

「第 17 編 養殖場」関係

資料17.1 湾の水環境改良保全工法の選定手順

湾の水環境改良保全工法の選定は一律に定まるものではないが、地形条件に重点をおいた場合、図 17-1-1 のような流れ図が考えられる。図においては湾域とは、その湾の大部分が工法を導入すべき漁場のことで、内海や大海湾の一部としての湾、または外海に面する湾をいう。

エネルギー源を潮汐に求める場合は、湾口の適正規模化と潮流流通型について検討すべきである。

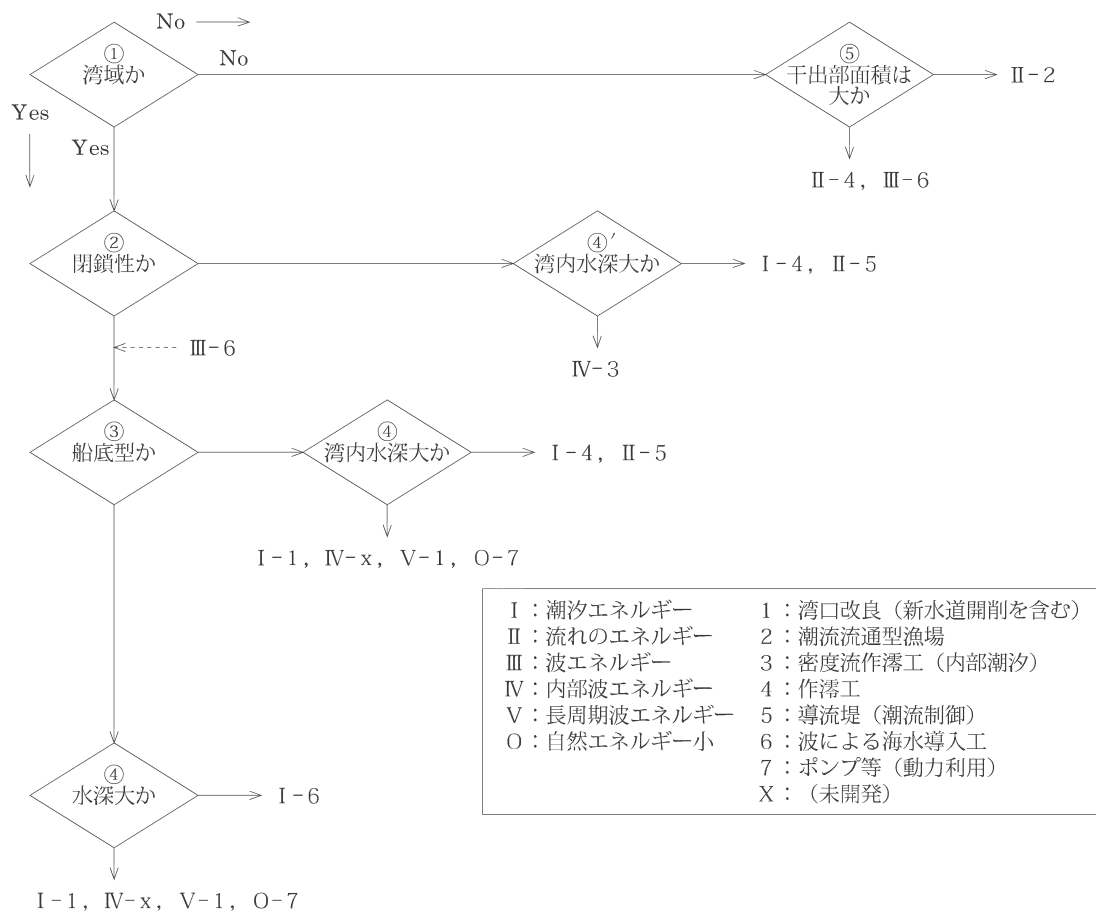
エネルギー源を波浪に求める場合は、波浪が常に存在する外海に面する海域が適用の対象となろう。

一方湾域においてもその湾奥部が外海に近く、かつその外海域に波エネルギーが存在する場合、そのエネルギーを導入することにより海水交換を増大させることも検討すべきである。

内部波エネルギーのうち内部潮汐は湾内が密度成層を形成し、湾の内部自由振動周期が潮汐周期（12.5 時間）に近い場合に卓越する。わが国近海では水深 10～50m の湾域で、夏季は内部潮汐の条件のための成層が形成される場合が多い。また、内部波の斜面への打ち上げなどによって海水流動を起こすが、未だ研究段階である（図中Ⅳ・x はそのことを示す）。湾内外における密度差によっても流動を起こすことができる。例えば、船底型湾口において外海水密度が湾内底層水密度より大きい場合、湾内への流入外海水は底層へも供給され湾内水と入れ換えることができる。

海水の交流・交換の促進は酸素濃度の大きい外海水を供給するとともに、塩分・水温などの水質に変化をもたらす。すなわち、閉鎖性の湾では一般に高塩分化する。また、作渚は外海水を湾奥まで運ぶ効果があり、それに付随して湾内の水質が水帯状の分布から均質化へ向かうが、塩分・水温の日較差は増大する傾向がある。このような水質の変化が湾内の多様な水産生物にどのような影響をもたらすかを検討し、水質改良工法を選定する必要がある。

機械エネルギーの導入は施設費のほかに運転経費も必要となるので使わないことが原則であろうが、水域が閉鎖的であり、密度及び水質成層を形成する養殖中心の漁場で、海水交換を促進するための自然エネルギー活用が不可能でほかに水質改良保全方法のない場合の次善、三善の策として検討されよう。



判定の目安

- ①：湾口に相当する2地点を選び、これを直径とする半円の面積と湾内の実面積を比較して後者が大きいとき。
- ②：湾口が浅いか、狭いかなどにより湾内外での潮位に差が、または位相に差がある（無次元湾内外潮差比 $\zeta'/\zeta < 0.97$ ）。
- ③：湾内底面より湾口敷高が高い。
- ④：湾内の平均地盤高が±0.0mより低い。
- ④'：水深10m以上。Noの場合、平均地盤が±0.0mより高い→6，そうでない→7。
- ⑤：距岸：100m以上。

なお湾域においては湾内外における密度差などの内部波エネルギーを検討する。また閉鎖性内湾域にあっては湾外部の波エネルギーを把握して、これの湾内導入を検討する。

図 17-1-1 工法選定の手順

資料17.2 養殖場の溶存物質収支

1. DO の推算

漁場における DO 変動要因としては、海水の流動に基づく移流、拡散による輸送、海面からの溶入、植物による生産・消費、動物による消費、そして化学的消費などがあり、これらが温度・光・流れ・水質・密度などの影響を受けて DO 濃度を変動させる。これらの関係を統合した DO 収支方程式から DO を推算する。

(1) DO 収支方程式¹⁾

完全に混合していると考えられる湾の DO 濃度の収支式は、以下のとおり表せる。

$$V \frac{dC}{dt} - q(C_0 - C) + K_1 R V - K_2 (C_s - C) A + K'_1 C A + (\alpha_0 - \alpha_1) V + kN = 0$$

…………… (式 17-2-1)

ここに、

C, C₀, C_s : 湾内、外海、飽和の DO 濃度

V, A : 湾の水容積、水面積 (ほぼ底面積も同じ)

K₁, K₂, K'₁ : 水中の脱酸素係数、酸素溶入係数、海底の脱酸素係数

R : 水中の還元物質濃度

q : 湾の海水交換量

α₀, α₁ : 単位体積当たりのプランクトンなどによる DO 消費、供給量

kN : 魚による DO 消費量

(N : 尾数、k : 魚の 1 匹当たりの単位時間当たりの酸素消費量)

t : 時間

である。

式 17-2-1 の第 1 項は湾内水の DO の変化率、第 2 項は q なる海水交換によって qC₀ が流入し、qC が流出することによる DO の増減、第 3 項は水中の有機物などの酸化分解による DO の減少、第 4 項は海面から水中に溶入する酸素量、第 5 項は海底での DO 消費量、第 6 項は植物プランクトンによる DO 生産と動・植物プランクトンによる DO 消費などによる増減、第 7 項は魚による DO 消費を示す。

式 17-2-1 を整理すると、

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC}{dt} + LC - I &= 0 \\ L &= \frac{q}{V} + \frac{K_2 A}{V} + \frac{K'_1 A}{V} \\ I &= \frac{qC_0}{V} - (\alpha_0 + K_1 R) + \frac{K_2 A}{V} C_s + \alpha_1 - \frac{kN}{V} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-2-2)$$

式 17-2-2 の解は、時刻 t₁ で濃度 C₁ であったとして、

$$C = \left[C_1 - \frac{I}{L} \right] e^{-Lt} + \frac{I}{L} \dots\dots\dots (式 17-2-3)$$

である。ただし酸素の供給や消費に関する諸係数は考えている時間内は一定とみなしている。I、L を構成する諸係数は次のようである。

① 水中の脱酸素係数 K_1

生物化学的な DO 消費速度は、DO 濃度、有機物量などで定まり、DO 消費を行う汚濁物質濃度 R、DO 濃度を C として、一定の水塊について、

$$\frac{dC}{dt} \propto R, \quad \frac{dC}{dt} \propto -\frac{dR}{dt} \quad \therefore \quad \frac{dR}{dt} = -K_1 R \dots\dots\dots (式 17-2-4)$$

R を残留 BOD 濃度で与えるとき、 K_1 を脱酸素係数とよぶ。脱酸素係数 K_1 に関しては DO が十分供給された場合の淡水について、有機物の分解に関する指標を BOD にとって研究されたものがある。しかし DO 濃度の影響や海水に対するものは、ほとんど確立されていないのが現状である。したがって現地の水について④項に述べる実測によって定めることが望ましい。

式 17-2-4 の解は

$$R = R_0 e^{-K_1 t}$$

$$\therefore K_1 = -\frac{1}{t} \ln \frac{R}{R_0} \dots\dots\dots (式 17-2-5)$$

R_0 : 最終 BOD 濃度 (=1.46BOD₅)、R=時刻 t の残留 BOD (=1.46BOD₅－消費 BOD)、BOD₅ は 5 日間の BOD である。

② 海底の脱酸素係数 K_1

海底堆積物の性状・水温などによって海底に接する水層の DO が消費される。この量は必ずしも DO 濃度に比例するとはいえないが、大阪湾²⁾、野見湾²⁾、古満目湾³⁾における実測値から溶存酸素消費速度 V_{OB} は、

$$\left. \begin{array}{l} V_{OB} = K'_1 C \\ K'_1 = 0.1 \sim 0.35 \quad (\text{m/day}) \end{array} \right\} \dots\dots\dots (式 17-2-6)$$

である。

③ 酸素溶入係数 K_2 ⁴⁾、再曝気係数 K_2 ⁵⁾⁶⁾

大気中の酸素が水に溶解する速度は、DO 不飽和量 ($C_s - C$) に比例する。この比例定数を酸素溶入係数 (K_2) という。また水深 h の水が完全に混合し、下層の水が水面上昇して再曝気を受ける場合、h なる水柱としての DO 溶入速度の比例定数を再曝気係数 (K_2) という。

すなわち

$$\left. \begin{aligned} \frac{d(Ch)}{dt} &= K_2(C_s - C) \\ \frac{dC}{dt} &= K'_2(C_s - C) \\ \therefore K_2 &= hK'_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-2-7)$$

である。

K_2 、 K'_2 の値については、現象が機構的に未解明で、また実測値も少ないため決定的な値はないが、以下のような値が報告されている。

$$\left. \begin{aligned} K_2 &= 0.06 \sim 0.12 \text{ m/hr} \\ K'_2 &= \left(\frac{3.9u^{0.5}}{h^{1.5}} + \frac{0.928W^{0.5} - 0.317W + 0.0372W^2}{h} \right) \times 1.024^{T-20} \\ &\quad (1/\text{day}) \\ K'_2 &= 8.6 \times 10^4 \sqrt{\frac{D_m u}{h^3}} \quad (h \geq 1.5 \text{ m}) \quad (1/\text{day}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-2-8)$$

ここに、

h : 水深 (m)、 W : 風速 (m/s)、 u : 平均流速 (m/s)、 T : 水温 (°C)、

D_m : 酸素ガスの水中への分子拡散係数 (m²/s)

$$D_m = (0.0072T + 1.973) \times 10^{-9}$$

④ 生物による供給 (α_1) と消費 (α_0)、脱酸素 (K_1R)

藻類、植物プランクトンは、酸素を呼吸消費するほか光を受けると光合成反応を行い、炭水化物を生産すると同時に酸素を発生する。

実用上これらの値の推算には明暗ビンによる実測が望ましい。これは水深別に採水した試水を曝気することなく、明・暗 2 種のビンに入れ、これを元の水深位置に朝吊り下げ、夕方取り上げ、明ビン、暗ビンの DO 値 C_1 、 C_d を測定する。

T を吊り下げ時間 (day) とすると単位時間当たりの濃度変化は明ビンにおいては、

$$\frac{C_1 - C_0}{T} = \alpha_1 - (\alpha_0 + K_1R)$$

ここに、

C_0 : 明暗ビンに入れる前の採水試水の DO 濃度

α_0 : 植物の呼吸による DO 消費

暗ビンにおいては植物による DO 生産 α_1 はないから

$$\frac{C_d - C_0}{T} = -(\alpha_0 + K_1R)$$

両式から

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{C_1 - C_d}{T} \\ \alpha_0 + K_1 R &= \frac{C_0 - C_d}{T} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-2-9)$$

α_0 、 $K_1 R$ については分離しては定まらないが、式 17-2-2 の適用にはこれで十分である。

⑤ 養殖魚の酸素消費 (k)

養殖魚の酸素消費は、一般に次の式で表される関係がある。

$$k = nW_b^m \dots\dots\dots (式 17-2-10)$$

W_b : 魚 1 匹当たりの体重 (g/尾)

n, m : 定数

k : 魚の単位時間当たりの DO 消費量 (ml/min/尾)

安静状態にした海産硬骨魚類 36 種の結果から

$$k = 0.00401W_b^{0.788} \text{ (水温 } 21^\circ\text{C)}$$

$$= 0.00534W_b^{0.811} \text{ (水温 } 26^\circ\text{C)}$$

が得られている。ただし上式を用いて得られた結果は、安静状態での値であり、摂餌などの活動時にはもっと大きな値になる。

(2) 漁場の DO 特性

I、L の現地決定法 I、L に係る個々の因子の量について上述した。他方現地の DO 経時変化を測定して、この湾の DO 特性 I、L を定めることもできる。図 17-2-1 は福井県日向湖の実測値であるが、時刻 $t=t_1=0$ で DO 濃度 $C=C_1$ とし、 $t=(t_1+T, t_1+2T)$ で (C_2, C_3) とすれば、

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{1}{T} \ln \frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_3} \\ I &= \frac{C_1 C_3 - C_2^2}{C_1 - 2C_2 + C_3} L \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-2-11)$$

と表せる。

これは図 17-2-1 に示すように春から夏にかけて DO が低くなり、最悪の状態になる場合、春先の DO 濃度を C_1 、最悪状態の濃度 C_3 、その中間地点での濃度 C_2 を観測して、この間の漁場の DO 特性値 I、L を求めるのである。

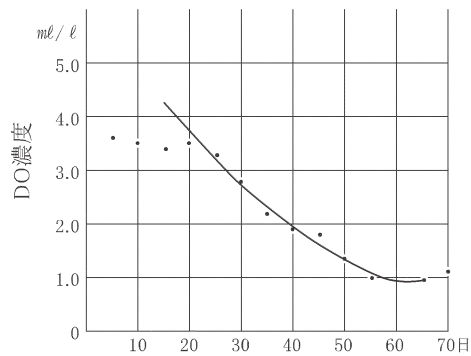


図 17-2-1 福井県日向湖 DO 周年変化 (1971) 水深 10m 層

(3) 溶存酸素量の計算

以上に述べた現地の諸数値を用いて溶存酸素の経時変化を計算する。溶存酸素を問題とする期間を n に区分する。例えば 5 月、6 月、.....10 月とか、あるいは旬別に 5 月 1 日～10 日、11 日～20 日、.....とする。ただし区間の長さは一定でなくともよい。各区分内で式 17-2-2 の I 、 L が一定と見なせるように区分する。各区分内について (I_1, L_1, t_1) 、 (I_2, L_2, t_2) 、..... (I_n, L_n, t_n) とすると、式 17-2-3 を用いて

$$0 < t \leq t_1 \quad C = \left[C_1 - \frac{I_1}{L_1} \right] e^{-L_1 t} + \frac{I_1}{L_1}$$

$$t_1 < t \leq t_2 \quad C = \left[C_2 - \frac{I_2}{L_2} \right] e^{-L_2(t-t_1)} + \frac{I_2}{L_2}$$

ここに

$$C_2 = \left[C_1 - \frac{I_1}{L_1} \right] e^{-L_1 t_1} + \frac{I_1}{L_1}$$

$$t_2 < t \leq t_3 \quad C = \left[C_3 - \frac{I_3}{L_3} \right] e^{-L_3(t-t_2)} + \frac{I_3}{L_3}$$

ここに

$$C_3 = \left[C_2 - \frac{I_2}{L_2} \right] e^{-L_2(t_2-t_1)} + \frac{I_2}{L_2}$$

以下同様にして図 17-2-2 の DO 変化曲線を引き、DO 濃度が許容量（例えば 4g/m^3 ）以下になる時間では養殖尾数 N を少なくするとか、海水交換量 q を大にするような改善工法を行う。

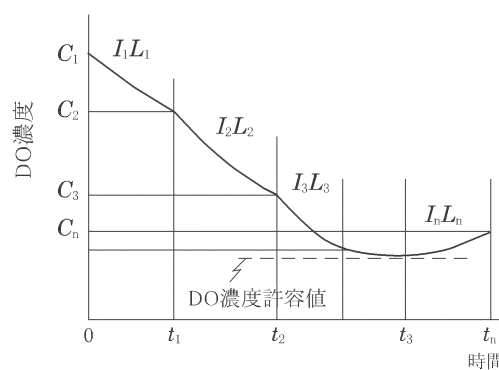


図 17-2-2 溶存酸素濃度の経時変化

(4) 漁場改良を必要とする場合の DO 供給量

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 17-2-2 の I に O_D/V を加えて解き、 $C \geq C_p$ として O_D について解けば、

$$O_D \geq \frac{LV \left\{ \left[C_p - \frac{I}{L} \right] - \left[C_1 - \frac{I}{L} \right] e^{-Lt} \right\}}{1 - e^{-Lt}} \dots\dots\dots (式 17-2-12)$$

となる。

いま、 $C_p = C_1$ にとれば、

$$O_D \geq (LC_p - I)V \dots\dots\dots (式 17-2-13)$$

となる。

O_D を供給するための工法は、前述の湾口改良、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、底層水の選択排除などがある。

(5) 溶存酸素に余裕のある場合の養殖増加量

DO の余裕を養殖量の増大に使う場合には、魚の酸素消費量は許容濃度以上では C に関係しないから、余剰の溶存酸素 O_D' は式 17-2-12、式 17-2-13 の O_D を用いて、

$$O_D' = -O_D \dots\dots\dots (式 17-2-14)$$

で与えられる。魚体重 W_b の魚の単位時間当たりの DO 消費量を k とすれば、養殖増加量 W は、

$$W' = \frac{O_D'}{k} \dots\dots\dots (式 17-2-15)$$

として求められる。ここに、 k の値は式 17-2-10 で計算される。

2. 栄養塩濃度の推算

栄養塩 N (窒素) や P (リン) の濃度変化は海水交換、海底からの溶出、陸上からの負荷、プランクトンなどによる吸収などによって引き起こされる。これらの関係を統合した栄養塩収支式から、栄養塩濃度の推算を行う。

栄養塩濃度を R とおくと、栄養塩収支式は式 17-2-16 のように表せる。

$$V \frac{dR}{dt} - q(R_0 - R) - k_B A + pV - q_c = 0 \dots\dots\dots (式 17-2-16)$$

この解は式 17-2-2、式 17-2-3 と同様に

$$\left. \begin{aligned} R &= \left[R_1 - \frac{I}{L} \right] e^{-Lt} + \frac{I}{L} \\ L &= \frac{q}{V} \\ I &= \frac{qR_0}{V} + \frac{k_B A}{V} - p + \frac{q_c}{V} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-2-17)$$

として推算される。

ここに、

R_0, R_1 : 外海及び初期栄養塩濃度

k_B : 海底よりの単位面積当たりの溶出速度

p : 海水中でプランクトンなどの吸収増殖及び死亡沈殿により変動する単位体積当たりの量

q_c : 陸上からの負荷量

である。

k_B の値は前述 ³⁾ の高知県古満目湾で

無機態窒素 $k_B=0.0144\text{g/m}^2/\text{day}$

リン $k_B=0.0024\text{g/m}^2/\text{day}$

大阪湾 ⁸⁾⁹⁾ で

窒素 $k_B=0.00218 \times T - 0.0118 \text{ g/m}^2/\text{day}$

リン $k_B=0.03 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 7,8,9 月

$0.005 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 10 月～翌年 6 月

ここで T : 底層水温 (°C) が得られている。

(参考文献)

- 1) 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 回海岸工学講演会論文集 (1976)，pp.539-544
- 2) 高知県水産試験場：昭和 51 年度魚類養殖環境自家汚染防除技術開発研究報告書 (1977)，p.42
- 3) 高知県水産試験場：昭和 58 年度赤潮対策技術開発試験報告書 (1984)，pp.25-28
- 4) 例えば日本水産学会編：水産学シリーズ 21 浅海養殖と自家汚染 (1982)，pp.88-108
- 5) Thomann, R.V. and J.A. Mueller: Principles of surface water quality modelling and control, Harper and Row (1987), 644p.
- 6) O'Connor, D.J. and W.E. Dobfins: The mechanism of reaeration in natural streams, Trans, A.S.C.E., Vol. 123 (1958)
- 7) 山元憲一・島隆夫・山下秀幸・綿石慶太：海産硬骨魚類 36 種の安静状態での酸素消費量と体重の関係，水産増殖，38 (1990)，pp.41-45
- 8) 城久：大阪府水産試験場研究報告，第 7 号 (1986)，pp.89-90
- 9) 米川和彦：大阪湾における栄養塩濃度変化に伴うプランクトン動態モデルの開発，電力中央研究所報告 U90057 (1991)，p.16

資料17.3 取入口構造決定のための計算手順

1. 必要流量・流速を得るための平均水位上昇高さ

取入口から養殖池、岩盤作濤など利用水域を通じて排水口までの間に、所要流量を所要流速で流すのに必要な水位上昇量 D の計算は次のように行う。

$$D = \sum_{i=1}^m \left(\frac{n_i^2 v_i^2}{R_i^{4/3}} l_i \right) + \sum_{j=1}^k h_j, \quad v_i = \frac{Q}{A_i} \dots\dots\dots \text{(式 17-3-1)}$$

ここに、

Q : 流量

n_i : マニングの粗度係数

v_i : 所要流速

l_i : 区間長

A_i : 通水断面積

R_i : 径深

h_j : 池への流入・流出損失、網による損失など（後述）

m : 断面か粗度係数のどちらかが異なる区間数

k : 摩擦以外の損失を与える構造物の数

径深は通水断面積を潤辺 P （通水断面で水に接する側壁及び底の長さ）で割ったものである（ $R = A/P$ ）。

粗度係数 n は潤辺の形状（凹凸）に関係し、これがなめらかだと小さく、凹凸が大きいとか植物が繁茂していると大きい（「第3編 5.2.1 マニングの粗度係数」参照）。

h_j の値については

養殖池への流入損失 : $f_e v^2 / 2g$ 、 $f_e = 0.2$ （ベルマウス）～ 0.5 （角ばった入口）

養殖池への流出損失 : $f_o v^2 / 2g$ 、 $f_o = 1.0 \sim 1.1$

網による損失 : $2C_D d / s \cdot v^2 / 2g$

$C_D = 1$ 、 d : 網糸の太さ、 s : 網目間隔

式 17-3-1 の計算は排水路出口の水位を起点とし、上流に向かって順次損失を加算して計算を進める。水路が合流、あるいは分岐するところでは、両水路の交点で同一水位となることを考慮する。例えば 2 つの取入口 A、B からの流れが S 点で合流する場合、A 取入口からの水位が B 取入口からのものより高いと流れは B 取入口へと逆流する。S 点で両取入口からの水位を一致させることが必要である。したがって 2 つ以上の取入口があるときは、それぞれの取入口での水位上昇高さ D は必ずしも同一とはならない。

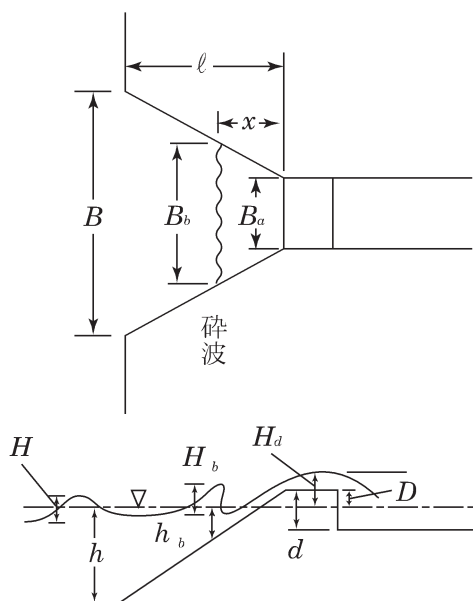


図 17-3-1 狭さくによるエネルギーの収束と砕波

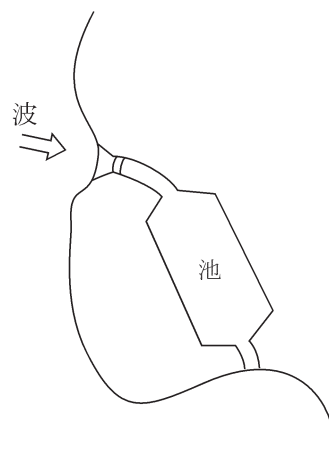


図 17-3-2 養殖池に利用した事例

2. 水位上昇 D を与えるための取入口

水位上昇高さ D を与えるための計算法を示す¹⁾。

所要海水導入力 Q が与えられ、式 17-3-1 から D が求まると堰上での越流水位 H_d を次式で計算する。

$$H_d = \left\{ \frac{\left(\frac{q}{\beta K} \right)^2}{g} \right\}^{1/3} + D, \quad q = \frac{Q}{B_a} \quad \dots\dots\dots (式 17-3-2)$$

ここに、

β : 堰上での平均流に関する実験係数で $\beta = 0.17$

K : 前面水深ゼロの段波波速に関する係数で $K = 1.7$

H_d を発生させるため開口幅 B は、 $B/B_a = y$

$$y^7 - y^6 + C_1 y^5 + C_2 y^4 - C_3 = 0 \quad \dots\dots\dots (式 17-3-3)$$

$$C_1 = \frac{K_1^2 D}{H^4 h}, \quad C_2 = \frac{K_1^2}{H^4}, \quad C_3 = \frac{K_1^7 K_0^2 (h + D)}{H^{12} h^3}$$

$$K_1 = \frac{\{2H_d + K^2(H_d - D)\} (H_d - D)}{\alpha (K_0 + a)}$$

ここに、

h : 前面水深

H : 利用のための計画波高

a : 砕波において静水面上の波頂高の全波高 (H_b) に対する比 ($\simeq 0.7$)

α : 砕波による流速に関する係数 ($\simeq 0.6$)

K_0 : 砕波における水深波高比で孤立波の場合 $K_0 = 1.28$

式 17-3-3 の解は漸近解法を用い、第 n 近似を y_n と書いて

$$y_1 = C_3^{1/7}$$

$$y_{n+1} = y_n - \frac{y_n^7 - y_n^6 + C_1 y_n^5 + C_2 y_n^4 - C_3}{7y_n^6 - 6y_n^5 + 5C_1 y_n^4 + 4C_2 y_n^3} \dots\dots\dots (式 17-3-4)$$

式 17-3-4 で必要精度まで計算する。

y が求まると開口幅 B は次式で求まる。

$$B = yB_a \dots\dots\dots (式 17-3-5)$$

鉛直方向の狭さくは、勾配 1 : 2 程度が効率的であるため、その勾配で前面水深（碎波しない水深）と等しくなるまで斜面を延ばし、それより沖側はその水深を確保しながら海底に接続させる。

(参考文献)

- 1) 中村充・乃万俊文：波浪エネルギーによる海水導入に関する研究，農業土木試験場報告，第 15 号（1977），pp.87-97

資料17.4 閉鎖性湾の海水交流・交換

1. 適用範囲

湾内外の海水交流、交換が潮汐によって行われる湾で、内外水位差が主として湾口部で生じている閉鎖性湾であること。

閉鎖性湾とは湾内外における海水流入のエネルギー損失が主として湾口部でのみ行われるもの、すなわち湾口部水位差の大なる湾である。閉鎖性湾における外海水との交換は湾口を通じて行われ、潮汐による海水交流は近似解析法でも十分な精度で計算できる¹⁾²⁾。この計算法は次の条件で導かれる。

① 潮汐に対して共振しない湾であること

共振しないための条件は $T_f/T \ll 1$ である。ここで、 T ：潮汐周期、 T_f ：湾の固有周期で、等深な長方形湾では次式で表される。

$$T_f = \frac{2l_b}{\sqrt{gd}} \quad (\text{湾口の狭い湾})$$

$$T_f = \frac{4l_b}{\sqrt{gd}} \quad (\text{湾口の比較的広い湾})$$

ここに、

l_b ：湾口から湾奥までの距離

d ：湾内平均水深

② 外海水位変動は正弦曲線とする

これらの条件を満たさないとき及び湾内の流況を調べたいときは、原則として水理あるいは数値模型実験を行うことが望ましい。

2. 計画上の基礎事項

(1) 湾口の水利特性

湾口の水利特性は原則として流量係数で表す。

湾口、湖口、築堤開口部などで区切られた2つの水域間の流量は、式 17-4-1 で求められる。湾口における流れやすさは式中の C によって示され、この C を流量係数とよび、式 17-4-2 または式 17-4-3 で示される。

$$q = \pm CA\sqrt{2g\Delta h} \quad (\text{右辺の+は流入時、-は流出時}) \dots\dots\dots (\text{式 17-4-1})$$

ここに、

q ：単位時間当たりの流出入流量

C ：流量係数

A ：交流口の平均潮位における平均通水断面積

Δh ：内外水位差

流量係数 C は交流口の水利特性を表すもので次のようになる。

$$C = \frac{1}{\sqrt{k}} \left\{ \begin{aligned} &k = f_e \left(\frac{A}{A_e} \right)^2 + f_0 \left(\frac{A}{A_0} \right)^2 + \Sigma \frac{2gn^2 l}{R^{4/3}} \left(\frac{A}{A_l} \right)^2 \\ & \dots\dots\dots (式 17-4-2) \end{aligned} \right.$$

ここに、

f_e, f_0 : 流入、流出損失係数でほぼ 0.4, 1.0 ととられる

A : 交流水道において基準にとった通水断面積 (普通最小通水断面を基準にとる)

A_e, A_0, A_l : 流入点、流出点、区間 l の位置における通水断面積

l : 水路区間長

n : マニングの粗度係数で水路の材料、水路の状態などによって定まる流れの摩擦抵抗に関する係数 (m-秒単位) で、「第 3 編 5.2.1 マニングの粗度係数」に示す。

R : 径深 (= 通水断面積 A / 潤辺長 P 、図 17-4-1 参照) で水路水深に比べ水路幅が十分大きい場合には水深に等しいとおいてよい。

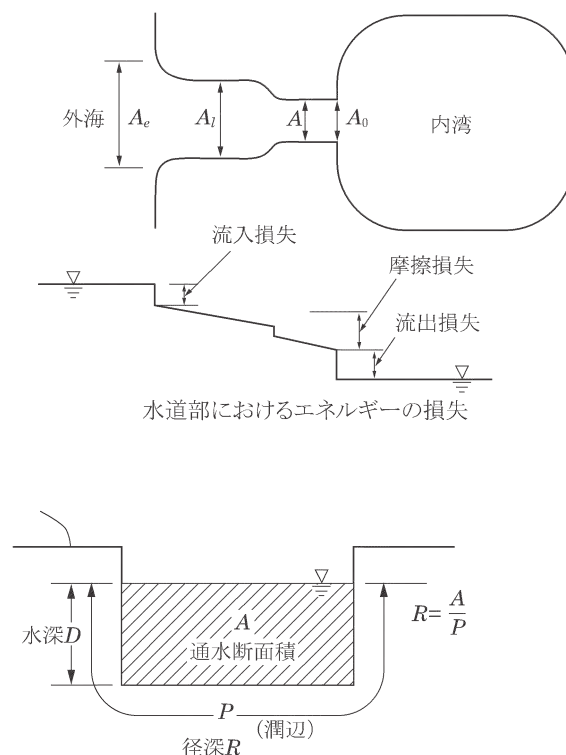


図 17-4-1 径深とエネルギーの損失

なお交流水道の形が単純な場合には流量係数 C は実用上ほぼ次式によって計算できる。

$$C = \left[1.4 + \frac{0.021}{D^{4/3}} \right]^{-1/2} \dots\dots\dots (式 17-4-3)$$

ここに、

D : 水道部水深

l : 水道部長さ

内外潮位差を同時に観測することによって式 17-4-8 により C を推定することができる。この方法で計算した日本の主要な浅海内湾の流量係数を、式 17-4-3 と比較すると図 17-4-2 となる。

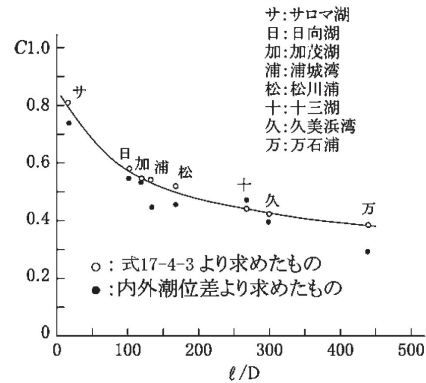


図 17-4-2 主な浅海漁場の流量係数³⁾

(2) 潮汐による海水交流

閉鎖性湾の海水交流は湾口条件における運動方程式と湾全域に関する連続方程式で解いてよい。海水交流は原則として次式の解より算定するものとする。

$$S \frac{dh'}{dt} = q + q_r \quad \dots\dots\dots (式 17-4-4)$$

$$q = \pm CA\sqrt{2g|h-h'|} \quad \dots\dots\dots (式 17-4-5)$$

ここに、

S : 有効内水面積

q_r : 河川流量

h : 外海水位

h' : 内水位

内海と外海との流出入流量 q は式 17-4-5 によって求められる。ここで $+$ は流入量、 $-$ は流出量を表す。湾内の流出入流量の連続方程式は式 17-4-4 で与えられる。ここで S は有効内水面積で、次式によって求める。

$$\left. \begin{aligned} S &= \bar{S} \left(1 - \frac{\pi t_l}{T} \right) \\ t_l &= \frac{l_b}{\sqrt{gd}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (式 17-4-6)$$

ここに、

$\bar{S}$: 平均湾内水面積 (平均潮位のときの湾内水面積のこと)

T : 潮汐周期

l_b : 湾口から湾奥までの距離

d : 湾内平均水深

いま外海の水位変動が次のような正弦曲線で与えられるとする。

$$h = \frac{\zeta}{2} \sin \frac{2\pi t}{T} \dots\dots\dots (式 17-4-7)$$

ここに、 ζ ：外海潮位差

① 河川流量など q_r が 0 の場合 ¹⁾ の近似解は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\zeta'}{\zeta} &= \left[\frac{(1+4K^2)^{1/2}-1}{2K^2} \right]^{1/2} \\ K &= \frac{4}{\beta^2} \left(\frac{S}{CA} \right)^2 \frac{\zeta}{gT^2}, \quad \beta = 0.763 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-4-8)$$

ここに、 ζ ：内水位潮位差

ζ が求まれば海水交流量、交流口での流速、内外水位変化の時差 ΔT の諸量は次のようになる。

$$Q = S \zeta' \dots\dots\dots (式 17-4-9)$$

$$\bar{v} = \frac{2Q}{\Delta T} \dots\dots\dots (式 17-4-10)$$

$$v = \frac{\bar{v}}{\beta} \sqrt{\sin \frac{2\pi}{T} (t + \delta)} \dots\dots\dots (式 17-4-11)$$

$$\delta = \frac{T}{4} - \frac{T}{2\pi} \cos^{-1} \frac{\zeta'}{\zeta}$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} \frac{\zeta'}{\zeta} \dots\dots\dots (式 17-4-12)$$

ここに、

Q ：1 回の干満の間に流入または流出する総水量

$\bar{v}$ ：1 回の干満における流入または流出する平均流速

v ：時刻 t における流速

ΔT ：内外水位変化の時差

② 河川流量など

q_r が無視できない場合 ²⁾ は式 17-4-5、式 17-4-7 を式 17-4-4 に代入して、ここで、 $t_0 = t/T$ 、 $h_0 = h/\zeta$ なる無次元量 t_0 、 h_0 を用いて表せば、

$$\frac{dh_0}{dt_0} = \pm \left[\left(\frac{CA}{S} \right)^2 \frac{gT^2}{\zeta} |\sin 2\pi t_0 - 2h_0| \right]^{1/2} + \frac{q_r T}{S \zeta} \dots\dots\dots (式 17-4-13)$$

式 17-4-13 を数値計算し、内水位潮位差 ζ 、外海に対する位相の遅れ ΔT 、平均水位の上昇量 a 、最大流出入流量 $Q_{\max}$ 、交流量 Q などが求められる。それらの諸量は図 17-4-3～図 17-4-7 に示す。

したがって外海の潮汐条件、交流口の特性、内湾の条件などがわかれば実用上は図 17-4-3～図 17-4-7 によって海水交流特性が求められる。

なお、海水交流の計算としてはこのほかにいくつかの計算式があるが 45)、大きな違いはない。

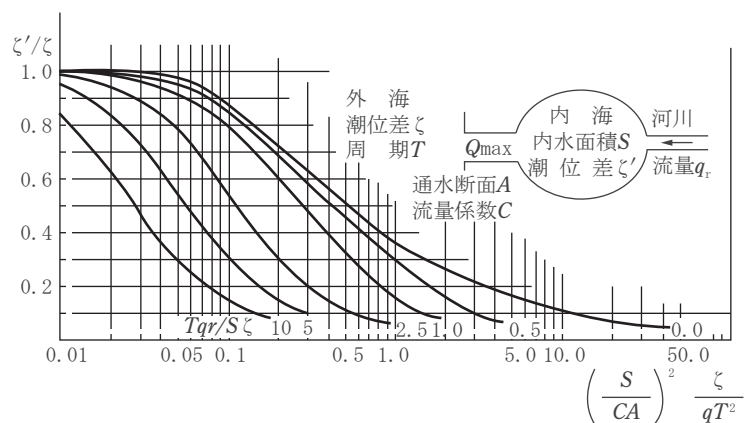


図 17-4-3 湾内外の潮位差比

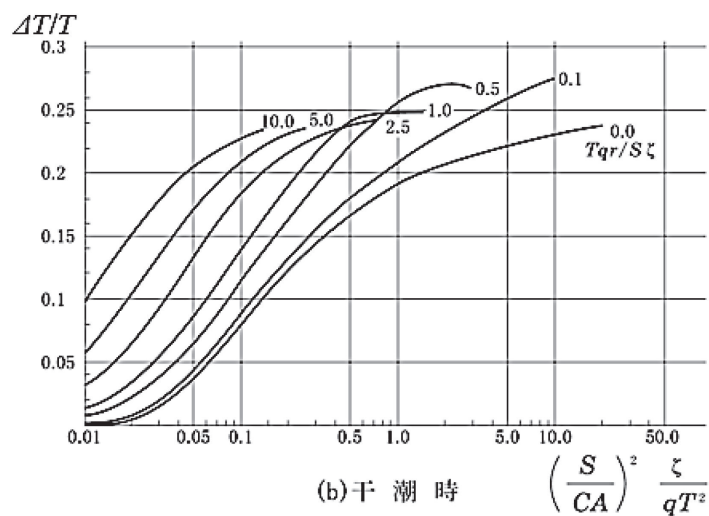
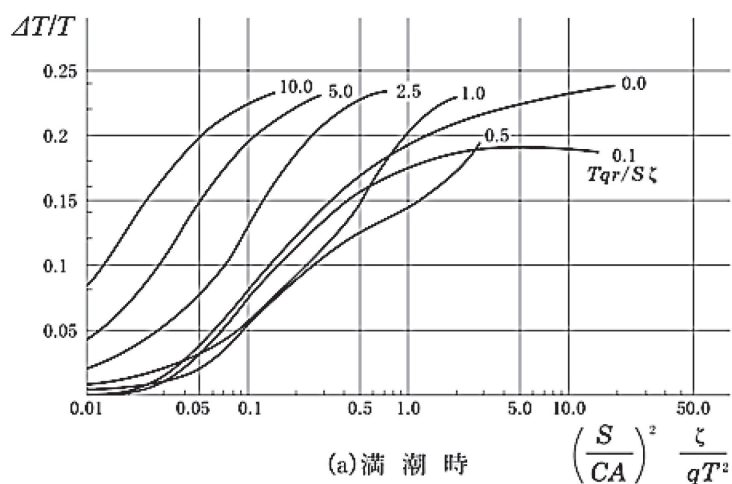


図 17-4-4 湾内外の位相差

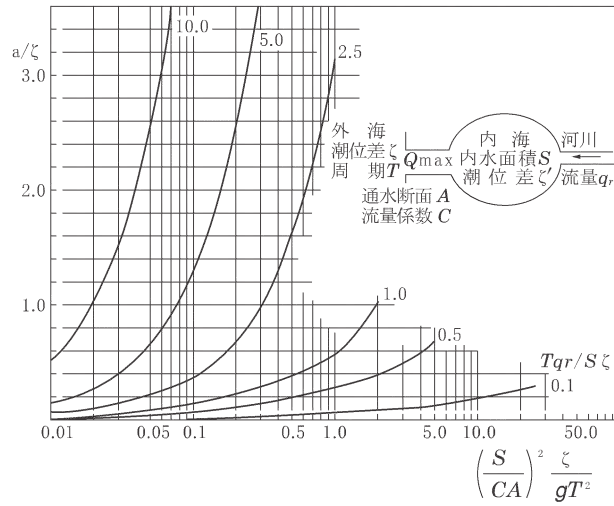


図 17-4-5 湾内の平均水位上昇量

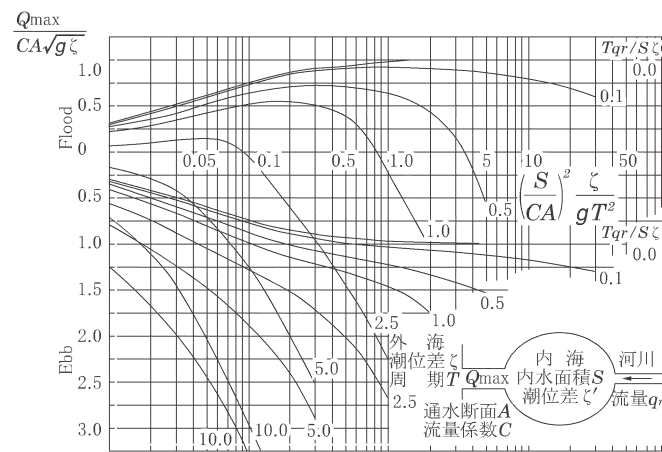


図 17-4-6 湾口部の最大断面平均流量

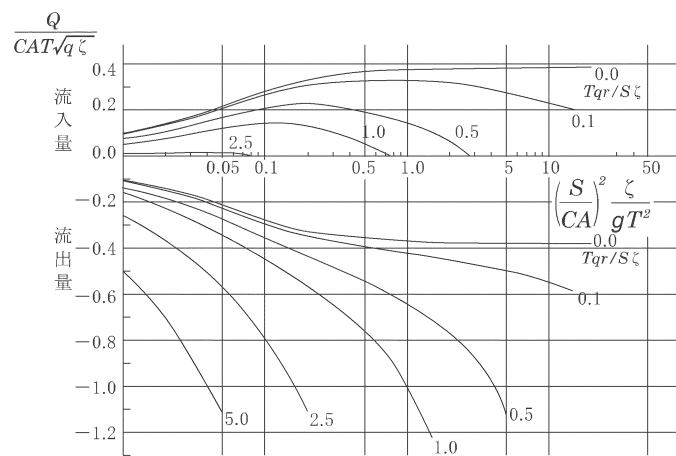


図 17-4-7 一潮当たりの海水交流量

(3) 海水交換

外海水と湾内水の一潮汐当たりの実質入れ替り量 q を海水交換量という。海水交流量 Q に対する交換量 q の割合 q/Q を海水交換率という。主な湾の海水交換率は表 17-4-1 のとおりである。

表 17-4-1 主な海湾の海水交換率⁶⁾

海 湾 名	海水交換率	研 究 者 名
明 石 海 峡	0.12	速水・福尾・依田
伊 勢 湾	0.15	平野・上原
三 河 湾	0.16	
駿 河 湾	0.25	
東 京 湾	0.20	
松 島 湾	0.12～0.15	渡辺
東 京 湾	0.14	松本ら
松 川 浦	0.12～0.14	中村・萩野 ^{*)}
豊 後 水 道	0.16	川村ら
布刈瀬戸 (南部)	0.42～0.76	平野・中田
(北部)	0.08～0.22	
浦 の 内 湾	0.1～0.3	木村ら

*) 数値シミュレーションによる値

湾の海水交換率の推定は今後の研究に待つところが多いが、次のように概略値の推定が可能である。図 17-4-8 のように外海の水が湾内に入り、その一部が既存の水と混合し合うとき、交流量 Q に対する割合を α_m とすると、この混合水は次の落潮時に流出して海水交換を生じることになる。海水交換率を α とすると α_m との間に次の関係がある。

$$\alpha = \frac{V - \frac{Q}{2}}{V - \frac{Q}{2} + \alpha_m Q} \alpha_m \dots\dots\dots (式 17-4-14)$$

α_m は完全混合のとき 1 であり、全く混り合うことなく次の落潮で流出するとき、 $\alpha_m=0$ である。 α_m の値は湾口部流速と湾のスケール (奥行) によって推定されるが、ほぼ次のように見積もることができる。湾軸長 (奥行) を l_b 、湾口部平均流速を $\bar{v}$ として、

$$\alpha_m = \frac{\bar{v}T}{2l_b} \leq 1 \dots\dots\dots (式 17-4-15)$$

すなわち湾口からの最大流程と湾軸長の比として見積もられ、1 より大となれば 1 回の漲潮で湾奥まで流れ込む状態で α_m の上限値は 1 である。

海水交換量 q は式 17-4-16 となる。

$$q = \alpha Q \dots\dots\dots (式 17-4-16)$$

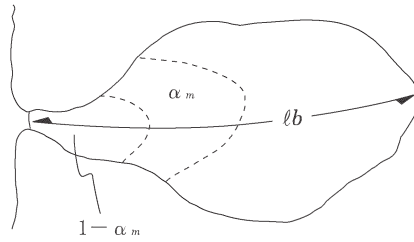


図 17-4-8 流入外海水が湾水と混合する割合

3. 最適湾口規模

一潮汐間の海水交換量が最大となるような湾口規模を定める。

閉鎖性湾の最適湾口規模とは一潮汐間の海水交換量が最大となるような湾口である。そのためには海水交流量 Q が多く、同時に湾口流速 v が大きくなるような通水断面積とすることである。 Q を増大させるには内水面潮位差 ζ' を大に、 v を大にするには湾口断面積を小にとればよい。図 17-4-6、図 17-4-7 より対象とする湾口の最大流速（平均流速）、海水交流量と通水断面積の関係図を描き、最適湾口規模条件に合うような通水断面積を決める。河川流量が 0 の場合の最適湾口断面積は ζ'/ζ が 0.95～0.98 程度に相当するものである。海水交換量を最大にするには通水断面積を小さくし、 ζ'/ζ を 1 より少し小さくし、湾口流速を大きくすることにより海水混合率 α_m を高めることが有効である。

また湾口に曲がり、断面変化などがある場合はできるだけ整形し、流出入水をできるだけ流れやすくすること、すなわち流量係数ができるだけ 1 に近づくようにすることが望ましい。

内部跳水 η の場合の最適湾口規模は流入時に内部跳水を発生させ、下層水の連行量を最大とすることである。その場合の最適内部フルード数は 3.0～3.1 程度に相当するものである。流出時にはポテンシャル流に近い流れとして流出させる。

密度潜流のときの湾口規模は上下層水に密度差がない場合に準ずるが、流入時の上層水の連行量をできるだけ小さくして、流入水を底層に導入するような湾口規模とする。

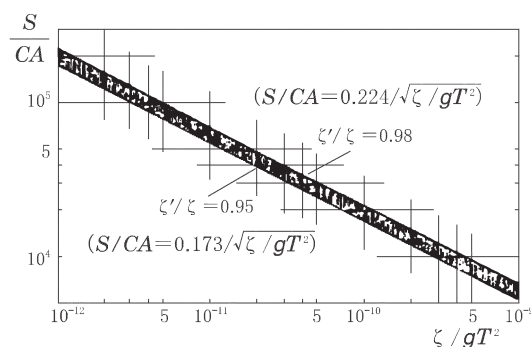


図 17-4-9 最適湾口断面積 S/CA と潮汐条件 (ζ/gT^2)

(参考文献)

- 1) 中村充・白石英彦・佐々木泰雄：海水交流に関する研究，農業土木試験場報告，第4号（1966），pp.63-91
- 2) 中村充・萩野静也：海水交流に関する研究，第23回海岸工学講演会論文集（1976），pp. 507-511
- 3) 中村充・萩野静也：海水交流に関する研究，農業土木試験場報告，第15号（1977），pp.99-107
- 4) 南信弘：浦の内湾の海水交流，水産土木，5（1968），pp.43-45
- 5) 戸原義男：築堤方式による湾の一部締切と海水交流について，水産土木，2（1966），pp.19-25
- 6) 萩野静也：湾口改良，水路開削，水産土木ハンドブック，緑書房（1980），pp.247-257
- 7) 中村充・乃万俊文・龍富士夫：密度成層流の内部跳水，第25回海岸工学講演会論文集（1978），pp. 456-459

資料17.5 動力利用による水質改善

1. ポンプによる底層悪水排除

(1) 排除水量の決定

排除水量の決定は、水質の許容濃度、対象とする水深、負荷物質の収支、対象種の収容密度、水質悪化の速さ、を考慮して行う。

排除水量は利用すべき対象水深までの水柱について水質（例えば DO）が対象種飼育に必要な濃度を保つよう、海水交換、大気中からの溶入また分解されるべき有機負荷の特性を検討して定める。

① 水質の許容濃度

水質の許容濃度は対象種の生理・生態を考慮して定める。

許容濃度として対象種が正常に飼育される濃度が望ましいが、その濃度をはずれることによって対象種が受けるであろう影響、はずれる頻度、時間など危険率をある程度考慮して定めるが、致死限界値を超えてはならない。

② 対象とする水深

現状における密度成層の位置と対流圏の深さ、及び水質の周年変化を考慮して対象とする水深を定める。

対流圏の深さは日本の緯度にあつては 20m といわれる。例えば日向湖では周年調査結果から約 20m である。対流圏以深は永年にわたる有機負荷の堆積部と考えられるので、これより以浅の密度成層面との間を対象とする水深と定め、その水深まで許容水質濃度を満足させる。

③ 水質悪化の速さ

水質悪化の速さは汚染負荷とその物理的・生物化学的浄化の速さを考慮して定める。

この方法には各漁場における成層発達の実態から、DO の漁場での固有特性値として求める方法と、流れによる DO 輸送、細菌による有機物分解、化学反応による酸素消費供給機構から解析する方法がある。（資料 17.2 参照）

(2) 取水工

取水工は目的とする悪水のみを選択的に取水するため、取水口は密度境界面より下で、対流圏の最下層に設けることが望ましく、また取水流速は上層水を連行しない流速とする。

密度流における選択取水は火力発電などにおけるものと共通の問題である。

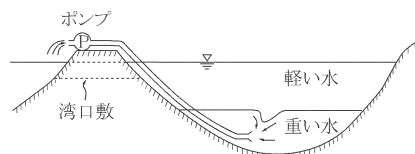


図 17-5-1 底層悪水排除模式図

① 取水工

漁場の水質悪化による障害は一般に対流期に底層滞留水の対流湧昇によって起こるので、対流

圈内の漁場は常時許容範囲の水質を保つ必要がある。このため取水口は対流圏の最下層に設けることが望ましい。対流圏以深の水は対流湧昇を起こさないで必ずしも排除する必要はない。

② 取水流速¹⁾

この工法による水質改善においては、その機構からも機械エネルギー効率からも底層悪水のみを選択的に排除しなければならない。そのためには上層水を連行しない流速内で排水を行うことが必要である。

上層水を連行しない取水限界流速、流量は次のように計算される。

a) 三次元の場合

取水口は一般的には漁場中央付近に設けられる三次元を選択取水となる。

吸込口の口径を D とすると、

$$\left. \begin{aligned} q_c &= 2 \pi n h_2 h_{sc} \left[\frac{\left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \rho_1 g n h_{sc}}{2 \rho_2 h_2 (h_2 - h_{sc})} \left\{ \left(2 h_1 h_2 + \frac{\rho_2}{\rho_1} h_2\right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) n h_1 h_{sc} - \left(\frac{5}{3} - \frac{\pi}{2}\right) n^2 h_{sc}^2 \right\} \right]^{1/2} \\ u_c &= \frac{8 \pi n h_2 h_{sc}}{D^2} \left[\frac{\left(1 - \frac{\pi}{4}\right) \rho_1 g n h_{sc}}{2 \rho_2 h_2 (h_2 - h_{sc})} \left\{ \left(2 h_1 h_2 + \frac{\rho_2}{\rho_1} h_2\right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \left(2 - \frac{\pi}{2}\right) n h_1 h_{sc} - \left(\frac{5}{3} - \frac{\pi}{2}\right) n^2 h_{sc}^2 \right\} \right]^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{(式 17-5-1)}$$

ここに、

q_c : 上層水を連行しない限界取水流量

u_c : 限界流速

h_1, h_2 : 上層及び下層厚

h_{sc} : 境界面から吸込口までの距離

ρ_1, ρ_2 : 上層及び下層密度

n : 密度差及び h_2/D に関する係数で図 17-5-2 によって与えられる。

$\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$

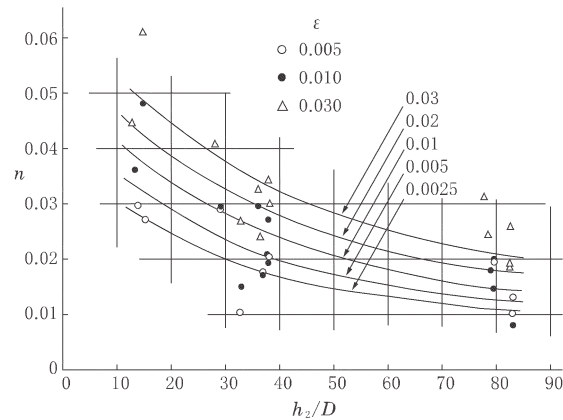


図 17-5-2 n と h_2/D の関係

b) 二次元の場合

地形的に恵まれて取水口を岸近くの水路部に設けることができる場合、二次元選択取水口となる。

限界取水量 q_c 、取水流速 u_c は、

$$\left. \begin{aligned} q_c &= h_2 h_{sc} \sqrt{\frac{\varepsilon g (2h_2 - h_{sc})}{2h_2 (h_2 - \eta h_{sc})}} \\ u_c &= \frac{h_2 h_{sc}}{(h_2 - h_{sc})} \sqrt{\frac{\varepsilon g (2h_2 - h_{sc})}{2h_2 (h_2 - \eta h_{sc})}} \\ \text{修正係数 } \eta &= 0.82 + 0.6 \frac{h_2 - h_{sc}}{h_2} \quad \left(0 < \frac{h_2 - h_{sc}}{h_2} \leq 0.3 \right) \\ \eta &= 1 \quad \left(0.3 < \frac{h_2 - h_{sc}}{h_2} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-5-2)$$

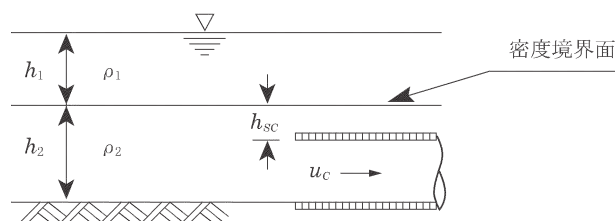


図 17-5-3 二次元選択取水

(3) ポンプ

低揚程、大容量に適するポンプとする。

この場合のポンプは水を実際高い所へ押し上げるものでなく、送水途中における摩擦損失を主に補なうためのものである。この種のポンプとしては軸流ポンプ、チューブラーポンプがあるが、後者は大容量（2.5m³/s 以上）で有利であるといわれる。

また、ポンプの台数について特に複数とする必要はないが、維持管理、大容量に過ぎるなどの理由で複数にする場合、同種のものを設置する。

(4) 導水路、排水路

導水、排水の過程で水質改善が行われるよう考慮する。

底層水が悪化する前からポンプを運転し底層水を排除することを原則とするが、底層水が若干悪化した場合を考慮し、開水路部で滝による曝気などをすることが望ましい。

また、排水側海域に他種漁業、海水浴場などがあり、排水の水質濃度がそれらの要求する基準を超える場合は排水処理施設が必要である。

2. ポンプによる外海水の底層導入

考え方としては、底層悪水排除と共通するところがあるが、この場合、漁場水深が対流圏以浅でかつ湾内底層水より密度の大きい外海水が得られることが必要である。それは水質悪化の出発点である底層にのみ、その大きい密度を利用して DO に富む外海水を導入するためである。つまり選択的に給水するのである。

(1) 導入水量の決定

導入水量の決定は次の点を考慮して行う。

- ① 対象種の DO 許容濃度
- ② 漁場における DO 収支
- ③ 底層の酸素要求量
- ④ 導水途中の DO 損失

漁場水質改善に必要な DO 供給量 O_D は「資料 17.2 養殖場の溶存物質収支」を参考に求める。
これを供給するに必要な供給水量 Q は外海水の DO 濃度を C_0 として、

$$Q = \frac{O_D}{C_0 - C_1 - C} \dots\dots\dots \text{(式 17-5-3)}$$

で計算される。

ここに、

C_1 : 導水途中の DO 損失量

C : 漁場内の DO 濃度である。

(2) 取水工

外海における密度及び水質分布を調査して取水位置及び取水水深を定める。

また、防災上、外海波浪の影響を受けるので一般海岸施設と同様の保全を考える。また漂砂による取入口の閉鎖対策も検討しておく。

取水口の位置は、出水や季節に影響されず安定して密度の高い DO に富んだ清浄な外海水の得られる場所、深さとする。また、所要の密度・水質をとる機能に加えて、外海に面していることによる防災上の観点からも、取水工位置は決定されるべきで、それらの重要性はほぼ同等である。

(3) ポンプ及びポンプ場

ポンプ場施設は給水のみならず、給水・排水の切換え、自然流入・流出など有機的な操作を行う

ことが可能なよう考慮することが望ましい。

ポンプなど機械力は付帯施設によっていくつかの目的に使うことができる。例えばポンプを逆方向に使用し、洪水時の湾内淡水の排除または鉛直混合をこの外海水導入ポンプで行うことができる。つまり、図 17-5-4 のようにポンプ場周辺にゲート、バルブを配置するか、または吸排切換え可能なポンプとすることが望ましい。またこうすることによって、漂砂による軽度の閉塞なら掃砂することができる。

ポンプそのものについては、底層悪水排除の場合に同じ。

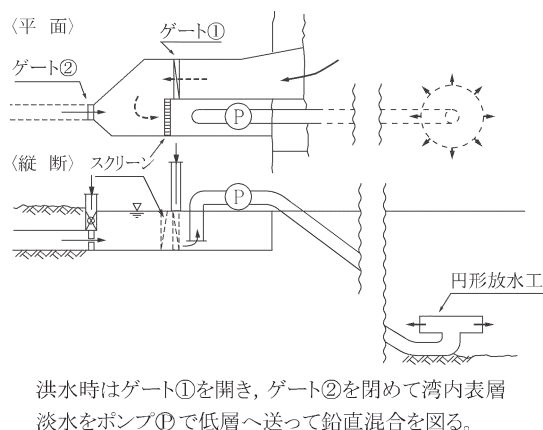


図 17-5-4 ポンプ場及び放水工

(4) 取水路・導水路

水路断面は生物付着による有効通水断面の縮小などを考慮して定める。また、保守・点検・清掃を考慮して適宜ゲート、バルブなどを設ける。

管路の場合、管路内では被圧流から自由水面をもった流れへの移行または、その逆の現象を起こさせてはならない。

生物付着厚さは、条件によって一定でないが最大 10cm 程度を見込めば十分である。

管路内で被圧流と自由水面流が接続しているときは、空気連行などによって衝撃水圧を生じ管に大きな圧力を与え、破損の原因となる（図 17-5-5 参照）。

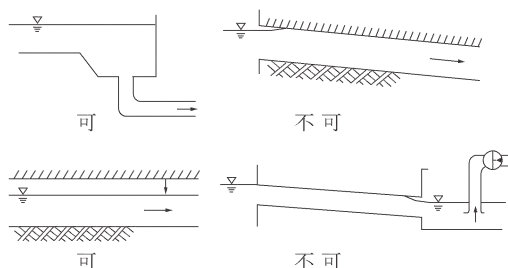


図 17-5-5 管路における被圧流・自由水面流

また管路においての流速の限度は次のようである。

表 17-5-1 送水管の平均流速の最大限度

管 の 材 質	平均流速の最大限度
モルタルまたはコンクリート	3.0 (m/s)
鋼または鋳鉄	6.0 (m/s)

(5) 放水工

位置は、底層改良を目的とする位置で海底地形及び底層水の密度分布を考慮して定める。

構造上、放水は水平または下方向に行うことを原則とし、導入水が湾内水と混合しないような放水速度となるような構造とする。

外海水の湾内水に対する密度差を利用して底層に供給することが目的であるので、放水時湾内水と混合して軽くなることのないよう、静かに放出することが必要であり、また最深部へ設けることが望ましい。最深部へ設けられないときは底面地形斜面に沿って最深部へ供給できるように設ける。

放水工の形状は供給すべき場所の方向性を考慮して、可及的に一様に放水できる構造とする。

3. エアバブルカーテン (A. B. C.)

エアバブルカーテンは、次のような目的のために施設配置する。

- ① 水質維持に必要な対流交換を行う。
- ② 水質成層の原因となる密度成層をつくらない。

①の対流とは、A. B. C. に伴う上昇流が表面付近で水平流となって A. B. C. から離れ、底層では A. B. C. に向かう流れが生じて A. B. C. を中心に漁場全体の水が対流循環することをいう。このような流れによって物質の拡散を増大させ、また表面曝気によって酸素が大気中から溶入する。この特性を利用するために A. B. C. を適当な位置に配置して湾内外の海水交換の増大を図ることができる。

その交換量は A. B. C. による表層流の減衰から推算するので、A. B. C. による流況特性を知ることが重要である。

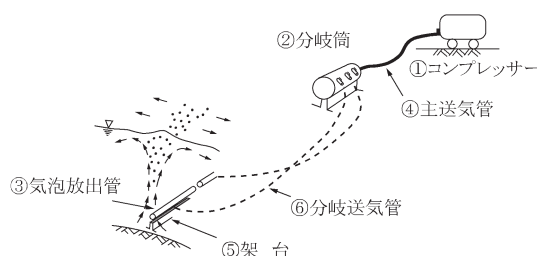


図 17-5-6 A. B. C. の構成模式図

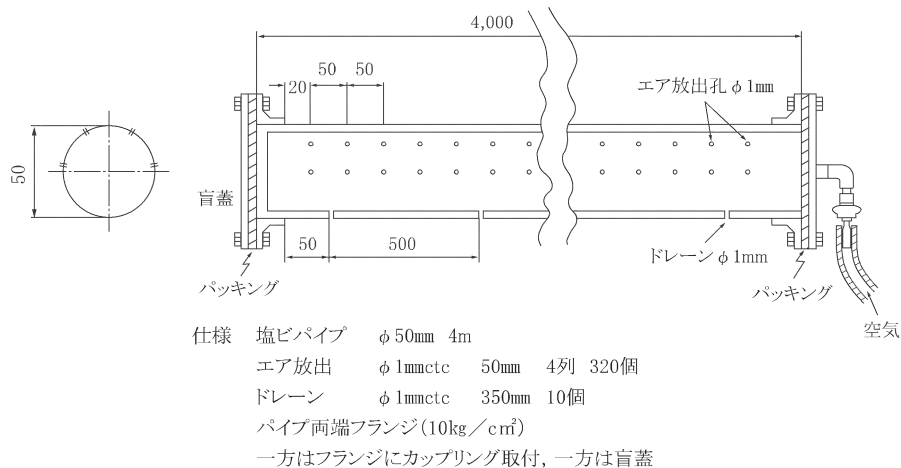


図 17-5-7 気泡放出管の一例

②の密度成層をつくらないこと、つまり成層破壊についても密度成層下における A. B. C. による流況を知らねばならない。

(1) 密度成層のない場合の A. B. C. による流況²⁾

対流交換を検討するためには、A. B. C. による流況を十分に把握する。

一様流速 u_0 の流れの場の水深 h_0 に置かれた A. B. C. による流況は図 17-5-8 に示されるように、気泡幕上昇に伴う表層流はある地点で最大流速となり、下流に行くに伴って流速を減じる。表層流の減少は、水が下層へ降下することになる。これらの流況によって物質拡散、酸素の溶入は影響されるので、以下の事項の把握が必要となる。

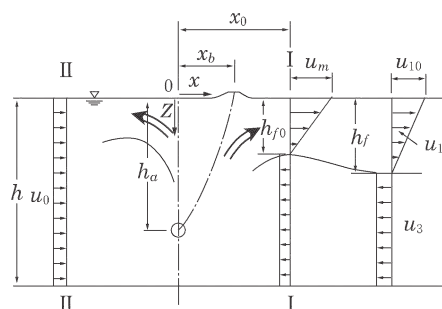


図 17-5-8 A. B. C. による流況模式図

① 表面最大流速

A. B. C. の中心から下流側 x_0 だけ離れた点に現れる表面最大流速は次式で与えられる。

$$U_m = \frac{6}{H_{r0}(4-7H_{r0})} \left[\left\{ H_{r0}^2 U_0^2 + \frac{H_{r0}}{3} (4-7H_{r0}) \cdot \left((2-H_{r0}) U_0^2 + \frac{\alpha_m Q_a}{\sqrt{g \phi h}} H_0 (1-H_{r0}) \ln \left(1 + \frac{H_a}{H_0} \right) \right)^{1/2} - H_{r0} U_0 \right\} \right] \dots \dots \text{(式 17-5-4)}$$

$$\text{ここに、 } U_m = \frac{u_m}{\sqrt{gh}}, \quad H_{r0} = \frac{h_{r0}}{h}, \quad H_0 = \frac{h_0}{h}, \quad H_a = \frac{h_a}{h}, \quad U_0 = \frac{u_0}{\sqrt{gh}}$$

h : 水深
 h_0 : 1 気圧を水柱で表した値 (10.3m)
 h_{f0} : 最大流速位置での摩擦深度
 u_m : 表面最大流速
 Q_a : 空気量
 ϕ : 気泡噴出口直径
 α_m : 気泡定数 (図 17-5-9 による)

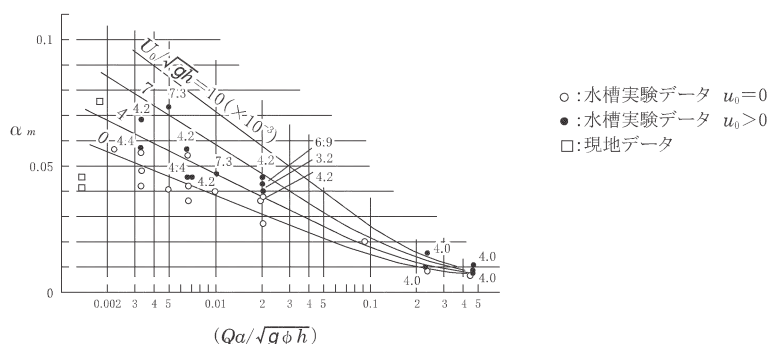


図 17-5-9 気泡定数 α_m

② 表面流の減衰

A. B. C. による伴流が方向を転じた水平流は、最大流速位置を離れるにしたがって内部摩擦によってその流速を減じる。最大流速位置から x だけ下流側の無次元表面流速は次のように与えられる。

$$U_s = U_{s0} + (1 - U_{s0}) \exp \left\{ - \frac{fX}{H_f(1 - H_f)^2} + \left(\frac{U_{s0}}{U_s - U_{s0}} - \frac{U_{s0}}{1 - U_{s0}} \right) \right\} \dots\dots\dots (式 17-5-5)$$

特に $U_0 = 0$ の場合は、

$$U_s = \exp \left\{ - \frac{fX}{H_f(1 - H_f)^2} \right\} \dots\dots\dots (式 17-5-6)$$

ここに、 $U_s = \frac{u_{1s}}{u_m}$, $U_{s0} = \frac{u_0}{u_m}$, $H_f = \frac{h_f}{h}$, $X = \frac{x}{h}$

u_{1s} : x 位置での表面流速

h_f : x 位置での摩擦深度

f : 摩擦深度面での摩擦抵抗係数 ($\approx 0.05 \sim 0.13$)

$H_f = 0.3$, $f = 0.12$ とおいて式 17-5-5 を計算した結果が図 17-5-10 である。A. B. C. による効果の及ぶ範囲を表面流が 1/100 に減衰するまでと考えると、一様流のない場合それは水深の 5.5 倍程度である。図からまた一様流のある場合の範囲が下流側に大きくなることもわかる。

③ 鉛直流

図 17-5-8 に示すごとく上層水平流は A. B. C. から遠ざかり、下層流は A. B. C. に向かって流れる。表面流速の減衰を考慮して上層流量を表すと、

$$q = \frac{q_u}{2} \frac{h_f}{h_{f0}} \left[U_{s0} + (1 - U_{s0}) \exp \left\{ - \frac{fX}{H_f(1 - H_f)^2} + \left(\frac{U_{s0}}{U_s - U_{s0}} - \frac{U_{s0}}{1 - U_{s0}} \right) \right\} \right] \dots\dots\dots (式 17-5-7)$$

ここに、 q_u ：湧昇流量

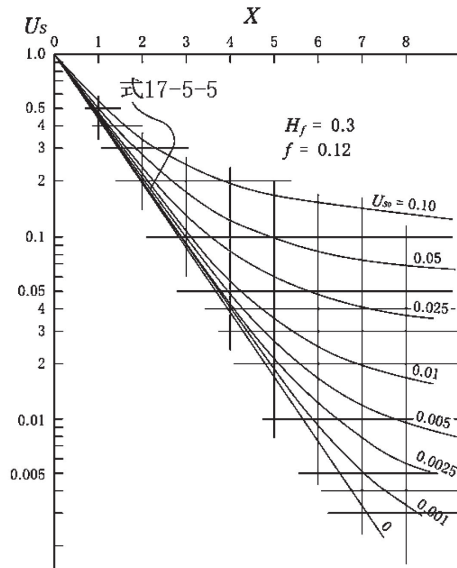


図 17-5-10 表面流の減衰

④ 鉛直移流による海水交換

ある区間での上層流量の減少量と摩擦深度以深の水容積との比を鉛直移流による交換率と考えれば、一潮汐当たりの平均交換率 ε は次式によって求められる。

$$\varepsilon = \frac{q_u}{2} \frac{f T_t}{h_{f0} h (1 - H_f)^3} \frac{(U_s - U_{s0})^2}{U_s} \dots\dots\dots (式 17-5-8)$$

ここに、 T_t ：潮汐周期

(2) A. B. C. による DO 増加³⁾

A. B. C. による DO 増大は、表面曝気と気泡から水中への酸素の直接溶入及び底層水湧昇による植物プランクトンの増殖による光合成などによる。

密度成層のない場合、A. B. C. による酸素溶入は、①気泡から水中への酸素の直接溶入及び②A. B. C. に伴う表面曝気とに大別される。前者は気泡の大きさ、水中の DO 未飽和量などに関係するが、特別な装置を用いない限り気泡径は 1～数 cm であり、その上昇速度は数十 cm/s のオーダーとなり、水に接する時間が短く水中への酸素ガスの直接溶入量は小さい。ここではその量が小さいこと、また無視することが水質改善にとっては安全側となることから、気泡から水中への直接溶入を無視し、後者の海面曝気による酸素溶入量を考える。また、表・底層水の混合によって植物プランクトンの増殖及び、これによる光合成で DO 供給が期待されるが、ここでは触れない。

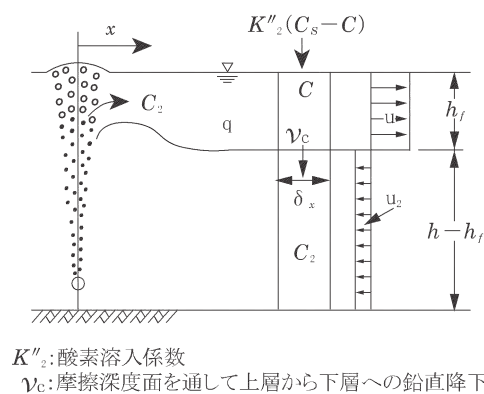


図 17-5-11 A. B. C. による DO 増加機構模式図³⁾

A. B. C. に伴う流れによって DO 濃度 C_2 の底層貧酸素水塊が湧昇し、これが海面で酸素不飽和量 $(C_s - C)$ に比例した量だけ酸素溶入を受けながら水平流として、流速を減じながら A. B. C. から遠ざかる。数値実験によると、A. B. C. 運転開始からの経過時間の小さい間の DO 変化は、酸素溶入によるよりも上・下層の混合による平均化が大きく、酸素溶入は平均化の行われた後の不飽和度に応じて行われる。(図 17-5-11 参照)

つまり無限海域において A. B. C. に近い領域を考えると、平均化後の不飽和量に応じた酸素溶入があるが、下層では下層初期濃度の下層水が流入し、表層では改善された水が領域外へ流去する。しかしながら、A. B. C. は有効海域とか広い海域では複数に用いるので、その内側の領域では上層流は下層流に移行し流去はなくなる。

この領域内での A. B. C. 運転開始から t 時間後の DO は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{C} &= C_s - (C_s - C_0) \exp(-\tilde{K}_2 t) \\ C_0 &= \frac{C_{00} h_f + C_2 (h - h_f)}{h} = C_{00} H_f + C_2 (1 + H_f) \\ \tilde{K}_2 &= \frac{2}{\sigma L} \sqrt{\frac{D_m u_m}{h_f^3}} (1 - e^{-\sigma L/2}) \\ \sigma &= \frac{1}{H_f (1 - H_f)^2} \cdot \frac{f}{h} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-5-9)$$

ここに、

- $\tilde{C}$: 上・下層平均した DO
- C_2 : 下層初期 DO
- D_m : 酸素ガスの水中への分子拡散係数
- u_m : 表層平均最大流速
- L : 考えている領域の長さ
- σ : 表層流の減衰係数
- C_0 : 初期平均 DO
- C_{00} : 上層初期 DO
- C_s : 飽和酸素量
- h : 全水深

また、この場合区間 L における酸素溶入量 O_s は

$$O_s = hL\tilde{K}_2(C_s - C_0)\exp(-\tilde{K}_2t) \dots\dots\dots \text{(式 17-5-10)}$$

計算にあたっては、まず u_m を適当に仮定して右边が与えられた O_s となるよう 2～3 回試算して u_m を決定する。

密度成層のある場合は後述する成層破壊が完了するまでは、上層水の下層への単なる混合過程で酸素の実質増はないと考えられる。

(3) 密度成層のある場合⁴⁾

密度成層のある場合、利用計画水深以下に A. B. C. を設置して、成層化エネルギーを上回るエネルギーで成層を破壊する。

成層破壊は A. B. C. によって密度大の下層水が湧昇し境界面をつき抜けた後、落下する際に上層水を混入することによって起こる。つまり成層破壊は上・下層厚の変化及び下層（ただし A. B. C. 以浅）における密度変化として表現され、最終的には上・下層境界面が水面に達し密度差がなくなることである。しかしこの場合、A. B. C. 設置水深以下の重い水は混合しないことに注意を要する。すなわち密度成層面は A. B. C. 設置水深面に残る。(図 17-5-12 参照)

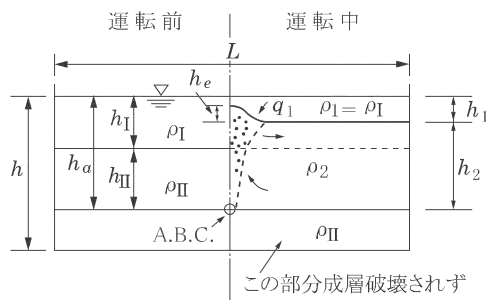


図 17-5-12 A. B. C. による成層破壊模式図

① 成層破壊に要する時間

上層厚 h_1 、下層厚 h_2 の時間的变化は、上層水の混入に比例するものとして A. B. C. 運転開始後の時間 t における下層厚 h_2 を求めると、

$$\left. \begin{aligned} h_2 &= h_{II} \exp(K_E t) \quad (h_{II} \leq h_2 \leq h_a) \\ K_E &= \beta \frac{Q_a}{\varepsilon_0 h_{II} L} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{(式 17-5-11)}$$

ここに、

h_{II} : A. B. C. 運転前の下層厚

Q_a : 単位長さ当たりの空気量

ε_0 : 無次元密度差 ($\varepsilon_0 = (\rho_{II} - \rho_I) / \rho_{II}$)

ρ_I, ρ_{II} : A. B. C. 運転前の上層水及び下層水の密度

β : 比例係数で、 $\beta = 0.125$

成層破壊を完了するまでの時間 T は式 17-5-11 で $h_2 = h_a$ において、

$$T = \frac{\ln \frac{h_a}{h_{II}}}{K_E} \dots\dots\dots (式 17-5-12)$$

② 成層破壊に必要な空気量

水深 h_a に設置した A. B. C. によって、上層厚 h_I 、下層厚 h_{II} ($=h_a-h_I$)、密度差 ε_0 の成層を時間 T で破壊する必要な空気量 (単位時間当たり) は次式で求められる。

$$Q_a = \frac{\varepsilon_0 h_{II} L}{\beta T} \ln \left(\frac{h_a}{h_{II}} \right) \dots\dots\dots (\text{式 17-5-13})$$

(4) 所要馬力

所要馬力は所要空気量、設置水深、エネルギー効率、負荷率などから定める。

コンプレッサー、ブロアーの所要馬力は次のように与えられる。

$$P_A = \frac{w_0 h_a Q_a}{\alpha_p \lambda} \dots\dots\dots (式 17-5-14)$$

表面最大流速に対して、

$$P_A = \frac{w_0 h_f u_m^3}{2 \alpha_p \alpha_E \lambda g} \dots\dots\dots (式 17-5-15)$$

ここに、

w_0 : 海水の単位重量

 h_{f0}, h_a : 式 17-5-4 参照 α_p : 湧昇効率 (水深 10~20m で $\alpha_p=0.53$) α_E : エネルギー効率 (図 17-5-13)

λ : 負荷率

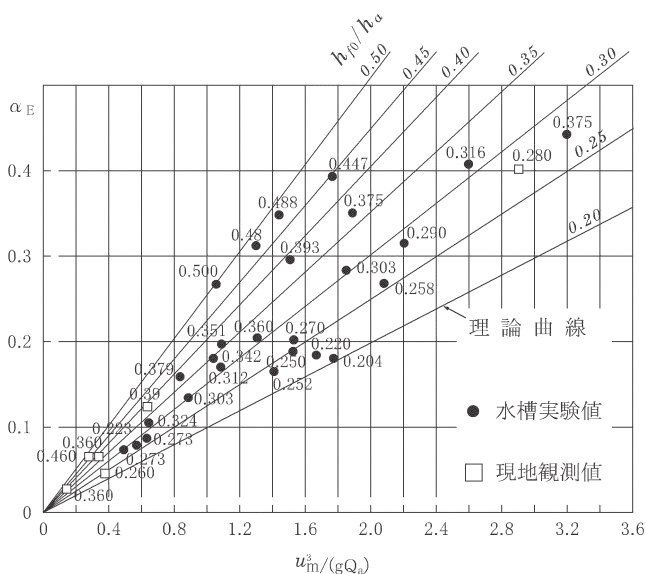


図 17-5-13 エネルギー効率 α_F

式 17-5-14、式 17-5-15 での P_A は、 $\text{kg} \cdot \text{m/s}$ である。これを kW で表すと、

$$P = \frac{P_A}{102} \quad (\text{kW}) \quad \dots\dots\dots \text{(式 17-5-16)}$$

この場合の成層破壊におけるエネルギー効率 R は次式で与えられる。

$$R = \frac{\alpha_p \beta}{2} \cdot \frac{\frac{h_I}{h_{II}}}{\left(1 + \frac{h_I}{h_{II}}\right) \ln\left(1 + \frac{h_I}{h_{II}}\right)} \quad \dots\dots\dots \text{(式 17-5-17)}$$

エネルギー効率は上・下層厚比に関係し、 h_I/h_{II} が小さいほど、つまり放気深を深くするほど効率は大きくなる。

(参考文献)

- 1) 中村充・乃万俊文：底層水の選択取水に関する研究，農業土木試験場報告，第 12 号（1974）
- 2) 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，農業土木試験場報告，第 13 号（1975）
- 3) 乃万俊文：養殖漁場の水質改善工法，水産土木，27 号（1977），pp.63-69
- 4) 乃万俊文・中村充：エアバブルカーテンによる成層破壊の基礎的研究，農業土木学会論文集，第 73 号（1978），pp.50-54

資料17.6 区画施設

区画施設とは、水産生物の養殖、蓄養及び増殖を目的とし、主材料に網を用いた漁獲用施設を除く増養殖施設のうち、囲い網、網仕切など、海底より海面上まで全水深にわたり、支持杭に固定された網で遮へいし、区画海面を造成するために設置された施設をいう。

1. 設計の基本方針

網地に作用する力は、使用する網地の網糸に作用する流れ・波による流体力の合計として求めることを原則とする^{1),2)}。

(1) 流れによる流体力

網地に働く流体力は、網地を構成する網糸の太さ、網目の大きさ、網の種類（有結節あるいは無結節）によって異なる。単位長さの網糸に作用する流れの作用力 f_{OR} は式 17-6-1 で示される。

$$f_{OR} = \frac{C_D \rho g d}{2} u^2 \dots\dots\dots (式 17-6-1)$$

ここで、

C_D : 網糸の抗力係数 ($C_D = 1.0$)

d : 網糸の太さ

ρ : 海水の密度

u : 流速

一般に網地は、網糸が交差した網目の集合体であるから、1つの網目に作用する流体力は網目の辺長を s 、網糸の太さを d として、式 17-6-1 より、

$$f_0 = C_D \rho g s d u^2 \dots\dots\dots (式 17-6-2)$$

となる。よって、単位面積当たりの網地に作用する流体力 f は、次のように求めてもよい。

① 流れが網地に直角に当たる場合、

$$f = \frac{C_D \rho g d}{s} u^2 \dots\dots\dots (式 17-6-3)$$

② 流れが網地に θ° 傾いている場合（図 17-6-1 参照）

(a) 網糸が 90° 交差している場合

$$f = \frac{C_D \rho g d u^2}{2s} (1 + \sin \theta) \dots\dots\dots (式 17-6-4)$$

(b) 網糸が 45° で交差して網目を構成している場合

$$f = \frac{C_D \rho g d u^2}{2s} \sqrt{3 - \cos 2\theta} \dots\dots\dots (式 17-6-5)$$

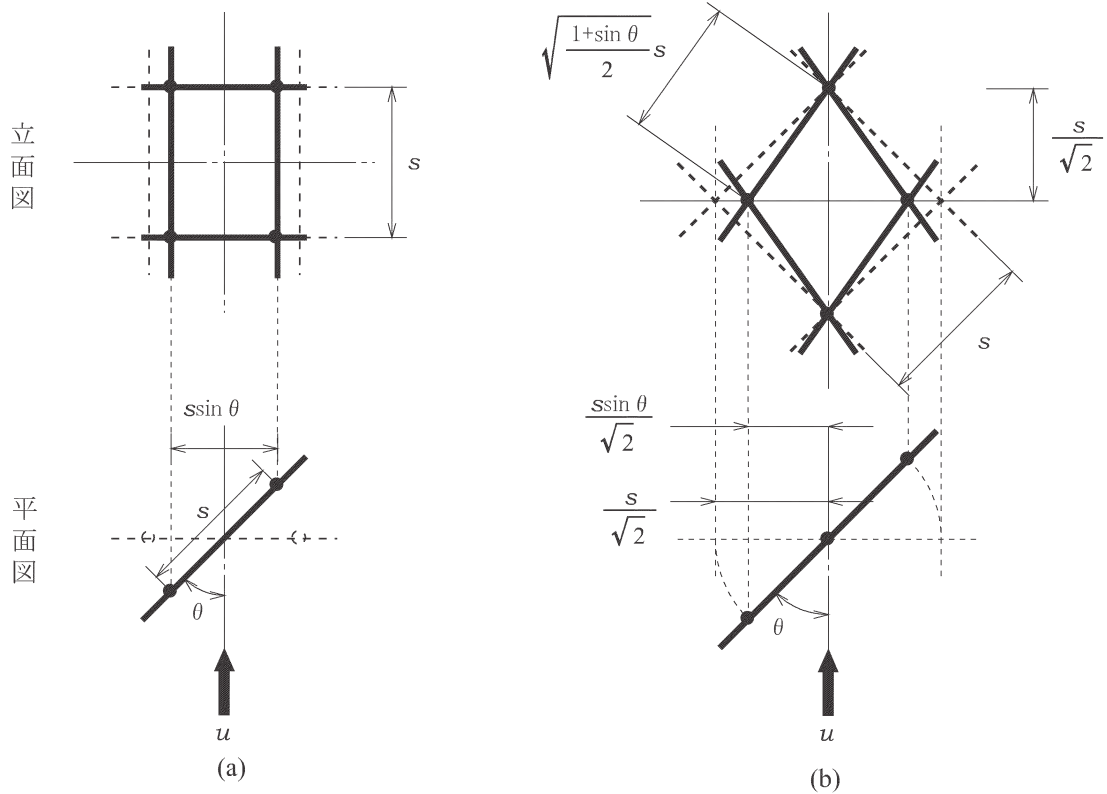


図 17-6-1 網と流れの方向

(2) 波による流体力

網に作用する流体力における質量力は抗力の d/H 程度 (d : 網糸の直径、 H : 波高) であるので、質量力は無視してもよい。よって、網地に働く流体力は式 17-6-6 に示す波の水粒子速度を式 17-6-3 ~ 式 17-6-5 に代入して求めることができる。また、波と流れが混在する場合は、式 17-6-6 で求めた u_m に潮流速 u_0 を加えた式 17-6-7 を同様に式 17-6-3 ~ 式 17-6-5 に代入して求めることができる³⁾。

$$u_m = \pi \frac{H}{T} \frac{\cosh \frac{2\pi(h-z)}{L}}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \dots\dots\dots (式 17-6-6)$$

$$u = u_0 + u_m \sin \theta \dots\dots\dots (式 17-6-7)$$

ここで、

u_m : 水深 z における波による水粒子の最大水平流速

H : 波高

L : 水深 h における波長

T : 波の周期

h : 水深

z : 静水面から下向きの深さ

θ : 波と流れの方向がなす角度

2. 設計条件

設計に用いる波・流れ等の自然条件は、設置位置での状況を十分勘案し、現地調査あるいは信頼できる資料等をもとに設定することを原則とする。また、施設の配置・規模及び養殖形態等については養殖場造成計画との整合性を図るとともに、現地聞き取り等に基づき十分な情報を把握することが望ましい。

自然条件の設定については、「第2編 設計条件」を参照するとよい。

3. 小割養殖施設

小割養殖生簀は主に内湾、内海あるいは島影など、波の静穏な海域に設置され、一辺 7～12m、深さ 5～7m の網地で構成された立方体あるいは円柱状の生簀を数個連結させて全体が固定係留されている。この一般的な形を図 17-6-2 に示す。この生簀内で養殖魚を給餌養殖する。また、漁獲物を蓄養する場合、蓄養生簀とも呼ばれる。

小割養殖生簀の形状には、図 17-6-2 に示すように立方体状の角型生簀と円柱状の円筒型生簀がよく用いられる⁴⁾。

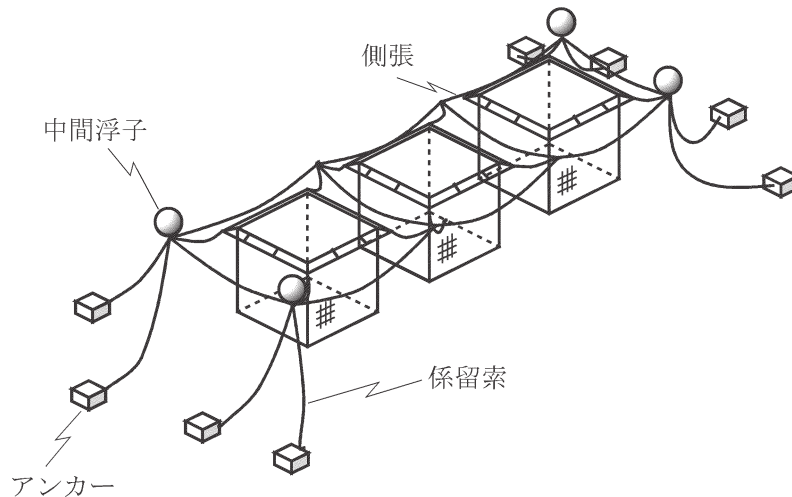
小割養殖施設は

- ① 囲いにロープを用いた網地で囲まれる立方体あるいは円柱状の囲い網
- ② 囲い網を立体形状に維持するための浮子
- ③ 海面に浮かせるための浮子
- ④ 浮子及び網を所定の位置に維持し、かつ作業足場を兼ね備えた枠組
- ⑤ これらいくつかの生簀を連結する連結網
- ⑥ これら一連の生簀を所定の海域に保持するための係留索及び係留基礎

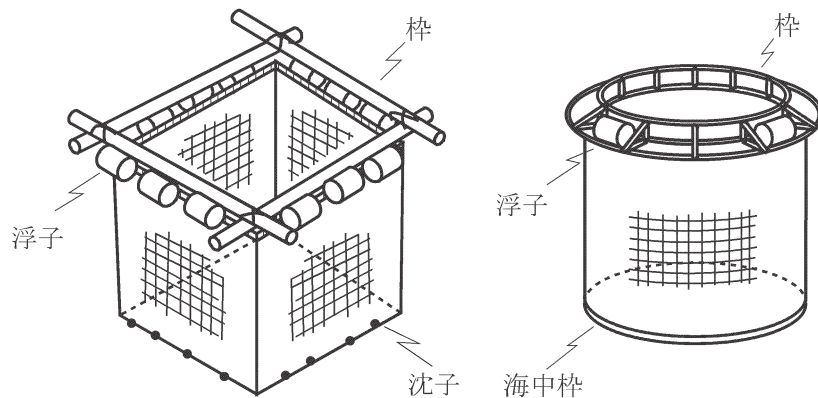
からなる。

設置位置における波・流れ等により移動・破損を生じないよう十分な安定性並びに構造強度を有するよう設計することを原則とする。

小割生簀が流れに沿って連結して設置するような場合には、上流側より 2 台目以降の流体力低減効果を考慮してよい。



(a) 〔小割養殖施設の模式図〕



(b) 〔小割養殖施設の形状〕

図 17-6-2 小割養殖施設

(1) 生簀の網成り

海・潮流、波浪の外力に対し、生簀の形状は、沈子の重さにより変形し、沈子重が軽すぎると強流時または強波浪時には流れに面した網地は流水抵抗のために底部が持ち上がり斜形に変形する。特に流れに直面した前面の網地は後面の網地に対して大きく変形する。この現象を網成りという。また、底面は前面と後面の網成りの大小により流水抵抗を受けるようになり、上方にめくれ上がるようになる。この現象を網のふかれという。このような現象が生じると生簀の容積が小さくなり、生簀内の養殖生物に網ずれや接触による障害が生じ、それが原因で病気が発生して養殖生物の斃死がよく見られる。そのため、設置場所の海・潮流、波浪に適した重さの沈子を取り付け、強流・強波浪時に生簀を正常な形状に保つことは非常に重要となる。このような網成り、網のふかれを防止する手法として、次のような方法が考えられている。

- ① 内湾などで海・潮流、波浪があまり大きくない場所では、図 17-6-2 に示すように生簀底部枠網に沈子を均等に取り付けたり、重量のある海中枠を底部に取り付ける。
- ② 海・潮流や波浪が強い外海域では、①の方法に加え、図 17-6-3 に示すように生簀底部から

中間浮子若しくは係留索に連結索を設けることが望ましい。

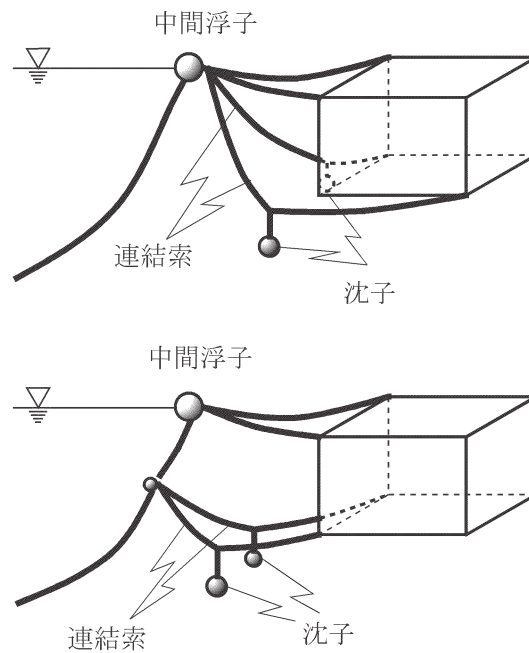


図 17-6-3 網の変形防止法の一例

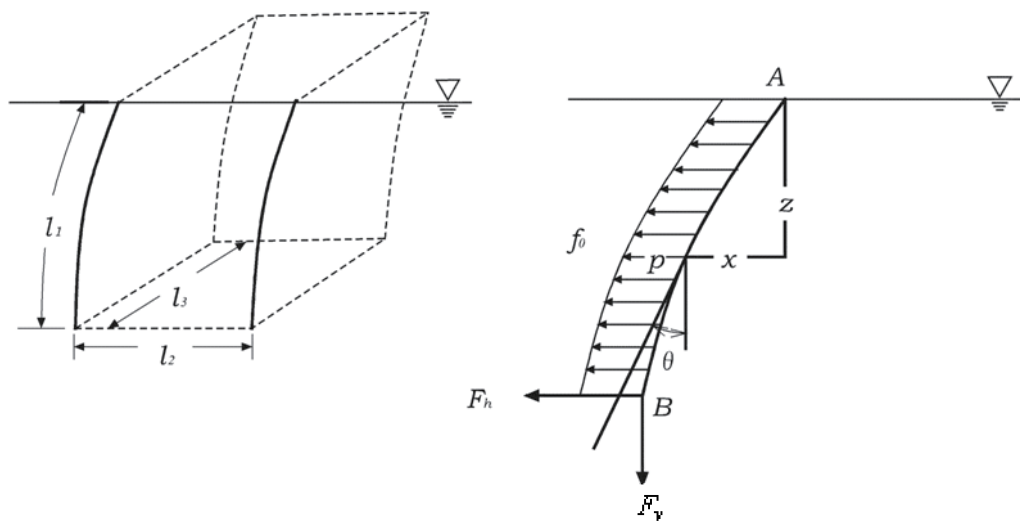


図 17-6-4 小割養殖施設の網成り

①の場合、海・潮流や波浪による生簀の網成りの状況は図 17-6-4 に示され、その網成り形状は次のようにして求めることができる。図より海面からの深さ z の位置における網成りの形は式 17-6-8 のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \tan\theta &= \frac{f_0 l_P + F_h}{mg l_P + F_v}, \quad f_0 = f \left(1 + 2 \frac{l_2}{l_3} \right) \\ F_h &= f l_2, \quad F_v = \frac{mg l_2}{2} \left(1 + 2 \frac{l_1}{l_3} \right) + \frac{Mg}{2 l_3} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-6-8)$$

ここで、

- θ：静水面下 z の網地の網接線と鉛直線のなす角度（図 17-6-4 参照）
- f：単位面積の網に働く力で式 17-6-3～式 17-6-5 で求めることができる。
- l_P：BP 間の長さ
- l₁, l₂, l₃：図 17-6-4 に示される生簀網の水中分の深さ、幅、奥行き
- M：沈子の全質量（浮力に相当する海水分を引いた値）
- m：網の単位面積当たりの質量（浮力に相当する海水分を引いた値）
- F_h, F_v：網の下端に加わる力

(2) 網生簀に作用する水平方向流体力

1 個の網生簀に働く全流体力は、生簀を構成する網地、浮子などに作用する波・流れの作用力の総和として求めることができる。

(a) 角型生簀に働く水平流体力

角型生簀に働く水平方向の流体力 F_D は式 17-6-9 で求めることができる。

$$F_D = \{ 2l_1(l_2 + l_3) + l_2 l_3 \} f \dots\dots\dots (式 17-6-9)$$

ここで、

- f：式 17-6-3～式 17-6-5 で求まる単位面積の網に働く力
- l₁, l₂, l₃：図 17-6-4 に示される生簀網の水中分の深さ、幅、奥行き

(b) 円筒型生簀に働く水平方向流体力

円筒型生簀に働く水平方向の流体力 F_D は式 17-6-10 で求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} F_D &= \frac{C_D \rho g d R D}{2s} \left\{ \alpha (u^2 + u'^2) + \frac{\pi R u^2}{D} \right\} \\ u' &= u \left(\frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{C_D d}{4s} \alpha} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-6-10)$$

ここで、

- R, D：円筒生簀の半径と深さ
- α：流れに対し円筒生簀上流側半周積分で $\alpha = \int_0^\pi (1 + \sin\theta) d\theta = 5.142$
- C_D：円柱の抗力係数
- u：式 17-6-7 で求まる水平流速
- s：目合いの辺長
- d：網糸の径

(3) 浮子の大きさ

浮子は沈子、網地、作業台を兼ねた枠組、作業員、作業資材の全質量、付着生物量及び係留索によって生じる下方向の力に耐え、生簀が沈まない浮力 F_u を持つことを原則とする。

$$F_u > Mg + mg \{2(l_1 l_2 + l_1 l_3) + l_2 l_3\} + M_0 g \dots\dots\dots (式 17-6-11)$$

ここで、 M_0 ：作業員、枠組、その他の付属物の質量

(4) 中間浮子（台浮子）の大きさ

係留索は生簀に作用する波力によって生じる衝撃力を緩和するため、生簀から直接係留しないで係留索と生簀の間に中間浮子を設置して、張り綱で生簀を連結する。

中間浮子の浮力 F_{uA} は式 17-6-12 で求めることができる。

$$F_{uA} \geq \frac{nRh}{\sqrt{L_a^2 - h^2}} \dots\dots\dots (式 17-6-12)$$

ここで、

R ：式 17-6-9 及び式 17-6-10 で求まる生簀 1 台に加わる力

n ：連結生簀の台数

L_a ：係留索の長さ

h ：水深

浮施設の係留索にかかる衝撃力を緩和するため、浮施設から直接係留するのではなく、中間に中間浮子を設けることが経験的に求められ、中間浮子の余剰浮力が小さいほど衝撃力緩和効果が大きいとされている⁵⁾。

(5) 枠組

枠組は波によって生じる変形に対し大きな応力を発生しない構造が望ましい。最も極端な場合はロープのみで枠取ることがあるが、棒材を用いる場合でも結合部を剛結しない静定構造とすることが望ましい。不静定トラスやラーメン構造は避けるのを原則とする。

(6) 係留索張力・アンカー

係留索に作用する張力及びアンカー質量の算定は、(2)で求めた流体力に生簀台数を乗じた全水平力について、浮消波堤の設計方法に準じて定めてもよい。

(7) 生簀の配置

生簀は大きな流水抵抗となるので、生簀の配置は養殖場内に適正な流路が設定されるようにする。配置によっては流れ制御に役立て、海水交換を促進させることも可能である。内部波、内部潮汐など密度流の卓越している湾では、この海水交換機構を阻害しないよう配慮するのがよい。なお漁場行使の際、1～2 年の交番移動利用が望ましい。

なお、生簀の配置された海面の平均摩擦抵抗係数 f は式 17-6-13 で求めることができる。

$$f = \frac{\Sigma F_D}{A_p g u^2} \dots\dots\dots (式 17-6-13)$$

ここで、

A : 海面の面積

ΣF_D : 海面内に設置された生簀の全流水抵抗

F_D : 式 17-6-9 または式 17-6-10 による値

4. 囲い網、網仕切

囲い網は一般に、人工種苗の天然海域への添加時の食害による初期減耗を防止するため、食害生物を駆除した区域を海域から海面まで囲う網をいう。囲い網の構造は、大別すると網地及び網を海面上まで保持する支持杭で構成される。

網仕切は、湾の一部を仕切り、その内側を中間育成場・蓄養場として利用するために湾口部に設けられるものであり、囲い網同様、網地とそれを海面上まで保持するための支持杭で構成される。

これらの構造は、海水流通を配慮し、かつ所要の強度を持つことを原則とする。

囲い網・網仕切の網地に働く流体力は、「1. 設計の基本方針」に準じて、海・潮流、波について求めることができる。

支持杭に働く流体力についても以下の方法により海・潮流、波について求めるが、その際、付着生物による杭径の増大等を考慮するのがよい。

(1) 海・潮流による流体力

円柱状の支持杭に働く海・潮流の流体力 F_T 及びそのときの支持杭下端のモーメント M_T は、式 17-6-14 により求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} F_T &= f \cdot h \\ M_T &= F_T \times \frac{h}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-6-14)$$

$$f = \frac{\rho}{2} C_D D u_0^2 \dots\dots\dots (式 17-6-15)$$

ここで、

f : 支持杭の単位長さ当たりの抗力

F_T : 網糸の直径

C_D : 支持杭の抗力係数

D : 支持杭の直径

u_0 : 海・潮流の流速

h : 水深

(2) 波力

- ① 砕波帯以深に設置された円柱状の支持杭に作用する波力は、波長に比して円柱の直径が小さい場合、式 17-6-16、式 17-6-17 を用いて求める。この際、まず式 17-6-17 中の K_D 、 K_M を図 17-6-5 を用いて求め $(F_D)_{\max}$ 、 $(F_M)_{\max}$ を算定し、これを式 17-6-16 に代入して $F_{\max}$ を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} F &= (F_D)_{\max} \sin\theta + (F_M)_{\max} \cos\theta \\ F_{\max} &= (F_D)_{\max} + \frac{(F_M)_{\max}^2}{4(F_D)_{\max}} \quad (2(F_D)_{\max} > (F_M)_{\max} \text{ の時}) \\ F_{\max} &= (F_M)_{\max} \quad (2(F_D)_{\max} \leq (F_M)_{\max} \text{ の時}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-6-16)$$

$$\left. \begin{aligned} (F_D)_{\max} &= \rho g C_D D^2 H K_D \\ (F_M)_{\max} &= \rho g C_M D^2 H K_M \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-6-17)$$

ここで、

C_D : 支持杭の抗力係数

C_M : 支持杭の仮想質量力係数

D : 支持杭の直径

H : 波高

K_D, K_M : 図 17-6-5 より求まる値

また、このときの支持杭下端の最大曲げモーメントは式 17-6-18、式 17-6-19 を用いて求める。波力を求める際と同様、まず式 17-6-19 中の S_D, S_M を図 17-6-6 を用いて求め $(M_D)_{\max}$ 、 $(M_M)_{\max}$ を算定し、これを式 17-6-18 に代入して $M_{\max}$ を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} M_{\max} &= (M_D)_{\max} + \frac{(M_M)_{\max}^2}{4(M_D)_{\max}} \quad (2(M_D)_{\max} > (M_M)_{\max} \text{ の時}) \\ M_{\max} &= (M_M)_{\max} \quad (2(M_D)_{\max} \leq (M_M)_{\max} \text{ の時}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-6-18)$$

$$\left. \begin{aligned} (M_D)_{\max} &= (F_D)_{\max} \cdot S_D \\ (M_M)_{\max} &= (F_M)_{\max} \cdot S_M \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-6-19)$$

- ② 砕波帯に設置された円柱状の支持杭に作用する流体力は、砕波後の流速を式 17-6-20 で求め、海底面から水面上 $1.28h$ の高さまでこの流速が作用するとして網地、支持杭の流れに対する作用力の求め方に準じて求めることができる。

$$u = \sqrt{\frac{3}{4} g H_b} \dots\dots\dots (式 17-6-20)$$

ここで、 H_b : 砕波波高、 $H_b = 0.78h$ として求めてよい。

(3) 支持杭の海底面に作用する最大モーメント

支持杭が海底面に作用する最大モーメント M_n は、網地、支持杭に作用する流体力によって生じるモーメントの和として式 17-6-21 で求めることができる。

$$M_n = \Sigma F_n h_r + M_{\max} \dots\dots\dots (式 17-6-21)$$

ここで、

F_n : 網地にかかる力

h_r : 網地が支持杭に連結される海底からの高さ

$M_{\max}$: 式 17-6-18 で求めた最大曲げモーメント

(4) 支持杭の設計

網地、支持杭などに作用する流体力を個別に求めて、その合成作用力と作用点を定め、その値を用いて「第4編 3.5 杭の軸直角方向に働く力による杭の挙動」に準じて設計する。この際、杭の洗掘深を考慮することが望ましい。

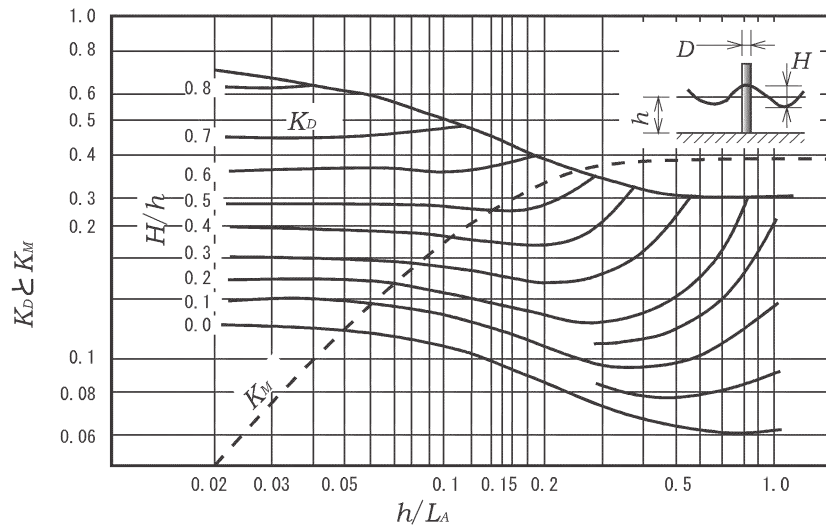


図 17-6-5 抗力及び質量力の最大値算定図表⁶⁾

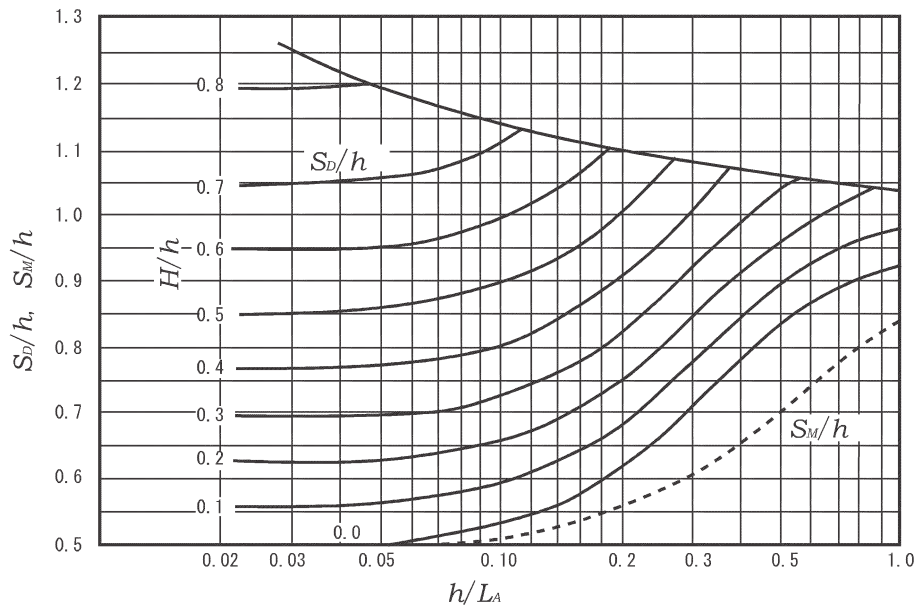


図 17-6-6 抗力及び質量力の最大モーメント算定図表⁶⁾

(参考文献)

- 1) 中村充: 水産土木学—生態系海洋環境エンジニアリング—, 工業時事通信社 (1991), pp.456-458

- 2) 宮崎芳夫・高橋正：網地の流体抵抗に関する研究（Ⅱ），Journ. of the Tokyo Univ. of Fisheries, 50(2)（1964），pp.89-94
- 3) 土木学会編：土木工学ハンドブック，第四版，第45編海洋，第5・6章，技報堂出版（1984）
- 4) 中村充：水産土木学－生態系海洋環境エンジニアリング－，工業時事通信社（1991），pp.458-464
- 5) 中村充・上北征男：係留浮力（浮子）の衝撃緩和に関する研究（Ⅰ），第23回海岸工学講演会論文集（1976），pp.70-73
- 6) 合田良實：構造物に働く波力，土木学会水工学に関する夏期研修会講演集（1967），pp.B.10.1.-B.10.34

資料17.7 ノリ網施設

ノリ網は水産生物の養殖、蓄養及び増殖を目的とし、主材料に網を用いた漁獲用施設を除く増養殖施設のうち、ノリの着生基質として用いられる水平張網施設をいう。

1. 設計の基本方針

育苗後、本養殖（本張り）として海域にノリ網を設置する際の固定方法は、竹などの棒状のものを海底に突き刺して固定し、これにノリ網を固定する支柱養殖と、ブイなどを用いて海面に浮かばせるように張る「浮き流し養殖」があるが、いずれの方法を用いる場合でも設置位置における波・流れ等により移動・破損を生じないよう十分な安定性並びに構造強度を有するよう設計することを原則とする。

ノリ網に作用する流体力は式 17-7-1 で求めることができる¹⁾。

$$F = blK_n u^2 \dots\dots\dots (式 17-7-1)$$

ここで、

F : ノリ網 1 枚当たりの流体力

b : ノリ網の幅

l : ノリ網の長さ

u : 流速

K_n : ノリ網の接面抵抗係数で、ノリの着生状態により異なる係数

(1) 海・潮流速による流体力

式 17-7-1 の流速 u に海・潮流速 u_0 を代入した式 17-7-2 により求めることができる。

$$F = blK_n u_0^2 \dots\dots\dots (式 17-7-2)$$

ここで、 u_0 : 海・潮流速

(2) 波による流体力

波によりノリ網 1 枚に働く流体力は、その設置位置が非砕波帯か砕波帯かにより異なるが、波による海面流速分布により、抵抗を $1/2$ 波長区間で積分した以下の方法で求めることができる。

- ① 非砕波帯にある場合、ノリ網 1 枚に働く流体力 F は、式 17-7-3、式 17-7-4 で求めることができる。

$$F = bK_n u^2 \left(\frac{1}{2} + \frac{L}{4\pi} \sin \frac{2\pi l}{L} \right) \dots\dots\dots (式 17-7-3)$$

$$u = \frac{\pi H}{T} \cdot \frac{\cos h \frac{2\pi(h-z)}{L}}{\sin h \frac{2\pi h}{L}} + u_0 \dots\dots\dots (式 17-7-4)$$

ここで、

z : 海面からのノリ網の設置水深
 u_0 : 海・潮流速
 h : 水深
 H : 波高
 T : 波の周期
 L : 波長

なお、ノリ網の長さ l が波長 L の $1/2$ 以上となるときは $l=L/2$ としてよい。

- ② 碎波帯内にある場合は、式 17-7-5 を式 17-7-1 に代入して求めることができる。

$$u = \sqrt{\frac{3}{4} \cdot g H_b + u_0^2} \quad \dots\dots\dots \text{(式 17-7-5)}$$

ここで、 H_b : 碎波波高、 $H_b=0.78h$ として求めてよい。

(3) 抵抗係数 K_n の算定

式中の抵抗係数 K_n は①～③に基づき求めることができる。

- ① ノリの着生がなく、網目が流れ・波の方向に平行または直角の場合は、

$$K_n = \frac{C_D \rho d}{2s} \quad \dots\dots\dots \text{(式 17-7-6)}$$

- ② ノリの着生がなく、網目が流れ・波の方向に斜めの場合は、

$$K_n = \frac{\sqrt{2} C_D \rho d}{2s} \quad \dots\dots\dots \text{(式 17-7-7)}$$

ここで、

C_D : 網糸の抗力係数 (=2.0)
 d : 網糸の直径
 s : 網の目合いの辺の長さ
 ρ : 海水の単位体積質量

- ③ ノリが密生している場合は、

$$K_n = 30 \text{ (N} \cdot \text{m単位)} \quad \dots\dots\dots \text{(式 17-7-8)}$$

一方、ノリの着生量が推定可能な場合は式 17-7-9 によって求めることができる²⁾。

$$\left. \begin{aligned} F &= K \frac{\rho}{2} u^2 \\ K &= 0.017 e^{12.3 M_t} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots \text{(式 17-7-9)}$$

ここで、 M_t : ノリ網 1 枚あたりに着生したノリの風乾燥質量 (kg/m^2)。

(参考文献)

- 1) 中村充：水産土木学－生態系海洋環境エンジニアリング－，工業時事通信社（1991），pp.467-468
- 2) 佐藤修：増養殖施設の設置に関する若干の問題点，水産土木 10(1)（1973），pp.17-24

資料17.8 垂下養殖施設

垂下養殖施設とは浮子により支持された筏の梁材あるいは直接浮子よりカキ、ホタテ、アコヤガイなど貝類を垂下し養殖する施設で、大きくは筏式と浮子式に大別される^{1),2)}。

筏式施設は図 17-8-1(a)に示すように、養殖期間中に管理作業を行うカキ、アコヤガイなど貝類を対象に主として用いられる。竹材、鋼管などを針金、連結棒などで組み合わされた梁材で構成される筏部と、それを海面上に保持する浮子、梁材に垂下し養殖物を海中に保持する垂下連、これらを所定の海域に保持する係留索及び係留基礎（錨、アンカーブロックなど）で構成される。係留索は直接本体に結ぶこともあるが、波のあるところでは筏部と係留索の間に衝撃緩和のために中間浮子进行けることが望ましい。また筏式施設は、管理作業海上基地として重要な役割を持つ。従来、筏式施設は内湾性の波の静穏な場所で用いられ、その規模は広島県のカキ筏では1台当たり10m×20mの大きさのものに1本につき垂下連長10mの長さのものを約500本/台垂下している。またアンカーのとり方は5台1組として筏の中央部にロープを固定し、筏本体から直接係留索により係留基礎に固定されている。

一方、浮子式は、波の強い海域で用いられる。図 17-8-1(b)に示すように、垂下連を吊り下げた浮子を1列に連結網で接続し、両端を中間浮子に結んで係留索によって係留基礎に固定される。これを数列平行に張るが、これが流れて交絡しないように、ところどころ控え綱をとる場合が多い。

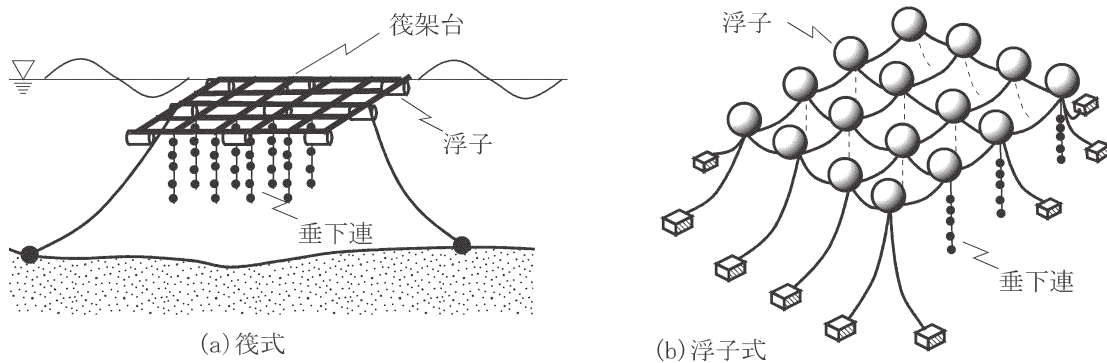


図 17-8-1 垂下式養殖施設

1. 設計の基本方針

設計にあたっては、1本当たりの垂下連の質量、海・潮流及び波により作用する流体力を適切に算定し、施設に連結されている垂下連及びその他構成部材による総加重により筏梁材の破損や施設の沈没、流出が生じないように、十分な強度並びに安定性を有するよう設計することを原則とする。

2. 1本の垂下連に働く最大鉛直力及び最大水平力

垂下連とは、筏本体の梁材に針金、ロープなど垂下索に養殖物の付いた付着器、または養殖物を入れた養殖簗などをある間隔に取り付け、海中に保持する施設である。1本の垂下連に働く鉛直力及び水平力は、波の大きさ、海・潮流速により求めることができる^{3),4)}。

(1) 1本の垂下連に働く最大鉛直力

垂下連の波による運動を模式的に表すと図 17-8-2 となる。垂下連上端が微小振幅波による水表面の粒子運動と同じ運動を行うとし、垂下養殖物と波の水粒子運動との相対運動による抗力、付加質量力、水中重量を考慮して、1本の垂下連に生じる最大鉛直力 F は式 17-8-1 で求めることができる。

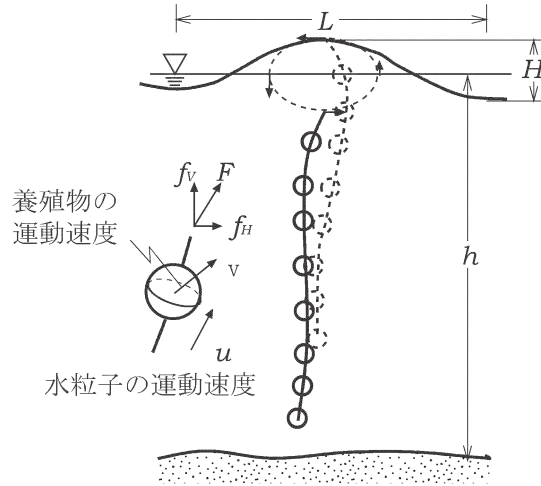


図 17-8-2 波による垂下体の運動模式図

$$\left. \begin{aligned} &M_1 \geq 2D_1 \text{ のとき} \\ &F = \frac{2\pi^2 \rho V H}{T^2} \left\{ \frac{1}{d} \left(\frac{\sigma_G}{\rho} - 1 \right) + C_M \alpha \right\} + M'g \\ &M_1 < 2D_1 \text{ のとき} \\ &F = \frac{M_1}{2D_1} \frac{2\pi^2 \rho V H}{T^2} \left\{ \frac{1}{d} \left(\frac{\sigma_G}{\rho} - 1 \right) + C_M \alpha \right\} \\ &\quad + \left(1 - \frac{M_1^2}{4D_1^2} \right) \frac{\pi^2 C_D A \rho H^2}{2T^2} \beta + M'g \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{(式 17-8-1)}$$

$$\left. \begin{aligned} &M_1 = \frac{2\pi^2 \rho V H}{T^2} \left(\frac{\sigma_G}{\rho} + C_M S_1 - 1 \right) \\ &D_1 = \frac{\pi^2 C_D \rho A H^2 S_1^2}{2T^2} \\ &\alpha = \frac{h}{d} \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{kh} \left\{ \cosh kh - \frac{\cosh k(h-1)}{\sinh kh} \right\} \right) \\ &\beta = \frac{h}{d} \left(\frac{1}{h} - \frac{2}{kh} \left\{ \cosh kh - \frac{\cosh k(b-1)}{\sinh kh} \right\} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2kh} \cdot \frac{\sinh 2kh - \sinh k(h-1) - \frac{1}{n}}{\cosh 2kh - 1} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots \text{(式 17-8-2)}$$

ここで、

M_1 , D_1 : 最大鉛直力算定式を判定するために使用する式 17-8-2 により求まる値

ρ : 海水の単位体積質量

σ_G : 養殖物の単位体積質量

V : 養殖物 1 個の容積
 A : 垂下連に直角な射影面積
 C_D, C_M : 抗力係数及び仮想質量力係数
 l : 垂下連の長さ
 d : 養殖物の取付け間隔
 S_l : 図 17-8-3 により求まる値
 α, β : 式 17-8-2 または図 17-8-4、図 17-8-5 により求まる値
 H, T, L, k : 波高、波の周期、波長、波数
 M' : 1 本の垂下連の全水中質量
 n : 1 本の垂下連に付いている養殖物の個数

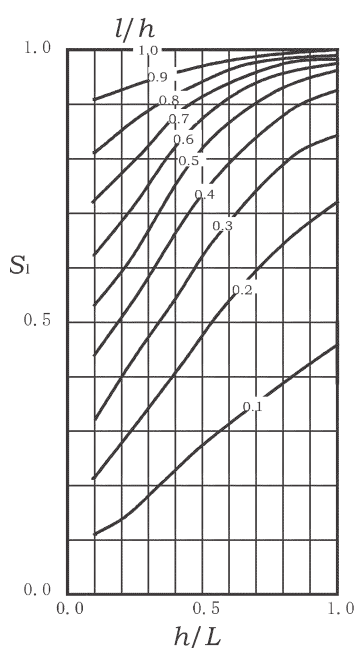


図 17-8-3 S_l の値

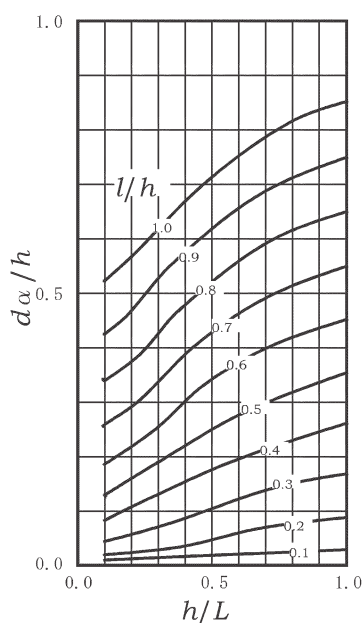


図 17-8-4 $d\alpha/h$ の値

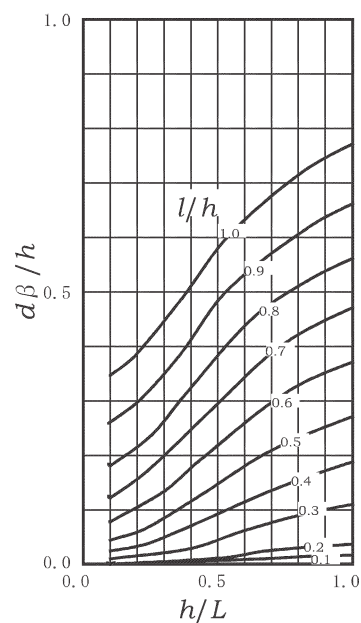


図 17-8-5 $d\beta/h$ の値

(2) 1 本の垂下連に働く最大水平力

垂下連に働く水平力は、海・潮流速 u_0 に波運動による水粒子の水平移動速度 u_m が加わったものとして計算することができる。また、波運動による慣性力は、索張力を減少させる方向に作用するので、抗力のみを考える。このとき 1 本の垂下連に働く最大水平力 $F_{\max}$ は式 17-8-3 により求めることができる。

$$F_{\max} = \frac{C_D A \rho}{2} \left(\frac{1}{d} u^2 + \frac{L H S_l}{T d} u + \frac{\pi H^2}{T^2} - \frac{h}{d} S_u \right) \dots\dots\dots (式 17-8-3)$$

$$S_u = \frac{\frac{L}{4\pi h} \left\{ \sinh \frac{4\pi h}{L} \sinh \frac{4\pi}{L} (h-l) \right\} + \frac{1}{h}}{\cosh \left(\frac{4\pi h}{L} \right) - 1} \dots\dots\dots (式 17-8-4)$$

ここで、

u : 流速 ($u_0 + u_m$)

S_u : 式 17-8-4 または図 17-8-6 により求まる値。

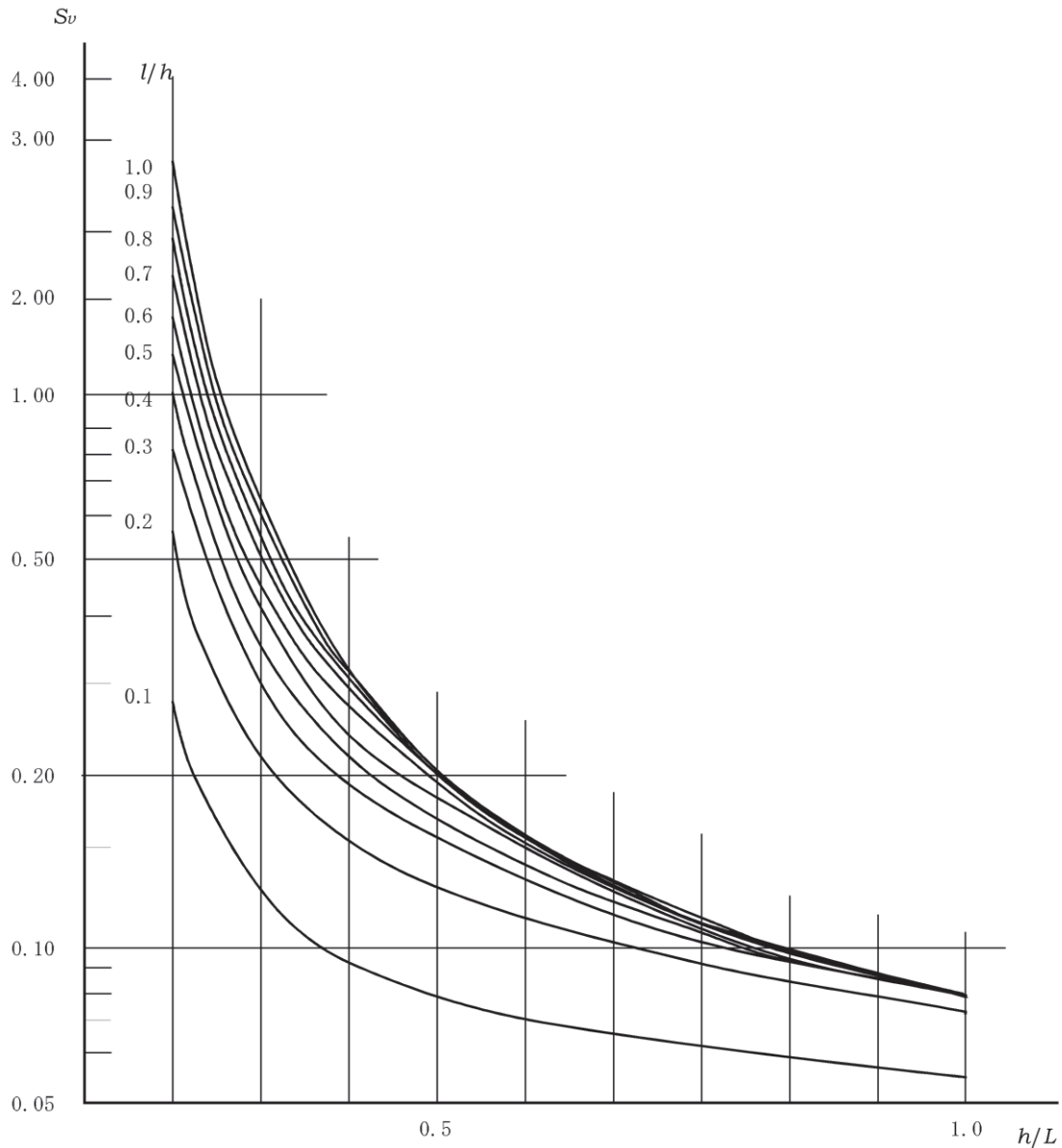


図 17-8-6 S_u の値

3. 筏使用梁材の断面計算

筏梁材の断面は、垂下連の鉛直力から梁材に生じる曲げモーメントの最大値に対し、使用部材に生じる応力を計算して、その値が許容応力以下になるように断面を定めることを原則とする。その場合、許容応力は材料の疲労を考慮するのがよい。

(1) 縦梁材がない場合

図 17-8-7(a)に示すように横梁材の浮子間に縦梁材がない場合、筏本体は浮子により海面上に保持されているため、通常支点（浮子の設置点）の不等沈下を考慮した連続梁として計算しなければな

らないが、不等沈下量の見積もりが困難なため、実用上は以下のようにして求めることができる。

梁材の最大曲げモーメント M_{Bmax} は、

$$\left. \begin{aligned} M_{Bmax} &= \frac{1}{4} F' m B \\ F' &= \frac{n}{2} F \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-8-5)$$

ここで、

F' : 縦梁材に作用する横梁材 1 本当たりの鉛直荷重

F : 垂下連 1 個当たりの鉛直荷重

m : 縦梁材の浮子間にある横梁材の数

B : 浮子間隔

n : 1 本の横梁材に垂下される垂下連数

(2) 縦梁材がある場合

図 17-8-7(b)に示すように横梁材の浮子間に縦梁材がある場合、浮子で囲まれた範囲内の垂下連により生じる鉛直力は外縁の縦横の梁材で支えることになる。このとき縦横の梁材が受け持つ支持割合は、歪条件式を解けば求まるが、梁材の剛性が等しい場合、近似的に荷重の分配率は式 17-8-6 で求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= q \frac{b^2}{a^2 + b^2} \\ q_2 &= q \frac{a^2}{a^2 + b^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-8-6)$$

ここで、

q_1, q_2 : 縦梁材、横梁材の支持荷重

a : 縦梁材の浮子間隔

b : 横梁材の浮子間隔

q : 浮子によって囲まれた範囲内の垂下連による全鉛直力

よって、縦横の梁材に生じる最大曲げモーメントは式 17-8-7 により求まることができる。

$$\left. \begin{aligned} M_{Bmax} &= \frac{1}{4} q_1 B \quad (\text{縦中央主梁材}) \\ M_{Bmax} &= \frac{1}{4} q_2 B \quad (\text{横中央主梁材}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (式 17-8-7)$$

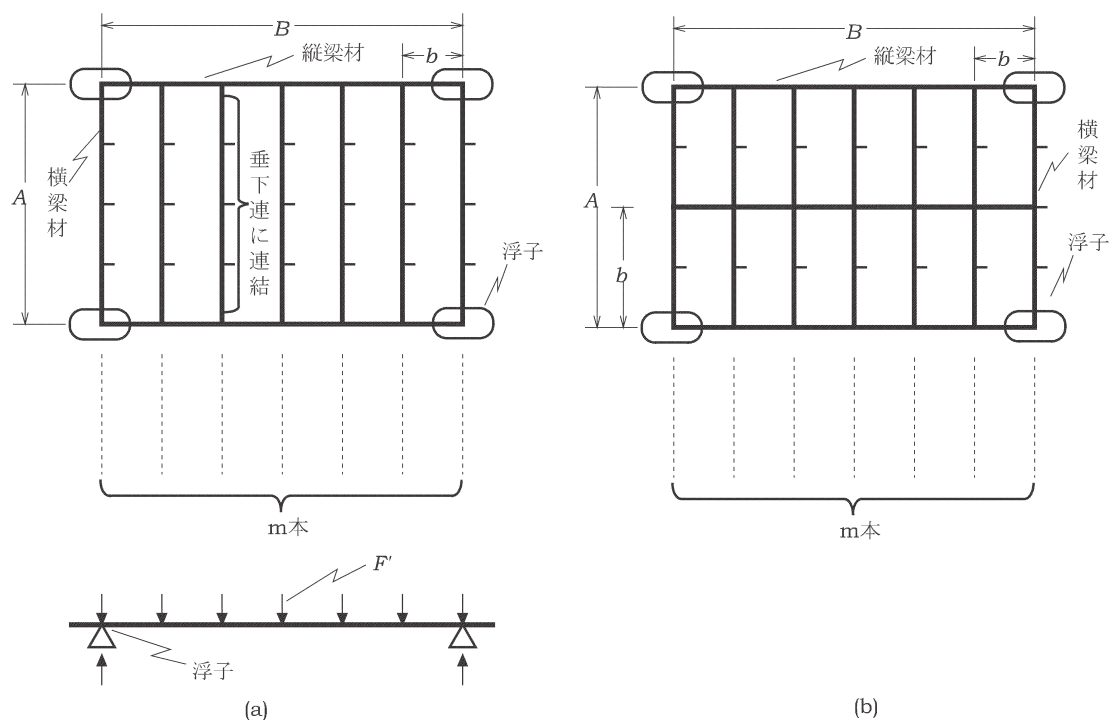


図 17-8-7 筏の梁材組み合わせ図

4. 浮子の大きさ

筏式の場合、筏 1 台当たりの全浮力は、波により垂下連に生じる鉛直力の合計と管理作業に必要な作業員、足場、その他付属重量の合計を支える大きさとする。浮子 1 個の大きさは、全浮力を使用個数で割った大きさとしてもよい。浮子式の場合、浮子に垂下される垂下連に作用する波の鉛直力を支える浮力を持つ浮子としてもよい。

(1) 筏式の場合

$$F_u \geq \frac{1}{n} (\Sigma F + Mg) \dots\dots\dots (式 17-8-8)$$

ここで、

F_u : 浮子 1 個の持つ浮力

ΣF : 垂下連に働く鉛直力の 1 台当たりの合計

M : 管理作業などに必要な作業員、足場及び付属物の質量

n : 筏 1 台当たりの浮子使用個数

(2) 浮子式の場合

$$F_u \geq \Sigma F \dots\dots\dots (式 17-8-9)$$

ここで、 ΣF : 垂下連に働く鉛直力の 1 個当たりの合計

5. 筏の係留索にかかる張力

筏は強波浪時も所定の海域に保持することを原則とする。そのため係留アンカーは筏の受ける全水

平力に対し、それ以上の固定力を持つものとするといふ。

(1) 筏 1 台当たりの全水平力

1 台の筏にかかる水平力 R は、垂下連に働く水平力の合計として求められ、式 17-8-10 で示される。

$$R = \sum F_H = n F_{H\max} \dots \dots \dots \text{(式 17-8-10)}$$

ここで、

n : 筏 1 台当たりの全垂下連本数

$F_{H\max}$: 垂下連 1 本当たりの水平力

(2) 係留索にかかる張力

① 図 17-8-8 に示されるように、筏の前後 2 点係留の場合、係留索にかかる力 T は、

$$T = \frac{1}{2} \frac{n R L_a}{\sqrt{L_a^2 - h^2}} \cos \theta \dots \dots \dots \text{(式 17-8-11)}$$

ここで、

L_a : 係留索長

h : 水深

n : 筏台数

θ : 係留索方向と海・潮流、波向とのなす角度

② 図 17-8-9 のように、筏前後 4 点係留の場合、

$$T = \frac{1}{2} \frac{n R L_a}{\sqrt{L_a^2 - h^2}} \cos \alpha \cos \theta \dots \dots \dots \text{(式 17-8-12)}$$

ここで、 α : 係留索方向と筏方向のなす角度

(3) 係留アンカーブロック及びアンカーの大きさ

「第 5 編 外郭施設 2.5 浮防波堤」の設計に準じて求めることができる。

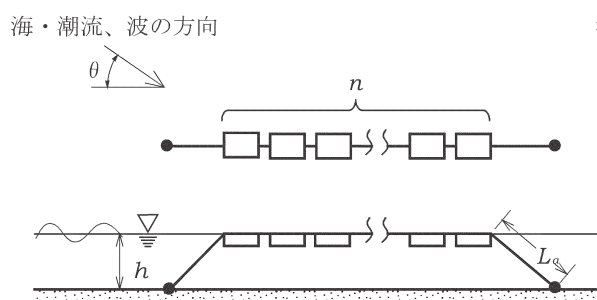


図 17-8-8 2 点係留法

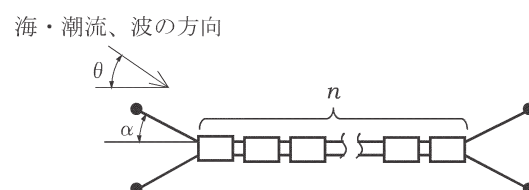


図 17-8-9 4 点係留法

(参考文献)

- 1) 中村充: 水産土木学—生態系海洋環境エンジニアリング, 工業時事通信社 (1991), pp.469-482

- 2) 中村充：浮養殖施設の設計法, FAO 水産増殖国際会議論文集 (I), 水産庁 (1976), pp.126-131
- 3) 中村充・上北征男：養殖筏の設計外力に関する研究, 第 24 回海岸工学講演会論文集 (1977), pp.625-628
- 4) 小林昭男・高木儀昌・福井洋介・増田光一：沖合における養殖生簀の流体力学的特性に関する実験的研究, 海岸工学論文集第 47 巻 (2000), pp.871-875