

空気混相流による水質改善の現地実験とその解析

堀 口 孝 男*

1. 空気混相流の利用

空気混相流を用いて水質環境を改善する方法は、1960年代から西ドイツ、アメリカなどで始まり、主として湖沼の水質を改善する目的で利用されたものである。利用の方法としては、一つには温度成層を破壊して底層水の溶存酸素量を上昇させる、いわゆる成層破壊型のものと、もう一つには、底層水の水温はそのままに保存しておいて、温度躍層以下の水質とくに溶存酸素量を改善する成層非破壊型のものがある。後者の方法は、高緯度地帯の湖沼に生息する魚類が成層破壊によって水温が上昇すると生存に適さなくなるため、底層水の水温は低く保ちながら溶存酸素量を増加させるために考案されたもので、装置は大がかりなものとなり、かなりの経費を伴うものである。中緯度に位するわが国では、前者の成層破壊型が一般に用いられている。

海域においても夏期の成層形成期に、底層部に貧酸素水塊が発生する水域では、かかる成層破壊型の方法によって水質条件を改良しようとする動きがでており、ここで述べる検討結果も、昭和54年、55年度に環境庁の依頼によって実施した釧路の現地実験に基づいて行ったものである。海域における空気混相流の利用は、湖沼におけるそれと異なる問題を抱えており、別途の検討が必要である。その最大の頭痛の種は、海域には流れが常にあり、空気混相流によって生ずる旋回流がよほど強力でない海水の流れで潰れてしまい、折角の装置がなんらの効果をももたらさないという恐れが多分にあることである。以下の説明において、これらいくつかの問題点を解析してみよう。

2. 空気混相流の諸元の検討

基本的な事項から検討を加えてみると、混相流の密度を ρ 、その容積を V 、これに含まれる空気密度、容積を ρ_a 、 V_a 、海水のそれを ρ_w 、 V_w とするならば、

$$\rho V = \rho_w V_w + \rho_a V_a, \quad V = V_w + V_a$$

の関係から

$$\rho = \rho_w \left(1 - \frac{V_a}{V}\right) + \rho_a \frac{V_a}{V}$$

通常、 $\rho_w \gg \rho_a$ であるから、 $\frac{V_a}{V} = S$ とするとき、

$$\rho = \rho_w(1-S) + \rho_a S \approx \rho_w(1-S) \quad \dots\dots\dots(1)$$

と表わされる。 V_a は圧力、温度によって変化するので、一般には、水面上の大気条件で表わすのが便利であるから、気体の状態方程式より

$$\left. \begin{aligned} \frac{pV_a}{T} &= \frac{p_{atm}V_{a^{atm}}}{T_{atm}} \\ S &= \frac{V_a}{V} = \frac{p_{atm}}{p} \frac{T}{T_{atm}} \frac{V_{a^{atm}}}{V} = \frac{p_{atm}}{p} \frac{T}{T_{atm}} S_0 \\ S_0 &= \frac{V_{a^{atm}}}{V} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(2)$$

とすることが多い。ここで、atm は水面上の大気における状態を示す。

散気管から発生する気泡の上昇速度は、混相流の上昇速度に影響を与えるので、これを検討してみよう。ほぼ気泡は直径 d の球形となり、鉛直上方に上昇するものと考えらるならば、この運動は、速度を w_a とするとき次式によって示される。

$$\rho_w \frac{\pi d^3}{6} \frac{dw_a}{dt} = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_w - \rho_a) g - \frac{1}{2} \rho_w \frac{\pi d^3}{6} \frac{dw_a}{dt} - \frac{1}{8} \rho_w \pi d^2 C_D w_a^2$$

C_D : 抵抗係数

直径 d は圧力によって変化するが、近似的に一定として取扱うと、解として

$$\left. \begin{aligned} w_a &= w_0 \tanh \left\{ \frac{\left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}\right) g t}{w_0 \left(\frac{1}{2} + \frac{\rho_a}{\rho_w}\right)} \right\} \\ w_0 &= \left\{ \frac{4}{3} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w}\right) \frac{g \cdot d}{C_D} \right\}^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

が得られる。式(3)から時間 $t=1$ 秒以下のオーダーで終端速度 w_0 になることが判明する。 $C_D=0.48$ とみなして計算すると、 $d=1.0$ cm で $w_a=52.2$ cm/sec、 $d=2.0$ cm で $w_a=73.8$ cm/sec 程度である。次に w_a を散

* 正会員 工博 東京都立大学教授 土木工学科

気量との関係でみると、単位時間、単位長さ当り散気管から放出される空気量を大気圧のもとに換算して v_0^{atm} と表わすならば、その質量 m は $m = \rho_a^{\text{atm}} v_0^{\text{atm}}$ である。空気 1 モルの質量は、28.9g であるから、 Δt 時間の放出を状態方程式で示せば、

$$pv = \frac{m \Delta t \cdot RT}{28.9} \dots\dots\dots (4)$$

コンプレッサーにより散気管内で圧力が p_1 容積が V_1 の空気が、 p_2 の圧力下にある海水に放出され容積が V_2 、直径が d になると、この空気のなした仕事は、次式で収支が表わされる。

$$\int_{V_1}^{V_2} p dv = p_2 \frac{\pi}{6} d^3 + 4\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 r \dots\dots\dots (5)$$

ここで右辺第2項は表面エネルギーを表わし、 r は表面張力である。一般には右辺の第1項が極めて大きいので無視される。式(4)を(5)へ代入し、近似的に等温状態であるとするならば、

$$d = \left\{ \frac{1}{p_2} \frac{6}{\pi} \frac{m \Delta t}{28.9} RT \ln \frac{p_1}{p_2} \right\}^{1/3} \dots\dots\dots (6)$$

が得られる。式(6)を式(3)へ代入すると

$$w_a = \left\{ \frac{4}{3} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \frac{g}{C_D} \right\}^{1/2} \times \left\{ \frac{1}{p_2} \frac{6}{\pi} \frac{\rho_a^{\text{atm}} \cdot \Delta t}{28.9} RT \ln \frac{p_1}{p_2} \cdot v_0^{\text{atm}} \right\}^{1/6} \dots\dots\dots (7)$$

と示される。式(7)でみるように、気泡の上昇速度は散気量の $1/6$ 乗に比例する関係となる。H. E. Kobus は水路における実験から、 $w_a \sim \{v_0^{\text{atm}}\}^{0.15}$ を導いているが、式(7)は極めてそれに近い結果を与えている。図-1 は式(7)を Kobus の実験結果と対比したものである。

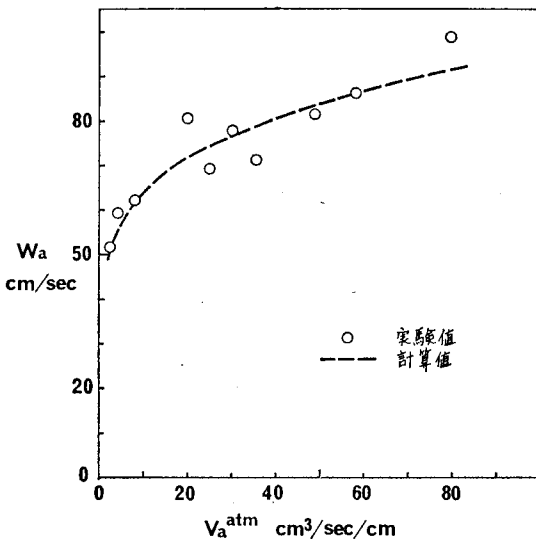


図-1 気泡の上昇速度と散気量

3. 現地実験の検討

湖沼における成層破壊型の利用方法により、どの程度の改善が行われたかをみるため、米国の EPA がとりまとめた資料を調べてみると、次のような結果が示されている。直接的な DO の改善を表わしたものではないが、成層破壊による上層と下層との水温の差がどの程度縮小されたかという結果から、図-2 のような傾向がみられ

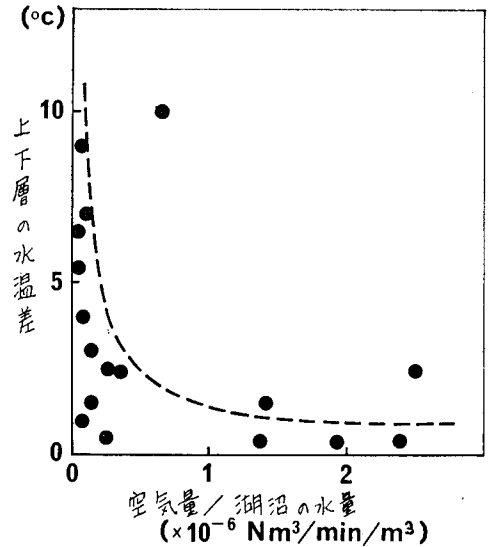


図-2 湖沼における改善効果

る。図の横軸は湖沼全体の水量を対象にして、その水量 1 m^3 あたりに供給される毎分の空気量を示したものである。図から判明するように、空気量が $1.0 \times 10^{-6} \text{ Nm}^3/\text{min}/\text{m}^3$ より大きくなれば、上下層の温度差は 1°C 以下になる。したがって、この値を基準とするのが望ましいといえよう。

しかしながら海域の場合では水域の境界がなく、また潮流等の流れが存在しているため、相当に異なった対応を考えなければならない。湖沼におけるエアーレーションの方式は、スポットエアーレーションとよばれるもので、この方式を海域に用いると、閉鎖された小水域で流れが微弱な場合を除いて、まず成功はおぼつかないものと考えられる。すなわち、図-3 のケース (I) にみるような流況が形成されてしまい、散気装置を設置した周辺の水質環境はほとんど変化しない状態になってしまうからである。したがって流れが存在する海域では、散気管を 1 辺が数十 m となる多角形もしくは円形状に設置して、図-3 のケース (II), (III) のように、散気管の内側領域では、流れによっても旋回流が保持できるようにすることが必要である。この場合、一方の側から生じた混相流の流れが潮流によって下流側にずれて下降し、他方の側から生ずる混相流の上昇流に衝突して、旋回流の

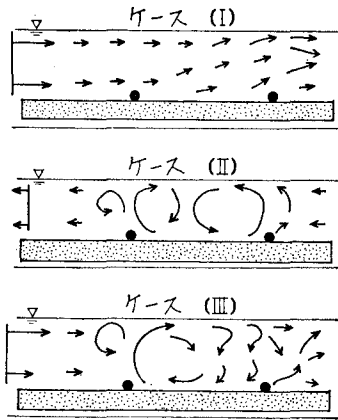


図-3 混相流の模式図

形成を潰してしまわないようにすることが望まれる。

図-4 は 1 辺が 11.5m, 対角線長が 30m となる八角形の散気管を用いた実験結果で、水深は満潮位で 14m, 潮流は上層で 15~20 cm/sec, 下層で 10~15 cm/sec, 空気量は $36 \text{ Ncm}^3/\text{sec/cm}$ を与えている。全く同じ条件で空気量を $18 \text{ Ncm}^3/\text{sec/cm}$ と半減すると、DO の変化は図-5 のようになる。図-4, 5 からみるように、上下層の混合はいつにかかって空気量の大小に支配され、適切な空気量は、水深、潮流の大きさ、上下層の温度差を考慮して判断されなければならない。今回の現地実験の経験からみると、空気量は水深 10m~20m の水域においては、 $25 \sim 50 \text{ Ncm}^3/\text{sec/cm}$ の範囲で考えれば、ほぼ目的を達成できるものと思われる。いうまでもなく、水質の改善は散気管内側と潮流の下流側 10m 周辺の領域で形成されるので、目的に応じて、かかる装置をいくつ用意すれば効果的となるか、経済性を考慮して決定する

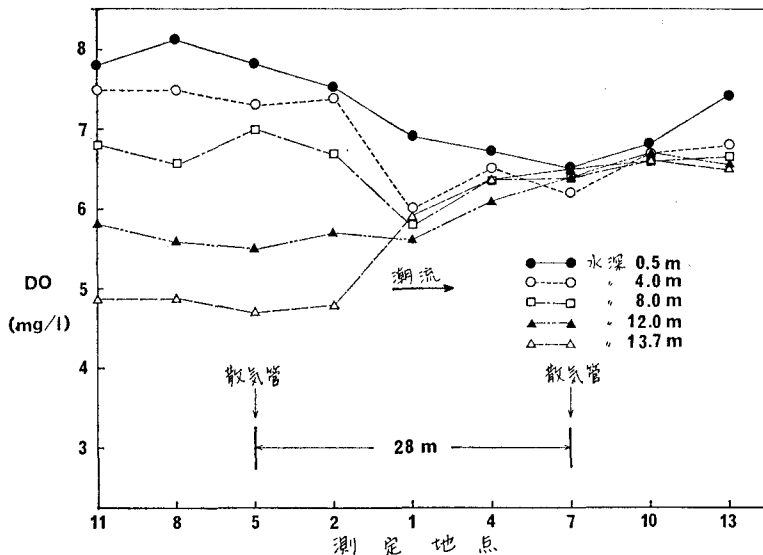


図-4 現地実験結果 (1)

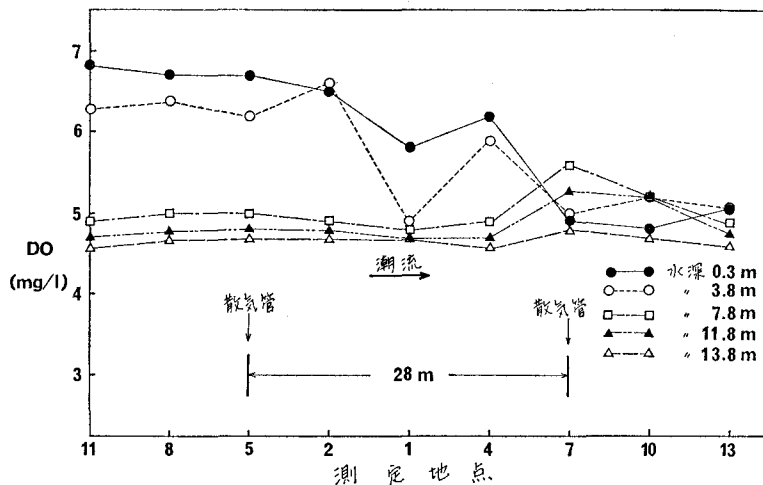


図-5 現地実験結果 (2)

必要がある。

装置の概要を述べてみると、一般に散気管は管径 50~75mm, 散気孔は 1~3mm で、その間隔は 5~7cm 程度である。コンプレッサーによる空気圧は水深の大きさにもよるが、3~5kg/cm² 程度である。所要出力の算定は、断熱変化もしくは等温変化により、

$$E_1 = \frac{1}{\gamma - 1} p_0 Q_0 \left\{ \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\gamma - 1/\gamma} - 1 \right\}$$

$$E_2 = p_0 Q_0 \ln \frac{p_1}{p_0}$$

ここで、 γ は断熱圧縮係数、 p_0 は大気圧、 Q_0 は空気量、 p_1 は吐出圧力である。これを機械効率 $\eta = 0.7$ で割る形となるが、これから定まる値は過小の傾向にある。すなわち、旋回流系を維持するためのエネルギー消費を考えなければならない、安全側をみて大きめにした方がよい。装置の費用は 55 年価格で算定すれば、散気管 1m あたり製作と設置を含めて 37 000 円程度、ランニングコストは 24 時間の継続運転で空気量 1m³ あたり 3 円程度である。

4. 混相流のシミュレーション

前述したように、海域における空気混相流の利用は事前に検討を入念にしておかないと、面倒な事態に直面することになるので、シミュレーションによって検討するのが一つの解決策となり得る。一般には散気管の形状を円形にすると、いずれの方向の潮流に対しても同等の取扱いとなるから有利で、円筒座標系で数値解析を行えばよい。ここでは説明を簡略にするため、図-6 のような

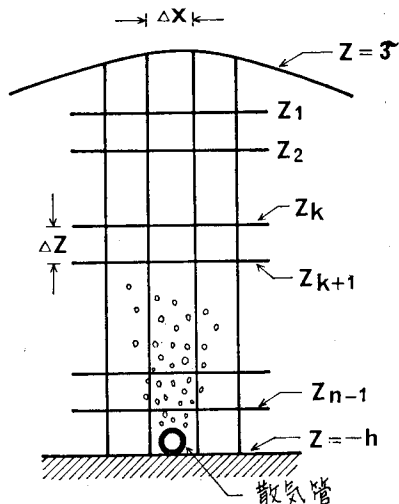


図-6 数値計算の格子網

レベルモデルにより、 x - z 面での 2 次元現象として取扱うことにする。

現象のモデル化は、空気混入による海水の密度減少に焦点をあてて、密度流が形成される場として考える。現

象は全て等温的な状態として、式 (1) の空気混入率 S を対象に、気泡を一種の拡散量とみなすと、散気管を含む格子では、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{z_{n-1}} S dz &= - \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{z_{n-1}} (uS) dz - [wS]_{z_{n-1}} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{z_{n-1}} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) dz + \left[K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right]_{z_{n-1}} \\ &- [w_a S]_{z_{n-1}} + S_a \dots \dots \dots (8) \end{aligned}$$

ここで、 u , w は混相流の流速であり、 w_a は気泡の速度である。また $S_a = \frac{Q_a}{\Delta x \Delta z}$ で、 Q_a は散気管近傍の圧力 p_2 のもとで放出される空気量である。当然、

$$p_2 Q_a = p_{\text{atm}} V_a^{\text{atm}}$$

の関係がある。

任意の層では、

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_{k+1}}^{z_k} S dz &= - \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_{k+1}}^{z_k} (uS) dz - [wS]_{z_k} \\ &+ [wS]_{z_{k+1}} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_{k+1}}^{z_k} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) dz + \left[K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right]_{z_k} \\ &- \left[K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right]_{z_{k+1}} - [w_a S]_{z_k} + [w_a S]_{z_{k+1}} \dots (9) \end{aligned}$$

表面の層は

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_1}^{\zeta} S dz &= - \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_1}^{\zeta} (uS) dz + [wS]_{z_1} \\ &+ \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_1}^{\zeta} \left(K_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) dz - \left[K_z \frac{\partial S}{\partial z} \right]_{z_1} - [w_a S]_{\zeta} \\ &+ [w_a S]_{z_1} \dots \dots \dots (10) \end{aligned}$$

となり、右辺の $-[w_a S]_{\zeta}$ は水面から消失する空気量を表わしている。かくして Δt 時間内の S の変化が求まると、式 (1) より混相流体の密度 ρ は、次式で決定される。

$$\rho = \rho_w (1 - S) \dots \dots \dots (11)$$

次に圧縮性流体の連続式から、底面の層で

$$[\rho w]_{z_{n-1}} = - \frac{\partial}{\partial t} \int_{-h}^{z_{n-1}} \rho dz - \frac{\partial}{\partial x} \int_{-h}^{z_{n-1}} (\rho u) dz \dots \dots \dots (12)$$

任意の層で

$$[\rho w]_{z_k} = [\rho w]_{z_{k+1}} - \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_{k+1}}^{z_k} \rho dz - \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_{k+1}}^{z_k} (\rho u) dz \dots \dots \dots (13)$$

表面で

$$\rho \frac{\partial \zeta}{\partial t} = [\rho w]_{z_1} - (\zeta - z) \frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_1}^{\zeta} (\rho u) dz \dots (14)$$

と表わされ、式 (11) から ρ がきまれば、各層の w と表面の水位らの変化が算定されることになる。

圧力方程式は、定常状態で見るとバロトロピック流のベルヌーイの式となり、

$$\frac{u^2 + w^2}{2} + gz + \int \frac{p}{\rho} dp = \text{一定}$$

となる。一般に u , w は最大値でほぼ同程度であり、 u

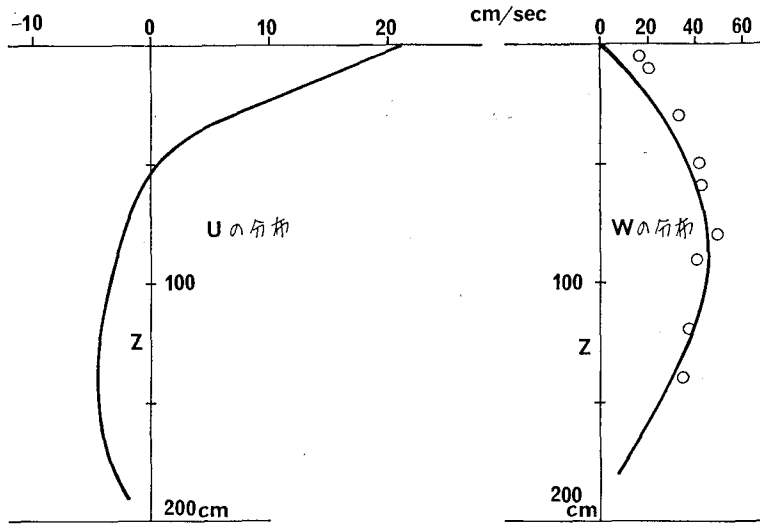


図-7 数値計算の結果

が大きいと w は 0 に近づき、 w が大きいと u は 0 に近づく。散気管の直上で水深の中間点附近で w が 50 cm/sec 程度となるが、 gz の値がかなり大きいので、近似的には流速の影響を無視して、

$$p(z_k) = (\zeta - z_1) \rho_1 g + \sum_{k=2}^n (z_{k-1} - z_k) \rho_k g \cdots \cdots (15)$$

として扱うようにした。

次に x 方向の運動方程式より、任意の層で表現すると

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{z_{k+1}}^{z_k} (\rho u) dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_{k+1}}^{z_k} (\rho u^2) dz + [\rho u w]_{z_k} - [\rho u w]_{z_{k+1}} \\ &= - \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_{k+1}}^{z_k} p dz + \frac{\partial}{\partial x} \int_{z_{k+1}}^{z_k} \left\{ \mu_x \frac{\partial u}{\partial x} \right\} dz \\ &+ \left[\mu_x \frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z_k} - \left[\mu_x \frac{\partial u}{\partial z} \right]_{z_{k+1}} \cdots \cdots (16) \end{aligned}$$

のようになる。

以上の各式を差分化して数値計算を行うことになるが、計算の手順は、各格子において

- (1) 式 (8), (9), (10) よりまず S を算定する。
- (2) 式 (11) により S から ρ を求める。
- (3) 式 (12), (13), (14) から各層の w と表面の水位を算出する。
- (4) 式 (15) より圧力を求める。
- (5) 式 (16) などにより各層の u を算定する。
- (6) 再び (1) へもどって、次の Δt 時間の計算を繰返す。

一般に計算は (ζ, ρ, p) のグループと (u, w) のグループとが、leap-frog スキームとなるよう計算すると便利である。 Δt は発散を防ぐため、水路での実験値と対比するときには $\Delta t = 0.01$ 秒、現地実験の場合では $\Delta t = 0.1$ 秒程度の値を用いている。ステップ数は 2 000~6 000 で、定常的な旋回流のパターンが出現する。

ここで問題となるのは、拡散係数 K_x , K_z , うず粘性

係数 μ_x , μ_z の値をどのように定めるかにある。混相流の旋回流系における運動エネルギーとうず粘性によるエネルギー損失の和が、吐出空気のなす仕事エネルギーと均衡して、流系が定常となるわけで、水路での実験あるいは現地実験の各場合、それぞれに適合した値の範囲を観測値と照合しながら、確定してゆく方向をとらざるを得ない。参考のために、Kobus の 2 次元水路における観測値と、上述の方法による計算値を示したのが 図-7 である。空気量は 30 cm³/sec/cm で、水深が 2.0 m、水路は 1×10×2 m のもので、これをそのままにシミュレートしたものである。水平流速は実験値が図示されていないので不明であるが、図-7 の u は散気管から 50 cm, x 方向に位置した点のものを示しており、 u の正負の境界が、水深のほぼ 1/4 に位置しており、通常観測されるものと一致した傾向にある。このときの K_x は CGS 単位で $K_x = 150$, $K_z = 50$, また同様に $\mu_x = 100$ である。 μ_z は海底からの位置によって値を変化させ、100~1 500 にまで増加し、表面に近づくにつれて 10 の値まで低下させている。

種々のケースに対して各係数の値を確定し、状況の分類に対応した各係数をグループ化すれば、事前の検討に活用できる状態になる。したがって現在の段階は、これら係数の確定をまとめあげることが急務であるといえよう。

参 考 文 献

- 1) 環境庁、底質浄化協会：瀬戸内海貧酸素対策調査報告書、底質浄化協会、昭 56。
- 2) EPA: A guide to aeration/circulation techniques for lake management, Ecological Res. Series, 1977。
- 3) Kobus, H. E.: Analysis of the flow induced by air-bubble systems, Coastal Eng. Con., pp. 1016~1031, London, 1968。