

湾における DO 収支に関する研究

中村 充*・杉浦正悟**・但馬 創***・高橋良幸****

1. 緒 言

海域の有機汚染は溶存酸素 (DO) 不足による好気性バクテリアの活動の劣化、嫌気性分解による還元層の発達によって起こり、DO 不足は水質、底質悪化の主たる原因となっている。この報告は内湾、内海における DO 不足量の推定法と、DO 収支に関する若干の因子についての研究結果を報告するものである。

2. 湾における DO 収支

DO 収支の基礎方程式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial(uC)}{\partial x} + \frac{\partial(vC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} \right\} - \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \right\} + K_1 R - \delta_1 K_2 (C_s - C) + \delta_2 K_2' C - \alpha_1 = 0 \quad \dots (1)$$

ここに

$$\delta_1 = \begin{cases} 1 & z=0 \\ 0 & z \neq 0 \end{cases} \quad \delta_2 = \begin{cases} 1 & z=h \\ 0 & z \neq h \end{cases}$$

C, C_s : DO 濃度, 同飽和値, u, v, w : 流速の x, y, z 成分, D_x, D_y, D_z : x, y, z 方向拡散係数, R : 還元物質濃度, K_1, K_2, K_2' : 脱酸素係数, 再ばっ気係数, 底面における DO 消費速度係数, α_1 : 光合成などによる DO 供給。

式 (1) を完全混合を行う水圏 V で積分した形を考えれば

$$V \frac{dC}{dt} - q(C_0 - C) + K_1 R V - K_2 (C_s - C) A + K_2' C A_1 - \alpha_1 V = 0 \quad \dots (2)$$

ここに, q : 海水交換量, C_0 : 外海水 DO 濃度, A : 水圏 V のばっ気面積 (湾面積), A_1 : 海底面積 ($\approx A$)。

還元物質濃度 R については酸化によって失われ、外的負荷によって濃度を増大する。 R についての収支方

式は式 (2) と同様の手順で

$$V \frac{\partial R}{\partial t} - q(R_0 - R) + K_1 R V - \alpha_2 V = 0 \quad \dots (3)$$

ここに, R_0 : 外海水の還元性物質濃度, α_2 : 還元物質の単位時間、単位容積当りの負荷量。式 (2), (3) を連立に解くことによって C, R が求まる。

他方, 3 章に述べるように還元性物質による酸素消費は, $K_1 R = \beta C R$, R を COD 濃度で与えたとき, $\beta \approx 0.01$ ($\text{cm}^3/\mu\text{g}/\text{hr} = 0.24 \text{ (m}^3/\text{g}/\text{day})$) である。

式 (2) を整理して

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + LC - I &= 0 \\ L &= \frac{q}{V} + \beta R + \frac{K_2 A}{V} + \frac{K_2' A}{V} \\ I &= \frac{qC_0}{V} + \frac{K_2 AC_s}{V} + \alpha_1 \end{aligned} \right\} \quad \dots (4)$$

ここに, L, I はそれぞれ DO の消費, 供給に関するもので, これを酸素消費係数, 酸素供給係数と呼ぶことにする。 L, I は式 (4) に示すように海水交換量, 還元物質濃度, 再ばっ気係数, 海底の酸素消費, 光合成その他によって定まり, これらは正確には時間の関数である。しかし個々の因子解析も十分でない現在, 実用上の立場から L, I を湾の固有特性値として与えることを考える。

L, I を定数として式 (4) の解は

$t=t_1=0$ で $C=C_1$ の条件下で

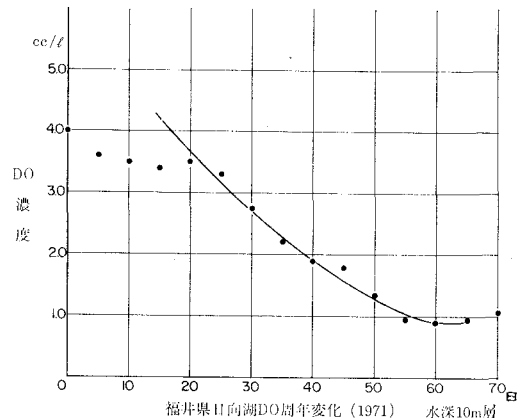


図-1 福井県日向湖の DO 周年変化

* 正会員 農博 農林省農薬土木試験場水産土木第3研究室
 ** 水産庁研究課
 *** 富士建設(株)
 **** 東洋基礎(株)

$$C = \left(C_1 - \frac{I}{L}\right)e^{-Lt} + \frac{I}{L} \dots\dots\dots (5)$$

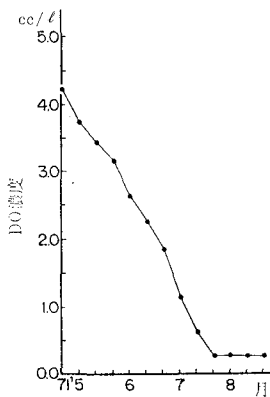


図-2 久美浜湾の DO 周年変化

式 (5) L, I は漁場 DO の最も悪化する春から初秋にかけての条件で求める。図-1, 図-2 は福井県日向湖, 京都府久美浜湾における 10 m 水深における DO 変化図である。

$t=t_2$ で $C=C_2$, $t=t_3$ で $C=C_3$ として L, I が求まる。

いま $t_1=0$ で $C=C_1$, $t_2=T$ で $C=C_2$, $t_3=2T$ で $C=C_3$ とすれば

$$C_2 = \left(C_1 - \frac{I}{L}\right)e^{-LT} + \frac{I}{L}$$

$$C_3 = \left(C_1 - \frac{I}{L}\right)e^{-2LT} + \frac{I}{L}$$

両式を連立に解いて

$$L = -\frac{1}{T}$$

$$\times \ln \frac{(C_1 - C_3) \pm \sqrt{(C_1 + C_3)^2 - 4C_2(C_1 - C_2 + C_3)}}{2(C_1 - C_2)}$$

$$> 0 \dots\dots\dots (6)$$

$$I = \frac{C_2 - C_1 e^{-LT}}{1 - e^{-LT}} \cdot L > 0 \dots\dots\dots (7)$$

このようにして, 漁場の DO 特性値をその湾の固有値として巨視的に定めれば, この漁場利用の立場から DO のコントロール計画を立てることができる。

海域の計画 DO 濃度を C_p とし, 湾における最悪の DO 濃度 C_3 に対し, $C_3 > C_p$ であれば負荷量を増大 (養殖量の増大させることが可能であり, $C_3 < C_p$ であれば負荷量を軽減するか, なんらかの形で DO を供給しなければならない。

DO の最悪状態の濃度を C_p 以上に保つために必要な DO 供給量を O_D とすれば, 式 (4) の I に O_D/V を加え, DO について解けば

$$C = \left(C_1 - \frac{I + O_D/V}{L}\right)e^{-Lt} + \frac{I + O_D/V}{L} \geq C_p$$

$$\therefore O_D \geq \frac{LV \left\{ \left(C_p - \frac{I}{L}\right) - \left(C_1 - \frac{I}{L}\right)e^{-Lt} \right\}}{1 - e^{-Lt}} \dots\dots (8)$$

いま, $C_p = C_1$ にとれば

$$O_D \geq (LC_p - I)V \dots\dots\dots (9)$$

で与えられる。

O_D を与えるための工法は湾口改良, 潮流制御による海水交換量 q の増大, エアバブルカーテンによる溶気促

進, 底層水の選択排水などの工法がある。動力によってこの DO 供給を行う場合その運転期間は $C=C_p$ となる時刻 t_1 から t_3 までの間で

$$t = t_3 - t_1 \dots\dots\dots (10)$$

で計算される。

$C_3 > C_p$ の場合には酸素消費を増大することができる。これを養殖量の増加で行うとすれば, 魚の酸素消費量は魚種によって異なり DO 濃度に C は関係しないから余剰の溶存酸素 O_b は式 (8), (9) の O_D を用いて

$$O_b = -O_D \dots\dots\dots (11)$$

となる。魚の単位重量, 単位時間当りの DO 消費量を k とすれば養殖増加量 W は

$$W = O_b/k \dots\dots\dots (12)$$

である。

3. 脱酸素係数

生物化学的な DO 消費速度は, 完全混合を行う一定の水塊について

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC}{dt} &\propto R, & \frac{dC}{dt} &\propto -\frac{dR}{dt} \\ \therefore \frac{dR}{dt} &= -K_1 R \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (13)$$

であり R を残留 BOD 濃度で与えたとき K_1 を脱酸素係数と呼ぶ。

海水における BOD 測定は未だ十分開発されていない。したがってここでは R に COD 濃度を用いて検討する。特に DO 不足下で行われた嫌気性分解によって発生した還元物質に DO 供給が行われた場合を中心に求める。

(1) 溶存酸素消費速度

溶存酸素の消費速度を《酸素と被酸化物質との衝突確率》という考え方から論ずる。

いま n_2 個の被酸化物質 (以下 COD とよぶ) が水中にあるとし, COD 1 個当たり α 個の平均有効還元基を有するものとする。さらに COD は, 酸素分子との衝突に際して 100% これと結合するものとする。水中に H_2O 分子が n_0 個, O_2 分子が n_1 個, COD 粒子が n_2 個, その他の物質 (X) の粒子数が n_3 個存在するとする。 O_2 と COD が衝突する確率は

$$\alpha_2 P_{COD} = n_1 \cdot n_2 / n \cdot C_2 = 2n_1 \cdot n_2 / n^2$$

である。

溶存酸素の消費は, COD が O_2 と結合 (衝突) したときに起こるものと考えることができる。したがって, 単位時間当たりの溶存酸素消費速度 dC/dt は, O_2 と COD の衝突確率に比例すると考えて

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC}{dt} &\propto \alpha_2 P_{COD} = 2n_1 \cdot n_2 / n^2 \\ \therefore \frac{dC}{dt} &= \frac{2kn_1n_2}{n^2} \dots\dots\dots (14) \end{aligned} \right\}$$

k は比例定数であり、この値はブラウン運動の激しさ、すなわち温度変化に左右されるものと考えることができる。

分子あるいは粒子数を濃度で表現すると

$$\text{H}_2\text{O}: n_0 = A_n W \cdot C_0 / 18$$

$$\text{O}_2: n_1 = A_n W \cdot C / 32$$

$$\text{COD}: n_2 = A_n W \cdot R / (16\alpha)$$

$$X: n_3 = A_n W \cdot C_3 / \sigma_X$$

$$n = n_0 + n_1 + n_2 + n_3$$

である。

ここに、 A_n : アボガドロ数 (6.02×10^{23})、 α : 平均有効還元基数、 σ_X : X の相当グラム分子 (平均大の粒子を構成する原子量の合計値にグラムをつけたもの)、 C_0, C_3 : それぞれ H_2O と X の濃度、 W : 全重量

これを式 (14) に代入すると

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= \frac{2k \cdot \frac{A_n W C}{32} \cdot \frac{A_n W R}{16\alpha}}{\left(\frac{A_n W C_0}{18} + \frac{A_n W C}{32} + \frac{A_n W R}{16\alpha} + \frac{A_n W C_3}{\sigma_X} \right)^2} \\ &= \frac{2k \cdot \frac{C}{32} \cdot \frac{R}{16\alpha}}{\left(\frac{C_0}{18} + \frac{C}{32} + \frac{R}{16\alpha} + \frac{C_3}{\sigma_X} \right)^2} \end{aligned}$$

ここで、分母は、 $C, R, C_3 = 0, C_0 = 1$ とおけるから

$$\frac{dC}{dt} = \frac{81k}{64\alpha} CR$$

ここで、

$$\beta = \frac{81k}{64\alpha} \quad \dots\dots\dots (15)$$

とにおいて、溶存酸素消費係数と呼ぶことにする。よって

$$\frac{dC}{dt} = \beta \cdot C \cdot R \quad \dots\dots\dots (16)$$

となり、 dC/dt は、 O_2 濃度と COD 濃度との積に比例する。

(2) 実験装置と実験方法

実験装置の略略を図-3 に示す。

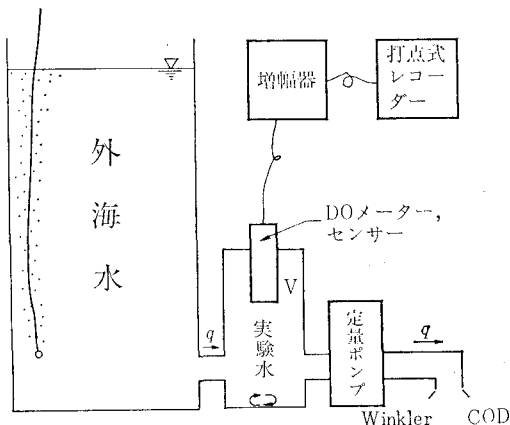


図-3 実験装置

希釈水は酸素飽和の蒸留水を用いた。また、実験に用いた容器は容積が 1 000 cc あるいは 2 000 cc の三角フラスコであり、溶存酸素計 (アンドリュース社製) 電極を取り付け、空気を完全に追い出してから密封した。容器内を完全混合状態にするために、マグネチック・スターラーによって攪拌させた。流量は、定量ポンプ (ペリスター・ミニ) を用いて一定に保った。

実験にあたって汚泥を一定量とり、これを蒸留水に溶かした後、泥分の沈殿するのを待ち、その上澄み液を実験試水として用いた。泥分の沈殿に要するまでの放置時間は、12~16 時間であり、この間、できるだけ空気中からの酸素の溶入を防ぐため、密封して放置した。

溶存酸素、および COD は、実験開始前と終了後、および実験継続中の分あるいは 1 時間おきに、容積 30 cc の酸素ビンに採水して測定した。溶存酸素の測定法はウィンクラー法を用い、これと並行して溶存酸素計による測定も行い参考とした。COD はヨウ素滴定法により測定した。

採水に要する時間は溶存酸素の場合 5~7 分間、COD の場合 10~15 分間である。採水開始時をそれぞれの採水時刻として扱った。

(3) 実験結果とその考察

実験条件下の DO 収支式は式 (2) から

$$\frac{dC}{dt} - \frac{q}{V}(C_0 - C) + K_1 R = 0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

$K_1 R$ は単位時間当りの脱酸素量でこれを ds/dt とかき、この値を実験値から求める。いま $t_r \sim t_{r+1} (=t_r + \Delta t)$ における ds/dt は式 (17) から

$$\frac{ds}{dt} = \frac{(C_0 - C_r) \exp(-q\Delta t/V) - (C_0 - C_{r+1})}{V[\exp(-q\Delta t/V) - 1]/q} \quad (18)$$

ここに、 C_r, C_{r+1} : t_r, t_{r+1} における試水の DO 濃度観測値である。式 (18) で実験結果を整理したのが表-1 である。表中

$$\beta = \frac{ds}{dt} / (CR) \quad \dots\dots\dots (19)$$

β の観測誤差は

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\beta}{\beta} &= \frac{2\Delta C \{1 + \exp(-q\Delta t/V)\}}{(C_0 - C_r) \exp(-q\Delta t/V) - (C_0 - C_{r+1})} \\ &\quad + \frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta C}{R} \quad \dots\dots\dots (20) \end{aligned}$$

ΔC はウィンクラー測定法における精度 0.05 を用いて β の相対誤差を求めた。表-1 中 * 印のあるものは $\Delta\beta/\beta > 0.12$ のものである。

これから β の値として

$$\begin{aligned} \beta &= 0.3 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2} \\ &= 0 \text{ (} 10^{-2} \text{) l/mg/hr} \end{aligned}$$

すなわち

$$\beta \approx 0.01 \text{ l/mg/hr} = 0.24 \text{ m}^3/\text{g/day} \quad \dots\dots\dots (21)$$

である。

表—1 $ds/dt, \beta$ の計算値

試料 番号	(mg/l) C	(mg/l) R	C·R	(mg/l/hr) ds/dt	(l/mg/hr) β	試料 番号	(mg/l) C	(mg/l) R	C·R	(mg/l/hr) ds/dt	(l/mg/hr) β
A ₁	3.10	8.10	25.11	($\times 10^{-1}$) 2.43	($\times 10^{-2}$) 0.97	B ₁	7.22	2.27	16.39	($\times 10^{-1}$) 2.62	($\times 10^{-2}$) 1.60
	4.30	6.89	29.63	2.26	0.76		7.38	2.06	15.21	2.48	1.63
	5.29	5.76	30.47	2.96	0.97		7.53	1.88	14.16	2.48	1.75*
	6.03	4.71	28.40	3.14	1.10		7.67	1.71	13.12	2.01	1.54*
	6.55	3.87	25.35	2.79	1.24		7.79	1.56	12.16	2.01	1.66*
A ₂	4.74	8.00	37.91	2.77	0.73	C	7.93	1.43	11.34	2.16	1.91*
	6.26	4.77	29.88	7.47	2.50		8.02	1.31	10.51	1.85	1.76*
	7.18	3.20	22.98	7.10	3.09		8.12	1.20	9.74	1.85	1.90*
	7.72	2.34	18.07	6.57	3.64		7.32	2.94	21.51	1.37	0.64
	8.06	1.82	14.67	6.75	4.60		7.78	2.47	19.21	1.07	0.56
	8.24	1.47	12.11	6.57	5.43*		8.17	2.09	17.08	0.76	0.45*
	8.34	1.25	10.43	6.40	6.13*		8.51	1.75	14.90	0.30	0.20*
	8.42	1.10	9.27	6.03	6.52*						
	8.49	1.00	8.49	5.86	6.90*						
A ₃	3.26	8.49	2.66	5.81	2.10	D ₁	3.77	3.18	11.98	7.19	6.00
	4.34	6.97	3.22	4.59	1.52		4.27	2.87	12.26	5.78	4.72
	5.24	5.84	3.60	4.28	1.40		4.77	2.59	12.36	4.84	3.92
	5.95	4.94	29.37	4.59	1.56		5.28	2.34	12.35	4.38	3.55
	6.45	4.21	27.16	4.73	1.74		5.74	2.15	12.34	4.07	3.30
	6.81	3.57	24.31	4.73	1.95		6.16	1.98	12.20	3.75	3.08
	7.08	3.03	21.44	4.28	2.00		6.54	1.83	11.97	3.13	2.61
	7.32	2.58	18.87	4.59	2.43		6.88	1.71	11.77	2.50	2.13
	7.46	2.26	16.86	3.98	2.36		7.22	1.61	11.63	2.34	2.01
	7.63	2.00	15.27	3.67	2.40		7.53	1.52	11.45	2.19	1.91
A ₄	3.26	8.64	28.13	5.04	1.79	D ₂	4.22	2.16	9.11	1.88	2.06
	4.57	6.73	30.75	3.63	1.18		4.90	2.01	9.84	1.40	1.42
	5.64	4.93	27.81	2.68	0.96		5.48	1.88	10.30	0.63	0.61
	6.50	3.65	23.72	2.21	0.93		6.04	1.76	10.63	0.31	0.29
	7.16	2.85	20.39	2.05	1.01						
	7.65	2.28	17.45	2.21	1.27*						
	8.00	1.89	15.12	2.52	1.69*						
	8.21	1.57	12.90	2.96	2.32*						

A：コイの飼育水 B：貯水槽汚泥水
C：大分県蒲江湾汚泥水 D：高知県宿毛湾汚泥水

4. 再ばっ気係数

大気中の酸素ガスが水に溶解する速度はDOの不飽和量に比例する。この比例定数を酸素溶入係数(K_2')という。また h の水深の水が完全に混合し下層の水が水面に湧昇して再ばっ気を受ける場合 h なる水柱としてのDO溶入速度の比例定数を再ばっ気係数という。すなわち

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(Ch)}{dt} &= K_2'(C_s - C) \\ \frac{dC}{dt} &= K_2(C_s - C) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (22)$$

$$\therefore K_2'' = K_2 h \quad]$$

K_2 について特に油膜のある場合について検討する。

(1) 実験条件と実験方法

実験用水は硫酸銅 (CuSO_4) を触媒として亜硫酸ソーダ (Na_2SO_3) を混入し溶存酸素を吸収させ、低酸素水として用いる。これを $V=40 \times 40 \times 75$ cm の実験水槽に入れ、この中に定流ポンプを入れ、水槽内で吸水、吐水を行って水を攪拌させる。油膜を張る場合には水面積に所要膜厚を掛けた容積のタラ肝油を表面に流し込む。DO測定のための採水は表層下 5 cm, 35 cm の位置に横向きに開口したガラス管によって行い、この試水の DO をウ

表—2 実験条件と結果

Case	1			2			3			4		
実験番号	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₃₁	C ₃₂	C ₃₃	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃
油膜厚 Z ₀ (cm)	0	0.01	0.10	0	0.01	0.10	0	0.01	0.10	0	0.01	0.10
攪拌流速 u' (cm/min)	0	0	0	2.01	1.99	2.24	3.98	3.24	3.58	5.15	7.26	7.75
相当流速 u×10 ³ (m/sec)	0	0	0	6.28	5.96	6.99	12.29	10.14	11.2	16.09	22.69	24.22
再ばっ気係数 K ₂ (1/day)	0.469	0.443	0.310	1.359	1.284	1.005	2.158	1.725	1.235	2.812	3.665	2.943

イングラ法および DO メータ (アンドリュース社製) で、1時間ごとに 40 時間測定した。実験条件は 表—2 に示す。

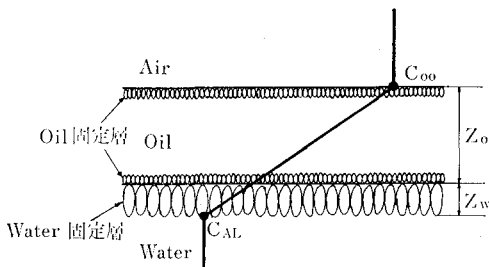
この中でポンプ攪拌流速 (変動流速) は次式による。

$$u' = q/V^{2/3} \dots\dots\dots (23)$$

ここに、q: ポンプの攪拌流量, V: 実験水槽の容積で流れが一樣であれば流れの 1 次元スケールは V^{1/3} であり、流管断面は V^{2/3} で示される。

(2) 油膜を通しての酸素溶入モデル

現象のモデルを図—4 のように与え、酸素溶入を空気との界面濃度 C₀₀ と表層の水中濃度 C_{AL} で表わし、境界膜内の機構には触れないことにする。溶入酸素量を Q, 酸素溶入係数を K₂', 油膜内の物質移動係数を D とすれば、単位時間に大気中から油膜内に溶入する酸素および単位時間に油膜内を移動する酸素量は単位面積当たり式 (24), (25) で与えられる。



C₀₀: 油膜の飽和 DO 濃度
C_{AL}: 水中の DO 濃度
Z₀: 油膜の厚さ
Z_w: Water 固定層の厚さ

図—4 酸素の溶入モデル

$$\frac{dQ}{dt} = K_2' (C_{00} - C_{AL}) \dots\dots\dots (24)$$

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{D}{Z_0 + Z_w} (C_{00} - C_{AL}) \dots\dots\dots (25)$$

両式より

$$Z_0 = D/K_2' - Z_w \dots\dots\dots (26)$$

が得られる。水中での単位時間の酸素濃度の変化を dC/dt とすれば式 (24) は

$$\frac{dC}{dt} = \frac{K_2' \cdot A}{V} (C_{00} - C_{AL}), \quad \frac{K_2' \cdot A}{V} = K_2 \quad (27)$$

となる。K₂ は再ばっ気係数である。これより、各実験

における K₂ 値を求めたのが 表—2 である。

(3) 油膜なしの場合の K₂ の理論値 (O'conner-Dobbins による) と実験値の比較

オコンナー・ドビンズは膜理論と流速のもつ乱れエネルギーによって中の水塊が表面張力に打ちかって空気との界面に出てばっ気を受けるとして総括移動係数または再ばっ気係数を実用化している。これは濃度 C が全断面または全水深一様という条件下における定数で河川のような鉛直混合の盛んな場合は使用できるが、海域におけるような DO 鉛直分布、鉛直輸送を問題とする場合には適当でない。ここでは酸素溶入係数が有効である。オコンナー・ドビンズの式は等方形乱流の場合

$$k_2 = 3.74 \times 10^4 \sqrt{\frac{D_m \cdot u}{h^3}} \quad (1/\text{day}) \dots\dots\dots (28)$$

$$K_2 = 2.30 k_2$$

ここに、h: 水深 (m), D_m: 酸素ガスの水中での分子拡散係数 (m²/sec), u: 流速 (m/sec)

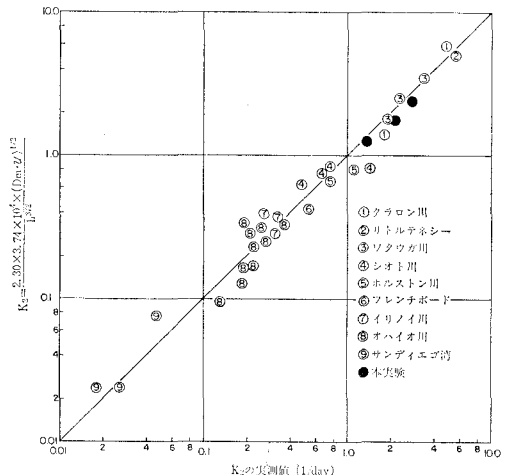
この実験では、攪拌流速 u' から u を求めることにする。

$$\tau = \rho u'^2 = \rho g R I, \quad u = \frac{1}{n} R^{2/3} I^{1/2},$$

両式より

$$u = \frac{R^{1/6} \cdot u'}{n \cdot g^{1/2}}$$

ここに、τ: 断応力, ρ: 密度, R: 径深 (m), I: 河床勾



図—5 溶入係数の計算値と実測値の比較

配, n : 粗度係数

ここで, 一般の河川を想定し ($n=0.025$, $R=10\text{ m}$ とし), 再ばっ気係数を計算し, 実測と比較したのが図-5 である。縦軸がオコンナー・ドビンズによる計算値でありよく一致している。

(4) 油膜のある場合の再ばっ気係数, 酸素溶入係数

表-2 の関係を表 (26) にしたがって, 横軸に $1/K_2$, 縦軸に油膜厚 Z_0 をとり図示すれば, 図-6 のようになり, Z_0 軸との切片が Z_w となり, その傾きが D/h となって表われる。

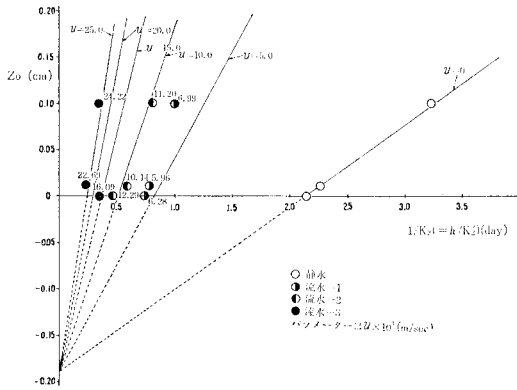


図-6 油膜厚流速と再ばっ気係数

D を油膜係数と呼ぶことにし, この流速による変化を図示したのが図-7 である。

これより

$$\frac{D}{h} = 28u + 0.09 \quad (\text{cm/day}) \quad \dots\dots\dots (29)$$

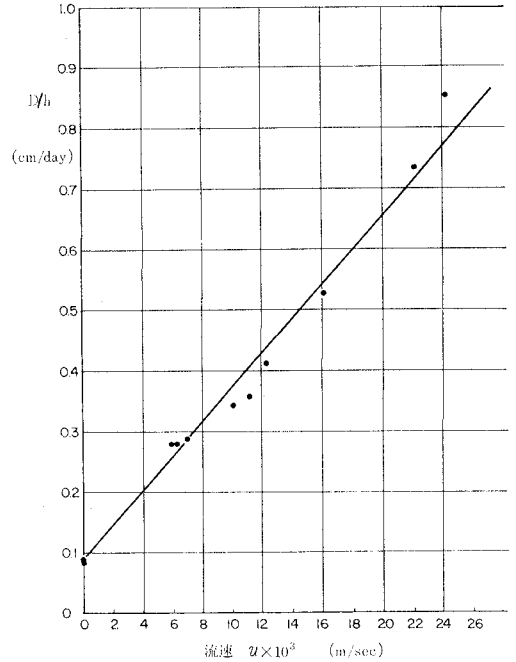


図-7 流速と油膜係数

$$K_2 = \frac{28u + 0.09}{Z_0 + 0.19} \quad (1/\text{day}) \quad \dots\dots\dots (30)$$

ここに, Z_0 油膜厚 (cm), u : 流速 (m/sec) である。

参 考 文 献

- 1) 中村 充・杉浦正徳: 漁場底層水の DO 消費に関する実験的研究, 農土試報告, pp. 207~214, 1975.
- 2) エッケンフェルダー: 廃水の生物学的処理, コロナ社, 1971.