

DO改善を目的としたエアバブルカーテンの設計

中 村 充*・乃 万 俊 文**・萩 野 静 也**

1. 緒 言

エアバブルカーテンによる水質改善, 特に漁場への溶存酸素 (DO) 供給を目的としたエアカーテンによる水理機構について一連の研究を行い, 報告してきた。今回は漁場改良に必要な DO 供給量 O_D が与えられた場合, O_D を供給するに必要なエアカーテンの規模, 設計法について報告する。

2. エアバブルカーテンによる酸素溶入量

エアバブルカーテンによって DO が増加する機構を図-1 に示す。図-1 に示すように DO 濃度 C_2 の底層酸素水塊が表層に湧昇し, これが海面で酸素不足量 $(C_s - C)$ に比例した量だけ酸素溶入を受けながら水平流としてエアカーテンから遠ざかる。一方その一部は降下流速 v でもって下層に運ばれる。この時エアカーテンから x なる位置での長さ δx , 深さ f_a なる水柱の DO 収支方程式を Lagrange 的に考える。移流による DO 輸送に比し, 拡散による DO 輸送を省略して

$$\frac{d(C\delta x f_a)}{dt} = K_2''(C_s - C)\delta x - vC\delta x \quad \dots\dots (1)$$

ここに, C : DO 濃度, C_s : DO 飽和濃度, K_2'' : 酸素溶入係数, f_a : 摩擦深度 (流向反転層までの深さ), v : 摩擦深度面を通して上層から下層への鉛直降下流速である。

Lagrange の連続方程式は

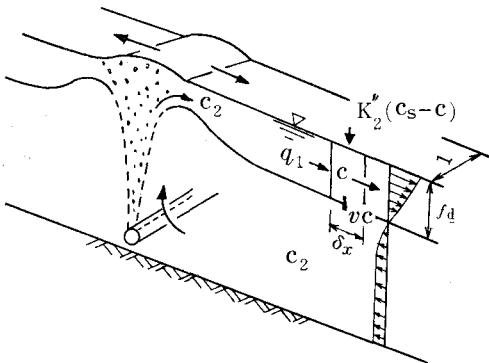


図-1 エアバブルカーテンによる DO 増加機構

$$f_a \frac{d\delta x}{dt} = -v\delta x \quad \dots\dots (2)$$

式 (1) から

$$\delta x f_a \frac{dC}{dt} + f_a C \frac{d\delta x}{dt} = K_2''(C_s - C)\delta x - vC\delta x$$

式 (2) を代入して

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K_2''}{f_a}(C_s - C) \quad \dots\dots (3)$$

K_2'' を再ばつ気係数 K_2 を用いて表わせば等方性乱流の場合

$$K_2'' = K_2 f_a = 8.62 \times 10^4 \sqrt{\frac{D_m u}{f_a}} = K_2'' \sqrt{u} \quad \dots (4)$$

ここに, D_m : 酸素ガスの中への分子拡散係数,

よって式 (3) は

$$\frac{dC}{C_s - C} = \frac{K_2''}{f_a} \sqrt{u} dt \quad \dots\dots (5)$$

いま Lagrange 的に u で x 方向に移動する座標を考え式 (5) を積分する。 $x=0$ で $t=0$ とすると, u, x, t はすべて独立ではない。

前報^{1),2)}までの研究から

$$\left. \begin{aligned} u &= u_m e^{-\gamma x} \\ \gamma &= \frac{(1 - F_a)f}{F_a(1 - 2F_a)h} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (6)$$

ここに, h : 水深, f : 流向反転層における摩擦係数 (0.02~0.08), F_a : f_a/h , ($F_a \approx 0.3 \sim 0.4$)

よって

$$dx = u_m e^{-\gamma x} dt$$

$$\int_0^x e^{\gamma x} dx = \int_0^t u_m dt$$

これから

$$e^{-\gamma x} = \frac{1}{\gamma u_m t + 1} \quad \dots\dots (7)$$

式 (6), (7) を (5) に代入して

$$\frac{dC}{C_s - C} = \frac{K_2'' u_m^{1/2}}{f_a} \frac{dt}{\sqrt{\gamma u_m t + 1}}$$

積分して

$$-\ln(C_s - C) = \frac{K}{\alpha F_a} \sqrt{\gamma u_m t + 1} + \text{const.}$$

ここに,

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{\gamma h}{2}, \quad K = \frac{K_2''}{u_m^{1/2}}, \quad F_a = \frac{f_a}{h} \end{aligned} \right\} \quad \dots (8)$$

* 正会員 農博 農林省農業土試験場水産土木第3研究室
** 正会員 農業土試験場水産土木第3研

である。式(8)で $t=0$ で $C=C_2$ であるから

$$\ln \frac{C_s - C}{C_s - C_2} = -\frac{K}{\alpha F_d} (e^{x/2} - 1) = -\frac{K}{\alpha F_d} (e^{\alpha X} - 1)$$

ここに, $X=x/h$

$$\therefore C = C_s - (C_s - C_2) \exp \left\{ -\frac{K}{\alpha F_d} (e^{\alpha X} - 1) \right\} \quad \dots\dots\dots (9)$$

よって x 点での酸素溶入量は

$$K_2''(C_s - C) = K_2'' u_m^{1/2} C_s \left(1 - \frac{C_2}{C_s} \right) \exp(-\alpha X) \cdot \exp \left\{ -\frac{K}{\alpha F_d} (e^{\alpha X} - 1) \right\}$$

したがって水面全体での溶入量 O_D はバブルカーテンの単位幅当たり次のようになる。

$$O_D = \int_0^\infty K_2''(C_s - C) dx \\ = K_2'' u_m^{1/2} h C_s \left(1 - \frac{C_2}{C_s} \right) \exp \left(\frac{K}{\alpha F_d} \right) \cdot \int_0^\infty \exp(-\alpha X) \cdot \exp \left(-\frac{K}{\alpha F_d} e^{\alpha X} \right) dX$$

右辺の積分項は若干の置換, 部分積分を行って

$$O_D = \frac{K_2'' u_m^{1/2} h C_s \left(1 - \frac{C_2}{C_s} \right)}{\alpha} \times \left\{ 1 + \frac{K}{\alpha F_d} e^{K/(\alpha F_d)} E_i \left(-\frac{K}{\alpha F_d} \right) \right\} \dots\dots (10)$$

ここで, $E_i(x)$ は指数積分で次のように定義される。

$$E_i(x) = \int_{-\infty}^x \frac{e^t}{t} dt$$

$$E_i(-x) = C + \ln x - x + \frac{x^2}{2 \cdot 2!} - \frac{x^3}{3 \cdot 3!} + \dots$$

C: Euler の定数 (=0.577215665...)

式(10)の関数を図化したのが図-2である。これより漁場改善に必要な DO 量 O_D が既知であれば式(10)

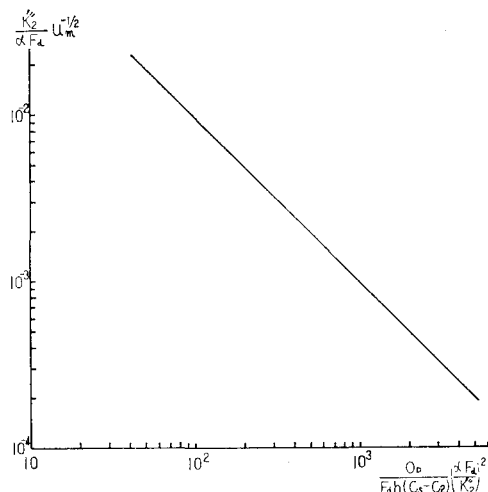


図-2 u_m と O_D の関係

あるいは図-2より O_D を溶入させるに必要なエアカーテンによる表面最大流速 u_m が求まる。

3. u_m を発生させる風量

u_m を発生させるに必要な風量は単位長さ, 単位時間当たり Q_a として式(11)で与えられる。

$$Q_a = \frac{\sqrt{g} \phi u_m^2 F_d (4 - 7 F_d)}{12 g \alpha_m H_0 (1 - F_d) \ln(1 + H_a/H_0)} \quad \dots\dots (11)$$

ここに, Q_a : 単位幅, 単位時間当たりの風量, ϕ : 気泡放出孔直径, H_0 : h_0/h , h_0 : 大気圧の水柱換算値 (10.3 m), H_a : h_a/h , h_a : 気泡発生筒の設置水深, α_m : 気泡の大きさ抗力に関する係数で気泡定数とよぶ。

α_m の値は図-3より求められる。 α_m の値がわかれば式(11)より風量 Q_a は計算できる。

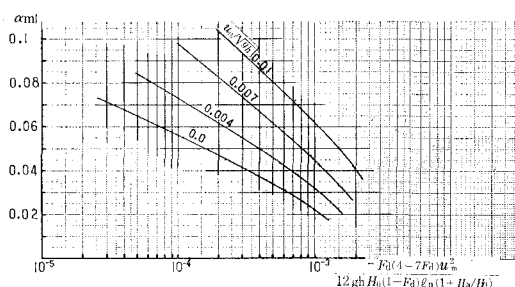


図-3 気泡定数 α_m

4. 風量 Q_a を発生させるに必要なコンプレッサーなどの所要出力³⁾

次にこの風量を発生させるに必要なコンプレッサーあるいはブロワーの所要出力 P は, 式(12)で与えられる。

$$P = \frac{w_0 F_d h u_m^3}{2.12 g \alpha_E \beta} \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに, P : 所要出力, w_0 : 海水の単位重量, β : コンプレッサーの負荷率, α_E : エアバブルの注入に要するエネルギー係数

α_E の値は図-4より求められる。この値がわかれば

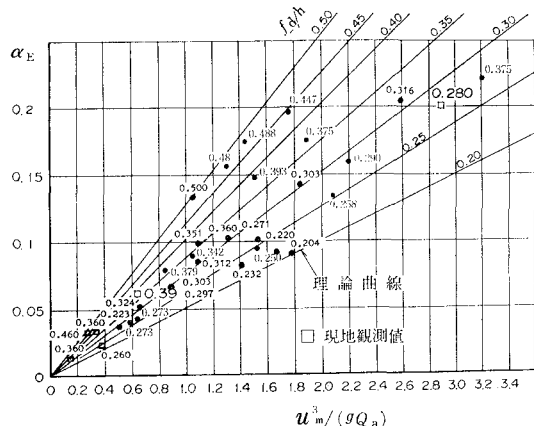


図-4 エネルギー係数 α_E

式 (12) より所要出力が計算できる。

5. 応 用 例

次にこれらの理論式を京都府久美浜湾に应用した例を示す。

久美湾は図-5に示すような日本海沿岸兵庫県の県境に近い所に位置する面積約 7.1 km² の閉鎖性内湾である。そのため海水交流、交換は不活発で、湾の中央部の海盆状を呈する所では春から晩秋にかけて無酸素水塊が形成される。そこで湾中央部の未利用漁場を開発するためのいろいろな対策が計画されている。ここでは図-5の斜線部分の水面積 1 km²、水深 7~10 m の水柱の DO を改善するために総延長 2 km の気泡発生筒を水深 10 m に設置した場合のエアカーテンの規模について試算、検討する。

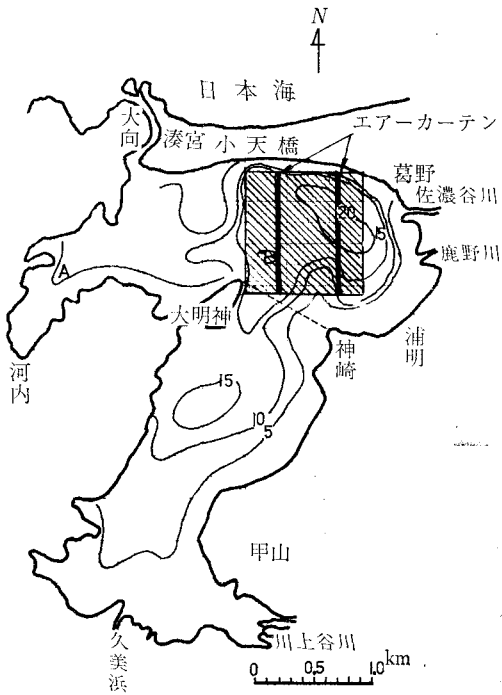


図-5 久美湾

(1) DO 改善に必要な DO 供給量

過去の調査資料⁴⁾より湾中央部の DO の周年変化をみると DO 濃度は 4 月下旬に 4 cc/l を下まわりその後秋にかけて急激に減少する。そこでこの DO 濃度を魚類養殖の立場から常に 4 cc/l に保つためには最大約 2.5 cc/l/10 日間の DO を供給してやればよいことがわかる⁵⁾。したがって開発水域全体での DO 供給量は、

$$2.5 \text{ cc/l/10 日間} \times 10^6 \text{ m}^2 \times 3 \text{ m} = 7.5 \times 10^9 \text{ cc/10 日間} \\ = 8.7 \times 10^8 \text{ cc/sec}$$

ゆえにエアカーテンの単位長さ当り DO の供給量 O_D は次のようになる。

$$O_D = \frac{8.7 \times 10^8 \text{ cc/sec}}{2 \times 10^3 \text{ m}} = 4.4 \text{ cc/sec/m}$$

(2) O_D を供給するに必要な最大表面流速

いま水深 $h=10$ (m), $D_m=2.2 \times 10^{-9}$ (m²/sec) ($t=20^\circ\text{C}$)
 $F_a=0.35$, 飽和酸素量 $C_s=6.0 \times 10^3$ (cc/m³), 下層水の DO 濃度 $C_2=0.0$ (cc/m³) 摩擦抵抗係数 $f=0.05$, $O_D=4.4$ (cc/sec/m) とすれば式 (4) より

$$K_2''' = 2.5 \times 10^{-5} (\sqrt{\text{m/sec}}), \quad \alpha=0.15$$

一方図-2の横軸の値は

$$\frac{O_D}{F_a h (C_s - C_2)} \left(\frac{\alpha F_a}{K_2'''} \right)^2 = 9.2 \times 10^2$$

ゆえに図-2より縦軸の値を読みとると

$$\frac{K_2'''}{\alpha F_a} u_m^{-1/2} = 1.05 \times 10^{-3}$$

$$\therefore u_m = \left(\frac{K_2'''}{1.05 \times 10^{-3} \alpha F_a} \right)^2 \\ = \left(\frac{2.5 \times 10^{-5}}{1.05 \times 10^{-3} \times 0.15 \times 0.35} \right)^2 = 0.21 \text{ m/sec}$$

すなわち 4.4 cc/sec/m の DO を供給するに必要な表面流速は 21 cm/sec となる。

(3) u_m を発生させる風量

いま気泡発生孔の直径を $\phi=1$ mm, 気泡発生管の設置水深 $h_a=10$ m とすれば

$$\frac{F_a(4-7F_a)u_m^2}{12ghH_0(1-F_a)\ln(1+H_a/H_0)} = 4.5 \times 10^{-5} \\ u_0/\sqrt{gh}=0.0$$

ゆえに α_m の値は図-3より

$$\alpha_m = 6.6 \times 10^{-2}$$

この α_m の値を式 (11) に代入し Q_a を求めると

$$Q_a = 6.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{m/sec}$$

すなわち風量は単位幅当り 0.67 l/sec となる。

(4) 風量 Q_a を発生させるに必要なコンプレッサーの所要出力

次にこの風量を発生させるに必要な所要出力は負荷率を $\beta=0.8$, $\alpha_E=0.125$ (図-4より) とすると式 (12) より

$$P = \frac{1.03 \times 10^3 \times 0.35 \times 10 \times (0.21)^3}{2.12 \times 9.8 \times 0.125 \times 0.8} = 16 \text{ kgm}^2/\text{m} \cdot \text{sec} \\ = 0.16 \text{ kw/m}$$

となる。すなわち単位幅当り 160 w の所要出力となる。

(5) 湧昇流量

エアカーテンによる湧昇流量は次式で計算できる。

$$q = F_a h u_m \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 q : 湧昇流量

式 (13) より湧昇流量を計算すると

$$q = 0.35 \times 10 \times 0.21 = 0.74 \text{ m}^3/\text{sec/m}$$

すなわち単位幅 0.74 m³/sec の湧昇流量が発生する。

6. あとがき

本報は漁場改善に必要な DO 量 O_D が与えられた時、

その DO 溶入に必要なエアカーテンの規模設計の理論式を提案した。そしてその理論式の応用例として京都府久美浜の DO 改善による漁場開発計画に適用し、試算した。今年はさらにそれらの理論解を実証するために鹿児島島のクルマエビ養殖池実験を行う予定にしている。

参 考 文 献

- 1) 中村 充・大西亮一・萩野静也・井上謙一: エアバブルカーテンによる水質改善に関する研究, 第 20 回海講論文集, pp. 239~245, 1973.
 - 2) 中村 充・乃万俊文・萩野静也・稲垣 基・矢内正樹: エアバブルカーテンによる水質改善に関する研究, 第 21 回海講論文集, pp. 281~286, 1974.
 - 3) 中村 充・乃万俊文・萩野静也・大西亮一: エアバブルカーテンの応用に関する研究, 農土試報告, 13 号, pp. 169~185, 1975.
 - 4) 京都府: 浅海漁場開発調査事業報告書, pp. 25~27, 1972.
 - 5) 中村 充・杉浦正悟・但馬 創・高橋良幸: 湾における DO 収支に関する研究, 第 23 回海講論文集, 1976.
-