

# 沿岸漁場の開発と防災

中 村 充

## 1. 概 要

沿岸海域は豊富な栄養塩をもった沖合性から汽水性までの海水、変化のある海底地形、など豊かな水産生物環境をもち、高級魚貝類の生産の場となっている。同時に有用水族の幼稚仔の発生の場として再生産の重要な場である。

水産業は近年まで海洋における生態系の平衡の範囲内において専ら獲る漁業として存在してきた。しかし現在は漁業技術の世界的向上と漁獲努力の増大によって生態系の平衡は失なわれ水産資源の滅亡を招来しつつある。更にこれに沿岸海域の環境破壊もまた拍車をかけている。

他方 1945年トルマン米大統領の沿岸における漁業資源、大陸棚鉱物資源に関するトルマン宣言を端緒に第1次、第2次の国際海洋法会議がもたれ本年（1974）6月20日～8月29日に第3次海洋法会議の第1回会合がもたれる。その内容の趨勢は日本水産にとって極めて重大な段階にある。それは領海12～200カイリ、排他的経済水域200カイリ、それ以外の水域の国際管理といった内容が主流となってきたためである。現在日本の漁獲量は年間約1,000万トン、その半分の500万トンは外国の沿岸200カイリ内での漁獲である。このことは動物蛋白の50%以上を魚類に依存している日本人にとって食生活の破たんをもたらす。

このような国際的動向の中で日本水産は資源培養型漁業への転向を図るために努力がはらわれている。

資源培養型漁業は自然的生態系における再生産の場を破壊するまでに至った従来の獲る一方の漁業から資源を増加させてからとる漁業へと変かんしたものである。資源を増加させる方法として漁獲制限や漁獲禁止水域を設定する消極的な資源培養と、より積極的な栽培漁業がある。栽培漁業は図1に示すサイクルをもった漁業である。

特に天然の場に移植・放流を行なうループは増殖事業と呼ばれ、増殖事業はこの他に天然群の増殖を図るための産卵場、稚仔育成場の造成、漁獲禁止水域、禁止時期の設定などがある。これら資源培養型漁業、特に栽培漁業は世界的人口激増の動向の中で動物性食糧の主要な供給源として近い将来の漁業の中核となるであろう。栽培漁業における生産物は国民の嗜好に適合する品種が多く、かつ魚種を選択的に生産が可能である。

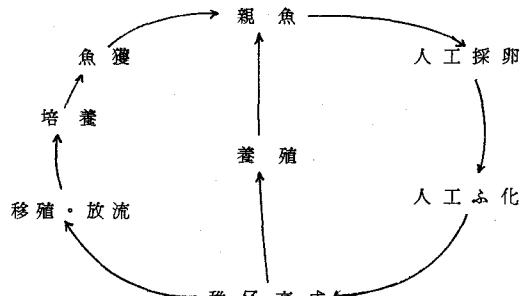


図1. 栽培漁業

栽培漁業技術の問題は、第1に種苗生産技術である。これはホルモン注射をしたり、温度刺激・塩分刺激などを行なって人工的に産卵、孵化して稚仔、胞子などの種苗を得るための技術であり、第2には種苗の移植、放流で、水槽から天然の海へ放流するとき食害生物や波浪などの生物・物理環境から保護し良好な餌料環境を与えるなど放流場・中間育成場などの造成技術、第3に培養魚礁、築磯、海藻林造林、海域豊度の増大などの漁場改良、第4に漁獲技術、第5に親魚養成である。以上は生態的研究と、工学的研究の協同の上に成立っている。ここでは、このうちの工学的面をもった部分を中心に述べる。

## 養殖・蓄養漁業

養殖・蓄養漁業は図1の下段のループで示されるもので、親魚から採卵・孵化・稚仔育成・養殖と市場品の大きさまで一貫して人間が管理生産する漁業である。ここでは生産物は常に所有権が明確であり、投餌、病理対策、施設の管理など細かい配慮が必要となる。養殖が飼育を内容としているのに対し、蓄養は市場供給を平均化するために1時的に飼うもので、例えば漁期の漁獲物を池に蓄えて禁漁期に出荷するといったものである。

養殖・蓄養漁業における土木的手法の役割は大きい。水理学的にもっとも大きな問題は水環境の改良保全である。水理学上有利な養殖場の構造（陸上池、海面池）、湾を養殖・蓄養漁場とする場合の海水交流促進工法、岩場における蓄養池の波の利用、網施設・いかだ施設における流れなど水理学的検討事項が多い。

また、これらの諸施設そのものや、これらの諸施設によって飼育、栽培されている水産生物を災害から守らなければならない。おもな災害は波浪、高潮災害、洪水災害（破壊および水質変化）、赤潮、水質汚染など物理・力学的災害と化学・生物学的災害がある。前者はほとんど防波を主とする波浪制御、後者は水の混合拡散を含む流れの制御である。流れの制御は内湾または養殖・蓄養場で水の流通を促進する工法で、湾口改良、新水道の開削、作れい（築）、導流工、ポンプ、エアレーションなどの諸工法がある。砂浜、岩場などで外洋または開いた湾における流水制御は、波の制御による海浜流（向岸流、沿岸流、離岸流など）の制御が考えられ、また波のエネルギーを利用して流れを起こすことが考えられる。海岸海流や潮汐流に対しては導流堤（突堤、離海堤）を用いる。底層流を制御するためには人工魚礁などがある。

波の制御の方法は、普通の防波堤と異なり、流れの流通の阻害しない。小さな波は存在する方がよい。碎波または部分碎波は抑制しなければならないが、うねり性の波は存在してもよい。工費が低廉である、ことなどが要求される。このような条件に適した消波工として現在もっとも確実な工法は潜堤がある。これは小さな波は自由に通過させるが、大きな波は堤上で碎波して波を減殺する。しかし、水深が大となると工費がかさむ。この対策として浮消波工が検討されている。これには箱型（ポンツーン型）、いかだ型その他がある。この特色は流れを阻害しない、風波などにおける表面碎波を抑制するなどであるが、うねり性の波を消すことは困難であり、係留方法などに問題がある。

また、動力を用いる方法として、エアカーテン、ウォータージェットによる流体式防波堤がある。前者は海底からの気泡の噴出によって上昇流を起こし、表面流を発生させて波を碎き、気泡間の粘性によって波を吸収し、気泡の排除水による見掛け質量力で波を反射するもので、深い位置での消波に適し、後者は水を海底より上向きに噴出して表面流を作り、波を碎いて消波する。これらは必要な時に必要なだけ消波することができるので、もっとも望ましいものとなろうが、まだ実用には至っていない。またエアカーテンは空気の溶入、上昇流による混合拡散効果もあり、水質改善に有効な手段である。

## 増殖漁業

増殖については、漁場環境の改善、種苗・幼稚仔の放流、飼料の培養・供給などの技術的手法に関係する。

漁場環境の改善は砂浜漁場、岩場漁場、内湾漁場によって特色がある。

砂浜漁場においては、波と流れを制御することによって波力を減じ、漂砂を安定して底生生物の環境を変え、幼稚仔の浮遊を制御する。また人工魚礁、人工海藻などによって底層流を変化させる。

岩場漁場においては、人工魚礁、岩礁爆破などによって自然岩礁間を整理し、必要に応じて波、流れ

を制御するなどの工法が土木工学的に検討される。

内湾漁場においては、水質の改良保全の工法が第一である。このための土木工学的手法として湾口改良、新水道開削、作れい（瀬）、導流堤などによる流れの制御工とエアレーション、ポンプによる給排水、浚渫など動力利用による工法がある。

種苗放流に関する土木工学的寄与は、放流場・中間育成場など保護水面の造成が考えられる。人工ふ化、あるいは自然採苗による幼稚仔が、天敵あるいは自然条件（流亡、死滅など）によって減耗しないように波、流れを制御したり囲障を設けて天敵を防御する。

増殖は採苗（自然採苗、人工ふ化）、稚仔養成、放流・中間育成（種苗の減耗の抑制）、海域豊度の増進（飼料の供給）、培養、漁獲、という一連の事業で行なわれる。

増殖に関する若干の事例を述べよう。

その一つは放流場の造成である。現在「浅海域における増養殖漁場の開発に関する研究」という生態と土木の共同研究が行なわれている。その一つにクルマエビ放流・中間育成場の造成研究がある。クルマエビの天然群は干潟域に定着し大きくなるに従って深い所へ移っていく。従ってエビにとってどのような干潟が適しているのか最適環境を分析し、最適環境に干潟を改造する。クルマエビは現在億の単位で稚エビ（体長 10 mm）を人工生産できる。孵化水槽から天然の海へ放流されるとき、他の魚の餌になったり、波や流れに流されたり、放流直後に数パーセントから 20 パーセント程度に減ってしまう。これを半ば管理された干潟、それは干潮時は水田のような浅いタイドプールに、満潮時には海面下に没するものであるが、このような人工干潟を造成すると 90 % 程度生存させ、また天然干潟に比べ単位面積当たりの密度を 50 ~ 100 倍程度には上げられるようである。これらの放流エビを 2 週間程度、体長にして 2 ~ 3 cm まで保護育成して深い所へ出でいかせる。保護育成といつても最適環境に放流するというだけで、この間餌料は全く与えず、食害生物を防除するといったことはしない。このようにして添加されたエビ資源は天然の海の中で成長し、これを漁獲する。この事業の養殖との相違は、養殖は前述のように稚魚からマーケットサイズまで所有者が一貫して行なうが、そこには餌料の問題があり魚を餌とするのでは限界がある。これに対し増殖は天然の生態系に有用魚種を優先種とするための技術で、種苗の生産から減耗の多い稚仔の時代までを保護管理するだけで、マーケットサイズに生長するのは自然の海の中で行なわれる。沿岸干潟域は陸地造成によってその多くが失なわれた。水産上、高生産性の干潟造成が必要である。エビ、カニ、ヒラメ、カレイ、貝などの底棲生物の資源培養の場が干潟浅海であるのに対し、遊泳魚類の資源培養の場は藻場あるいは河口域である。その何れも水質汚濁によって減耗しつつある。サケ、マスの放流は技術化されたものであるが、その回帰率は、0.1 % ~ 5 % にすぎない。河口および河口海域の環境がこれを支配していると考えられる。これを数十パーセント高めるよう河口改良、あるいは人口河川のようなものも必要となろう。その他、タイ、アワビなども種苗生産には成功している。天然群においても人工孵化種苗においても産み落される卵の数に比し、成魚となる割合は極めて微小で、天然では百万分の 1 単位であり、その減耗の多くは卵、稚、仔魚期においてである。この減耗をなくするのが放流場・中間育成場としての海域環境の制御技術である。このように増殖漁業の最も重要なポイントは、初期減耗の防除にあるが、他方、場の生産性を高めるための環境作りも重要である。例えば、成魚とするための場の造成がある。魚のアパートで知られる人工魚礁も、培養魚礁として海域豊度の向上技術も含めて考える必要がある。日本水産資源保護協会では、日本の全海岸線の 1/5 に亘る延長で水深 50 m 線に大魚礁帯を作ることを検討している。また 27,000 km におよぶ日本海岸の大半を占める砂浜は大きな可能性を藏している。海藻林の造林、静砂、浮魚礁などがあり、砂浜海

底に杭を打って棚を作り、この上にU字溝のようなものを全面に並べれば海藻の刈取り、コンクリート面の掃除（新しい面には海藻が着くが古くなると海藻が生えない。）など海上から機械化ができる。

### 海域豊度の増大と過栄養化

クリスティおよびスコットは海底に沈積した栄養度の高い海水を上昇させ、プランクトンを大量発生させて水産の潜在生産力を増大させることを考えた。湧昇流の発生に海底原子力発電による温水あるいはスクリューなどを考えている。またチャップマンはこのような大湧昇流によって海の潜在生産力を現在の約80倍に当たる40億トンにあげることができるといっている。これらはアイデアと大まかな見積りであるが、湧昇流の発生が海域豊度を増大させ生産力を増大することを主張したものである。

これは大洋の海水は貧栄養水であることを意味する。黒潮もまた貧栄養である。他方日本沿岸の湾や、内海では過栄養化が進んで漁場は荒廃しようとしている。ここ数年急速に顕在化した赤潮被害は、貧死の海のあえぎにもしている。瀬戸内海の栄養水塊を適当な濃度で黒潮に拡散させれば黒潮の水産的生産力は増大するであろう。無論重金属やP.C.B.汚染などは許されない。

海洋における栄養は毎年5,000万トンにおよぶ漁獲として陸上に、またプランクトン他の死ガイとしてマリンスノーとなり、深海に蓄積してしまう。陸水としての栄養供給が適当であれば、海の生産力は増大する。現実は閉鎖性内湾にのみ陸からの栄養供給があるため、その湾は過栄養となり死の海域となっているのである。

## 2. 漁場水環境の改良・保全

### (1) 海水交流

海水交流の問題はきわめて広い範囲の問題と応用部門をもっている。水産ではここ数年来沿岸漁業の改善、開発という行政上の必要性より老朽漁場の更新、新漁場の開発などが取りあげられた。これらにおけるおもな問題の一つに海水交流の問題が出てきた。すなわち漁場の生産性を規定する水温、水質、微生物、溶存酸素、底質、有機物その他水産環境の改善を計る有力な方法が漁場と外海の交流促進である。このための具体的な方法は漁場と外海の交流口の拡大、縮小、新水道の開削、作れい、導流工、ポンプ利用などが考えられる。また水質汚濁対策として近年の重要性はますます大となってきている。ここでは二つの水域が狭さく部で結ばれ、両水域に起る交流について主として述べることとする。

#### 1) 交流口の水理特性

湾口、湖口、囲ぎょう（繞）築堤開口部などで区切られた二つの水域間の流況を求める場合、これら交流口の水理特性をあらかじめ求めておく必要がある。このような流出入口の水理特性はそれぞれの事例に応じて適当に扱われるべきであるが、ここでは計算法を統一的に表現するために流量係数で交流口の特性を表現する。すなわち

$$q = CA\sqrt{2g\Delta h} \dots \quad (1)$$

ここに  $q$  ; 単位時間当たりの流量、  $A$  ; 交流口の通水断面積、  $g$  ; 重力加速度、  $\Delta h$  ; 内外水位差。

(1)式で流量を表現した場合の流量係数  $C$  は摩擦、断面変化、流入出、曲り、阻柱その他損失水頭を考慮して次式を得る。

$$C = \left[ f_e \left( \frac{A}{A_e} \right)^2 + \sum f_w \left( \frac{A}{A_w} \right)^2 + \sum f_c \left( \frac{A}{A_c} \right)^2 + \sum f_b \left( \frac{A}{A_b} \right)^2 + f_o \left( \frac{A}{A_o} \right)^2 + \sum \frac{2gn^2l}{R^{4/3}} \left( \frac{A}{A_l} \right)^2 \right]^{-1/2} \dots \quad (2)$$

ここに  $f_e$ ,  $f_w$ ,  $f_c$ ,  $f_b$ ,  $f_o$ ; 流入, 断面拡大, 断面縮小, 曲り, 流出の各損失係数,  $A$ ; 交流水道において基準にとった通水断面積(最小通水断面を基準にとる),  $A_e$ ,  $A_w$ ,  $A_c$ ,  $A_b$ ,  $A_o$ ,  $A_t$ ; 交流水道各位置における通水断面積,  $l$ ; 区間長,  $n$ ; 粗度。ただし各損失係数のうちあるものは水力学における実用式で上式に変形適用する。たとえば断面漸拡損失は,

$$\Delta h_w = f_{ge} \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$

ここに  $f_{ge}$ ; 漸拡損失係数,  $v_1$ ; 漸拡前の流速,  $v_2$ ; 漸拡後の流速であるから

$$f_w = f_{ge} \left( 1 - \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

ただし  $A_1$ ; 漸拡前の通水断面,  $A_2$ ; 漸拡後の通水断面である。

その他の損出においても

$$\Delta h_k = f_k \frac{v_k^2}{2g} = \left( 1 - \frac{A_1}{A_2} \right)^2 \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

## 2) 潮セキによる海水交流

平面的拡がりを考慮しなければならない水域間の交流現象を調べる場合には運動方程式を差分式において数値積分を行なうことが電子計算機の利用ということで行なわれている。しかし干拓, 潮止め, 湖口処理, 低湿地河口問題, 渔場問題などであらわれる多くの場合, 内水域流況を調べることができる。

いま内水面の linear scale が水深に比しそまく内水面が平面とみなしえるととき解析は容易となる。この静的成立条件は(5)式である。

$$\left. \begin{aligned} & \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right)_{\max} t_i \equiv \epsilon \ll \zeta \\ & t_i = \int_i \frac{dl}{\sqrt{gd'}} \ll T \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ここに  $h$ ; 外海水位,  $\zeta$ ; 外海潮差,  $t_i$ ; 交流口における水位変動の内水域最遠点に達するまでの時間,  $l$ ; 交流口より内水域門最遠点までの距離,  $d'$ ; 内水域水深,  $T$ ; 外海水位変動周期(潮セキ周期)。

つぎに内外水域の水位変動を正弦曲線で与えれば以下の展開ができる。

$$\left. \begin{aligned} & h' = \frac{\zeta'}{2} \sin \frac{2\pi}{T} (t - \Delta T) \\ & h = \frac{\zeta}{2} \sin \frac{2\pi}{T} t \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

ここに  $h'$ ,  $h$ ; 内外水位,  $\zeta'$ ; 内水域潮差,  $\Delta T$ ; 内外水位変動の時差。

これと(1)式とから, 次の諸式が導かれる。

$$\zeta' = \alpha \sqrt{\sqrt{1 + 2 \left( \frac{\zeta}{\alpha} \right)^2} - 1} \quad \dots \dots \dots$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{ATc\beta\sqrt{g}}{2S} \right)^2 \\ \beta &= \frac{\Gamma(3/4)\Gamma(1/2)}{\pi\Gamma(5/4)} = 0.76 \end{aligned} \right\} \dots \quad (7)$$

(7)式はまた次のように無次元表示ができる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\zeta'}{\zeta} &= \frac{\beta^2}{4\sqrt{2}K_1^2K_2} \left( \left( 1 + \frac{64K_1^4K_2^2}{\beta^4} \right)^{1/2} - 1 \right)^{1/2} \\ K_1 &= \frac{S}{AC}, \quad K_2 = \frac{\zeta}{T^2g} \end{aligned} \right\} \dots \quad (8)$$

(8)式を図化しておくと図2を得る。図2より与えられた湾または内水域条件に対し容易に内水面潮差 $\zeta'$ を求めることができる。

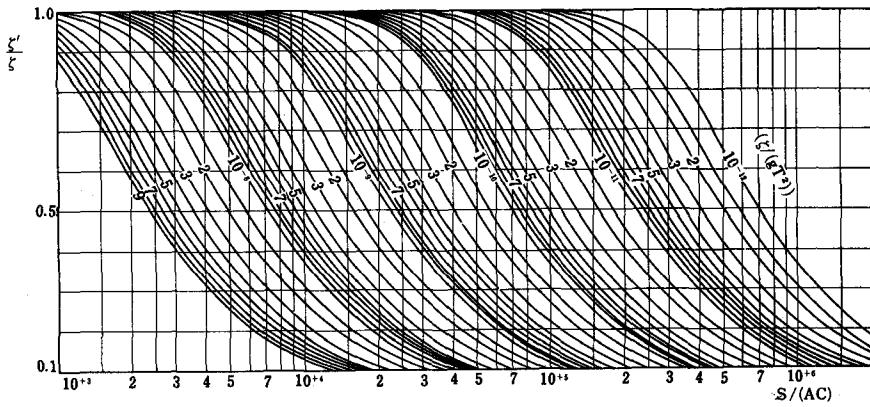


図2. 湾口条件、外海条件と内外潮位

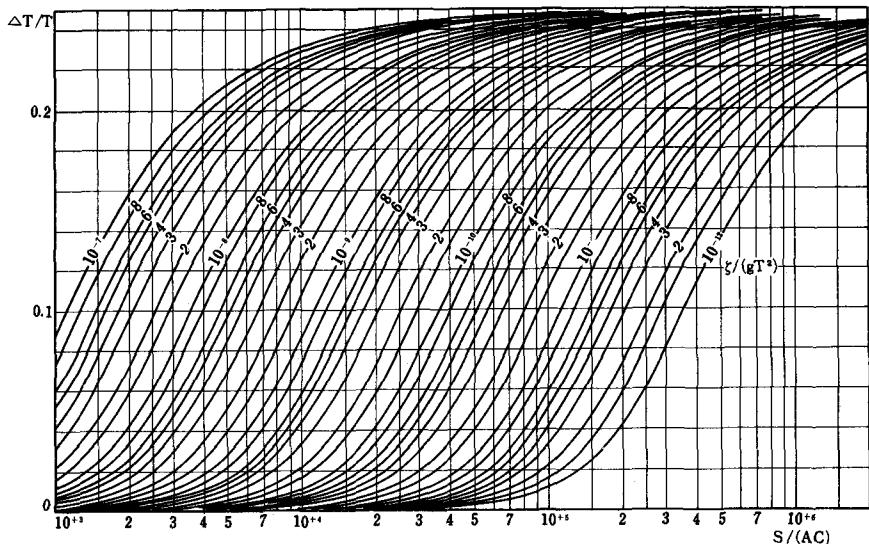


図3. 湾口条件、外海条件と内外潮位の位相差

図2より $\zeta'$ が求まれば次の諸量が計算される。

$$Q = S \zeta' \quad \dots \quad (9)$$

$$\bar{v} = 2 S \zeta' / (AT) = 2 Q / (AT) \quad \dots \quad (10)$$

$$v = \frac{\bar{v}}{\beta} \sin^{1/2} \frac{2\pi}{T} (t + \delta) \quad \dots \quad (11)$$

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

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{1}{2\pi} \cos^{-1} \frac{\zeta'}{\zeta} \quad \dots \quad (13)$$

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の平均流速， $v$ ；時刻 $t$ における流速。

また(13)式を図化したのが図3である。この図から $\Delta T$ が求まる。

内外水位差を水道のみでなく内水面においても扱う必要のあるとき、上記における $S$ の代りに $S_{eff}$ を用いる。内水面単節のセイシユが重なるとして

$$S_{eff} = \bar{S} (1 - \pi t_i / T) \quad \dots \quad (14)$$

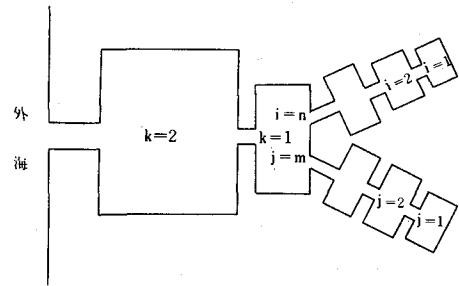


図4 外海潮差の内水面への伝達

ここに $S_{eff}$ ；有効水面積， $\bar{S}$ ；干，満潮時の平均水面積である。一般に図4のように幾つかの水域に区分されて外海につながっているときは、それぞれの系列、例えば $i$ の系列で $\zeta_{i=2}$ を仮定し上述の方法で $\zeta_{i=1}$ を求める。そして $i=3$ における潮汐振動 $\zeta_{i=3}$ に対する $S_{i=1}$ ， $S_{i=2}$ を流量の連続条件から

$$\left. \begin{aligned} S'_{i=2} &= S_2 + S_1 \zeta_1 / \zeta_2 \\ \text{一般に } S'_i &= S_i + S'_{i-1} \zeta_{i-1} / \zeta_i \end{aligned} \right\} \quad \dots \quad (15)$$

として換算内水面積を求め $i=2$ の水域に当初の仮定値 $\zeta_{i=2}$ が起るような $\zeta_{i=3}$ を試算的に求める。以下順次同様に換算内水面積 $S'_i$ を用い、 $\zeta_i$ を生ずるような $\zeta_{i+1}$ を求め外海にまで計算する。 $i$ 系列と $j$ 系列が $k=1$ で合流する場合には

$$\begin{aligned} S'_{k=1} &= S_{k=1} + \frac{\zeta_{i=n-1}}{\zeta_{i=n}} \left( S_{i=n-1} + \frac{\zeta_{i=n-2}}{\zeta_{i=n-1}} (S_{i=n-2} + \dots + S_{i=1} \frac{\zeta_{i=1}}{\zeta_{i=2}}) \dots \right) \\ &+ \frac{\zeta_{j=m-1}}{\zeta_{j=m}} \left( S_{j=m-1} + \dots + S_{j=1} \frac{\zeta_{j=1}}{\zeta_{j=2}} \right) \dots \end{aligned} \quad (16)$$

として上述の計算を行なう。この一連の計算によって外海潮差 $\zeta_0$ に対応して $\zeta_k$ ， $\zeta_i$ ， $\zeta_j$ などが求まる。この一組の値は $\zeta_{i=2}$ ， $\zeta_{j=2}$ の仮定から出発しているので $\zeta_0$ は必ずしも現実の値とは異なるが2~3組の計算値を求め $\zeta_0$ を横軸に $\zeta_i$ ， $\zeta_j$ などを縦にとってグラフ化すれば大潮潮差，小潮潮差時の各感潮湖の $\zeta_i$ を内挿して求めることができる。 $\zeta_i$ ， $\zeta_j$ が求まれば(9)～(13)式から各交流口の流況が求まる。

### 3) 海水交流の工法

#### 湾口改良

湾への流入出が潮汐によって行なわれている湾で、湾口が狭すぎて流出入水量が少ない場合、湾口が広すぎて流入出流速が遅く湾口から湾奥にかけて安定した成層水塊があって、全交流水量のわりに実質交換水量が少ない場合などのとき、湾口を改良して実質交換量を増大させることができる。このためには流入出流量  $Q$  を大にすると同時に、湾口流速  $\bar{v}$  を大にして湾内水との混合拡散を促進すればよい。(9) (10)式よりわかるように  $Q$  を増大するには内水面振幅  $\zeta$  を大にし、 $\bar{v}$  を大にするには湾口断面積  $A$  を小にとればよい。第2図よりわかるように  $\zeta/\zeta_0$  は  $A$  を大にすれば 1 に近づき、 $\zeta$  が大となり  $Q$  が大となるが、 $A$  がある値より大となると  $\zeta/\zeta_0$  は 1 に漸近して  $\zeta$  は大とならず、 $Q$  はほとんど増大せずに  $\bar{v}$  のみが小となっていく。すなわちもっとも望ましい湾口は  $\zeta/\zeta_0$  がほぼ 1.0 (0.98 前後) に等しく、(CA) のもっとも小さいものである。また湾口はできる限り流れやすく流量係数  $C$  が 1 に近づくようにとる。

#### 新水道の開削

湾奥に滞流水帯の生じている場合の改良工法で、この部に新水道を開削して新鮮な海水を導入し、水質改良を図るものである。

この工法は新水道入口および出口に水位差のあること、新水道が短く有効通水断面 (CA) が現湾口、湖口に対比できる大きさであることが必要である。

新水道と現水道の湾湖内における支配水面は、ほぼ有効通水断面積 (CA) の割合に近い。現水道と区別して新水道の量には添字  $n$  をつける。開削後の状況は第2図、第3図で (CA) の代わりに (CA + C<sub>n</sub>A<sub>n</sub>) を用いて、 $\zeta$ 、 $\Delta T$  を求め、式(6)～式(14)を適用する。 $\zeta/\zeta_0 = 1$  ならしめる (C<sub>n</sub>A<sub>n</sub>) を開削すれば、全交流量の増加は最大となる。また新旧両水道の流量比率は式(17)で示す。

$$\frac{Q_n}{Q} = \frac{C_n A_n}{CA} \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

#### (2) 海水の交換率と漁場生産力

漁場内で溶存物質の消費が行なわれ、外海水との交流によってこれが補給されるとき、漁場内での溶存物質濃度は式(18)のようになる。

$$\left. \begin{aligned} C_i &= \frac{K_i}{1 - K_a} \\ K_i &= \frac{2 C_0 \alpha}{2(\alpha + \gamma) - 1} - \frac{C_i T}{Q} \left[ \frac{1}{2(\alpha + \gamma) - 1} + \frac{1}{\alpha + 2\gamma - 1} \right] \\ K_a &= \frac{2\gamma - 1}{2(\alpha + \gamma) - 1} \\ \gamma &= \frac{V}{Q} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots \quad (18)$$

ここに  $C_0$ 、 $C_i$ ；外海または流入水、内水域の溶融物質濃度、 $V$ ；平均潮位面における内湾水容積、 $\alpha$ ；外海水が内水域にはいって既存の水と混合し合う割合、 $C_i$ ；漁場内での溶存物質の単位時間における全消費量。

$\alpha$  は 0.1 ～ 1.0 である。湾口の流入出流速が速く、内水面積が小であり、流入出周期が潮汐周期のとき数 km<sup>3</sup>以下の漁場では  $\alpha = 1$  に近づく。

溶存物質が酸素である場合に、魚の生産量  $W$  はつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} W &= \frac{C_i - mV + bs}{k} \\ C_i &= \frac{2\alpha Q}{T} \frac{(C_0 - C_{cr})(\alpha + 2\gamma - 1)}{3\alpha + 4\gamma - 2} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

ここに  $k$  ; 魚貝の単位重量, 単位時間当たりの酸素消費量,  $m$  ; 単位容積の水中に含まれるプランクトンなどによる単位時間当たりの酸素消費量,  $b = b_1 + b_2 - b_s$ ,  $b_1$  ; 単位面積の水面に単位時間に溶入する酸素,  $b_2$ ; 海草によって生産される酸素（消費のときは負の値）,  $b_s$ ; 底面の有機物の分解によって消費する酸素,  $s$ ; 内水面積,  $C_{cr}$ ; 魚貝の適正溶存酸素濃度である。

### (3) 潮流制御

天然の海では海流, 潮汐流によって海水従って海水に溶存, 懸濁している物質が運ばれる。ある海域の水質は海潮流の影響を強く受ける。閉鎖性の内海, 内湾では特にこの影響が大きい。そして海水交換は分子拡散より, 乱流拡散の方がはるかに大きく更に移流（平均流で運ばれる拡散）効果の方が大きい。従って, 海水交換の増大を図るためにには先ず移流すなわち流れの恒流成分を増大させること。次に亂れを発生して乱流拡散係数を大にすることが考えられる。先に述べた作れいや, 湾口改良も一種の潮流制御であるが, 潮流制御工としては導流堤がある。

導流堤は, 作れいに比較して確実に流況を変化することができる。導流堤の機能は, 流れのもつ慣性項 ( $v^2/(2g)$ ) を制御する工法であるから流速の大きい所ほど効果的である。しかし導流堤は作れいと異なり, 流れの抵抗となり, エネルギーの損失を伴うので十分な検討の上, 行なわないと, かえって障害となることもある。第5図は, 導流堤の効果的配置の一例である。

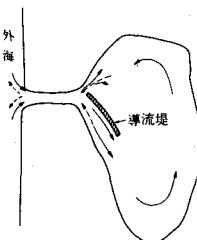


図 5 導流堤の配置

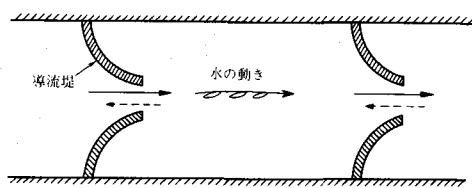
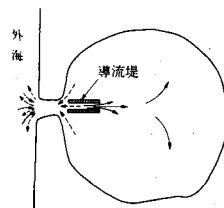


図 6 潮汐流制御の一例

この図の導流堤は湾口の高流速を受けて湾への流入方向を制御する。流出時は緩流速部分から湾口に集まるので導流堤に支配されることなく全域から一様に湾口に流出する。図6は流出入口が2つ以上ある場合で図の右方向流は流れ易いが、左方向流は流れにくい。これは瀬戸内海のように紀伊水道と豊後水道から同時に流れ込み、内海中央で交わって両水道から落潮するような場合に上げ潮、下げ潮に応じて一方向流を優勢にすることができます。これらは何れも流速の速い所でなければ効果がない。

### (4) 選択取水

#### 1) 湾の深層水質維持のための排水量の決定

閉鎖性の湾では都市排水, 工場排水あるいは水産の自家汚染などによって底質が悪化し, その結果底層水は無酸素または貧酸素で硫化物を含んだ悪水となっている。しかしこの底層水の悪化は短時間で進行するものでないから, この汚水だけを静かに抜き取ることを考えれば, 小さなポンプで十分である。

福井県日向湖の例で述べよう。

日向湖は福井県三方五湖の一つで面積  $0.95 \text{ km}^2$ , 最深部  $-40 \text{ m}$  のカルデラ湖で日向水道を通じて日向湾につながり, また嵯峨水道を通じて水月湖につながっている。

日向湖は高カン低温の下層水が上層水と分かれ, 上層水は更に水月湖からの淡水流入の影響を強く受ける湖奥水と, 外海の影響を直接受ける湖口水に分けられる。下層水はほぼ水深  $15 \text{ m}$  以下に存在し温度変化による対流圈の下にあり, 上層水流動による混合拡散域の外にある。従ってこの層は無酸素で有機汚染, 硫化物汚染の進行した水層である。この水層の影響が季節的あるいは気象条件によって消長し, 時として表層に達し, 水産被害をもたらす。このような水層の形成は前述のようなスリ鉢状の地形と水月湖からの淡水流入が大きな影響をもっている。日向湖は夏季水温上昇および淡水によって安定した成層を行ない, これが秋から冬季にかけて気温の降下とともに上層水温が低下し密度を増加して反転する。このとき降下反転し得る水層は表層水の塩分濃度に関係する。

#### 湖内溶存酸素分布の

季節的变化は図 7 のようであり, 8~11 月に貧酸素水が上層まで発達する。このため折角の養殖魚を死亡させてしまう。いまこの湖の漁場としての利用水深を  $10 \text{ m}$  とし, 溶存酸素の限界濃度を  $4.0 \text{ cc}/\ell$  として, 溶存酸素に富む外海水の導入を考えよう。このことは, 逆に底層貧酸素水を排除して湾口から外海水を入れた方が能率的である。

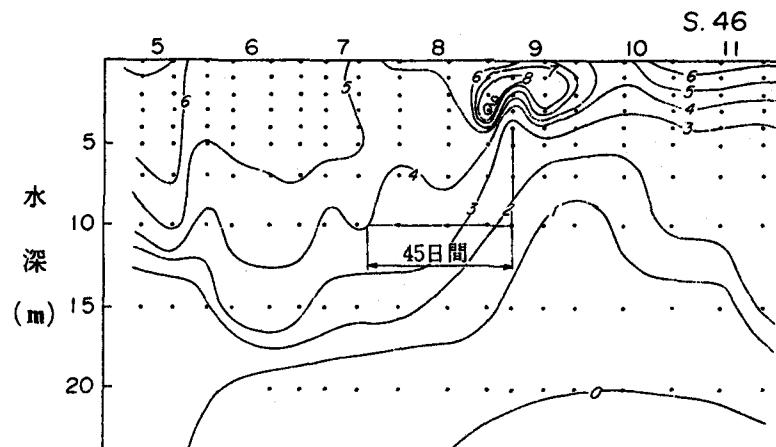


図 7 DO の周年変化

昭和 46 年の DO の周年変化図 (図 7) において DO  $4.0 \text{ cc}/\ell$  の分布曲線を  $10.0 \text{ m}$  以深に低下させるためには,

$$\frac{(4.0 - 3.5) \times 0.5 + (4.0 - 2.5) \times 5.0 + (4.0 - 1.75) \times 1.5}{0.5 + 5.0 + 1.5} = 1.68 \text{ cc}/\ell$$

の DO を  $h = 7.0 \text{ m}$  ( $10.0 - 3.0$ ) の水柱に補給しなければならない。一方補給された DO は湖内において消費されるが, その割合は,

$$\frac{dC}{dt} = -KC \quad (\text{d}t \text{ は日単位}) \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

で与えられ,  $K$  の値は水深によって異なるが, 一応水深  $10 \text{ m}$  を利用水深とするので, この水深での  $K$  を実測すると,

$$K = 0.08$$

となる。また  $C$  の値は外海水の DO を  $C_0 = 6.0 \text{ cc}/\ell$  として, これを用いると,

$$0.08 \times 6.0 = 0.48 \text{ (cc/l/day)}$$

が1日当たり消費される。

従って排除すべき水量は、水面積  $A = 0.95 \times 10^6 \text{ m}^2$  として

$$7.0 \times 0.95 \times 10^6 \times \frac{(1.68 + 0.48)}{6.0} = 2.394 \times 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$$

またポンプ容量は上記の量を何日で排除するかによってきまるが、利用水深10m層のDOが4.0cc/l以下になり始める日(7月5日)から水質が最悪になる8月20日までの45日間で考えると、

$$\frac{2.394 \times 10^6}{45 \times 8.64 \times 10^4} = 0.62 \text{ (m}^3/\text{sec})$$

であり、わずか620l/secのポンプで足りる。

さて、このようにして決定した水は底層汚水のみを排除するもので、表層水を連行しないための条件は次のようになる。

## 2) 底層水取水に関する水理学的考察

境界層をはさんで密度  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  の流体の成層を考える場合、境界層よりある距離  $h_s$  だけ下方に設置した取水パイプから下層水を取水する場合、取水流速、 $h_s$  および上下層の密度差  $\Delta\rho (= \rho_2 - \rho_1)$  のいかんによっては、上層水を連行することが起こる。

連行が生じた状態での境界層の形状を2次元的に考えると、吸込口から十分遠い地点で水底より  $h_s$  の高さにある境界層が吸込口では  $h_s - h_{sc}$  に低下している。一種の内部段波であると考えて以下のように取り扱う。

### 2次元の場合

検査面I, IIについて力のつり合いを考えると、

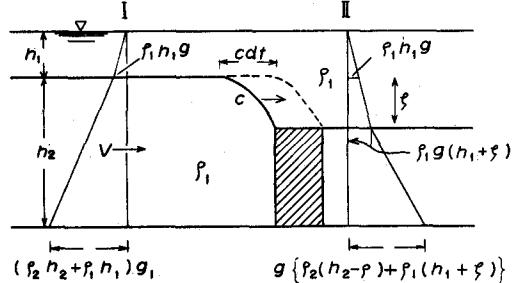


図8 内部段波模式図

$$F = \frac{h_2}{2} (2\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) g - \frac{h_2 - \xi}{2} \left[ 2\rho_1(h_1 + \xi) + \rho_2(h_2 - \xi) \right] g$$

$$-\frac{\xi}{2} \left[ \rho_1 h_1 + \rho_1(h_1 + \xi) \right] g = \frac{\xi g}{2} (\rho_2 - \rho_1)(2h_2 - \xi) \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

運動量の増加は

$$F dt = \rho_2(h_2 - \xi) C dt V \quad \dots \dots \dots \quad (22)$$

また連続条件から

$$V h_2 = C \xi \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

式(23)より、

$$C = \frac{V h_2}{\xi} \quad \dots \dots \dots \quad (24)$$

したがって式(22)に式(24)および(23)を代入すると、

$$\frac{g \xi}{2} (\rho_2 - \rho_1)(2h_2 - \xi) = \rho_2(h_2 - \xi) \frac{V^2 h_2}{\xi} \quad \dots \dots \dots \quad (25)$$

ゆえに、

$$\left. \begin{array}{l} V = \xi \sqrt{\frac{\varepsilon g(2h_2 - \zeta)}{2h_2(h_2 - \zeta)}} \\ C = h_2 \sqrt{\frac{\varepsilon g(2h_2 - \zeta)}{2h_2(h_2 - \zeta)}} \\ \xi = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \end{array} \right\} \quad (26)$$

ただし

限界吸込深を  $h_{sc}$ 、そのときの波速および流速を  $C_c$ ,  $V_c$  とすれば、 $\zeta = h_{sc}$  とおいて

$$\left. \begin{array}{l} C_c = h_2 \sqrt{\frac{\varepsilon g(2h_2 - h_{sc})}{2h_2(h_2 - h_{sc})}} \\ V_c = h_{sc} \sqrt{\frac{\varepsilon g(2h_2 - h_{sc})}{2h_2(h_2 - h_{sc})}} \end{array} \right\} \quad (27)$$

このとき吸込量を  $q_c$  とすれば

$$q_c = C_c h_{sc} = V_c h_2$$

したがって次式を得る。

$$q_c = h_2 h_{sc} \sqrt{\frac{\varepsilon g(2h_2 - h_{sc})}{2h_2(h_2 - h_{sc})}} \quad (28)$$

式(28)は吸込口が水底付近にあるような場合には、分母がゼロになって発散し適応できない。以上における取扱いでは底面摩擦がゼロと考えたが実際には吸込口付近の底面摩擦が影響して流速の鉛直分布形が以上の取扱いと異なってくる。その流速の鉛直分布の平均化における効果を、自由水面段波と同じように考えて修正すると式(27)および式(28)はそれぞれ次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} C_c = h_2 \sqrt{\frac{\varepsilon g(2h_2 - h_{sc})}{2h_2(h_2 - \eta h_{sc})}} \\ V_c = h_{sc} \sqrt{\frac{\varepsilon g(2h_2 - h_{sc})}{2h_2(h_2 - \eta h_{sc})}} \end{array} \right\} \quad (27)'$$

$$q_c = h_2 h_{sc} \sqrt{\frac{\varepsilon g(2h_2 - h_{sc})}{2h_2(h_2 - \eta h_{sc})}} \quad (28)'$$

ただし修正係数  $\eta$  は

$$\eta = 0.82 + 0.6 \frac{h_2 - h_{sc}}{h_2} \left( 0 < \frac{h_2 - h_{sc}}{h_2} \leq 0.3 \right)$$

$$\eta = 1 \left( 0.3 < \frac{h_2 - h_{sc}}{h_2} \right)$$

これを  $h_1 = h_2$  の場合について数値解で求めた Huber の結果 ( $V_c = 1.66 \sqrt{\varepsilon g h_{sc}}$  としている) と比較する。このとき  $\eta = 0.82$  であるので

式(27)' から

$$\left. \begin{aligned} V_c &= h_{sc} \sqrt{\frac{\epsilon g h_{sc}}{2h_{sc}^2(1-0.82)}} \\ &= 1.66 \sqrt{\epsilon g h_{sc}} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

となる。

### 3次元の場合

3次元の場合にも同様の論法で連行の開始するとき次の式が成立つ。

$$\begin{aligned} q_c &= 2\pi n h_2 h_{sc} \left[ \frac{(\pi/2 - 1)n h_{sc} \rho_1 g}{2 \rho_2 h_2 (h_2 - h_{sc})} \left\{ h_2 \left( 2h_1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} h_2 \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - nh_1 h_{sc} + n^2 h_{sc}^2 \left( \frac{\pi}{2} - \frac{5}{3} \right) \right\} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} v_c &= \frac{8n h_2 h_{sc}}{\phi^2} \left[ \frac{(\pi/2 - 1)n h_{sc} \rho_1 g}{2 \rho_2 h_2 (h_2 - h_{sc})} \left\{ h_2 \left( 2h_1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} h_2 \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - nh_1 h_{sc} + n^2 h_{sc}^2 \left( \frac{\pi}{2} - \frac{5}{3} \right) \right\} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \frac{v_c}{\sqrt{\epsilon g h_{sc}}} &= 8n \frac{h_2}{\phi} \frac{h_{sc}}{\phi} \left[ \frac{(\pi/2 - 1)n(1/\epsilon - 1)}{2(1 - h_{sc}/h_2)} \left\{ \left( 2 \frac{h_1}{h_2} + \frac{1}{1-\epsilon} \right) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - n \frac{h_1}{h_2} \frac{h_{sc}}{h_2} + n^2 \left( \frac{h_{sc}}{h_2} \right)^2 \left( \frac{\pi}{2} - \frac{5}{3} \right) \right\} \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (32)$$

となる。ここに  $n$  は吸込点の内部波の曲率に  
関係し図 9 による値。

### (5) 干潟浅海域の海水交換

一様な平面的な流れの場に局部的にミオを掘り、この部の流速、流量を増加させ、一様な平面流を破壊して、水質の改良保全を計る工法であり、その効果を知るには数理模型による数値計算、あるいは水理模型実験などによるが、大よそ次式で計算される。

#### 一様水深 $d$ の水域に深さ $D$ 、幅 $B$ の作れい

を行なったとき、作れい位置の単位幅当たり流量  $q_a$  は、作れい線近傍の値  $q_b$  に対し (33) 式の流量比となる。ここに  $I_b$ 、 $I_a$  は作れい線およびその近傍の動水ユウ配であり普通両者は等しくとられる。

$$\frac{q_a}{q_b} = \left( \frac{n_b}{n_a} \right) \left( 1 + \frac{D}{d} \right)^{5/3} \left( \frac{I_a}{I_b} \right)^{1/2} \quad (33)$$

適用条件は、①式(33)からわかるように浅い水域であること、作れい前にも作れい線に沿って流れが存在することが必要である。②湾や湖の全域の水質改良を行なうときは、流況特性を考慮して動脈状に作れいする。このとき流入時流線と流出時流線が異なるようにして、湾奥部を含めた大きな循環流を作る。③全域改良ではなく、利用水域の増大を計るための局部改良の場合には、広く水域に分散していた流量を局所的に集中して利用する。作れい配置は、地形的に流れの寄る位置に数条のミオを掘ってその付近

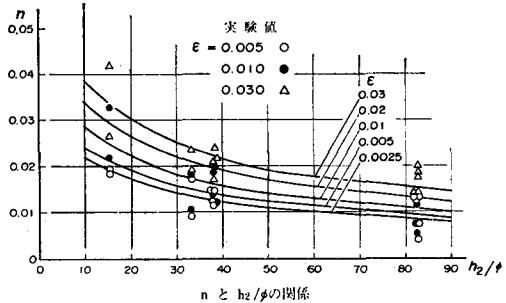


図 9  $n$  と  $h_2/\phi$  の関係

の水域を利用する。

#### (6) 海底砂床内の海水交換

砂浜海床は貝類、甲殻類、ヒラメ、カレイ、など底棲生物環境であり、砂床内の海水交換はこれら生物の直接生息と硅藻などの餌料生物環境あるいは底質汚染の重要因素となる。干潟域は干出、冠水の繰返しによって地下浸透が生じるが、潮感帶以外の海底では波の進行による非定常浸透および砂の移動による水の交換である。干潟域の浸透については多くの教科書に書いてある。ここでは波による浸透を調べる。

非定常浸透流の基礎式は水、砂体、間隙の圧縮性を考慮して求める。

まず、微小六面体内に単位時間に留まる浸透流の質量は、

$$-\left\{\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z}\right\} \delta_x \cdot \delta_y \cdot \delta_z \quad \dots \quad (34)$$

となる。一方、この間にこの六面体内で増加する質量は

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \lambda \cdot \delta_x \cdot \delta_y \cdot \delta_z) \\ &= \rho \cdot \lambda \cdot \delta_x \cdot \delta_y \cdot \delta_z \left\{ \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial t} + \frac{1}{\delta_x} \frac{\partial \delta_x}{\partial t} + \frac{1}{\delta_y} \frac{\partial \delta_y}{\partial t} + \frac{1}{\delta_z} \frac{\partial \delta_z}{\partial t} \right\} \end{aligned} \quad \dots \quad (35)$$

である。ここに、 $\rho$ ；水の密度、 $(u, v, w)$ ； $(x, y, z)$ 方向の流速、 $\lambda$ ；空げき率、 $(\delta_x, \delta_y, \delta_z)$ ；微小六面体の $(x, y, z)$ 方向の長さである。

次に、圧縮応力と圧縮率の関係は定義から

$$\begin{aligned} \frac{d(\delta_x)}{\delta_x} &= \alpha_x \cdot d\sigma_x \\ \text{あるいは} \\ \frac{\partial(\delta_x)}{\partial t} &= \alpha_x \cdot \delta_x \cdot \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} \quad \text{etc.} \end{aligned} \quad \left| \quad \dots \quad (36) \right.$$

となる。

ここに $(\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$ ；圧縮応力、 $(\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$ ；圧縮率である。

ところが浸透層の構成材そのものの圧縮性は浸透水や層の空げき率のそれに比して無視されるから式(36)を用いて、

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} = (1 - \lambda) \left\{ \alpha_x \cdot \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} + \alpha_y \cdot \frac{\partial \sigma_y}{\partial t} + \alpha_z \cdot \frac{\partial \sigma_z}{\partial t} \right\} \quad \dots \quad (37)$$

が得られる。

一方、応力とひずみのつり合いから平衡状態では、

$$\sigma_x = \rho \Omega + p \quad \text{あるいは} \quad \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t}, \quad \text{etc.} \quad \dots \quad (38)$$

である。ここに、 $\Omega$ は重力ポテンシャルで重力ベクトルを $F$ とすれば、

$$\left. \begin{array}{l} F_x = F_y = 0 \\ F_z = \frac{\partial Q}{\partial z} = g = \text{const.} \end{array} \right\} \quad (39)$$

$g$  ; 重力加速度である。

次に、水の密度変化率は浸透水の圧縮率  $\beta$  を用いて

$$\frac{dp}{\rho} = \beta dp \text{ すなわち } \frac{\partial \rho}{\partial t} = \beta \cdot \rho \frac{\partial p}{\partial t} \quad (40)$$

となる。次に、圧力  $\rho$  を水頭  $h$  で示すと

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial(\rho gh)}{\partial t} = \frac{\rho g}{(1 - \beta \rho g h)} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (41)$$

となる。以上の結果をまとめて、質量保存則から式(34), (35)が等しいとおき、砂層を完全弾性体として体積弾性係数を  $a_v$  とすれば

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = \left( \beta + \frac{a_v}{\lambda} \right) \frac{\rho^2 \lambda g}{(1 - \beta \rho g h)} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (42)$$

となる。ここに、 $a_v/3 = a_x = a_y = a_z$  である。

次に、非定常浸透流の運動方程式は抵抗則を定常運動における Darcy 則にしたがうと考え、加速度項を省略すれば、

$$\left. \begin{array}{l} u = -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ v = -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ w = -K_z \left( -1 + \frac{\partial h}{\partial z} \right) \end{array} \right\} \quad (43)$$

となる。式(42)に式(43)を代入して整理し、 $K = K_x = K_y = K_z$  とすれば

$$\begin{aligned} & \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] + \beta \rho g \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial z} \right)^2 \right] \\ &= \frac{\rho \lambda g (\beta + a_v/\lambda)}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \end{aligned} \quad (44)$$

となる。式(44)において  $(\beta \rho g)$  は  $10^{-5}$  のオーダーであるから、左辺第2項は第1項に対し省略できる。次に右辺は透水係数  $K$  が小さい場合には省略できないオーダーとなる。すなわち、水を非圧縮性流体と考えることができなくなる。

以上の結果から式(44)を変形して、非定常浸透流の基礎式は

$$\frac{\partial h}{\partial t} = K^2 \left[ \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right] \quad (45)$$

となる。ここに

$$K^2 = \frac{K}{\rho \cdot \lambda \cdot g (\beta + a_v/\lambda)} \quad (46)$$

である。式(45)を2次元の場合について、砂床表面上を正弦波形の圧力が $x$ の正の方向に進行するとき、

$$\frac{\partial h_p}{\partial t} = K^2 \left\{ \frac{\partial^2 h_p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_p}{\partial z^2} \right\} \quad (47)$$

となる。ここに、 $h_p$ ；変動圧力である。式(47)を、

$$\left. \begin{array}{l} h_p|_{z=0} = h_0 \cdot \sin(\delta_L x - \sigma t) \\ h_p|_{z=-\infty} = 0 \end{array} \right\} \quad (48)$$

の境界条件で解けば

$$h_p = h_0 e^{-mz'} \sin(\delta_L x - \sigma t + n z') \quad (49)$$

となる。ここに、 $\delta_L = 2\pi/L$ ， $\sigma = 2\pi/T$ ， $L$ =波長， $T$ =周期， $h_0$ =砂床面上の波压， $Z' = -Z$ ，

$$\left. \begin{array}{l} m = \frac{1}{2K} \sqrt{2\delta_L^2 \cdot K^2 + 2\sqrt{K^4 \delta_L^4 + \sigma^2}} \\ n = \frac{\sigma}{K \sqrt{2\delta_L^2 \cdot K^2 + 2\sqrt{K^4 \delta_L^4 + \sigma^2}}} \end{array} \right\} \quad (50)$$

である。

砂床内における水粒子の軌道は砂床内における水粒子の移動距離を波動運動における軌道の計算と同じように考える。いま、砂床内の流速を Darcy 則にしたがうとする。次に水粒子の軌道を静止座標 $(\bar{x}, \bar{z}')$ を中心に $(X, Z')$ の変位にあるとすれば、

$$x = \bar{x} + X, \quad z = \bar{z}' + Z' \quad (51)$$

となる。ここで $X, Z'$ が波長 $L$ に比べて十分に小さいと考えれば、第1次近似として

$$\left. \begin{array}{l} u' = \frac{dx}{dt} = \frac{dX}{dt} \\ w' = \frac{dz'}{dt} = \frac{dZ'}{dt} \end{array} \right\} \quad (52)$$

となる。ここに、 $u' = u/\lambda$ ， $w' = w/\lambda$ である。

式(49)を用いて式(52)を解くと、

$$Z'^2 - \frac{2n}{\delta_L} XZ' + \left( \frac{m^2 + n^2}{\delta_L^2} \right) \cdot X^2 = a^2 m^2 \quad (53)$$

となる。ここに

$$a = \frac{K \cdot h_0}{\sigma \cdot \lambda} e^{-mz'} \quad (54)$$

である。式(53)は $(x, z')$ 座標に対して $\theta$ だけ回転させた軸 $(\eta, \xi)$ を長軸と短軸にもつだ円であるので座標軸をだ円の軸と一致するように回転させねば、

$$\frac{\eta^2}{l^2} + \frac{\xi^2}{s^2} = 1 \quad (55)$$

となる。ここに

$$\left. \begin{aligned} \tan\theta &= -\frac{\delta_L^2 - m^2 - n^2}{2\delta_L \cdot n} + \sqrt{\left( \frac{\delta_L^2 - m^2 - n^2}{2\delta_L \cdot n} \right) + 1} \\ l^2 &= \frac{a^2 \cdot m^2 \cdot \delta_L^2 (1 + \tan^2 \theta)}{(\delta_L \cdot \tan\theta - n)^2 + m^2} \\ s^2 &= \frac{a^2 \cdot m^2 \cdot \delta_L^2 (1 + \tan^2 \theta)}{(\delta_L + n \cdot \tan\theta) + m^2 \cdot \tan^2 \theta} \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

である。よって砂床内の水粒子は  $l$ ,  $s$  を軸として、軸が ( $x$ ,  $z'$ ) から  $\theta$  回転しただ円運動をする。砂床表面での  $l$ ,  $s$  の値の一例を図 10 に示す。これから透水係数の小さい砂の場合、波の周期の短かい場合には、波による砂床内の海水交換は余り行なわれず、むしろ漂砂移動などによる海水交換が大きい。

### 3. 増殖漁場の開発

増殖漁業は人工種苗（稚仔、胞子など）の放流や、天然種苗の保護育成による水産資源の培養によって天然の海の資源の増殖を図るもので人工干潟、海藻林造成、人工魚礁、その他の開発が行なわれている。ここに若干の事例を紹介する。

#### (1) 人工干潟

干潟は水産生物にとって重要な再生産の場である。その干潟における水産資源再生産の機構を明らかにし、高能率の再生産機構をもつ干潟に改善したものが人工干潟である。干潟の水産資源再生産に果たす役割りは天然資源におけるものと、人工種苗におけるものとある。ここでは人工種苗（クルマエビ）を天然へ高能率に資源添加するための干潟構造を明らかにし、このような条件をそなえた人工干潟造成について述べる。これは浅海別枠研究「浅海域における増養殖漁場の開発に関する総合研究」の一環として南西水研、山口県水試、瀬戸内海栽培協会他関係機関と協力して行なわれたものである。

#### 1) クルマエビ稚仔の人工生産

クルマエビ稚仔の人工生産は、体長 10 mm サイズのもので現在億尾の単位で瀬戸内海栽培協会を始めとして県水試などで行なわれている。このサイズまでは水槽の中で浮遊状態で生産され 1 m<sup>3</sup> 当たり 1 万尾を収容できる。その後は底棲生活に入ることが必要なので 1 m<sup>3</sup> 当たり 300 尾程度となり、生産施設が立体的水槽から平面的な水槽へと変わり、非常に大きな施設が必要となる。従ってクルマエビ稚仔の天然への資源添加は 10 mm サイズで行なうことが望まれる。他方、稚エビはほぼ 30 mm 程度になると環境の変化や、外敵から身を守ることが十分となる。このような稚エビの生産行程から体長 10 mm ~ 30 mm までの間の管理をどのように行なうかが問題となる。

従来このサイズの放流は天然干潟で網囲い給餌で 2 週間程度育成し、その後囲いをといて天然へ添加する方式と、天然干潟に干潮時可及的に薄播きする方式がある。前者では給餌、囲い網内の食害生物駆除、波に対する網の保持などに問題がある。後者では放流後一切の管理がいらないが、直後の減耗がは

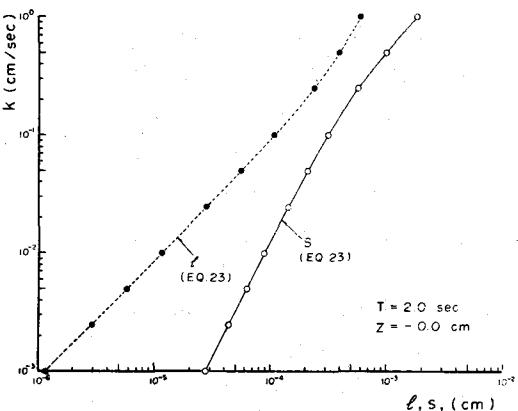


図 10 砂層内の水粒子の移動距離

げしく、放流1日後には1～20%程度になる。これらの問題を克服し安定した資源添加により天然の海での計画生産を行なおうというのが人工干潟のねらいである。すなわち、初期減耗が何によって起こるか、天然条件の変化の中で安定した高生産を計るための干潟環境はどのようなものであるかを研究し、このような干潟を造成するのである。

## 2) 人工干潟におけるクルマエビ稚仔放流環境

昭和47、48年度に100m×60mの人工干潟を山口県秋穂町大海湾小浜地先に造成した。これは45年46年度に行なった愛媛県西条地先、福岡県豊前海裏島地先の天然干潟における放流実験結果から、クルマエビ放流稚仔の初期減耗におよぼす干潟環境条件についての推測、仮説をより明確にする目的で作られた。人工干潟構造は干潟面と潮位高、底質の性状に起因する各因子の稚エビに及ぼす影響を知るために干潟標高として小潮平均高潮位、平均潮位、小潮平均干潮位の三種、底質に砂区と泥混り区、これに対照区を考慮して12の実験区を作った。上段では干潮時にタイドプール（1～5cm程度の水深で一見水田のような感じの干潟）を作るためにポンプ給水を行なっている。

この干潟で2ヶ年間放流および環境実験を行ない、47年度には100尾/m<sup>2</sup>の密度で播殖歩留り80～90%の高密度、高率歩留りの条件を見出し、48年度では播殖定着エビが分散過程での減耗に関する研究を行ない、減耗が極めて少なく有効な資源として天然に添加されることを見出した。

高密度、高歩留りの干潟環境については地盤標高、底質中央粒径、間隙率、含泥率、附着硅藻細胞数、餌料生物、食害生物その他を含め約40の因子について要因分析し、次の要約を得ている。播殖歩留り（放流1日後の生残率）について干潟標高は平均潮位以上で小潮満潮位程度がよく、底質は砂で含泥率（粒径0.074mm以下のもの）が低い程よく3%以下であること、餌料環境指標として附着硅藻細胞数は $3 \times 10^5 / 12.25 \text{ cc}$ 以上あることが良く、餌料生物特に多毛類項が多いことが望ましい。全硫化物は0.04mg/g以下でなければならない。CODは0.75mg/g以下が良い、浸透は浸入が良く浸出は望ましくなく、波による地盤変動量は（15mm以上）であってはならない、などがいえる。放流2週間後では上記の条件に付加して砂の間隙率が35%以上が良く、表面硬度は小さい方が良い。CODは若干上記より多くなり、2.0mg/g以下であればよい。また浸透水の浸出、浸入は関係なくなっている。

播殖エビの分散については、放流後5日間程度は場に対応すべく盛んに移植分散するが、その後はほぼ場の環境に応じて定着し、分布の形態は一定する。その後、稚エビの成長に従って単位面積当たりの尾数は減少し人工干潟外に出て行く。これは多分人工干潟の餌料環境に支配されて餌料を求めて分散すると考えられる。多分生態的に稚エビは成育するに従い体長に応じて深い所へ移動する性質があるといわれている。この性質からも分散の促進が考えられる。人工干潟は放流、中間育成のものであるから繰返し使用するためには、放流エビが野性化して自己防衛する能力をもてば早急に外に出すことが必要である。

この分散過程での減耗を見ると、放流直後に場を求めて盛んに動いている5日間にほとんど減耗していない。その後1ヶ月後までに干潟上のエビは約1/4に減少しているが、放流直後で減耗がほとんどないことと考え合せるとその後の減少は人工干潟外への有効な分散とみることができよう。

人工干潟の特色を要約すれば次のようになる。

- ① クルマエビ播殖稚仔の生残歩留りを80～90%（天然干潟では数%～十数%）とすることができる。
- ② 単位面積当たりの播殖定着尾数を100～150尾/m<sup>2</sup>（天然では1～10尾/m<sup>2</sup>）とすることができる。

- ③ 人工干潟の物理環境を管理すればよく、高度の生物学的知識を必要とせず、管理が容易である。
- ④ 防波堤などによる防災が十分であるため恒久的施設として安定したエビ資源の添加が可能である。
- ⑤ 沿岸海域におけるクルマエビの計画生産に一步近付けることができる。

## (2) 人工魚礁

人工魚礁は海底または海中に地形の変化を与えて、集魚を図る漁具として、あるいは増殖、培養を図る漁場改良造成として重要である。材料としては、投石、コンクリート魚礁、鋼製魚礁をはじめ古タイヤ、廃船、古自動車、電車などの廃物利用もある。図11にこれらを例示する。

魚礁に集まる生物は、まず魚礁部に貝、ゴカイ、エビなどのペントス（底棲生物）が生息し、これを摂餌するイシガレイ、マコガレイ、などが底面に棲み、次にここを棲所とする。メバル、カサゴ、クロダイ、などが魚礁間隙に生息する。魚礁の表面付近はカワハギなどが遊泳し、魚礁表面の付着生物を索餌する。中層部にはアジ、ブリ、カンパチ、ボラ、スズキなどが泳ぎ、更に表層は食肉性の大型魚（ブリなど）が一時的に滞在する。

魚礁の集魚機構はいろいろな立場から検討されているが、魚の立場からは食害生物からのカクレ場、餌場、産卵の場などの生活上の必要性および遊び場、強流に流されないための休み場、回遊経路中の立寄り場など遊泳生活上の必要性を満足しているために魚礁に集まるとされている。これを物理環境的に考えると魚礁の下流に発生する渦流・流影の存在と魚礁周辺、間隙の明暗など幾何学的陰影となる。これらは底棲生物の着生を促がし藻類の発生、流れ藻の漂着など生物環境改善となり、またプランクトンなどの餌料生物を流影に滞留させて餌場としての環境を作り、他方渦流や魚礁は索餌と休養の調和した場を魚族に与えたものである。

現在では集魚効果のみでなく、魚礁を積極的に稚仔育成、培養の場として増殖の重要な手段としての活用が研究されている。

人工魚礁についての若干の工学上の問題を述べる。

### 1) 人工魚礁による渦流、流影

一様流中に魚礁の置かれている場合の後流について、佐藤ら<sup>4)</sup>は回流水槽中に縮少模型を用いて流れの変化を測定している。測定は細いガラス管から色流を流出させ、色液の変化によって、a級の流れ：一般流と区別できない状態、b級の流れ：色液が出口からすぐにぼかし状に広がり、乱されていることは判然とするが流れは下流に向いている状態、c級の流れ：流速がゼロかまたは逆に流れている状態の三通りに区分し、各部分について目視判断してスケッチを行ない、表1を得た。

海底に板または箱型の置かれた場合の流影をポテンシャル論によって議論することができる。その結果をあげる。

ラム（Lamb）は板に流れがあたる場合の流影を、流影境界を自由流線としてポテンシャル理論を用いてといた。正田らは、この解における自由流線境界を粘性流体として修正し、流影規模として高さ、長さをそれぞれ板高の約1.8倍および1.5倍を得ている。

一様流中に魚礁単体あるいは魚礁群があって、これによって効果的に渦流域が発生するための魚礁の

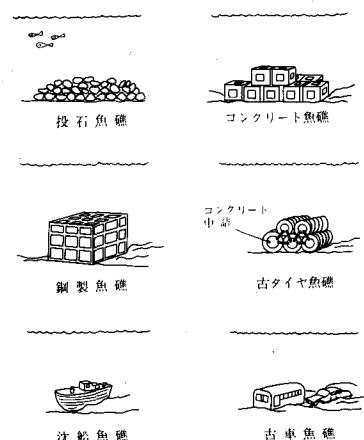


図11 魚礁の種類

表 1 魚礁の流体力学的陰影

種類		模型流速 cm/sec	c級の陰影 魚礁1ヶの外接 体積の倍数	b級の陰影 魚礁1ヶの外接 体積の倍数	b級の陰影の長さ 魚礁1ヶの長さの 倍数
円筒型	2段積	1.5	1.0	2.6	4.3
		3.5	7.5(1個)	4.5(1個)	4.8
		6.0	12.5(換算値)	4.7(換算値)	4.5
	独立 (間隔1.45倍以上)	1.5	6	1.9	2.5
		3.3	1.0	2.8	3.0
		5.5	1.0	3.7	3.6
	間隔0.97倍	1.4	6.0	5.2	5.1
		3.5	9.5	6.6	5.1
		6.0	1.0	9.0	5.4
四角型	$\theta = 0$	2.0	5.5	3.7	2.8
		4.0	1.1	5.2	3.7
		6.0	11.5	6.4	4.8
	$\theta = 22.5^\circ$	1.8	7.1	3.4	2.1
		3.8	7.4	4.5	2.4
		6.0	8.3	4.5	2.4
	$\theta = 45^\circ$	2.0	9.0	3.8	2.7
		4.0	1.3	4.0	1.8
		6.0	1.6	5.1	2.7

高さと、流速の関係はほぼ次の条件を満たすことが必要である。

$$Dv \geq 100 \quad \dots \dots \dots \quad (57)$$

ここに、 $D$ ；魚礁または魚礁群の高さ(cm)， $v$ ；流速(cm/sec)。

一般に、

$$Dv = 1000 \quad \dots \dots \dots \quad (58)$$

程度にとることが望ましい。

注) ハク離の条件  $R_e > 10^4 \sim 10^6$

乱れの発達する条件  $R_e > 10^4$

ここに、 $R_e$ はレイノルズ数と呼ばれ、

$$R_e = \frac{Dv}{\nu}, \quad \nu ; \text{動粘性係数} (= 0.01 C, G, S)$$

波による渦流・流影

波によって魚礁の前後に渦流域を生じる。その大きさは(59)式で計算される。この渦が潮流などで下流に運ばれる。

$$l' = \frac{\cosh 2\pi D/L}{\sinh 2\pi h/L} \cdot H \quad \dots \dots \dots \quad (59)$$

ここに、 $l'$ ；うずの長径， $H$ ；波高， $D$ ；魚礁の高さ， $L$ ；波長， $h$ ；水深

## 2) 魚礁の安定

### a 流れに対する安定

魚礁に働く流れの力は(60)式で求められる。

$$F = C_d A w_0 \frac{v^2}{2g} \quad \dots \dots \dots \quad (60)$$

ここに,  $A$ ; 流線方向の正射影面積,  $w_0$ ; 海水の単位容積重量,  $v$ ; 流速,  $C_d$  抗力係数で次の値をとる。

魚礁の部材が円柱で構成されているとき  $C_d = 1$

魚礁の部材が角柱で構成されているとき  $C_d = 2$

魚礁の部材が板で構成されているとき  $C_d = 2$

魚礁全体に対し佐藤は  $C_d$  をレイノルズ数の関係で示したが、最大値として次の値を得ている。

円筒魚礁のとき  $C_d = 1.4$ , 角型魚礁のとき  $C_d = 1.7$ 。

基盤が洗掘を受けない場合の安定は、魚礁が滑動を生じないための重さ  $W$  として、

$$W > \frac{F}{\mu \left( \frac{\sigma}{\rho} - 1 \right)} \quad \dots \dots \dots \quad (61)$$

ここに,  $\mu$ ; 魚礁と基盤の摩擦係数,  $\sigma$ ,  $\rho$ ; 魚礁材料, 海水の密度。

魚礁が転倒しないための条件は

$$W > \frac{F}{\mu - 1} \cdot \frac{l_A}{l_v} \quad \dots \dots \dots \quad (62)$$

ここに  $l_A$ ; 正射影面  $A$  の図心までの高さ,  $l_v$ ; 魚礁重心の底面への射影点から最も近い稜線までの距離。

基盤が砂礫で洗掘を受ける場合には魚礁は洗掘によって安定を失ない転倒、滑動を生ずる。これについて佐藤は、底面に置かれたブロックが動き始める流速を回流水槽を用いて実験し、次の理論式を得た。

$$v_c = K_1 \sqrt{\frac{g}{\sigma}} \cdot \sqrt{(\sigma - \rho) l} \quad \dots \dots \dots \quad (63)$$

$v_c$  は動き始めの流速,  $\rho$ ,  $\sigma$  は水、魚礁ブロックの密度,  $g$  は重力加速度,  $l$  は魚礁ブロックの代表的長さ,  $K_1$  は無次元係数で  $C$ ,  $G$ ,  $S$  単位系では第 2 表の値となる。

なお、円筒型、車輪型については、正置した場合と、一度横転した場合とでは、後者は  $K$  が非常に小さくなることを指摘して 四角型 I ; 底辺が流れと  $45^\circ$  四角型 II ; 底辺が流れと  $90^\circ$  いる。

魚礁が砂堆、あるいは礫、転石帶上に設置される場合に魚礁の安定を支配する条件として底質の移動がある。潮流についての移動限界流速は求められていない。これを

河川におけるものを拡張適用するならば、 $u^* = \sqrt{f} u_b$  とし、 $f = 0.003 \sim 0.02$  を用いて大略の検討が行なわれる。

### b 波に対する安定

魚礁に働く最大波力は式(64)で求める。

$$F = C_d A w_0 \frac{u_m^2}{2g} + \frac{2\pi^2 C_m^2 V^2 w_0}{C_d A g T^2} \quad \dots \dots \dots \quad (64)$$

表 2

型	$K_1$
四角型 I	0.42
四角型 II	0.48
円筒型	0.48
三角型	0.32
車輪型	0.51

$$u_m = \frac{\pi K H}{T} \quad (65)$$

ここに,  $C_D$ ,  $A$ ,  $w_0$ ; 前出,  $V$ ; 魚礁の実容積,  $T$ ; 波の周期,  $H$ ; 波高,  $K$ ; 図12による値,  $C_M$ ; 質量係数で次の値をとる。

魚礁部材が円柱で構成されているとき  $C_M = 2$

魚礁部材が角柱で構成されているとき  $C_M = 2$

魚礁部材が板で構成されているとき  $C_M = 1$

碎波の場合の海中波力は十分明らかでないが, (66) 式を参考にする。

$$F = \frac{3}{8} C_D A w_0 H_b \quad (66)$$

ここに,  $H_b$ ; 碎波高 ( $\approx 0.76 h_b$ ),  $h_b$ ; 碎波水深。

注) (66)式は中村が段波について求めた式である。

### 3) 投入落下時の着床衝撃

#### a 落下速度

魚礁ブロックが水中落下する場合の終速度は魚礁の水中重量と水の抗力が平衡するとして, (67)式で示される。

$$v_c = \sqrt{\frac{2gW(\sigma/\rho - 1)}{C_D A w_0}} \quad (67)$$

ここに,  $v_c$ ; 水中落下速度,  $W$ ; 魚礁ブロックの空中重量,  $A$ ; 魚礁ブロックの落下方向に直角な正射影面積,  $\sigma$ ,  $\rho$ ; 魚礁ブロック材, 海水の密度,  $w_0$ ; 海水の単位容積重量,  $C_D$ ; 抗力係数。

佐藤は, 魚礁の代表的長さを  $\ell$  として(67)式を(68)式で示し,  $K_2$  を実験によって求めている。

$$v_c = K_2 \sqrt{\frac{g}{\sigma}} \cdot \sqrt{(\sigma - \rho) \ell} \quad (68)$$

表 3

型	$K_2$	型	$K_2$	型	$K_2$
四 角	0.80 0.58	三 角	0.47 0.56	逆 三 角	0.64 0.50
円 筒	0.93 0.84	車 輪	1.19 0.71	上 段 最 大 値	
				下 段 最 小 値	

#### b 終速度に達する水深

魚礁ブロックが水中を落下し始めて終速度に達する水深  $h_z$  は次のようになる。飯倉らは, 海水の質量抵抗を省略した運動方程式から,  $t$  秒後の流速  $v$  を

$$v = v_c \tanh\left(\frac{gt}{v_c}\right) \quad (69)$$

で支えた。従って、 $v$ が終速度の 0.9 倍になる水深および 0.99 倍となる水深は次のようになる。

$$\left. \begin{array}{l} v = 0.9 v_c \text{ となる深さ } h_z = 0.384 \frac{v_c^2}{g} \\ v = 0.99 v_c \text{ となる深さ } h_z = 0.973 \frac{v_c^2}{g} \end{array} \right\} \quad (70)$$

### c 着床衝撃

着床衝撃力は、魚礁ブロック重、衝突時の速度、基盤の反力係数、衝突面の形状によって定まる。この衝撃力を計算するための実用式は今後の研究にまたなければならない。水中衝撃を空気中で実験するための換算落下高さ  $S$  は次のような。

魚礁の排除水容積（実容積） $V$ 、落下速度  $v_c$  のときこの魚礁が衝突静止するときに失う見掛け質量によるエネルギーは、

$$C_M \rho V \frac{v_c}{\Delta t} \cdot \frac{v_c \Delta t}{2} = \frac{C_M \rho V v_c^2}{2}$$

魚礁のもつ運動エネルギーは

$$\frac{\sigma V v_c^2}{2}$$

両エネルギーを空中落下高  $S$  で与えると(71)式を得る。

$$S = \left(1 + \frac{C_M \rho}{\sigma}\right) \frac{v_c^2}{2g} \quad (71)$$

他方、水中では衝突時に衝突面の水が粘性によって緩和作用を行ない、衝撃圧の軽減に役立つ。

着床時に発生する外力は、魚礁の海中落下速度  $v_c$  が着床時  $\Delta t$  時間で静止するとして、このとき魚礁の質量は  $(\sigma + C_M \rho)$ 、加速度  $v_c / \Delta t$ 、であり見掛けの重量  $\bar{\sigma}$  を(72)式で与えればよい。

$$\bar{\sigma} = \left(1 + \frac{1}{g} \cdot \frac{v_c}{\Delta t}\right) (\sigma + C_M \rho) \quad (72)$$

すなわち単位重量が  $\bar{\sigma}$  の材料の物体に加わる重力を外力として応力計算をすればよい。

#### 4) 浮き魚における魚礁規模と配置

魚礁規模を断面積  $S$  で示したとき魚群映像の断面積  $G$  は藤井によれば、

$$\left. \begin{array}{l} \text{天然礁} \quad G_N = 2.11 + 5.76 S - 0.142 S^2 \\ \text{人工魚礁} \quad G_A = 0.33 + 1.800 S - 4.483 S^2 \end{array} \right\} \quad (73)$$

ここに  $G$ 、 $S$  の単位は  $1,000 \text{ m}^2$  である。

この式を用いて若干の推算を行なうと次のようなことがいえる。

人工魚礁規模は魚礁断面積で  $200 \sim 2500 \text{ m}^2$ 、魚礁容積で  $2,500 \sim 13,000 \text{ m}^3$  の範囲で天然礁より優り、断面積  $1,400 \text{ m}^2$ 、容積  $5,000 \text{ m}^3$  のとき最も効果的である。この規模は単体（1個の魚礁）または群体魚礁（単体が1カ所に集積された魚礁）が相互作用を及ぼし合う魚礁集落としての規模であり、1つの単体または群体の規模は  $2,500 \text{ m}^3$  以上が望ましい。魚礁集落は、単体または群体魚礁が散在し、単位漁場を形成する魚礁配置で魚礁距離は相互干渉（相乗効果）距離より短かい配置にあるものである。

いま1つの魚礁規模を  $2,500 \text{ m}^3$  とすると、1つの集落は20個の魚礁群からなり、1つの魚礁の効果範囲は  $16,000 \text{ m}^2$  [  $(200+200)^2$  ] であるから、1魚礁集落は  $3,200,000 \text{ m}^2$  ( $= 320 h_a$ ) 程度

である。

このときの魚群の規模は断面 1 万 6 千 m<sup>2</sup>, 容積 200 万 m<sup>3</sup> となり, 魚種に応じて魚群中における魚の密度によって魚の総量を推算することができる。

魚礁集落を単位として魚礁群落が構成される。魚礁群落は, 魚礁集落が魚の資源量, 魚道, 魚具漁法, 操業船数などの条件で配置され, 渔場が形成されるもので, 群落の配置は各集落の集魚機能が個体群生態学的に独立であると想定されており, 集落間距離は周辺魚群の資源量, 回遊魚群の特性と漁具漁法, 可能漁獲努力(船数, 日数)によって定められる。

すなわち 1 つの魚礁集落の漁獲は他の集落の魚群に生態的な影響を与えないことが条件と考えられ, このような集落を順次操業して, いくつかの集落の漁業後に最初のものにもどれば最高の漁獲が得られることになる。

いくつの集落単位に操業が行なわれるかは, 漁獲後における魚群の再添加速度によって定まる。魚礁集落間の距離は各集落が独立するために魚の魚礁感知範囲 1.5 km の 2 倍の 3 km 以上とする。回遊魚群の場合には, 魚道に沿った回遊直径を  $D$  とすれば, 魚礁集落間の距離は  $D/\pi^2$  を目易とする。これは魚の遊泳速度を  $v_F$  とするとき, 1 循環に要する時間は,  $\pi D/(\alpha v_F)$  であり, 魚群重心の移動(これを魚道と呼ぶことにする)速度は  $\alpha v_F/\pi^3$  (黒木による) であるから, 魚群スパイラルの軌道上に集落が配置されるための集落間距離  $L_s$  は,

$$L_s = \frac{\pi D}{\alpha v_F} \cdot \frac{\alpha v_F}{\pi^3} = D/\pi^2 \geq 3 \text{ km} \quad \dots \dots \dots \quad (74)$$

となる。ここに  $\alpha$  は流れによる影響を示す係数 ( $\approx 1.0$ ) である。

魚礁群落の規模は, 漁獲態勢が十分の場合魚群の規模によって定まる。1 つの魚礁集落の魚群量を  $K$  とし, 直径  $D$  の魚群スパイラル中に存在する集落数を  $n$  とすると, 単位時間当たりの漁獲可能量は,  $n K \alpha v_F / (\pi D)$ , 魚群が魚礁群落(魚道に沿って長さ  $L_a$ ) を通過するに要する時間  $\pi^3 L_a / (\alpha v_F)$ , 魚群総量を  $W$  とすれば,

$$W = \frac{n K \alpha v_F}{\pi D} \cdot \frac{\pi^3 L_a}{\alpha v_F} = \frac{\pi^2 n K L_a}{D}$$
$$\therefore L_a = \frac{DW}{\pi^2 n K} \quad \dots \dots \dots \quad (75)$$

となる。ここに,  $n \leq \frac{\pi D}{4 A_s}$  ( $A_s$  は魚礁集落の漁獲有効面積上例では 320 ha),  $K = G_A^{3/2} d$  ( $d$  は単位容積海水中の魚の量) である。

魚道の変動のはげしい場合には, 魚礁集落に誘導魚礁を配置する。誘導魚礁距離は, 相互干渉距離より短かい配置(400 m 以下)とする。

以上によって回遊魚に対する単体・群体魚礁, 魚礁集落, 魚礁群落の規模, 配置を検討することができる。しかし, これらは実証的に精度をあげることが必要であり, 特に魚礁群落の構造については, 渔場論的に研究実証が必要であり, 今後につきが大きい。

#### 4. 増養殖施設

養殖の対象になる水産生物は, ノリ, ワカメなどの海藻類, エビ・カニなどの甲殻類, アワビ・真珠などの貝類, ウナギ・タイ・ハマチなどの魚類等で種類が多い。養殖施設はその生態的特性, 立地条件,

企業体の経済性によって種々様々であるが、基本的には藻類は海水の流れによる葉体への栄養塩の供給、魚介類は海水の交流による酸素供給ならびに代謝生産物の除去などで、施設の適正最大生産量をあげるために、水の交流を良くすることが重要である。

### (1) 水中構造物に働く力

水中の固定構築物に働く力は、水粒子の流速の2乗に比例する抗力と流速の時間変化、すなわち水粒子の加速度に比例する質量力との和で与えられる。それにおける抗力係数、質量係数は形状ごとに定まり、実用値が求められている。流速  $u$  なる流れによって受ける力  $F$  は次式で求められる。

$$F = C_D A w_0 \frac{u^2}{2g} + C_M \cdot V \frac{w_0}{g} \frac{\partial u}{\partial t} \quad \dots \dots \dots \quad (76)$$

$A$  ; 物体の流れに直角なシャドウ面積、 $V$  ; 物体の排水容積、 $w_0$  ; 水の密度、 $u$  ; 流速、 $C_D$ 、 $C_M$  ; 抗力係数、質量係数。

波によって受ける力は波が非碎波のとき、(76)式の水粒子流速  $u$ 、加速度  $\partial u / \partial t$  は、

$$u = u_m \sin \theta$$

$$\left. \begin{aligned} u_m &= \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh 2\pi(h-z)/L}{\sinh 2\pi h/L} \\ \theta &= \frac{2\pi}{L} x - \frac{2\pi}{T} t \\ \frac{\partial u}{\partial t} &= -u_{tm} \cos \theta \\ u_{tm} &= \frac{2\pi}{T} u_m \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (77)$$

である。ここに、 $H$ 、 $L$  ; 波高、波長、 $h$  ; 水深、 $z$  ; 水面から下向きの距離。

このとき、

(76)式は、

$$F = \frac{C_D A w_0}{2g} u_m^2 \sin \theta - \frac{2\pi C_M V w_0}{g T} u_m \cos \theta$$

$F$  を最大にする位相  $\theta$  は、

$$\theta = \cos^{-1} \left( -\frac{2\pi C_M V}{C_D A T u_m} \right) \quad \dots \dots \dots \quad (78)$$

であり、波力の最大値は、

$$F_{max} = \frac{C_D A w_0 u_m^2}{2g} + \frac{2\pi^2 C_M^2 V^2 w_0}{C_D A g T^2} \quad \dots \dots \dots \quad (79)$$

で求めることができる。普通容積  $V$  の小さい物体では、(79)式の第2項は省略できる。

碎波の場合の波力  $F_b$  は十分明らかでないが、筆者の段波に関する次式を参考にする。しかし、碎波の波圧を越えることなく、また(79)式以下であることはない。これらを参考に決める。

$$\left. \begin{aligned} F_b &= \frac{3}{8} C_D A w_0 H_b \\ H_b &= 0.76 h_b \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (80)$$

ここに,  $H_b$ ,  $h_b$  は碎波高, 碎波水深である。

(80)式は, 波頂から海底まで一様に働くものとする。定常流(時間によって変わらない流れ)の場合の力  $F$  は, (76)式で第2項は消えて

$$F = C_D A w_0 \frac{u^2}{2g} \quad \dots \dots \dots \quad (81)$$

となる。

### (2) 杭施設に働く力

杭施設は網仕切り池の支柱, ノリ支柱その他各種施設の支持体として用いられる。ここでは杭自身に働く波力をもとめてみよう。

円杭(直径  $d$ ) の単位長さに働く波力  $F$  は(79)式を用いる。

円柱の場合,  $C_D = 1.0$ ,  $C_M = 2.0$  であるから,

$$F_{max} = \frac{dw_0}{2g} u_m^2 + \frac{\pi^4 d^3 w_0}{2g T^2} \quad \dots \dots \dots \quad (82)$$

この式で  $u_m$  は(77)式から各深さごとに計算されるから, それに応じて各深さに加わる力が求まる。

### (3) 網施設の水理

網施設はノリ網や, 養魚の網仕切りなどその使用範囲は広い。まず網の水理的性質を述べよう。

速さ  $u$  なる流れが網に当たるとき, 単位面積の網に働く力  $f$  は(61)式から,

$$f = \frac{\kappa C_D w_0 d}{gs} u^2 \quad \dots \dots \dots \quad (83)$$

となる。

ここに,  $f$ ; 網の単位面積当たりの抵抗 ( $\text{ton}/\text{m}^2$ ),  $w_0$ ; 海水の単位体積重量 ( $\text{ton}/\text{m}^3$ ),  $g$ ; 重力の加速度 ( $9.8 \text{ m/sec}^2$ ),  $d$ ; 網糸の太さ(直径  $\text{m}$ ),  $s$ ; 網目の間隔 ( $\text{m}$ ),  $u$ ; 流速 ( $\text{m/sec}$ ),  $\kappa$ ; 網糸間相互干渉係数 ( $\leq 1$ ),  $C_D$ ; 網糸の抗力係数である。

$\kappa$ ,  $C_D$  の値は次式による。

$$\left. \begin{array}{l} \kappa \text{ は } 1 < R_e < 10^4 \\ S > 0.2d \end{array} \right\} \text{ のとき } \kappa = 1.0 \quad \dots \dots \dots \quad (84)$$

ここに  $R_e$  はレイノルズ数と呼ばれ, 流れの粘性の影響を示す重要な値であり, 式(85)で与えられる。

$$R_e = \frac{ud}{\nu} \quad \dots \dots \dots \quad (85)$$

ただし,  $\nu$  は水の動粘性係数で, 普通  $0.01 \text{ ポアズ}$  であり, この式では  $u$ ,  $d$  は  $\text{cm}$ ,  $\text{sec}$  単位で計算する。この条件外のとき,  $\kappa$  は若干小となるが, 網の場合つねに  $\kappa = 1$  としてよい。

$C_D$  は,

$$\left. \begin{array}{l} 1 < R_e < 10^3 \text{ のとき } C_D = \frac{10}{3\sqrt{R_e}} \\ 10^3 \leq R_e < 10^6 \text{ のとき } C_D = 1.0 \\ 10^6 \leq R_e \text{ のとき } C_D = 3.16 \times 10^7 R_e^{-3/2} \geq 0.5 \end{array} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (86)$$

である。

流速  $u$  の流れを網で仕切った場合、網によって失なわれる損失水頭  $\Delta h$  は次の式で計算される。

$$\Delta h = \frac{f}{w_0} = \frac{2\kappa C_D d}{S} \cdot \frac{u^2}{2g} \quad \dots \dots \dots \quad (87)$$

すなわち網による損失係数  $f_m$  は、

$$f_m = 2\kappa C_D d / S \quad \dots \dots \dots \quad (88)$$

となる。池の入口を網で仕切った場合の海水交流の計算は、(2)式に(88)式の値を加えて用いればよい。

ノリ網に働く波力

波が砕けてないとき、幅  $b$ 、長さ  $l$  のノリ網1枚に働く波力  $F$  は(89)式のようになる。

$$F = 4bKu_m^2 \left[ \frac{l}{4} + \frac{L}{8\pi} \sin \frac{2\pi l}{L} \right] \quad \dots \dots \dots \quad (89)$$

$F$ ；ノリ網1枚 ( $b \times l$ )、に働く波力、 $b$ ；ノリ網の幅、 $l$ ；ノリ網の長さ、 $L$ ；波長、 $u_m$ ；波による水粒子の最大水平流速(7)式による値、 $z$ ；静水面からノリ網までの深さ、 $K$ ；ノリ網の接面抵抗係数でつぎの値をとる。

$K$ の値

ノリのほとんどついていない場合

$$K = \frac{\kappa C_D w_0 d}{2gs} \quad \dots \dots \dots \quad (90)$$

(88)式参照)

ノリの密生しているときは十分明らかでなく、今後の検討を要するが、ほぼ(91)式のようにとって差支えない。

$$K = 0.0015(\tan/m^2) \quad \dots \dots \dots \quad (91)$$

$l > L$  の場合には(88)式中の  $l$  は  $L$  に等しくとる。

波が砕けているとき

このとき(88)式の  $u_m$  には、(7)あるいは(92)式のうち大なる方をとる。

$$u_m = \sqrt{\frac{3}{4} g H_b} \quad \dots \dots \dots \quad (92)$$

ここに、 $H_b$ ；碎波高 (m) (80)式、 $g$ ；9.8 (m/sec<sup>2</sup>)、 $u_m$ ；平均流速 (m/sec)。

ノリ網に働く流れの力

網に潮流のような流れが作用するとき、ノリ網1枚に働く力  $F$  は(93)式となる。

$$F = 2blKu^2 \quad \dots \dots \dots \quad (93)$$

ここに、 $u$ ；流速 (m)、 $K$ ；(90), (91)式による値。

#### (4) 小割り施設

小割り養殖施設は主に内湾あるいは島影の静穏な海面に設けられ 図13に示すように 7~10 m の立方体の網を数個連らねて全体を固定係留する。ハマチ、タイなどを給餌養殖する。この小割り養殖施設の設計法を述べる。小割りは潮流などのために底部が流され、網成り（吹かれともいう）を生ずる。これが大きいと魚の遊泳空間が狭くなり、網と魚体が摩擦して病害を生ずる。網成りを防ぐために網の底部に錘りをつける。錘りと網の重さを支える浮きを設け、これを係留する。

図14の  $z$ 、 $z$  点の網接線の鉛直線となす角  $\theta$  は

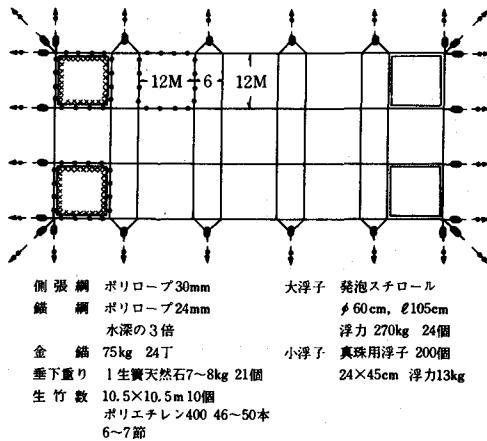


図 13 外海養殖施設(宿毛湾)

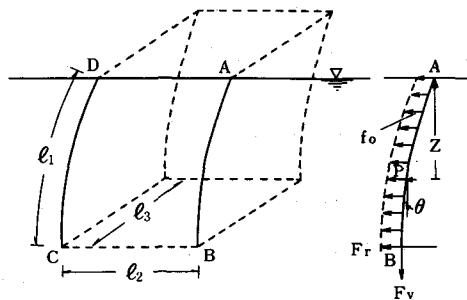


図 14 小割りの網成り

$$\left. \begin{aligned} \tan \theta &= \frac{F_h + f_o \ell_p}{F_v + w \ell_p} \\ f_o &= f \left( 1 + 2 \frac{\ell_2}{\ell_3} \right) \\ F_h &= f \ell_2 \\ F_v &= \frac{w \ell_2}{2} \left( 1 + 2 \frac{\ell_1}{\ell_3} \right) + \frac{W}{2 \ell_3} \end{aligned} \right\} \quad (94)$$

$\theta$ ; ( $x$ ,  $z$ ) 点  $p$  における網接線の鉛直線となす角,  $f$ ; 網の単位面積に加わる力 (83) 式による,  
 $\ell_p$ ;  $B P$  間の長さ,  $\ell_1$   $\ell_2$   $\ell_3$ ; 網イケスの深さ, 幅, 奥行,  $W$ ; 沈子の全水中重量,  $w$ ; 網の単位面  
 積当たりの水中重量,  $F_h$ ,  $F_v$ ; 網の下端に加わる力。

小割りの受ける全流水抵抗は、水平方向に、

$$R = \{2\ell_1(\ell_2 + \ell_3) + \ell_2 \ell_3\}f \quad (95)$$

で計算される。

##### (5) 築堤式養殖施設

この施設は潮汐振動による海水交流形と潮汐流速を導入した流通形がある。他に波の利用によるも  
の、ポンプ利用の陸上池がある。

##### 潮汐振動利用の築堤式養魚施設

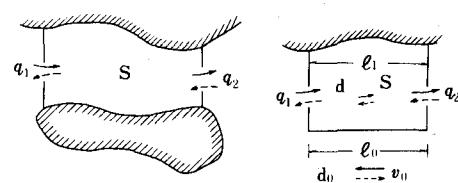
潮汐振動による場合は潮差  $\zeta_0$ , 池面積  $S$  として最大交流量は 1 千満当たり,

$$Q \leq \zeta_0 S \quad (96)$$

であり、あまり効率的な養魚施設とはいえない。この施設の水理計算は 2.(1), 海水交流で述べた計算に  
準じて行なわれる。

潮流の早い海域では、潮流利用の築堤式養魚施設が  
用いられる。これは築堤で流速の早い海域を囲い、潮  
流をこの中へ導入して水管理をする方式の池である。

第 15 図のように潮流の早い海域に、島の間、海岸  
などを仕切って養殖、畜養漁場をつくる。この池は流  
通型であるので、水質保全の立場から高密度養魚が可  
能である。



(a) 島の間の仕切養魚場 (b) 築堤式養魚場

図 15 潮流による給排水