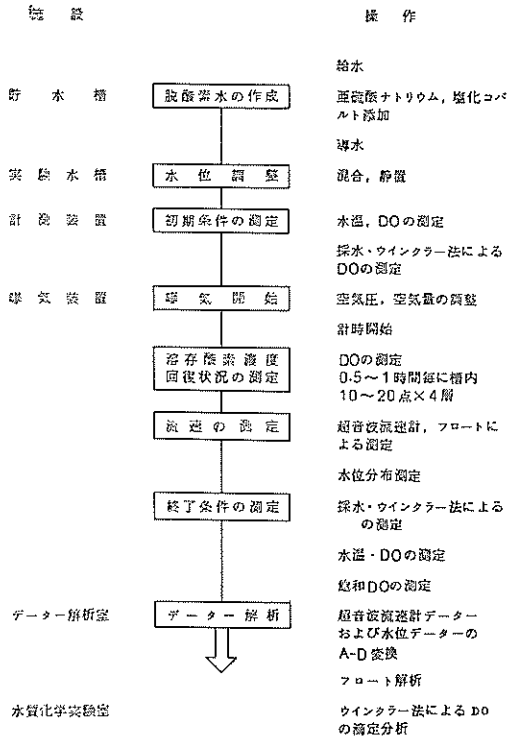


図-12 平面水槽実験手順

込ませながら一晩放置し、22~25時間後に再び溶存酸素濃度を測定している。空気吹込み終了後、水槽内の水を一部採水し、小型エアポンプで十分曝気して飽和溶存酸素濃度を測定している。溶存酸素濃度の測定は、溶存酸素計(DOメーター)により行なっているが、当初水および終了時の水についてはウィンクラー・アジ化ナトリウム変法による溶存酸素濃度の分析を同時に実施し、

溶存酸素計の読みとり値をチェックしている。

### 5.2 実験ケース

すべて平面水槽実験は、水深90cmで実施している。また、吹込み空気圧は大気圧プラス1 kg f/cm<sup>2</sup>の条件で実施している。

4種の散気管形状を比較するため、散気孔径0.5mm吹込み空気量10NI/m/minの条件、もしくは、散気孔径1.0mm、吹込み空気量10NI/m/minの条件で実施している。さらに、散気孔径、散気孔面積(空隙率)、吹込み空気量の影響を調べるため、Aタイプ、Cタイプにつきいくつかの実験条件で実施している。

全実験ケースの一覧を表-4に示す。ケース1とケース2は、同一実験条件のものを別の日に実施したものである。

表-4 平面水槽での実験ケース一覧

ケース	散気管形状	散気孔径 mm	散気孔 空隙 mm	吹込み 空気量 NI/m/min	吹込み 空気圧 kg f/cm <sup>2</sup> 大気圧+1	水深 cm
1	A	0.5	30	10	1	90
2	A	0.5	30	10	1	90
3	A	0.5	30	20	1	90
4	A	1.0	120	10	1	90
5	B	0.5	30	10	1	90
6	C	0.5	30	7.5	1	90
7	C	0.5	30	10	1	90
8	C	0.5	30	20	1	90
9	C	0.5	30	30	1	90
10	C	0.5	60	20	1	90
11	C	1.0	120	10	1	90
12	C	1.0	120	20	1	90
13	D	1.0	120	10	1	90

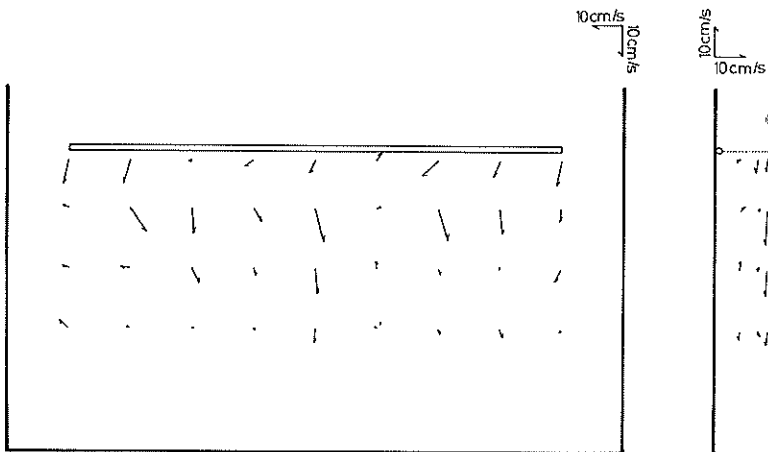


図-13a 実験ケース1の誘起水平流ベクトル図(Aタイプ、水深5cm層)

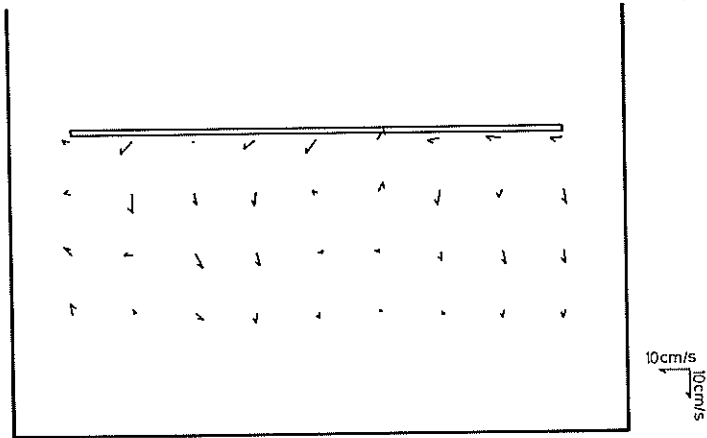


図-13b 実験ケース1の誘起水平流ベクトル図(水深20cm層)

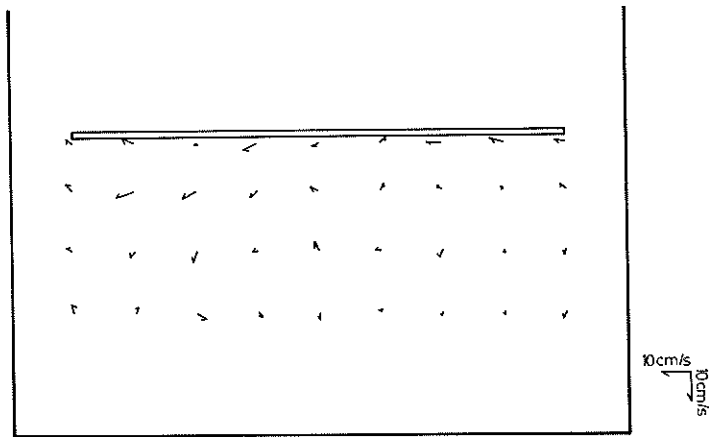


図-13c 実験ケース1の誘起水平流ベクトル図(水深50cm層)

### 5.3 誘起流れの状況

誘起流れは、水深5, 20, 50 cmの3層で測定している。

深さごとの水平流速の分布を比較してみる。最も単純な形状の散気管形状Aタイプを例に水深ごとの流速をみてもみる。ケース1の実験結果は、図-13のようになる。流速は、散気管より15 cm, 1, 2, 3 mそれぞれ流下した位置を幅1 m間隔で測定している。水深5 cmでの水平流速に比して、20, 50 cm層での水平流速は小さく、また散気管より離れるにつれ小さくなるのがわかる。水深5 cmでの水平流速の分布図から、散気管両端部に比して中央部での水平流速がやや速くなっている。これは側壁の影響などのためと思われる。水平流速の最大流速は、散気管から1 m離れた中央部位置で測定されており、11.5 cm/sである。この値は、同一の条件(空気吹込み量10 Nl/m/min, 散気孔径0.5 mm, 水深90 cm)での二次元水路実験での値17~18 cm/s(表-3)に比して

やや小さい。

図-13aには、散気管中央部を通して外壁へ流下した断面での流速分布も同時に横に示してある。大きな循環流がうかがえるが、散気点近傍での上昇流速はあまり大きくない。

平均水面の測点と、測定結果を図-14に示す。散気点では気泡の影響で乱れており、2 m離れると静水面より0.2~0.6 mm程度下がり、4 m離れ外壁に近づくとやや水位が上昇している。しかし、これら水位の上昇下降値は、二次元水路実験に比して小さく高々0.5 mm程度であり、測定値の誤差も大きいと思われる。

Aタイプの4ケースについて、水深5 cm層で測定された最大水平流速およびフロートの移動距離より求めた水表面での最大水平流速は、表-5のようになる。同一実験条件(ケース1とケース2)でのばらつきが大きい。

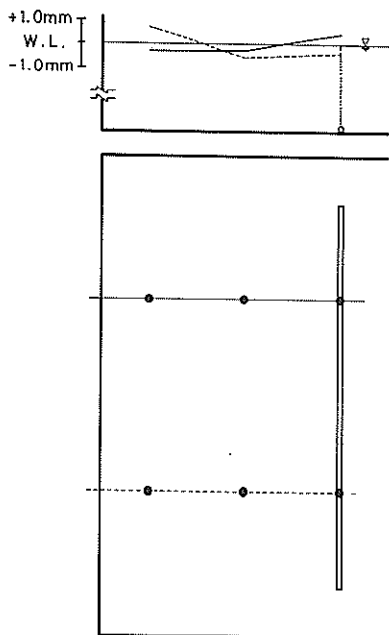


図-14 実験ケース1の水位の上昇図および水位測定線位置図

表-5 Aタイプ散気管での水平最大流速値の比較

ケース	散気孔径 mm	散気孔 間隙 mm	空気 吹込み量 NL/m/min	水平最大流速	
				水深5cm cm/s	表面 cm/s
1	0.5	30	10	11.5	13.3
2	0.5	30	10	8.9	10.2
3	0.5	30	20	11.2	15.1
4	1.0	120	10	8.7	10.3

しかし、吹込み空気量がふえると水平最大流速もわずかながら増大するようである。また、同一吹込み量でも、大きな穴を粗い間隙で配列したケース4では、流速が小さくなっている。表-3の二次元水路での値と比較すると、同一散気孔径・同一吹込み量でもやや小さい値となり、式(2)が近い値を与えている。

散気管形状が変わると流速分布がどう変わるのか散気孔径0.05mm、吹込み量10NL/m/minの実験ケースで比較してみる。水深5cmでの流速平面分布と、対称軸で切った断面での流速分布とを、各形状ごとに図-15に示す。Bタイプの形状は、散気管が閉じた四辺形形状である。図-15aを見ると四辺形内および散気管直近では、大きな鉛直流速が誘起され上下の混合がかなり良い。しかし、散気管を離れて少し流下すると水平流速の減少が大きい。Cタイプの形状は、散気管が四方に伸びた十字形状である。散気管直近では、散気管から離れる方向へ、やや離れると十字形中心から離れる方向へと水平流が方向を変えている。鉛直流速は、それほど大きくはない。Dタイプの形状は、直管を横に並べたクシ形状である。この形状では、散気孔径1mm、散気孔間隙120mmのものしか実験を実施していない。他形状との比較はむずかしいが、散気管にはさまれた部分での鉛直混合は良いようである。

いずれのケースでも、中～低層での流れはゆるやかであり、大きな循環流が形成されていることがわかる。各ケースとも水位は側壁近くでわずかに上昇しているようである。

#### 5.4 酸素の溶解状況

溶存酸素濃度は、4台の溶存酸素計を用い、12～18

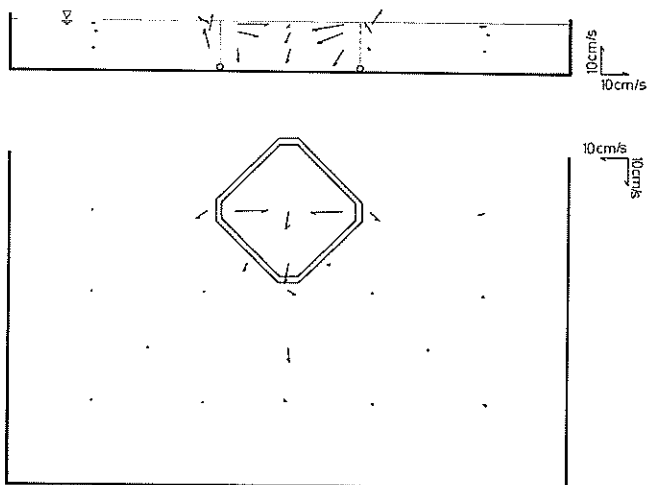


図-15a 実験ケース5の誘起水平流ベクトル図(Bタイプ、水深5cm層)

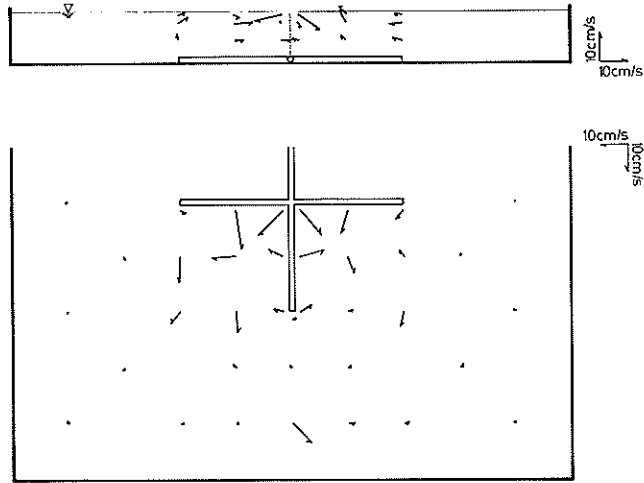


図-15b 実験ケース7の誘起水平流ベクトル図（Cタイプ、水深5 cm層）

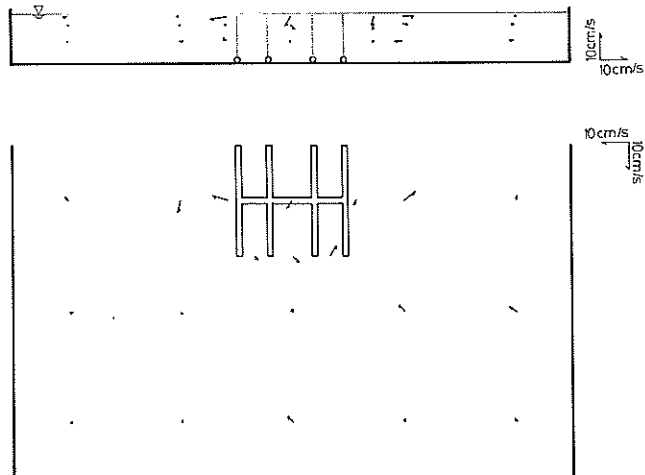


図-15c 実験ケース13の誘起水平流ベクトル図（Dタイプ、水深5 cm層）

地点で4層（水深5, 20, 50, 70cm）ずつ測定している。限られた台数の溶存酸素計を移動して用いているため、各地点の測定時刻は少しずつずれている。また、4台の溶存酸素計は実験開始時にゼロおよび飽和濃度によるキャリブレーションを行なっているが、個々の計器の特性からか、やや低目の値を指示するものなどがあり、溶存酸素計の読みとり値は当初濃度と終了後に測定する飽和濃度とによって各メーターごとに補正してやる必要があった。4台の溶存酸素計は、NO.1の溶存酸素計が水深5 cm, NO.2の溶存酸素計が水深20 cm というように、水深層4層をそれぞれ受持ち、4層の濃度を同時に測定している。

溶存酸素の測定点は、Aタイプ実験ケース1では図-16のように配置されている。18地点のうち第16, 17, 18地点の濃度は第13, 14, 15地点の濃度と同一であっ

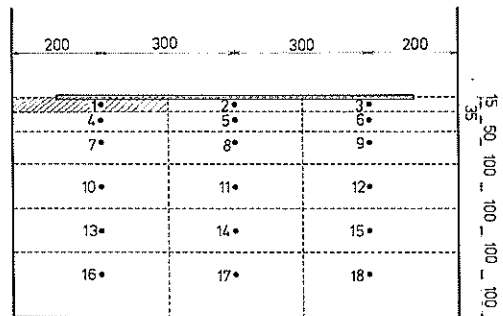


図-16 実験ケース1の溶存酸素測定地点と各点の代表面（測定は、すべての地点において水深5, 20, 50, 70 cmの4層で実施）

た。ここでは、解析のためには1～15地点のデータを用いている。

表一六 ケース1の測得溶存酸素濃度値(単位: mg/l)

POINT No. 1 (A=1.14m <sup>2</sup> )					POINT No. 2 (A=0.98m <sup>2</sup> )					POINT No. 3 (A=1.14m <sup>2</sup> )				
t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層	t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層	t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層
0.	0.9	1.2	0.8	0.7	0.	0.9	1.1	0.7	0.6	0.	0.9	1.2	0.7	0.7
0.65	1.3	1.5	1.0	1.0	0.50	1.1	1.3	1.0	0.9	0.57	1.3	2.0	1.0	1.0
1.17	1.5	1.7	1.3	1.3	1.00	1.5	1.7	1.3	1.3	1.07	1.5	2.7	1.4	1.3
1.70	1.9	2.0	1.6	1.5	1.50	1.5	1.8	1.5	1.4	1.60	1.8	1.9	1.5	1.5
2.20	2.1	2.1	1.8	1.8	2.00	1.8	2.4	1.7	1.6	2.10	2.1	2.1	1.8	1.8
3.20	2.5	2.6	2.3	2.2	3.00	2.3	2.4	2.2	2.1	3.08	2.6	2.6	2.2	2.2
4.18	3.0	3.0	2.8	2.7	4.00	2.8	2.8	2.6	2.5	4.10	3.0	3.0	2.8	2.6
5.22	3.3	3.3	3.1	3.0	5.00	3.2	3.2	3.0	2.8	5.10	3.3	3.3	3.0	3.0
7.18	4.2	4.1	3.9	3.8	7.00	3.9	3.8	3.8	3.6	7.10	4.1	4.0	3.8	3.7
9.22	4.8	4.7	4.6	4.4	9.00	4.6	4.6	4.5	4.3	9.10	4.7	4.6	4.4	4.4
21.18	7.9	7.8	7.7	7.6	21.00	7.8	7.6	7.6	7.4	21.08	7.9	7.8	7.6	7.5
POINT No. 4 (A=1.49m <sup>2</sup> )					POINT No. 5 (A=1.28m <sup>2</sup> )					POINT No. 6 (A=1.49m <sup>2</sup> )				
t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層	t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層	t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層
0.	0.8	1.1	0.7	0.6	0.	0.7	1.1	0.7	0.6	0.	0.8	1.1	0.7	0.7
0.67	1.2	1.4	1.0	1.0	0.52	1.1	1.3	1.0	0.9	0.60	1.2	2.2	1.0	1.0
1.20	1.5	1.7	1.3	1.3	1.02	1.6	1.6	1.3	1.2	1.08	1.5	2.6	1.3	1.3
1.72	1.8	1.8	1.5	1.5	1.52	1.6	1.8	1.5	1.4	1.62	1.8	1.9	1.5	1.5
2.22	2.1	2.1	1.8	1.8	2.02	1.8	2.8	1.7	1.6	2.12	2.0	2.1	1.8	1.7
3.22	2.4	2.6	2.3	2.2	3.02	2.3	2.4	2.2	2.1	3.10	2.4	2.5	2.2	2.2
4.20	2.9	2.9	2.8	2.6	4.02	2.8	2.8	2.6	2.5	4.10	2.8	2.9	2.7	2.6
5.25	3.3	3.3	3.1	3.0	5.02	3.2	3.2	3.0	2.9	5.12	3.3	3.3	3.1	3.0
7.20	4.1	4.0	3.8	3.8	7.02	4.1	3.9	3.8	3.6	7.12	4.0	4.0	3.8	3.7
9.23	4.8	4.7	4.6	4.4	9.02	4.6	4.6	4.5	4.3	9.12	4.7	4.6	4.6	4.4
21.18	7.9	7.8	7.7	7.6	21.02	7.8	7.6	7.6	7.4	21.10	7.8	7.7	7.6	7.5
POINT No. 7 (A=2.63m <sup>2</sup> )					POINT No. 8 (A=2.25m <sup>2</sup> )					POINT No. 9 (A=2.63m <sup>2</sup> )				
t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層	t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層	t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層
0.	0.8	1.1	0.7	0.6	0.	0.8	1.1	0.7	0.6	0.	0.8	1.1	0.7	0.7
0.68	1.1	1.4	1.0	1.0	0.53	1.1	1.3	1.0	0.9	0.62	1.2	1.8	1.0	1.0
1.22	1.5	1.7	1.3	1.3	1.03	1.4	1.6	1.3	1.2	1.10	1.5	2.4	1.3	1.3
1.73	1.7	1.9	1.6	1.5	1.53	1.7	1.8	1.5	1.4	1.63	1.7	1.9	1.6	1.5
2.23	2.0	2.1	1.8	1.8	2.03	1.9	2.6	1.7	1.7	2.13	2.0	2.1	1.8	1.7
3.22	2.4	2.5	2.3	2.2	3.03	2.3	2.4	2.2	2.1	3.12	2.5	2.5	2.3	2.2
4.22	2.9	2.9	2.7	2.6	4.03	2.8	2.8	2.6	2.5	4.12	2.8	2.9	2.7	2.6
5.25	3.2	3.3	3.1	3.0	5.03	3.2	3.2	3.0	2.9	5.13	3.2	3.3	3.1	3.0
7.22	4.0	4.0	3.8	3.7	7.03	3.9	3.9	3.8	3.7	7.12	4.0	3.9	3.8	3.7
9.25	4.8	4.7	4.6	4.4	9.03	4.6	4.6	4.4	4.2	9.13	4.7	4.6	4.6	4.4
21.20	7.9	7.7	7.6	7.5	21.03	7.8	7.6	7.6	7.4	21.12	7.8	7.7	7.6	7.5
POINT No. 10 (A=3.50m <sup>2</sup> )					POINT No. 11 (A=3.00m <sup>2</sup> )					POINT No. 12 (A=3.50m <sup>2</sup> )				
t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層	t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層	t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層
0.	0.8	1.0	0.7	0.6	0.	0.8	1.1	0.7	0.6	0.	0.8	1.1	0.7	0.6
0.68	1.1	1.4	1.1	1.0	0.55	1.1	1.3	1.0	1.0	0.63	1.2	1.7	1.0	1.0
1.25	1.7	1.7	1.4	1.3	1.03	1.4	1.7	1.3	1.2	1.10	1.5	2.3	1.3	1.3
1.75	1.7	1.8	1.6	1.5	1.55	1.6	1.8	1.5	1.4	1.65	1.7	1.8	1.6	1.5
2.25	2.0	2.1	1.8	1.8	2.05	1.9	2.6	1.8	1.7	2.15	1.9	2.1	1.8	1.7
3.23	2.4	2.5	2.3	2.2	3.03	2.3	2.4	2.2	2.1	3.13	2.3	2.4	2.3	2.2
4.23	2.8	2.9	2.8	2.6	4.05	2.8	2.8	2.6	2.6	4.13	2.8	2.8	2.7	2.6
5.27	3.2	3.3	3.1	3.0	5.03	3.2	3.2	3.0	2.9	5.15	3.2	3.3	3.1	3.0
7.22	4.0	4.0	3.8	3.7	7.05	3.9	3.9	3.8	3.7	7.13	4.0	4.0	3.8	3.7
9.27	4.8	4.6	4.6	4.4	9.05	4.6	4.6	4.5	4.4	9.15	4.7	4.6	4.6	4.4
21.22	7.9	7.8	7.6	7.5	21.05	7.8	7.6	7.6	7.4	21.12	7.8	7.6	7.6	7.5
POINT No. 13 (A=8.75m <sup>2</sup> )					POINT No. 14 (A=7.50m <sup>2</sup> )					POINT No. 15 (A=8.75m <sup>2</sup> )				
t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層	t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層	t(h)	第1層	第2層	第3層	第4層
0.	0.8	1.1	0.7	0.7	0.	0.8	1.1	0.7	0.7	0.	0.8	1.1	0.7	0.7
0.70	1.2	1.4	1.1	1.0	0.72	1.4	1.5	1.2	1.0	0.75	1.4	1.5	1.2	1.1
1.27	1.5	1.7	1.4	1.3	1.05	1.4	1.6	1.3	1.2	1.13	1.5	2.1	1.4	1.3
1.77	1.7	1.8	1.6	1.5	1.57	1.7	1.8	1.5	1.5	1.67	1.7	1.8	1.6	1.5
2.25	2.0	2.1	1.8	1.8	2.07	1.9	2.4	1.8	1.7	2.17	1.9	2.1	1.8	1.8
3.23	2.3	2.4	2.3	2.2	3.05	2.3	2.4	2.2	2.1	3.15	2.4	2.5	2.2	2.2
4.25	2.8	2.9	2.8	2.6	4.05	2.8	2.8	2.6	2.6	4.15	2.8	2.9	2.7	2.6
5.28	3.2	3.3	3.1	3.0	5.05	3.2	3.2	3.0	2.9	5.17	3.2	3.3	3.1	3.0
7.23	4.0	4.0	3.8	3.7	7.07	4.0	3.9	3.8	3.7	7.15	4.0	4.0	3.8	3.7
9.28	4.8	4.6	4.6	4.4	9.07	4.7	4.6	4.5	4.4	9.17	4.7	4.6	4.6	4.4
21.23	7.9	7.8	7.6	7.5	21.05	7.8	7.6	7.6	7.4	21.13	7.8	7.6	7.6	7.5
DO METER No. 1	C <sub>s</sub> = 11.75		C <sub>0</sub> = 0.80 (第1層)											
DO METER No. 2	C <sub>s</sub> = 11.30		C <sub>0</sub> = 1.10 (第2層)											
DO METER No. 3	C <sub>s</sub> = 11.35		C <sub>0</sub> = 0.70 (第3層)											
DO METER No. 4	C <sub>s</sub> = 11.20		C <sub>0</sub> = 0.70 (第4層)											



表-7 各測定点の代表する水体积

(単位: m<sup>3</sup>)

測定地点			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	計
DO メーター	受持面積 (m <sup>2</sup> )		1.1375	0.975	1.1375	1.4875	1.275	1.4875	2.625	2.25	2.625	3.5	3.	3.5	8.75	7.5	8.75	50.0 <sup>m<sup>3</sup></sup>
	測定水深																	
No. 1	(cm)	(m)	0.142	0.122	0.142	0.186	0.159	0.186	0.328	0.281	0.328	0.438	0.375	0.438	1.094	0.938	1.094	
No. 2	-5	0.125	0.256	0.219	0.256	0.335	0.287	0.335	0.591	0.506	0.591	0.788	0.675	0.788	1.969	1.688	1.969	
No. 3	-20	0.225	0.284	0.244	0.284	0.372	0.319	0.372	0.656	0.563	0.656	0.875	0.750	0.875	2.188	1.875	2.188	
No. 4	-50	0.25	0.341	0.293	0.341	0.446	0.383	0.446	0.788	0.675	0.788	1.05	0.90	1.05	2.625	2.25	2.625	
No. 4	-70	0.30																
計		0.9																45m <sup>3</sup>

各地点各層での測得濃度値を表-6に示す。曝気開始時の当初濃度は、溶存酸素計の読みで0.6~1.1mg/l、ウィンクラー法では1.6mg/lである。実験終了時の濃度は、溶存酸素計の読みで7.4~7.8mg/l、ウィンクラー法では8.7mg/lである。開始時と終了時のウィンクラー法での分析濃度により、各溶存酸素計の読みの補正式を求めることができる。表-6には、補正を施す前のデータを示している。飽和濃度は、各溶存酸素計で1.12~11.75mg/l、であり結局1.4mg/lとなる。

散気開始直後の低濃度時には、散気管からの距離に応じて0.2~0.3mg/l程度の濃度差が認められるが、終了時の高濃度時には濃度差がごく小さい。濃度回復の状況は、いずれの地点でも良く似ている。各地点各層の濃度経時変化に対し、式(20)より $K_L a$ を各測定点毎に求めると、0.0474~0.0501(1/h)の間の値となる。15地点4層計60個の $K_L a$ 値を単純に算術平均すると0.0489となる。

測得濃度や濃度上昇の状況が、各地点でよく似ていることは、この水槽内での溶存酸素の混合が良いことを示している。

ここでは、各ケースの溶解速度比較のために、次の手順で $K_L a$ 値を算出している。

- ① 各溶存酸素計ごとに測得濃度を補正し、式(26)により無次元化する。
- ② 各地点各層ごとに、その測定値で代表される水塊体積を求めておく。これを各測定点の受持ち体積とする。
- ③ ①で求めた濃度を、②で求めた受持ち体積で重みづけをし、平均濃度を算定する。
- ④ 平均濃度の経時変化より、平均濃度に対する $K_L a$ 値を式(20)により求める。

ケース1のデータを例に示す。ケース1での測点を示した図-16には、各測定位置が代表する受持ち面が破線で区切っている。例えば、第1地点は、斜線でハッチが施されている部分の濃度を代表していると見なす。第13, 14, 15地点は、それぞれ第16, 17, 18地点の受

持ち面積も加えた部分の代表点と見なす。さらに水深方向にも4層に仕切り受持ち水深を仮定している。こうして、15地点4層計60個の濃度値が代表している水塊体積が算定できる。計算結果を表-7に示す。表中の体積値はm<sup>3</sup>単位で示しており、表-7の場合、総計は水槽の片側の体積10m×5m×0.9m=45m<sup>3</sup>となる。

この受持ち体積を用いて、水槽内の平均濃度の経時変化を算定する。濃度測定は全データ同時に実施しているわけではなく、測定時刻のずれが最大30分程度ある。このため各測定点の濃度変化は、式(5)の成立を仮定し時間に関して指数関数的に増加するとし、外挿法により定時の濃度値を求め算定に用いている。

溶存酸素計の濃度で表わした平均濃度 $\bar{C}$ (mg/l)、無次元化した平均溶存酸素不足濃度 $\bar{D}^*$ 、およびこの対数を表-8に示す。 $\bar{D}^*$ は、散気開始時に1、飽和時に0となる。図-17中の白丸で示すように散気時間に対して $\ln(\bar{D}^*)$ をプロットすると直線となり、傾きが $K_L a$ となる。このケースでは、 $K_L a$ 値は、0.488(1/h)となる。

表-8 槽内平均溶存酸素濃度、平均無次元不足濃度、および酸素溶解効率

曝気時間	$\bar{C}$	$\bar{D}^*$	$\ln(\bar{D}^*)$	$a$
h	mg/l			#
0.	0.82	1.	0.	0.0315
0.5	1.10	0.974	-0.027	0.032
1.0	1.44	0.942	-0.060	0.038
1.5	1.56	0.931	-0.072	0.013
2.	1.84	0.904	-0.101	0.032
3.	2.24	0.866	-0.144	0.023
4.	2.70	0.823	-0.195	0.026
5.	3.07	0.788	-0.238	0.021
7.	3.81	0.718	-0.332	0.021
9.	4.51	0.652	-0.428	0.020
21.	7.64	0.356	-1.033	0.015

#  $\bar{C} = 0$  mg/l の値

り、60測点でそれぞれ求めた $K_{La}$ 値の算術平均値0.489とほとんど変わらない値となっている。

表-8には、1つ前の測定時刻からその欄の測定時刻までの間に溶解した酸素量と、吹込み空気中の酸素量との比が載せてある。この比は式(21)で定義される溶解効率 $\alpha$ に相当するものである。時間間隔が短いと、濃度値の小さな誤差により $\alpha$ が大きく変動する。このため、30分ごとの値はややばらつく。しかし、時間とともに $\alpha$ 値は徐々に低下してゆく傾向がわかる。飽和濃度に達した後は、過飽和現象とならない限りもうそれ以上溶解せず $\alpha$ はゼロになる筈である。また表-8には、散気開始

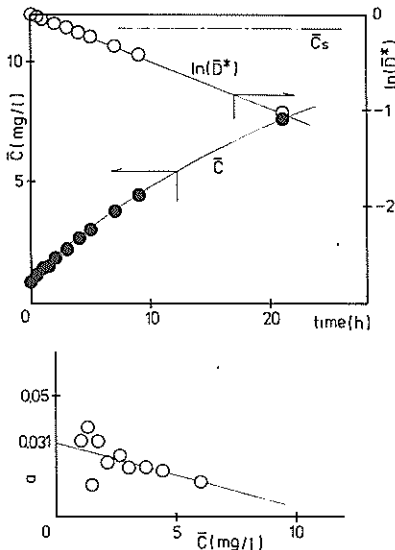


図-17 平均濃度 $\bar{C}$ 、平均無次元不足濃度 $\bar{D}^*$ の経時変化および、酸素溶解効率 $\alpha$ の濃度依存性(実験ケース1)

時の欄に $\bar{C}=0$  mg/lでの $\alpha$ の値( $\alpha_0$ )を算定して記入してある。これらの $\alpha$ 値を平均濃度 $\bar{C}$ に対してプロットすると図-17の下図のようになる。低濃度時では測定時間間隔が浅いためややばらつくが、おおむね直線に載っており、式(21)の成立が確かめられる。たて軸を切る切片は、 $\bar{C}=0$  mg/lでの $\alpha$ 値であり、よこ軸を切る切片は飽和濃度値である。

他の12ケースについても同様に解析し、 $K_{La}$ 、 $\alpha$ を求めている。 $\bar{C}$ および $\ln(\bar{D}^*)$ の経時変化図、 $\bar{C}$ に対する $\alpha$ の変化図は、他の12ケースについても文末の付録Bにまとめてある。

### 5.5 曝気効率の比較

各実験ケース毎に求めた総括酸素移動係数 $K_{La}$ と、 $\bar{C}=0$  mg/l時の酸素の溶解効率 $\alpha_0$ とを表-9に示す。 $K_{La}$ 値より溶解の速さを、 $\alpha_0$ 値より溶解の割合を比較できる。

表-9には、ウィンクラー法により測定した各実験時の溶存酸素初期濃度、飽和濃度ならびに実験時水温とこの水温での純水の飽和濃度をも同時にかかげてある。実験時水温は8.6~13.2℃の範囲であり、ほぼ10℃前後である。また、表-9にかかげた $K_{La}$ の値は、式(19)に従って10℃での値に直したものである。ここで、式(19)の $\theta$ の値には、1.024を用いている。 $\alpha_0$ は、式(21)に従い、 $\bar{C}=0$  mg/lとし、10℃での $K_{La}$ 値から新たに算定している。ケース1とケース2は同一条件での実験であり、 $K_{La}$ 、 $\alpha_0$ はそれぞれ3~5%の差が生じている。

$K_{La}$ は、0.1~0.05 (1/h)の値であり、二次元水路での値にほぼ近いが、やや低目になっている。また、 $\alpha_0$ は4~2%程度の値である。比較的大きな気泡での散気

表-9 総括酸素移動係数 $K_{La}$ および酸素溶解効率 $\alpha_0$ の比較

ケース	実験条件				測定結果				
	散気管形状	散気孔径	散気孔間隔	吹込み空気量	初期濃度	飽和濃度	水温(飽和)	10℃での $K_{La}$	$\alpha_0$
1	A	0.5 mm	30 mm	10 Nl/m/min	1.6 mg/l	11.4 mg/l	8.6 (11.7) °C	0.0504 1/h	0.033
2	A	0.5	30	10	3.1	10.5	11.3 (10.9)	0.0519	0.031
3	A	0.5	30	20	3.7	10.3	9.7 (11.4)	0.1014	0.030
4	A	1.0	120	10	1.7	10.5	13.9 (10.3)	0.0391	0.023
5	B	0.5	30	10	2.2	11.9	9.6 (11.4)	0.0578	0.039
6	C	0.5	30	7.5	3.1	11.1	11.0 (11.3)	0.0381	0.032
7	C	0.5	30	10	3.4	11.4	9.3 (11.5)	0.0425	0.027
8	C	0.5	30	20	2.7	10.3	9.4 (11.4)	0.0868	0.025
9	C	0.5	30	30	3.1	11.3	10.3 (11.2)	0.1255	0.027
10	C	0.5	60	20	3.8	10.3	12.0 (10.8)	0.0777	0.023
11	C	1.0	120	10	3.2	11.5	9.0 (11.6)	0.0328	0.021
12	C	1.0	120	20	3.5	11.6	9.2 (11.5)	0.0520	0.017
13	D	1.0	120	10	3.4	10.9	13.2 (10.5)	0.0344	0.021

実験として、ほぼ妥当な値である。

散気管形状 A および C の両タイプでは、吹込み空気量、散気孔径を変えた実験をいくつかのケース実施している。空気の吹込み量をふやすと、 $K_{La}$  値は増加し  $\alpha_0$  値は減少する傾向がうかがえる。よこ軸に吹込み量の対数をとって軸に  $K_{La}$  値の対数をとって、各形状タイプにつき散気孔径ごとにプロットすると図-18 のようになる。同一散

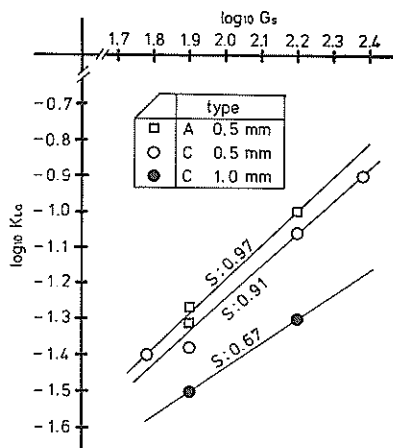


図-18 吹込み空気量  $G$  による総括酸素移動係数  $K_{La}$  の変化

気管では、吹込み量の増加につれて  $K_{La}$  値が増加し、 $K_{La}$  値は吹込み量のべき乗で表わされることが確認できる。図-18 より直線の傾きを読みとると、散気孔径 0.05 mm では 0.97~0.91, 散気孔径 1.0 mm では 0.67 となる。一方、式(12), (13)の King 式では、 $K_{La}$  の吹込み量依存性を、吹込み量の  $\alpha$  乗ないし  $\alpha'$  乗として示してあり、 $\alpha, \alpha'$  の値は式(14)によって与えている。ここでの実験水深 0.9 m を与えてやると  $\alpha = 0.805$ ,  $\alpha' = 0.862$  となり散気孔径 0.5 mm での測得値に近い値となる。また、式(16)の Eckenfelder 式では、 $K_{La}$  は吹込み量の  $(1-n)$  乗に比例するとしており、この  $n$  は、式(1)の  $n$  を想定している。気泡径の吹込み空気量依存性実験の結果は、図-4 に示されており、 $n$  として、散気孔径 0.5 mm, 1 mm とともに、0.03~0.05 程度との値が得られている。この  $n$  値を用いれば、 $(1-n)$  の値は、散気孔径 0.5 mm での測得値 0.91~0.97 に非常に近い値となる。 $K_{La}$  の吹込み空気量依存性は、平面水槽での実験においても Eckenfelder 式が成立すると見なせる。

$K_{La}$  が空気量の 1 乗に比例するならば、式(21)で明らかのように  $\alpha_0$  の値は吹込み空気量に関係なく一定となる。しかし、吹込み空気量の指数が 1 より小さいため、

吹込み空気量がふえるにつれ  $\alpha_0$  の値が減少してくることになるのである。

ケース 1 と 4, ケース 7 と 11, ケース 8 と 12 のように、同一吹込み量を与えた場合、散気孔径が大きくなり散気孔間隙が長くなると  $K_{La}$  値は小さくなる。散気孔径を 0.5 mm から 1 mm へと 2 倍にすると散気孔面積は 1 孔あたり 4 倍になる。散気孔間隙を 4 倍に長くし、見かけの空隙率をそろえた場合、散気孔径が 1 mm になると 0.5 mm の時の 7~8 割程度の  $K_{La}$  値となる。同じ空隙率の散気管を用いる場合、小さな穴を多数あけた方が溶解効率が良くなる。また、同一散気孔径の管に同一吹込み量を与えても、ケース 8 と 10 との比較から、散気孔間隙を広くし、空隙率を 1/2 にすると  $K_{La}$  値は 9 割程度低下する。

散気管の効率を比較する。A, B, C タイプでは、散気孔径 0.5 mm, 吹込み空気量 10 Nl/m/min の共通条件で実施例がある。 $K_{La}$  値では B が最も大きく、以下 A, C の順となる。A, C, D タイプでは、散気孔径 1.0 mm, 吹込み空気量 10 Nl/m/min の共通条件での実施例がある。 $K_{La}$  値では A が最も大きく、以下 D, C の順となる。ケース 3 と ケース 8 とを比較しても、 $K_{La}$  値では A が C より大きい。結局、 $K_{La}$  値により溶解効率を比較すると、効率の高いものから順に B, A, D, C の順位となる。タイプ D とタイプ C との差は小さい。

## 5.6 平面水槽実験結果のまとめ

平面水槽を用いて実施した曝気実験により、誘起流れの状況、酸素溶解効率などを比較し、次の知見を得た。

誘起流れは、二次元水路と同様に大きな循環流を形成する。表面の最大水平流速は散気管から 1 m 程度離れた地点で測定され、Kobus 式などで予測される値に近い値となる。同一の吹込み空気量に対しては、小さい散気孔を集密に並べた方が流速がはやくなるようである。

二本の散気管にはさまれた水域では鉛直の流速が大きくなり混合も良くなる。

溶存酸素濃度の回復は、水槽内の混合の良さを考慮して、平均濃度によって検討した。水槽内の平均濃度から総括酸素移動係数  $K_{La}$  を求め、温度補正を施し比較すると、次のことがわかった。 $K_{La}$  は吹込み空気量がふえると増加し、増加の割合は式(16)の Eckenfelder 式でよく説明できる。同式では、吹込み空気量の指数が 1 より小さいため、溶解効果  $\alpha_0$  の面からは大量の空気を短時間に吹込むよりも、少しずつ長期にわたって吹込む方がよい。同一吹込み量に対しては、小さな穴を多数あけた散気管を用いる方が効率がよい。比較した 4 種の散気管形状では、B, A タイプが他に比して高い溶解効率を有し

ている。

## 6. 現地への適用

### 6.1 酸素溶解の相似律

酸素溶解効率を、式(12)、(13)のKing式や、式(16)のEckenfelder式などで表わされる。平面水槽実験からは、Eckenfelder式の成立が、吹込み空気量に関しては確認された。ここでは、このEckenfelder式を用いて、溶解効率の相似律について検討し、室内実験と同一の溶解効率を得るためには、現地でのどのぐらいの空気を吹込んでやる必要があるのか考えてみる。

ここで予想している現地海域は、水深5m程度の比較的静穏な港内である。Eckenfelder式やこの式に関連する気泡径と吹込み量との関係式等が、水深5mまで拡張して成立し適用できるかどうかについては検討されていない。しかし、現在までの室内実験の知見をもとに大略を予想することは、現地への適用性を検討するうえで重要である。

いま、下添字 $m$ は実験水槽での値、下添字 $p$ は現地海域での値を表わすとする。実験水槽と実海域との間には幾何学的な相似が成立しているとする。ここで、実験水槽での値と実海域での値との関係を次式のようにおく。

$$\begin{aligned} l_r &= \frac{x_p}{x_m} = \frac{y_p}{y_m} \\ d_r &= \frac{z_p}{z_m} \\ t_r &= \frac{t_p}{t_m} \\ (K_{La})_r &= \frac{(K_{La})_p}{(K_{La})_m} \\ \xi &= \frac{(G_s)_p}{(G_s)_m} \end{aligned} \quad (30)$$

ここで、 $x, y$ は $x, y$ 方向の長さ、 $z$ は鉛直方向の長さを表わす。さらに、式(16)中のパラメーターについても、実験水槽での値と実海域での値との関係を次式のようにおく。

$$\begin{aligned} f_r &= \frac{f_p}{f_m} \\ n_r &= \frac{n_p}{n_m} \\ g_r &= \frac{g_p}{g_m} \end{aligned} \quad (31)$$

実海域における式(16)と、実験水槽における式(16)との比は次式のようになる。

$$(K_{La})_r = f_r \cdot \frac{(G_s)_p^{(1-n_p)}}{(G_s)_m^{(1-n_m)}} \cdot \frac{H_p^{(1-g_p)}}{H_m^{(1-g_m)}} \cdot \frac{1}{V_r} \quad (32)$$

上式で $(K_{La}) = 1$ となるような $\xi = (G_s)_p / (G_s)_m$ を求めることを試みよう。

$G_s, H$ の指数について考えてみる。 $G_s$ の指数 $n$ は、式(1)により定義される。実験結果によれば、 $n$ は散気孔径にはあまり左右されず、 $G_s$ が大きくなるとやや小さくなるようである。図-4のように $n = 0.03 \sim 0.05$ 程度の小さい値であるため、 $n$ 値がやや変化しても $1-n$ の値はほとんど変化しない。 $G_s$ の比 $\xi$ がそれほど大きくなければ $1-n_p = 1-n_m = 1-n$ としても良いであろう。 $H$ の指数 $g$ は、式(15)の左辺における $H$ の指数 $1/3$ の値を一般化したものである。Eckenfelderによれば、水深100cm程度以上あれば、水深に依らずおおよそ $g = 1/3$ となる。ここでの実験水槽も水深90cmであり、 $g_m = g_p = g$ として良いであろう。

次いで、式(16)での係数 $f$ について考える。式(9)で示された係数 $F$ は、無次元係数であった。一方、端効果を勘案した式(15)での $f'$ は、長さの $1/3$ 乗の次元を有していることになる。式(16)の $f$ は、式(10)、(15)などより $f'$ と次の関係がある。

$$f = \frac{6}{b} \cdot \left(\frac{Dy}{\nu}\right)^{1/2} \cdot f' \quad (33)$$

$$\text{ただし、 } b = \frac{d_B}{G_s^n}$$

$b$ は、式(1)の比例係数に相当する。図-4などの結果より、 $b$ は散気孔径に左右されるものと思われる。散気管についての幾何学的相似は仮定せず、同一孔径とする。 $b$ の水深依存性については不明であるが、とりえず水深に依存しないとすれば、室内水槽と実海域との $b$ は同一となる。また、室内水槽と実海域との水質・水温が同じならば、 $\nu, D_L$ とも同じ値である。よって、 $f_r = f'_r = (d_r)^g$ と仮定する。

結局、式(32)は次のように書き直せる。

$$\begin{aligned} (K_{La})_r &= (d_r)^g \cdot \xi^{(1-n)} \cdot d_r^{(1-g)} \cdot \frac{1}{V_r} \\ &= \xi^{(1-n)} \cdot l_r^{-2} \end{aligned} \quad (34)$$

$(K_{La})_r = 1$  となることは、次のようになる。

$$\xi = l_r \cdot l_r^{2/n} \quad (35)$$

この結果によれば、長さの比が  $l_r$  の歪なし模型により室内実験を行ない、室内実験と同一の  $K_{La}$  値を得るためには、必要吹込み空気量比  $\xi$  は  $l_r^{2/1-n}$  となる。 $n=0.03$  なら  $\xi$  は  $l_r^{2.06}$ ,  $n=0$  なら  $l_r^{2.0}$  である。 $n$  の値が小さければ、 $K_{La}$  のスケール効果も小さい。前章にまとめた平面水槽実験結果を、水深 5 m の海域に適用する場合を考える。長さの縮尺は  $l_r=5.6$  となる。 $n=0.03$  として、必要吹込み空気量比  $\xi$  は 34.2 となる。1 辺 56 m の海域に対し 1 分間に 340 Nl 程度吹込めば、1 辺 10 m の実験水槽で 10 Nl の吹込み量と同等の  $K_{La}$  値が期待できることになる。

Eckenfelder 式をもとに、気泡による曝気と大気による曝気とを区別しそれぞれにつきスケール効果を検討した例<sup>15)</sup> などもあるが、酸素溶解の相似律には不明な点が多く今後の調査・検討が期待される。ここでの二次元水路実験、平面水槽実験は、すべて水深 90 cm で実施しており、水深の変化による酸素溶解への影響は実験値を比較する際には考慮しなくてよい。

## 6.2 溶存酸素収支式

現場海域の水深が比較的浅く、鉛直的に同一水質とみなせるとする。こうした海域の溶存酸素濃度  $C$  の変化は流れによる移動や拡散に加え、溶存酸素の消費速度および供給速度のバランスで決まってくる。溶存酸素濃度の変化を表わす基礎式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} V \frac{\partial C}{\partial t} = & V \frac{\partial}{\partial x} (D_x \frac{\partial C}{\partial x}) + V \frac{\partial}{\partial y} (D_y \frac{\partial C}{\partial y}) \\ & - V \frac{\partial}{\partial x} (u C) - V \frac{\partial}{\partial y} (v C) + V \cdot K_{La} \cdot \\ & (C_s - C) + (-K_1 L + K_2 (C_s - C) - D_B) \cdot V \end{aligned} \quad (36)$$

ここで、 $V$  は水体積、 $D_x, D_y$  は  $x, y$  方向の水平拡散係数、 $u, v$  は  $x, y$  方向の流速、 $K_{La}$  は散気による総括酸素移動係数、 $K_1$  は有機物の酸化による酸素消費速度、 $L$  は酸素要求量で表わした有機物濃度、 $K_2$  は流れによる水表面からの再曝気係数、 $D_B$  は底泥面の酸素消費などによる酸素消費速度、を表わす。上式は、曝気などにより酸素供給速度が変化すると、溶存酸素濃度も変化するこ

とを示している。

対象海域の混合が良く、水質が一様とみなせる場合、対象水塊を 1 つの BOX としてより簡単に解析できる。水塊内の溶存酸素濃度の変化式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} = & \frac{q}{V} (C_{in} - C) + K_{La} (C_s - C) + K_2 (C_s - C) \\ & - K_1 L - D_B \end{aligned} \quad (37)$$

ここで  $q$  は流入水量  $C_{in}$  は流入水質である。

非曝気時の現況水質  $\dot{C}$  は、ある期間ほぼ一定で定常として良ければ式 (37) より次のように求められる。

$$0 = \frac{q}{V} (C_{in} - \dot{C}) + K_2 (C_s - \dot{C}) - K_1 L - D_B \quad (38)$$

$$\dot{C} = \frac{1}{\frac{q}{V} + K_2} \{ K_2 \cdot C_s + \frac{q}{V} \cdot C_{in} - K_1 L - D_B \} \quad (39)$$

一方、曝気時の水質  $C$  も、曝気時水質がほぼ一定で定常として良ければ、 $\dot{C}$  を用いて次のように書ける。

$$\begin{aligned} 0 = & \frac{q}{V} (C_{in} - C) + K_{La} (C_s - C) + K_2 (C_s - C) \\ & - K_1 L - D_B \end{aligned} \quad (40)$$

式 (38) と式 (40) の差をとれば、

$$\left( \frac{q}{V} + K_2 \right) (C - \dot{C}) = K_{La} (C_s - C) \quad (41)$$

上式左辺は、溶存酸素濃度が  $\dot{C}$  から  $C$  へと上昇することにより、増大した系外への流出量と再曝気効率の低下による供給の減少量との和を示している。このロスが、人工的な曝気による溶解量とつり合って平衡濃度  $C$  を保っていることになる。

上式より、現況水質  $\dot{C}$  と目標水質  $C$  が決まると、対象海域の水理特性の条件から、必要  $K_{La}$  値が求められる。

従って、現地に適用する場合は、単に  $K_{La}$  への考慮のみでなく現地水質現況、水理的特徴などへの考慮も必要である。

また、曝気に伴う誘起流により底泥が巻き上げられ、 $D_B$ が増加すること、あるいは誘起流により流速  $u$ ,  $v$  がふえ  $q$  がふえること、などの変化と水質への影響の大きさにも考慮を払う必要がある。

## 7. おわりに

閉鎖的な港内の溶存酸素濃度改善のため、人工的な空気吹込みによる曝気工法を想定し、吹込み散気管の効率比較を試みた。

二次元水路を用いた予備実験から、気泡の発生状況、誘起流れの状況、酸素溶解の状況について観察を行なった。空気吹込みにより発生する気泡の気泡径は散気孔径により変化し、また吹込み空気量の  $0.03 \sim 0.05$  乗に比例して増大している。誘起流れは、気泡の上昇により引き起こされる。上昇流は水表面に達した後表層水平流となり散気管から離れる方向に流下する。表層水平流は水深の  $2 \sim 3$  倍程度の距離流下すると微弱となる。中～下層では上昇流を補う弱い水平流が表層と逆向きに流れ、全体として大きな循環流の形成が見られる。表層水平流は、空気吹込み量が大いほど強く吹込み圧力にはよらない。酸素溶解は、気泡の上昇による溶解と、誘起流による水表面からの溶解とが考えられるが、誘起流流速や影響範囲が小さく後者の寄与は実験水深が深ければ無視して良い。気泡による酸素溶解は、空気吹込み量が大いほど早く吹込み圧力にはよらない。

平面水槽を用いた実験で、4種の散気管形状、散気孔径、散気孔空隙率、空気吹込み量などを変えて、誘起流れと酸素溶解効率とを比較した。誘起流れは、二次元水路実験時よりもやや小さくなるもののほぼ同程度の鉛直循環流が認められる。二本の散気管にはさまれた水域では下向きの鉛直流速が大きくなる。水平流速は、空気吹込み量が大いほど速くなり、小さい散気孔を密に並べた方が速くなる。酸素溶解速度を総括酸素移動係数でみると、空気吹込み量が大いほど増大し、小さい散気孔を密に並べた方が大きい。しかし、吹込み量に対する溶解量の比でみると、大量の空気を短時間に吹込むよりも少しずつ長期にわたって吹込む方が溶解効率は良い。

さらに、現地に適用する際に考慮すべき諸点について簡単な考察を加えた。諸々の仮定をもうけて  $K_{La}$  の相似性について検討し、現地での必要空気吹込み量を試算している。

人工的な空気吹込みによる水質改善の試みには、酸素供給の面と同時に対象海域の溶存酸素消費特性、溶存酸素移動構造等にも配慮が必要である。活発な酸素消費が起きておりながら酸素供給がおさえられている海域では、

人工的な酸素溶解による水質改善効果も大きくなると思われる。

本実験を実施するにあたり、第五港湾建設局海域整備課から現地適用上の問題点等の意見をいただいた。ここに深く感謝いたします。二次元水路実験の一部は、昭和56年度東海大学実習生上原康明君（現日本テトラポッド株式会社）の助けを借りて実施した。ここに深く感謝いたします。

超音波流速計等のデジタル変換には、海水汚染水理研究室のデータ処理装置（ティアック社製 DR-1000 を中心とした装置）を用いている。

（昭和57年9月30日受付）

## 参考文献

- 1) 既応の実験例に対するレビューとしては、例えば、第五港湾建設局：曝気施設計画調査報告書、263p. 昭和56年3月
- 2) Eckenfelder, Jr., W.W., D.J. O'Connor: Biological Waste Treatment, Pergamon Press, pp. 86~104 (1961) または、邦訳書として岩井重久訳：W.W. Eckenfelder, Jr., D.J. O'Connor 共著：廃水の生物学的処理，コロナ社，pp. 84~111 (1965)
- 3) Kobus, H: Berechnungsmethoden für Luftschleier — Strömungen zur Auslegung von Pressluft — Ölsperren, Proc. Symposium on Air Bubbling, Ottawa (1961)
- 4) 栗原道徳：空気防波堤について (I)~(III), 第1~3回海岸工学講演集, pp. 93~97, pp. 71~77, pp. 139~146, (1954)~(1956)
- 5) Bulson, P.S., M.I. Struct: The theory and design of bubble breakwaters, Proc. 11th Conference on Coastal Engineering, Vol II, pp. 995~1015, (1968)
- 6) Higbie, R: The rate of absorption of a pure gas into a still liquid during short period of exposure, Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs., Vol. 31, pp. 365~ (1935)
- 7) Camp, T.R.: Discussion of 'Mechanics of reaeration in natural streams' by D.J. O'Connor and W.E. Dobbins, Jour. Sanitary Eng. Div., Vol. 83, No. SA2, pp. 1227-9~1227-15, (1958)
- 8) King, H.R: Mechanics of oxygen transfer in spiral flow aeration tank, (I) Derivation of formula, (II) Experimental work, (III) Application of formula, S. and I.W., Vol. 27, No. 8, pp. 894~908, No. 9 pp. 1007~1026, No. 10 pp. 1123~1129 (1955)

- 9) 柏谷衛, 安中徳二, 及川直也: 散気式エアレーションタンクの酸素移動, 第6回衛生工学研究討論会講演集 pp. 90~99 (1970)
- 10) O'Connor, D.J., W.E. Dobbins: Mechanism of reaeration in natural streams, Trans. ASCE, Vol. 123, (1958)
- 11) 村上 健: 河川における再ばっ気, 第5回衛生工学研究討論会講演集, pp. 45~52 (1969)
- 12) The Committee on Sanitary Engineering Research: Effect of water temperature on stream reaeration, 31st prog. rep. of Committee on San. Engr. Res., Jour. San. Eng. Div. ASCE, Vol. 87, No. SA6, (1961)
- 13) 松本順一郎, 中村玄正: 単一オリフィスより生じる気泡の性状と酸素移動に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第175号, pp. 49~57, (1970)
- 14) 岩垣雄一, 安井誠人: 空気防波堤に関する研究(第1報), 空気防波堤の基本的性質, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 563~569, (1975)
- 15) 宗宮 功: 酸素供給率に関するエアレーションタンクのスケール効果, 第1回衛生工学研究討論会講演集 pp. 51~70, (1965)

#### 使用記号一覧

- $A$  : 水槽の面積 ( $m^2$ )
- $a$  : 式(21)で定義される酸素溶解効率
- $a_0$  : 溶存酸素濃度0のときの酸素溶解効率
- $b$  : 式(1)の比例係数
- $C$  : 溶存酸素濃度 ( $mg/l$ )
- $C_b$  : 気泡からの曝気が行なわれている水塊の溶存酸素濃度 ( $mg/l$ )
- $C_{in}$  : 式(36)で, 対象海域に流入する水塊の溶存酸素濃度 ( $mg/l$ )
- $C_r$  : 水表面からの曝気が行なわれている水塊の溶存酸素 ( $mg/l$ )
- $C_s$  : 飽和溶存酸素濃度 ( $mg/l$ )
- $C_0$  : 実験開始時の当初溶存酸素濃度 ( $mg/l$ )
- $\bar{C}$  : 水槽内の測定濃度を測定点の代表体積で重みをつけて平均化した平均溶存酸素濃度 ( $mg/l$ )
- $C^*$  : 式(26)で定義される無次元溶存酸素濃度
- $\dot{C}$  : 式(38)で定義される非曝気時定常溶存酸素濃度 ( $mg/l$ )
- $C'$  : 式(18)中の比例係数
- $D$  :  $C_s - C$ で定義される溶存酸素不足濃度 ( $mg/l$ )
- $D_A$  : 上昇時の気泡を横から見たときの長径
- $D_B$  : 上昇時の気泡を横から見たときの短径
- $D_B$  : 式(36)中の底泥での酸素消費による溶存酸素濃度減少速度
- $D_L$  : 水中での酸素分子の分子拡散係数
- $D_x, D_y$  :  $x$ 方向,  $y$ 方向の水平拡散係数
- $D^*$  :  $1 - C^*$ で定義される無次元溶存酸素不足濃度

- $d_b$  : 球相当径ではなかった気泡径 ( $mm$ )
- $d_r$  : 鉛直方向の長さの模型 / 現地の縮尺比
- $F$  : 式(9)中の無次元比例係数
- $F'$  : 式(11)中の比例係数
- $f'$  : 端効果を加味した式(15)の比例係数
- $f, f''$  : 端効果を加味した式(16)の比例係数
- $G$  : 式(12), (13)中の吹込み空気量, 水槽  $1000m^2$  当り 1 分間当りの値
- $G_s$  : 吹込み空気量
- $g$  : 式(15)左辺の  $H$  の指数  $1/3$  をさらに一般化して示している値
- $H$  : 水深 ( $m$ )
- $H_0$  : 水柱の高さで示した水表面の大気圧 ( $m$ )
- $K_{La}$  : 式(5)で定義される総括酸素移動係数 ( $1/h$ )
- $K_2$  : 水表面からの再曝気係数 ( $1/h$ )
- $K_L$  : 二重境界膜で示す液膜係数
- $K_1$  : 有機物の分解係数 ( $1/h$ )
- $L$  : 酸素消費量で表示した有機物濃度
- $l_r$  : 水平方向長さの模型 / 現地縮尺比
- $m$  : 溶存酸素量 (対象水塊の溶存酸素濃度と水塊体積の積)
- $n$  : 式(1)の  $G_s$  の指数
- $P_{atm}$  : 式(2)の水表面上の大気圧
- $p_0$  : 大気中の酸素分圧
- $t$  : 時間 ( $h$ )
- $t_r$  : 時間の模型 / 現地縮尺比
- $U$  : 水表面からの再曝気にかかる平均流速
- $U_{max}$  : 誘起流れのうち表層を流れる水平最大流速
- $V$  : 水槽体積 ( $m^3$ )
- $u, v$  : 水の  $x, y$  方向流速
- $v_B$  : 水との相対速度で見た気泡上昇速度
- $v_b$  : 気泡の体積
- $w_b$  : 気泡の見かけの上昇速度
- $\xi$  : 散気管長さあたり単位時間あたりの吹込み空気量の模型 / 現地縮尺比
- $\Phi$  : 式(A・1)で定義される塩分係数
- $\rho$  : 式(18)中の水の密度
- $\rho_0$  : 式(22)で定義される標準状態での酸素の比重
- $\rho_w$  : 式(2)中の水の比重
- $\Theta$  : 式(19)で定義される温度係数
- $\sigma$  : 式(18)中の水の表面張力
- $\tau$  : 式(7)中の境界更新時間
- $\gamma_0$  : 式(2)中の仮想の気泡発生原点と散気管設置水深との深さの差

#### 付録 A 総括酸素移動係数の温度・塩分依存性実験

##### A.1 依存式

総括酸素移動係数もしくは再曝気係数は温度により影響を受け, 本文中の式(19)のように表示される。ここで  $\Theta$  は温度係数とよばれ,  $1.016 \sim 1.1047$  程度の値をと



るとされている。塩分濃度による影響も同様に表わせるとし、 $\Phi$ を塩分係数として次式のように書こう。

$$K_{La,s} = K_{La} \cdot \Phi^s \quad (A \cdot 1)$$

ここで $K_{La,s}$ は塩分 $s$ での $K_{La}$ 値、 $s$ は塩分(g/l)を示す。

ここでは、温度係数 $\theta$ および塩分係数 $\Phi$ を室内実験により求めてみている。

### A.2 実験方法

水質化学実験槽内の恒温室に4個のホローバケツ(容積10l)を置き、4基の定速攪拌器を用い同一条件でバケツの水を攪拌する。この攪拌による $K_{La}$ 値を、供試水温度、塩分を変えて実施し、 $\theta$ 、 $\Phi$ の値を算定する。 $K_{La}$ の測定のために、4台の溶存酸素計を用い個々のバケツの溶存酸素濃度の経時変化を直接測定し、ペン書きレコーダーにて記録している。水温は、検定付二重管温度計を用いて測定している。

溶存濃度の経時変化より、本文式(20)に従って $K_{La}$ 値を算定する。

### A.3 実験結果

温度、塩分を変えて実験した結果、表-A.1のような結果が得られた。表中のNo.1~4は、バケツ・攪拌器・溶存酸素計の4組のセットの番号である。

表-A.1 水温・塩分依存実験結果

ケース	装置番号	温度	塩分	$K_{La}$ 値
		℃	g/l	1/h
1	No. 1	8.9	0	0.00614
	No. 2	9.0	0	0.00621
	No. 3	9.1	0	0.00728
	No. 4	9.1	0	0.00598
2	No. 1	18.9	0	0.01134
	No. 2	19.0	0	0.00958
	No. 3	18.8	0	0.01070
	No. 4	18.9	0	0.00842
3	No. 1	4.4	35	0.00573
	No. 2	4.4	35	0.00512
	No. 3	4.4	35	0.00526
	No. 4	4.4	35	0.00524
4	No. 1	18.8	35	0.00935
	No. 2	18.6	35	0.00839
	No. 3	18.5	35	0.00911
	No. 4	18.6	35	0.00773
5	No. 1	19.6	35	0.00918
	No. 2	19.4	35	0.00611
	No. 3	19.4	35	0.00869
	No. 4	19.6	35	0.00753

温度が高いほど $K_{La}$ 値は大きく、塩分が高いほど $K_{La}$ 値が小さくなる傾向がうかがえる。

同一塩分濃度の実験ケースに対して温度の影響を比較する。同一の攪拌セットにつき $\theta$ を求めると、1.012 ~ 1.064の間にばらつく。4個の $\theta$ の平均値を求めると、塩分0 g/lで $\theta=1.039$ 、塩分35 g/lで $\theta=1.031$ と

なった。本文中で用いた値(1.024)よりやや大きい。

塩分濃度が異なり水温が類似の実験ケースにつき、塩分の影響を比較する。水温が同一ではなくわずかに違うため、ケース2, 4, 5につき $\theta=1.03$ を用い19℃の値に補正し、その後塩分による差を比べている。 $\Phi$ の値は0.991~0.997の間にばらつき、4個の平均値を求めると0.994となった。

塩分35%の外洋水では、淡水に比して $K_{La}$ 値が8割ほどに低下することになる。

### 付録B 平面水槽実験における溶存酸素の回復状況と溶解効率

本文図-17として、実験ケース1の溶存酸素の回復状況と溶解効率との図を示してある。他の12ケースについて同様に整理し表示した図をここにまとめてかかげる。図-B.1~B.12が、実験ケース2~13の結果をそれぞれ示している。図中の $\bar{c}$ は、受持体積の重みをつけて平均した水槽内溶存酸素濃度、 $\bar{D}^*$ は、 $\bar{c}$ より求めた無次元の溶存酸素不足濃度、 $a$ は、吹込み酸素量に対する溶解酸素量の比をそれぞれ示している。時間 $t$ に対する $-\ln(\bar{D}^*)$ の傾きが総括酸素移動係数 $K_{La}$ となる。

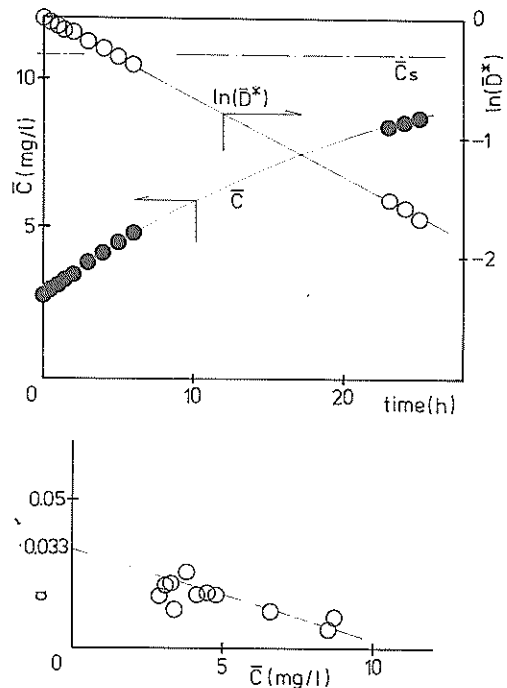


図-B.1 平均濃度 $\bar{c}$ 、平均無次元不足濃度 $\bar{D}^*$ の経時変化および酸素溶解効率 $a$ の濃度依存性(実験ケース2)

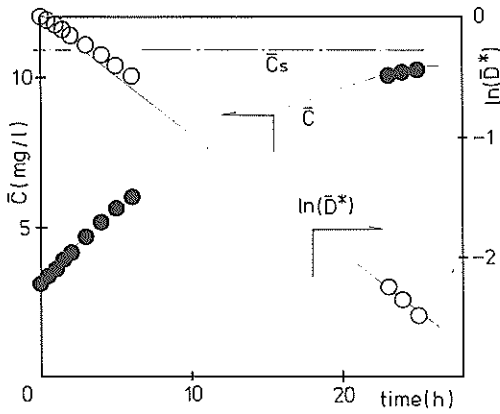


図-B.2 平均濃度  $\bar{C}$ 、平均無次元不足濃度  $\bar{D}^*$  の経時変化および酸素溶解効率  $\alpha$  の濃度依存性 (実験 ケース 3)

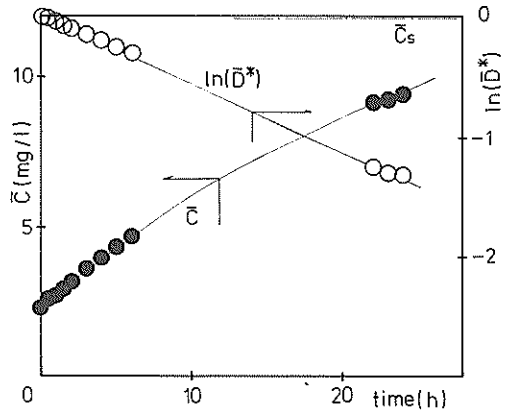


図-B.4 平均濃度  $\bar{C}$ 、平均無次元不足濃度  $\bar{D}^*$  の経時変化および酸素溶解効率  $\alpha$  の濃度依存性 (実験 ケース 5)

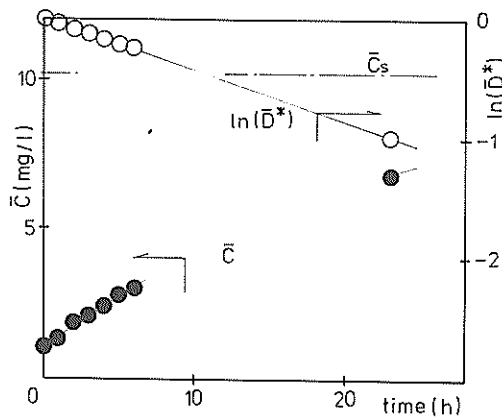


図-B.3 平均濃度  $\bar{C}$ 、平均無次元不足濃度  $\bar{D}^*$  の経時変化および酸素溶解効率  $\alpha$  の濃度依存性 (実験 ケース 4)

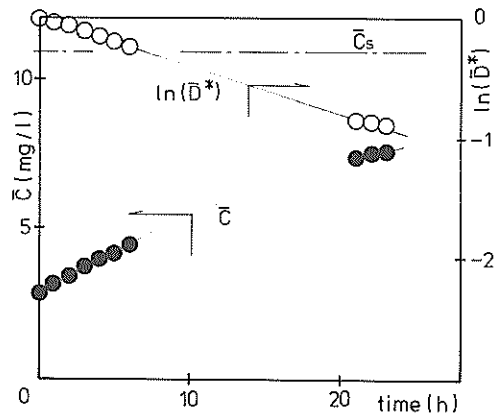


図-B.5 平均濃度  $\bar{C}$ 、平均無次元不足濃度  $\bar{D}^*$  の経時変化および酸素溶解効率  $\alpha$  の濃度依存性 (実験 ケース 6)

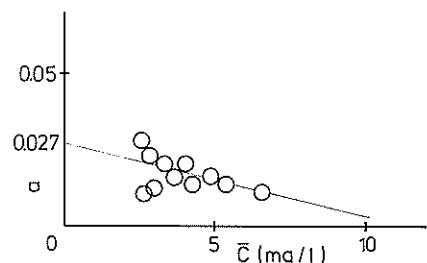
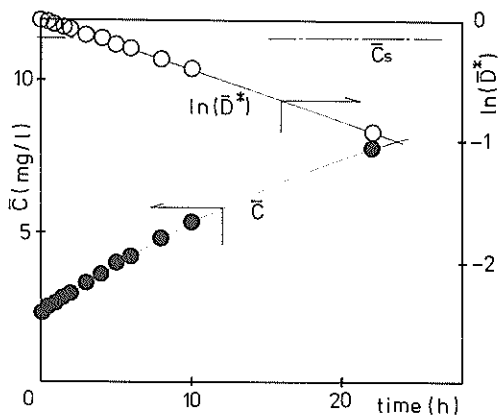


図-B.6 平均濃度  $\bar{C}$ 、平均無次元不足濃度  $\bar{D}^*$  の経時変化および酸素溶解効率  $\alpha$  の濃度依存性 (実験ケース 7)

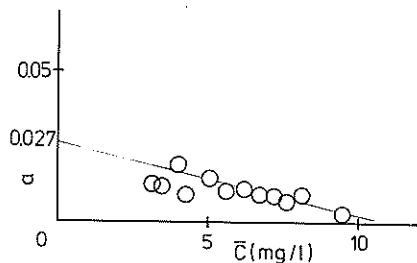
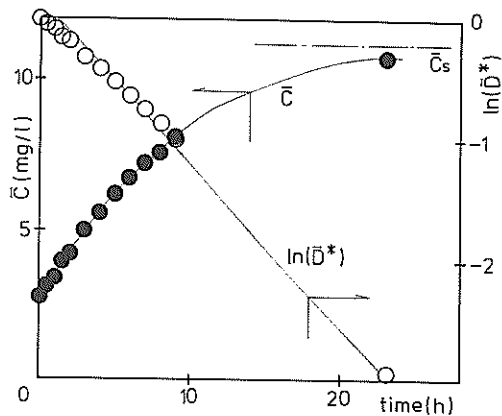


図-B.8 平均濃度  $\bar{C}$ 、平均無次元不足濃度  $\bar{D}^*$  の経時変化および酸素溶解効率  $\alpha$  の濃度依存性 (実験ケース 9)

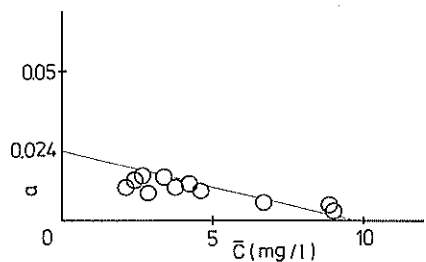
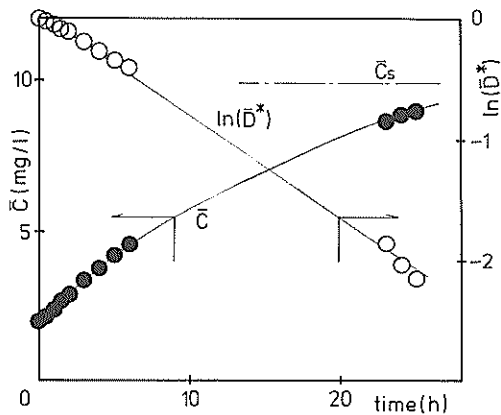


図-B.7 平均濃度  $\bar{C}$ 、平均無次元不足濃度  $\bar{D}^*$  の経時変化および酸素溶解効率  $\alpha$  の濃度依存性 (実験ケース 8)

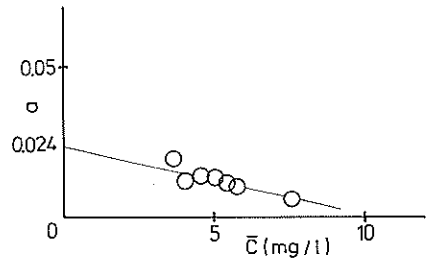
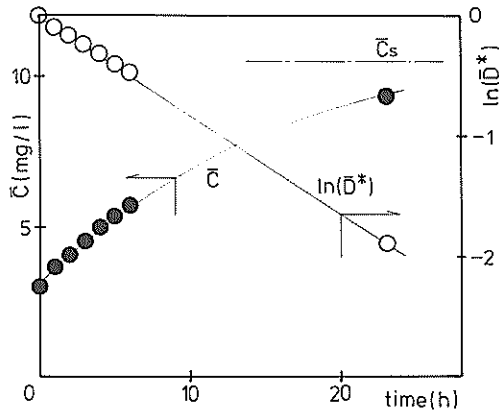


図-B.9 平均濃度  $\bar{C}$ 、平均無次元不足濃度  $\bar{D}^*$  の経時変化および酸素溶解効率  $\alpha$  の濃度依存性 (実験ケース 10)

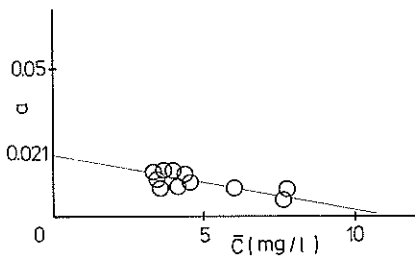
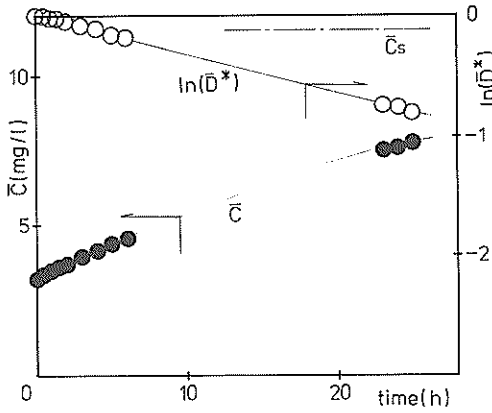


図-B.10 平均濃度  $\bar{C}$ 、平均無次元不足濃度  $\bar{D}^*$  の経時変化および酸素溶解効率  $\alpha$  の濃度依存性 (実験ケース 11)

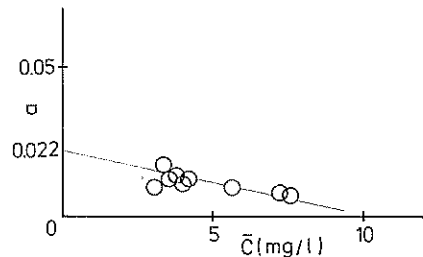
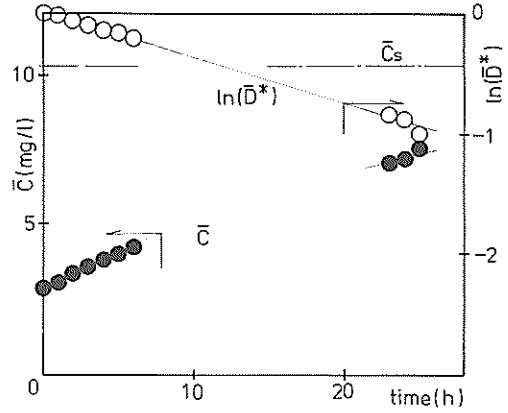


図-B.12 平均濃度  $\bar{C}$ 、平均無次元不足濃度  $\bar{D}^*$  の経時変化および酸素溶解効率  $\alpha$  の濃度依存性 (実験ケース 13)

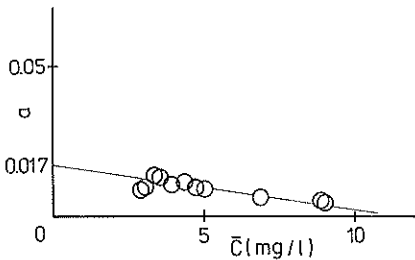
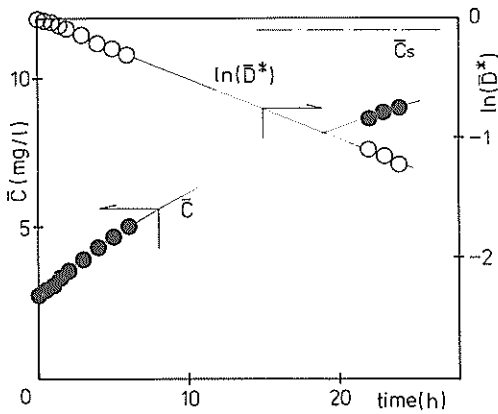


図-B.11 平均濃度  $\bar{C}$ 、平均無次元不足濃度  $\bar{D}^*$  の経時変化および酸素溶解効率  $\alpha$  の濃度依存性 (実験ケース 12)

港湾技研資料 No. 437

1982・12

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 株式会社 東京プリント

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