

生物と海の環境

中 村 充

1. 緒 言

環境的・生物的に見た海浜現象は、未知の問題が多い。それには次の2つの理由が考えられる。

①生物は巨視的環境の中で生息するのではなく、己れの体長を包む微視的環境の中で生息する。

②従来の流体力学が物中心であり、流体は物の存在する背景として扱われている。その扱いかは力学的であり環境的でない。

例をあげて若干補足しよう。①について微視的環境が生物にとって決定的に重要であることは論をまたない。水質を議論する方法に拡散理論があるが、その平均化のスケールは生物体長の数桁上のオーダーであり、時間スケールは定常過程に収束した状態を扱う。(数値シミュレーションで一見非定常拡散を扱っているように見えるが、これは定常拡散を非定常的に扱っているに過ぎない)。このような拡散理論で議論できる環境・生物問題は極く特殊な場合に限られる。②について海底に立てた板について考えよう。一般流が層流であるとき板の後ろに生じる伴流の長さは板の高さの15倍前後であることが理論的に、また実験的に知られている。しかしこれは15倍後ろで一般流の流速分布に戻ったことを意味する。もし板の高さの2倍以下の水が水質的に異なっている場合を考えると15倍の流程の中で上流側におけるこの水層の水は混合して新しい水塊を形成し、この水塊は次の混合を受けるまで流れるのである。従って15倍程度というのは力学的伴流であって、環境的伴流ではない。また海の環境流体中の現象は重力の支配を極めて大きく受けることを再認識しなければならない。このような立場から、環境的・生物的に見た重要な海浜現象としての内部波および拡散について述べる。

2. 内部波と海岸現象

(1) 内部波と環境問題

内部波は密度の異なる成層流体中の内部に風や潮汐・潮流その他によって生じる波動で、これに関する沿岸現象では河口塩淡水問題、温排水問題などがその対象とされてきた。内部波はふるくから海洋学の対象として研究され、大規模な海洋構造現象の一つとして議論されてきた。しかし、筆者らの若干の漁場環境調査の結果では内部波は大規模な海洋問題のみならず、小規模な沿岸環境にとっても極めて重大な影響をもっていることを観測した。このことは水産土木のみならず、海洋土木にとっても極めて重要な現象であることを指摘しておく。

内部波に関する理論は1973年のこの水工学シリーズで梶浦教授の講義があり、その他多くの海洋学の著書¹⁾²⁾に述べてあるので、ここでは、この現象が身近な重要な現象であることを実例をもって紹介することにする。

(2) 湾の海水交流と内部波

内部潮汐が湾流を支配している例を示そう。

(a) 野見湾(高知県)

野見湾は図-2.1に示す地形で湾の面積約4.1 km²で、年間約2~3千トンのハマチを中心とした養殖が行われている。野見湾口は須崎湾に接続し、同湾は新莊川、御手洗川、桜川などの河川が流入し、表層塩分濃度が低い。図-2.2に湾軸に沿った塩素量の鉛直分布模式図を示す。ステーション番号は図-2.1に示す。これによるとSt.9が野見湾口であり、右側はほぼ野見湾湾軸に沿った観測点で、湾軸沿いの

塩素量の成層分布の高低が分かりSt. 5～St.2の区間で湧昇流域の存在することが分かる。

また、図-2.3は湾口St.12における流速分布の一部を示す。満潮時（14 h 00 m）流れはよどんでいるが、落潮盛期には表層は流入、底層は流出し、干潮時(19 h 00 m)には落潮流況が継続し、漲潮盛期には表層が流出、底層が流入している。次の満潮では漲潮時流況が継続し、落潮時は底層より流出、表層より流入が起っている。この湾の流れは、底層の流れが支配的で潮汐に対応して流入出が生じ、表層流は底層流の補償流として運動している。湾口通水断面積はI-I線で $2.4 \times 10^4 \text{ m}^2$ であるから、干満による流速は日潮不等における低潮差 0.30 m、高潮差 1.06 m に対応してそれぞれの平均流速、0.0024 m/sec, 0.0084 m/sec, 最大流速 0.0032 m/sec, 0.011 m/secであり、測得流速はそれぞれ 0.32 m/sec, 0.20 m/secで潮汐による断面平均流速とは比較にならず、また必ずしも潮差の大小によっていない。

この現象を説明するためには内部潮汐の概念を導入しなければならない。湾口で生じた潮汐変動は $\sqrt{gh}$ ($g: 9.8 \text{ m/s}^2$, h : 水深約 20 m) で伝達するので野見湾程度の湾(湾軸に沿って約 2.5 km)では短い時間(約 3 分)で湾奥に達し、湾表面は水平に潮汐振動を行なう。これに対し、内部密度界面では波速 C は、

$$C^2 = g (\rho - \rho') \left(\frac{\rho}{h} + \frac{\rho'}{h'} \right) \approx g \frac{hh'}{h+h'} \frac{\rho - \rho'}{\rho}$$

..... (2.1)

ここに、 ρ' , ρ : 上下層の海水密度, h' , h : 上下層の厚さ, g : 重力加速度であるから伝達速度が遅く界面は水平ではなく傾斜する。この傾斜によって内部流が生じ上層はその補償流として挙動するようになる。この場合 $\rho' = 1.0175$, $\rho = 1.0195$, $h' = h = 10 \text{ m}$ であるから $C = 0.31 \text{ m/sec}$, 須崎湾口から野見湾奥までの距離 $L = 3.5 \text{ km}$ に対する副振動固有周期 T_0 は、

$$T_0 \div \frac{4L}{C} = 12.54 \text{ hr}$$

であり、この湾での固有内部副振動周期は、丁度半日周潮の内部潮汐周期と一致している。この結果として図-2.2のような湾奥での湧昇や、図-2.3のような湾流が起ると考えられる。密度成層のある海

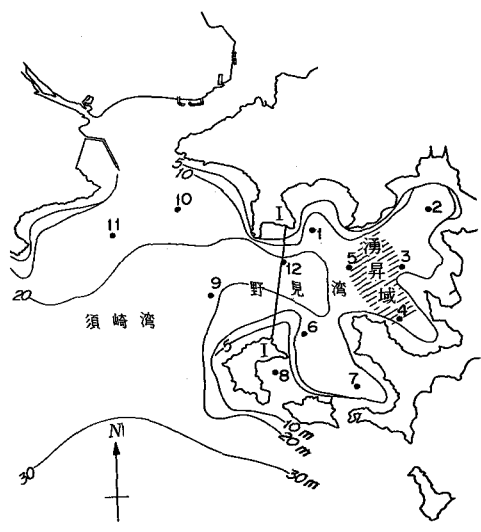


図-2.1 野見湾地形と観測点

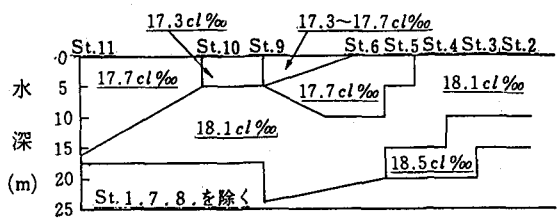


図-2.2 野見湾湾軸に沿った塩素量分布

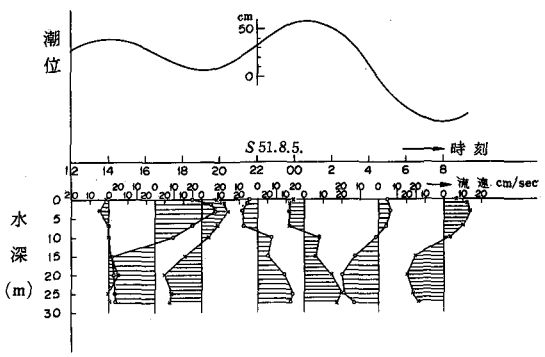


図-2.3 野見湾湾口 (St.12)の流速分布

洋空間では内部波エネルギーは海水流動に大きく寄与していることが分かる。

次に内部界面波が湾流を支配している例を示そう。

(b) 隠岐島島前湾（島根県）

この湾は図-2.4に示す位置にある。この位置は島根沖冷水塊上を対馬暖流が流れ、隠岐島の島棚に当って分流する。ここでは底層冷水と上層暖水との間の相対速度によって内部波を発生する条件がある。図-2.5は、この海域（北緯 $35^{\circ}30'$ 東経 $130^{\circ}29'$ ）地点における内部波の記録である。緩斜面上を遡上する段波状水塊の形状がよく現われている。また、その先端に波高 $30\sim 40\text{ m}$ 、波長約 300 m の分裂波が現われている。このような位置にある隠岐島前湾の海水交流は内部波の影響を強く受けている。

この湾の水深は湾口部 60 m で湾内は約 40 m

の湾である。図-2.6～図-2.7は表層海流板追跡記録である。島前湾最大の湾口木路口における表層流は、上げ潮、下げ潮何れも湾外に流出している。流速は下げ潮時陸岸近くで $20\sim 30\text{ cm/sec}$ 木路ヶ崎寄りで $60\sim 90\text{ cm/sec}$ 上げ潮時陸岸寄りで $20\sim 30\text{ cm/sec}$ 、中央部で $50\sim 70\text{ cm/sec}$ である。湾内の流況は安定したパターンがある。島前湾は無潮点に当り干満差が零である。上述の常に中・底層から流入し表層から流出する安定した流れのパターンは何をエネルギー源としているのだろうか。潮汐でもなく、風でもない。内部波に依存するとししか考えられない。上層下層の密度の測定値から内部波の屈折図を画いたのが図-2.8である。これは内部波の波速 C を式 (2.1) で与え、スネルの法則を満足させる。筆者による作図法は次の通りである。図-2.9で等深線 I, II における波速を C_1, C_2 とし、波の進行線 A と I, II の中間線 III の交点を O とし、O を中心として半径 1 の円弧 N を画く。AO の延長上に C_2/C_1 の点 B をとる。O 点における III 線の法線に平行な B を通る線を描き、N との交点を A' とすれば、OA' は屈折後の波向である。なお、AOA' 線の I II 線間に挟まれる折れ線の長さが等しいように OA' を平行移動する。

波高の変化は幅の変化を B_1, B_2 とし、単位幅当りのエネルギーを E_1, E_2 、エネルギー伝播速度を C_{g1} ,

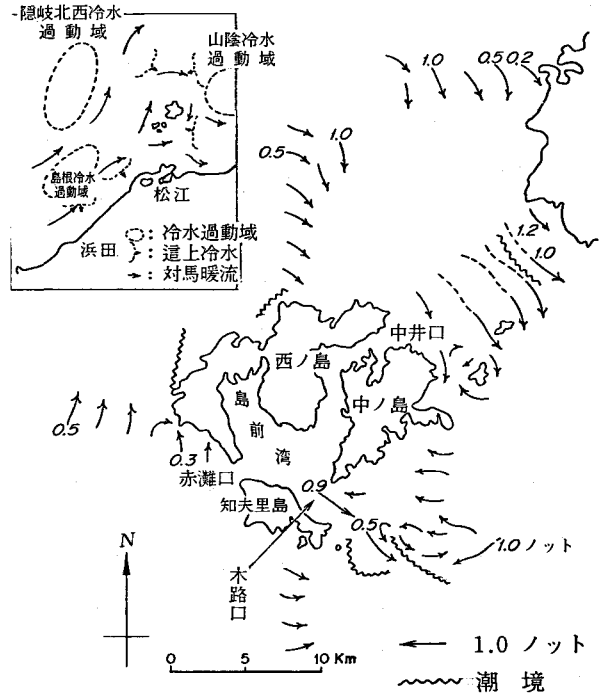


図-2.4 隠岐島の位置と流況

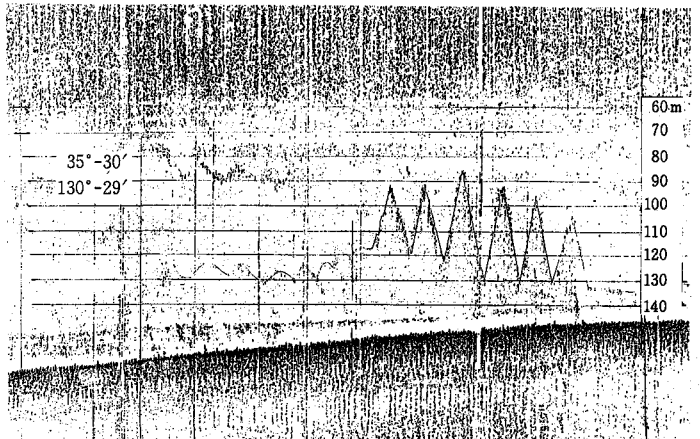


図-2.5 緩斜面上を遡上する内部段波の観測記録

Cg_2 として、

$$E_1 B_1 Cg_1 = E_2 B_2 Cg_2$$

として与えられる。 Cg は式 (2.2) による。

図-2.10は、島根県水産試験場³⁾⁴⁾⁵⁾による表層流測定図である。湾奥浦郷、由良の湧昇域の存在や、古海前面の潮目（降下流）など表層流況は図-2.8に示す内部波の進行・反射・干渉図によってよく説明される。なお、予期しなかった生物との対応として内部波が魚に及ぼす影響がある。図-2.8中の黒丸は島根水産試験場が行なった鯛の魚道である。体長46.5 cmのマダイにピンガー（超音波発信機）をつけた鯛を放流し、その移動径路を追跡したものである。この海域の内部波は水温の相違によって作られるので冷たい内部波の先端に追われて行動していると解釈できる。

(2) 内部波エネルギーの利用

いうまでもなく、一様準位のエネルギー空間からは、エネルギーを取出すことも制御することもできない。その意味で密度成層下の海洋空間は制御し易い面をもっている。野見湾の例に見るように、潮汐エネルギーはその大部分が湾内の干満水位という位置のエネルギーになるのに対し、わずかに重い底層水に内部波として与えた一部のエネルギーは流れとなり湾の海水交流交換を支配している。もし一様密度下における海水交流であれば、ゴム膜が伸び縮みするように、落潮・漲潮で水はわずかに移動しても往復潮流で交換量はごく小さいものになる。

密度成層は鉛直拡散を抑止して環境保全上不都合な現象と考えられてきた。また実際そうである場合もある。しかし、密度成層は反面エネルギーの伝達機能を持っている。閉鎖性の内湾で考えてみよう。湾口底の高い船底形の湾で、湾奥に小量の淡水流入のある場合と、無い場合を比較する。淡水流入のある場合には表層塩分が低くなり、漲潮時流入水は潜流となって底部に流入し、落潮時は表層水が流出することになるので海水交換量は最大となる。河川水流入のない場合は、流入・流出とも表層の湾口付近に限られ、海水交換は少なくなる。前者のような表層に軽い水のある湾では、適当な水深範囲を利用して貝などの無給餌養殖を行うのに適している。密度成

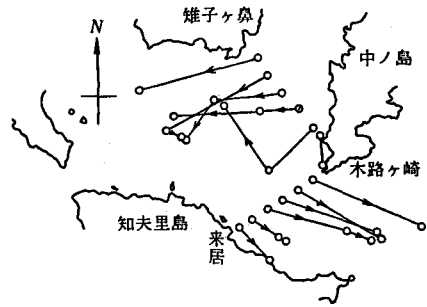


図-2.6 表層海流板追跡記録（下げ潮，1974.7.24. 8時14分～12時08分）



図-2.7 表層海流板追跡記録（上げ潮，1974.7.24. 12時45分～16時19分）

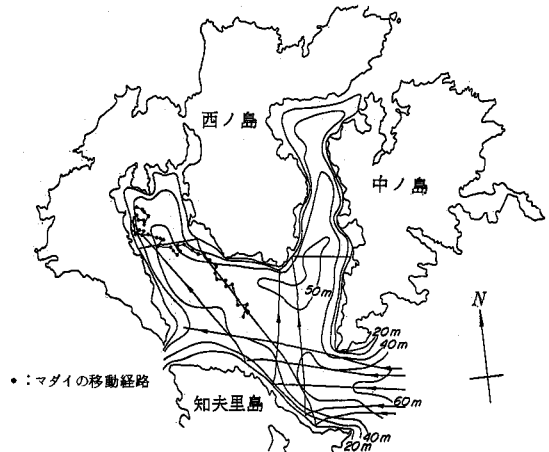


図-2.8 内部波の屈折図とマダイの移動経路

層を持つ湾では、湾口底の高さのコントロールや、湾底の構築物による湧昇域の設定など、海水交換を増大するための工法が可能である。

さて、内部波エネルギーはどの程度あるのだろうか。

内部波エネルギーは $(\Delta\rho/\rho)g$ なる微小な有効重力の支配下の現象ではあるが、波高が数十メートルになることを考えれば、そのエネルギー量は表面波のそれに匹敵する。

2層モデルでエネルギーフラックス W (波の進行方向へのエネルギーの流れ) を考える。コリオリの力を無視した場合には、表面波のエネルギーフラックスと似た解が得られ、

$$\left. \begin{aligned} W &= EC_g \\ E: \text{単位水平面積当り水柱のもつ平均エネルギー} &= \left(\frac{H^2 \rho \epsilon g}{8} \right) \\ C_g &= \text{エネルギー輸送速度} (=nc) \\ C &= \text{位相速度} (= \text{式 (2.1)}) \\ \epsilon &= \frac{\rho - \rho'}{\rho} \\ n &= \frac{1}{2} + \frac{kh' \sinh^2 kh + k h \sinh^2 kh'}{\sinh 2kh' + \sinh 2kh} \\ k &= \frac{2\pi}{L} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

L, H : 内部波の波長, 波高である。

この式で平常時の表面波 (添字 S をつける) に対する比率を考えてみれば、波高 $H/H_S = 0$ (10^{-2})、重力 $\epsilon g/g = 0$ ($10^{-2 \sim -3}$)、波速 $C/C_S = 0$ ($10^{-1 \sim -1.5}$) であるから、単位面積当りの水柱では $10^{-1} \sim 10^0$ ほぼ $1 \sim 10$ 倍、エネルギーの到達量では $10^{-2} \sim 10^1$ でほぼ $0.1 \sim 1$ 倍である。

内部波が沿岸海洋環境制御の重要なエネルギー源であることは、上述の実例で明らかである。しかもこのエネルギーは中底層に亘って存在するので海水の鉛直混合に有効なのである。図-2.11に連続密度成層流中の礁におけるリー波 (Lee wave) と、これに定位する表層魚との関係を示している (山口県外海)。

3. 沿岸における分散現象

(1) 拡散方程式とその適用

沿岸における分散は別に議義が準備されているから詳細はゆずり、ここでは生物を念頭において沿岸の分散過程を考えて見る。

全体を構成する要素が不規則 (random) な運動を行

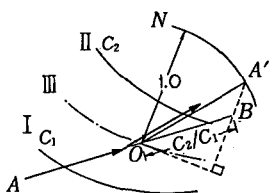


図-2.9 内部波屈折図の描き方

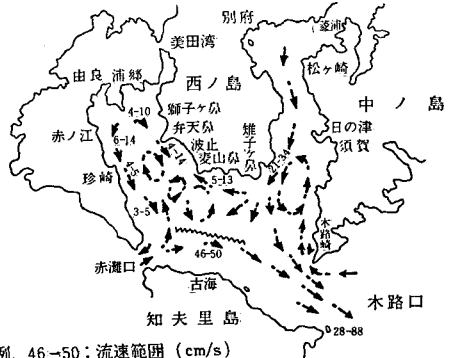


図-2.10 島前湾の表層流測定図

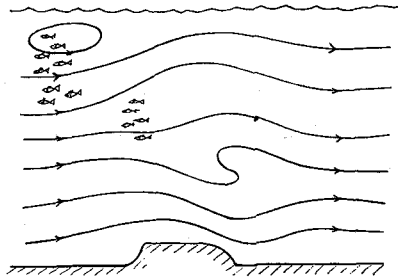


図-2.11 Lee wave に定位する表層魚

ないその結果として全体が広がっていく。これを拡散と呼び各要素が規則に従った運動を行なうことによって全体の分布が変わっていく場合を移流と呼ぶ。移流，拡散を通じて全体が広がっていくことを分散と呼ぶ。

さて，流れと同一の運動をする保存系物質の分散方程式は物質濃度を S ，流速を U として一次元で検討する。収支式は，

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (US) = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial S}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (3.1)$$

ここに D は粘性領域における拡散係数で Fick の拡散則が成立つ領域の値である。 U ， S を平均値 $\bar{U}$ ， $\bar{S}$ と変動成分 U' ， S' に分ければ，

$$\left. \begin{aligned} U &= \bar{U} + U' \\ S &= \bar{S} + S' \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.2)$$

であるから式 (3.1) は，

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (\bar{U}\bar{S}) + \frac{\partial}{\partial x} (-\bar{U}'S') + \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} \right) \dots\dots\dots (3.3)$$

式 (3.1) (3.3) を慣性領域のうずを含めて解けばよいが，これは出来ないので平均化を行なう必要がある。式 (3.3) の右辺第 2 項は

$$\overline{U' S'} = -K_x \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} \dots\dots\dots (3.4)$$

とかいて， K_x を乱流拡散係数と呼んでいる。

式 (3.4) を式 (3.3) に代入して，

$$\frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{U}\bar{S}) = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ (K_x + D) \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} \right\} \dots\dots\dots (3.5)$$

普通 D は K に対して省略される。

3次元問題では式 (3.5) と同様にして

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{U}\bar{S}) + \frac{\partial}{\partial y} (\bar{V}\bar{S}) + \frac{\partial}{\partial z} (\bar{W}\bar{S}) \\ = \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial \bar{S}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial \bar{S}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial \bar{S}}{\partial z}) \end{aligned} \dots\dots\dots (3.6)$$

となる。

現在実用上は式 (3.6) を 2次元あるいは 3次元問題として数値シミュレーション，水理シミュレーションを行なっている。また拡散係数 K_x は染料拡散実験や流速連続測定などから推定したり，あるいはシミュレーションモデル上で現象を再現する値として求める。さてこのような理論が有効な範囲を検討しよう。この理論の根底には式 (3.4) の表現がある。式 (3.4) は時間および空間スケールによる定常過程・遷移過程の問題がある。定常過程で濃度コウ配 $\partial \bar{S} / \partial x$ に比例して物質輸送が起こるためには $\bar{U}$ ， $\bar{S}$ を代表値として考えることのできる要素体積に比しランダム運動の行程 ℓ が非常に小さく，かつ回数 f が数多くなければならない。 ℓ が小さく f が大きいことは S の分布が滑らかで $\bar{S}$ の連続性が保証されることである。このときランダム歩行の確率あるいは気体分子拡散の類推から，

$$K = \frac{1}{2} \ell U' = \frac{1}{2} \ell^2 f$$

が得られる。他方海洋における拡散係数 K の多くの実測値は現象のスケールとほぼ同じ ($K \propto \ell^{4/3}$) であり，逆に f は小さい。このような場での $\bar{S}$ の連続性は保証されないから式 (3.4) は基本的な問

題を含むことになる。相対的に ℓ が小さく f が大きいために流れのスペクトルの立場からは平均流 $\bar{U}$ で与え得るような大きな f の極く小さい流れ成分)の中に小さい渦(f の大きな流れ成分)を含むことが必要であるが、慣性領域でのエネルギー・スペクトル分布は $-5/3$ 乗則に従う連続分布をもっているから、この領域で $\bar{U}$ を定めれば相対的に ℓ を小さく f を大にとることはできないので式(3.4),従って式(3.5)(3.6)は不適当なものとなる。

例えば瀬戸内海の塩分分布を考えてみよう。瀬戸内海の空間スケールで考えれば1千満の潮汐流の流程 ℓ は非常に小さい。また、月別とか季別、あるいは年間分布を考えれば潮汐の回数 f は十分に多数である。このような空間・時間のスケールで瀬戸内海を考えれば式(3.4)が成立って、瀬戸内海の塩分分布を議論することができる。しかし瀬戸内海のある河口から排出された水の拡散は一回の上げ潮、下げ潮流の影響を受ける空間規模であるから、潮汐流は移流 $\bar{U}\bar{S}$ で扱おう必要があるが、更に高周波の慣性領域の渦についても K は精度よく定義することはできない。

近年、中小規模の海洋拡散に表れるような一方向流($\bar{U}$, 0 , 0)のみを対象にできる流れ場での拡散が式(3.4)で定義される K_x, K_y, K_z によるものでなく、 $\bar{U}$ の y, z 方向分布によって説明できることからシア拡散の考えが重視されてきた。すなわち式(3.6)で、

$$\bar{V} = \bar{W} = 0$$

の場合でも

$$\bar{U} = \bar{U}_0 + Hy + Vz$$

ここに H, V は水平・垂直方向の速度コウ配。なる $\bar{U}$ の分布があれば

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{S}}{\partial t} + (\bar{U}_0 + Hy + Vz) \frac{\partial \bar{S}}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} (K_x \frac{\partial \bar{S}}{\partial x}) \\ &+ \frac{\partial}{\partial y} (K_y \frac{\partial \bar{S}}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_z \frac{\partial \bar{S}}{\partial z}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

となる。しかし式(3.7)は式(3.6)を適当なメッシュで数値シミュレーションすることと同等である。また、沿岸での拡散は地形的影響を強く受けて、 $\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}$ も複雑であるばかりでなく $\bar{W}$ を扱うシミュレーションは計算機の制約や、水理模型の歪の問題などで殆んど扱われない現状である。

図-3.1は鳥取県気高海岸の長尾鼻という岬での $\bar{W}$ の実測値であるが、このように水平的な流れのハク離や反流域の形成は鉛直流を誘起し、平面シミュレーションでは解析が困難である。

前章2に述べた内部波的なエネルギー供給が大きい場での拡散はより複雑なものとなる。

以上に物質拡散のもつ複雑性とこれを解析する手法の問題点を述べた。この分野での研究の進展が望まれる。さて水産浮遊幼生等の拡散についての数学的知見も多い⁶⁾が筆者の扱った若干の事例を次の項で述べる。

浮遊幼生は発生後一定期間後に着定するのであって、好適着定場が早く得られても更に浮遊しなければならず、いつ産卵を受けたかの日齢マークがついている。また実用上解析の対象となる海域は現状では、干潟域、碎波帯などの混合の激しい場(式

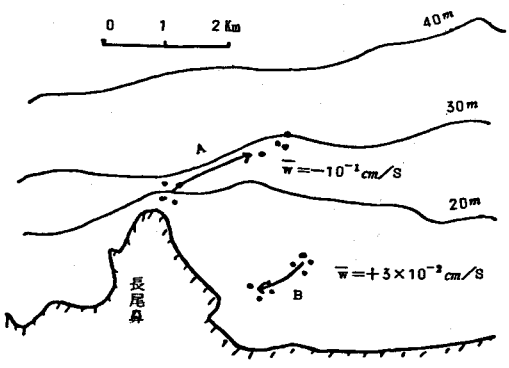


図-3.1 ハク離による上昇・降下流の実測例 (鳥根県)

(3.4)の成立)に限られよう。

(2) 沿岸定着性生物浮遊幼生の拡散

沿岸に定着性の生物、特に貝類は生息し得る底質、水深によって種毎に棲み分けが行なわれている。また水産生物は卵・稚仔や胞子など発生初期の段階では浮遊期（Plankton stage）があり、浮遊期間の長い種程発生数が多い。貝の場合1個体からの産卵数は50万粒～1億粒の産卵があり、深い場所で産卵する貝程産卵数が多い傾向にあるのも特徴的である。沿岸の特定海域に定着して生存する種にとって、種の維持を図るためには、発生初期浮遊幼生時代に受ける大きな流動分散は克服しなければならない大きな条件の一つである。大量の産卵は流動分散に耐えると同時に分散によって生息圏を拡大し種個体群の繁殖を図るための適性であろう。

流動分散環境の変化は定着性水産生物に重大な影響を与える。これは2次的に底質の性状を変化してその影響を増幅する。

以下に貝について浮遊幼生の分散について若干の事例についてのべる。

a. 干潟域に生息する貝幼生の分散

干潟域に生息するアサリ・ハマグリ等は約10～20日の浮遊期をもち、この期間に干潟漁場外へ分散したものは、この漁場の再生産に役立たない。ここで産卵を受けた漁場へ沈着し得る量の計算例を示す。

図-3.2は、熊本県緑川・白河河口干潟のアサリ漁場の地形とアサリの浮遊幼生(larvae)濃度の実測値を示す。また図-3.3は干潟上の表層水と底層水中の浮遊幼生濃度を示す。これから干潟域の海水混合は完全混合に近く、また干潟上とその外縁水域、沖合水の3水域に区分される。沖合水は移流分散が大きく、急激に濃度が小さくなっている。干潟から灘への斜面上では移流と拡散が同じオーダーで支配し図-3.2のラバー濃度5千および1万の等値線に見るように複雑な入り込みがある。いま干潟から沖合へのラバーの分散を調べる。図-3.4に示すように海域を干潟域A、外縁遷移域B、沖合域Cの3海域に区分し、A-BおよびB-C間はQ、Q₀なる海水交換によってラバーの出入があるものとする。A、B、C域のラバー濃度をS、S₀、 $\bar{S}$ 、平均潮位におけるA、B域の水容積をV、

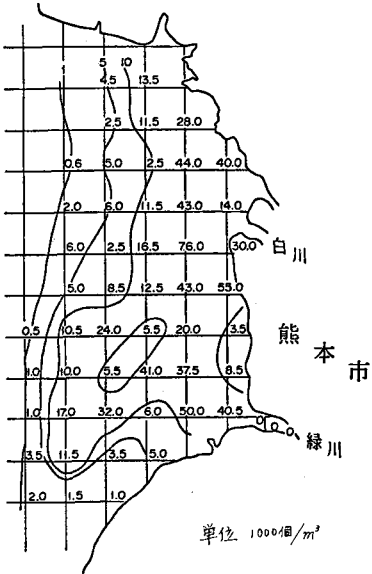


図-3.2 アサリの浮遊幼生濃度

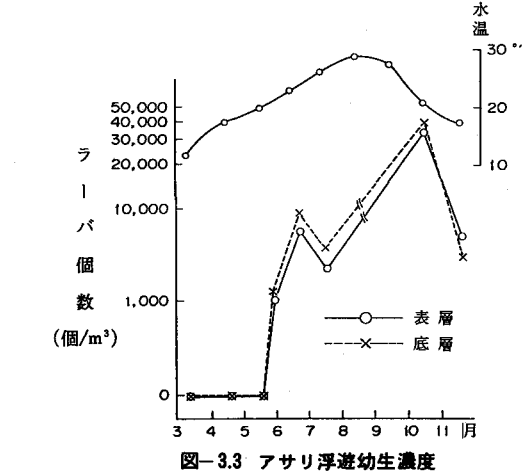


図-3.3 アサリ浮遊幼生濃度

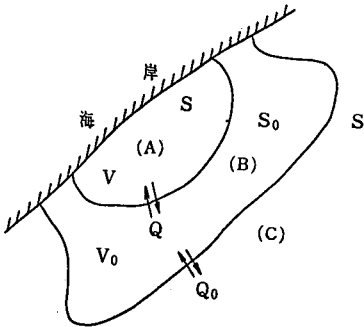


図-3.4 海水交換による海域区分拡散モデル

V_0 , 単位時間当りのラーバ発生量を p , A , B 域の自然死亡率を K , K_0 とすれば A , B 域のラーバ収支式はそれぞれ,

$$V\dot{S} = p - (S - S_0)Q - KSV$$

$$V_0\dot{S}_0 = (S - S_0)Q - K_0SV_0 - (S_0 - \bar{S})Q_0$$

両式より S_0 を消去して

$$\begin{aligned} & \ddot{S} + \left\{ (\alpha + K) + (\alpha_0 + K_0 + \bar{\alpha}_0) \right\} \dot{S} \\ & - \left\{ \alpha\alpha_0 - (\alpha_0 + K_0 + \bar{\alpha}_0)(\alpha + K) \right\} S \\ & = \frac{P}{V} (\alpha_0 + K_0 + \bar{\alpha}_0) + \frac{\dot{P}}{V} + \bar{S}\alpha\bar{\alpha}_0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

ここに,

$$(\alpha, \alpha_0, \bar{\alpha}_0) = \left(\frac{Q}{V}, \frac{Q}{V_0}, \frac{Q_0}{V_0} \right)$$

である。

(3.8) 式に $P = F(t)$ を与えて積分すれば S が求まる。

浮遊幼生は発生後 T_0 時間は浮遊し, その後着底するので, $t = 0$ で発生した群の濃度 S を求める。

(3.8) 式を解くに当たっての条件を物理拡散に主体を置いて, $K = K_0 = 0$ とし,

$$\left. \begin{aligned} p &= \dot{p} = 0 \\ t = 0 \text{ で } S &= p/V + \bar{S} \\ t = \infty \text{ で } \bar{\alpha}_0 &= 0 \text{ のとき } S = p/(V + V_0) + \bar{S} \\ \bar{\alpha}_0 &\neq 0 \text{ のとき } S = \bar{S} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

の条件で積分して

$$S = \frac{p}{V(V + V_0)} \left\{ Ve^{-(\ell - \tau_0)t} + V_0 e^{-(\ell_0 + \tau_0)t} \right\} + \ell \quad \dots\dots\dots (3.10)$$

ここに,

$$I_0 = \frac{1}{2} (\alpha + \alpha_0 + \bar{\alpha}_0 + K + K_0)$$

$$\tau_0 = \sqrt{I_0 - r}$$

$$r = (\alpha + K)(\alpha_0 + K_0 + \bar{\alpha}_0) - \alpha\alpha_0$$

$$\ell = \frac{\alpha\bar{\alpha}_0}{r} \bar{S}$$

である。

$t = T_0$ で着底するので A 海域内の着底量は $S_{T_0} \cdot V$, 産卵全期間 T_H では,

$$\begin{aligned} P_1 &= \int_{T_H} S_{T_0} V dt \\ &= \frac{P_0}{V + V_0} \left\{ Ve^{-(\ell_0 - \tau_0)T_0} + V_0 e^{-(\ell_0 + \tau_0)T_0} \right\} + \ell VT_H \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (3.11)$$

となる。ここに P_0 は産卵期の全発生量である。

普通第2項第3項は省略されて

$$P_1 = \frac{VP_0}{V+V_0} e^{-(I_0+r_0)T_0} \dots\dots\dots (3.12)$$

で計算される。

遷移海域 B の存在しない場合には $V_0 = 0$ とおいて

$$P_1 = P_0 e^{-(I_0-r_0)T_0} \dots\dots\dots (3.13)$$

で計算される。

また産卵期中のラーバー濃度 $\hat{S}$ は (3.10) 式で第2, 第3項を第1項に比し省略して

$$\begin{aligned} \hat{S} &= \int_0^{T_0} S dt \\ &= \frac{p \{ 1 - e^{-(I_0-r_0)T_0} \}}{(V+V_0)(I_0-r_0)} \dots\dots\dots (3.14) \end{aligned}$$

となるから、産卵期におけるラーバー濃度 $\hat{S}$ を実測すれば、 $I_0 - r_0$ を定めることができる。

例、図-3.2 の場合について適用してみよう。

p の値は当地区漁獲量の5年平均は、16,000 トンであり、主産卵期は7~11月の5カ月であるので概略単位時間(1干満, 半日)当り約

$$p = \frac{16,000 \times 10^3 \times 5 \times 10^5}{5 \times 2 \times 30 \times 5 \times 2} = 2.7 \times 10^{12}$$

と見る。ここに1個体重を5gとし、放卵量を50万粒/個とし、雌雄比を1:1としてある。

海水交換率 α , 自然減耗率 K , K_0 等に不十分な点もあるが、主たる減耗因子 $I_0 - r_0$ を観測値で定めることにする。

調査結果によれば A 海域 larvae 濃度平均 24,000 個 / m^3 であるが、殻長別実測個体数から発見率を考慮した A 海域の larvae 濃度は、

$$S = 52,000 \text{ 個} / m^3$$

と考えられる。

A, B 海域の水容積は、

$$V = 1.68 \times 10^8 m^3$$

$$V_0 = 3.45 \times 10^8 m^3$$

貝の浮遊期間

$$T_0 = 36 \text{ (= 18 日} \times 2 \text{ 干満)}$$

であるから (3.14) 式に代入して

$$52,000 = \frac{2.7 \times 10^{12} \{ 1 - e^{-36(I_0-r_0)} \}}{(1.68 + 3.45) \times 10^8 (I_0 - r_0)}$$

これから

$$I_0 - r_0 = 0.099$$

(3.12) 式から

$$\begin{aligned} \frac{P_1}{P_0} &= \frac{1.68 \times 10^8}{(1.68 + 3.45) \times 10^8} e^{-0.099 \times 36} \\ &= 0.0093 \end{aligned}$$

全発生量 P_0 は期間 5 カ月間の干満数を用いて

$$P_0 = 5 \times 30 \times 2 \bar{p} = 8.1 \times 10^{14}$$

よって A 海域への全着底量 R は

$$R = 7.37 \times 10^{12} \text{個} = 1.1 \times 10^5 \text{個/m}^2$$

と見積れる。但し漁場面積は $6.7 \times 10^7 \text{m}^2$ である。

なお、海水交換特性 α , α_0 , $\bar{\alpha}_0$ および自然死亡率 K , K_0 を与えて上記の計算を行なうことができる。この例では $K + K_0$ の値は $\alpha + \alpha_0 + \bar{\alpha}_0$ の 0.16 倍で浮遊幼生段階では流動拡散が決定的な重要性をもっていることが判る。

単位面積当りの着底個数が十分であれば、この漁場での生産は底質等の他の条件に規定されて定まる。

b. 砕波帯における分散

鹿島灘のような開いた海浜で生息する外海性ハマグリ（チョウセンハマグリ）やコタマガイなどが約 10～15 日間もの間遊泳力もないまま浮遊して再生産が成立っているのはなぜだろうか。それは砕波帯の中では烈しい海水混合が生じて移流による全面輸送からまぬがれるためであろう。すなわち場に固定した稀釈過程をとる場合には濃度は零にならない。例えばコップにインクを入れ攪拌しながら清水をそそぐ。十分に攪拌しておればコップのインクは薄くなっていくが、濃度は零にはならない。単純なモデルで稀釈過程を示す。水容積 V の漁場で移流 Q があり稀釈過程をとるとき濃度の時間的変化は、

$$V \cdot S = -SQ$$

$t=0$ で $S=S_0$ といて

$$S = S_0 e^{-\frac{Q}{V}t}$$

浮遊期間 T_0 として再沈着する量は単位面積当り m として

$$m = S_0 h e^{-\frac{Q}{V}T_0}$$

ここに、 h : 水深である。

砕波帯内の流れが向岸流、沿岸流、離岸流の一連の流れから海浜循環流セルを形成していることが知られている (Inman, 1971)。このセルモデルに貝の浮遊ラーバーを乗せてみよう。

図-3.5 に示すように汀線を連続した n 個の海浜循環流セルモデルを考える。時刻 $t=0$ において発生した卵（受精卵）の濃度を S_{i0} ($i=1, 2, \dots, n$) とし、これが汀線方向の離岸流（流量 Q_n ）によって分散する様子を求める。離岸流によって砕波帯外へ輸送された浮遊幼生は D 倍に稀釈された後、向岸流に乗って一部がセル内に戻るものとする。

第 i セルの収支式は、

$$V \dot{S}_i = -(S_i - S_{i-1})Q - (S_i - DS_i)Q_n$$

$$= -\{Q + (1-D)Q_n\}S_i + S_{i-1}Q$$

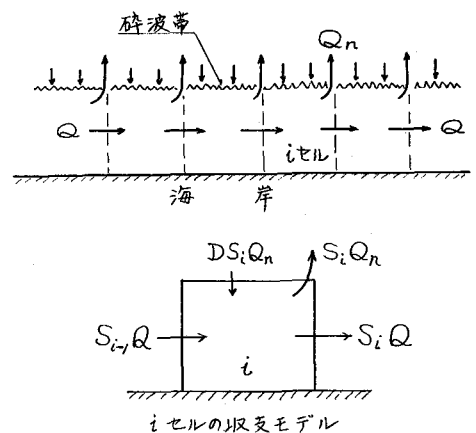


図-3.5 海浜循環流セル内の浮遊物質濃度

$$\left. \begin{aligned} \therefore S_i + \alpha S_i &= \frac{Q}{V} S_{i-1} \\ \alpha &= \frac{Q + (1-D) Q_n}{V} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.15)$$

(3.15) 式の解を求める。

$$i = 1 \text{ では } \dot{S}_1 + \alpha S_1 = 0$$

$$\therefore S_1 = S_{10} e^{-\alpha t}$$

$$i = 2 \text{ では } \dot{S}_2 + \alpha S_2 = \frac{Q}{V} S_{10} e^{-\alpha t}$$

$$\therefore S_2 = (S_{20} + S_{10} \frac{Qt}{V}) e^{-\alpha t}$$

同様に $i = k$ では、

$$\begin{aligned} S_k = \left\{ S_{k0} + S_{k-10} \frac{Qt}{V} + \frac{S_{k-20}}{2!} \left(\frac{Qt}{V} \right)^2 + \right. \\ \left. \dots\dots\dots + \frac{S_{10}}{(k-1)!} \left(\frac{Qt}{V} \right)^{k-1} \right\} e^{-\alpha t} \end{aligned} \dots\dots\dots (3.16)$$

$i > k$ のセル内での産卵がないとすれば $i = k + r$ 番目のセルでは

$$\begin{aligned} S_{k+r} = \left\{ \frac{S_{k0}}{r!} \left(\frac{Qt}{V} \right)^r + \frac{S_{k-10}}{(r+1)!} \left(\frac{Qt}{V} \right)^{r+1} + \right. \\ \left. \dots\dots\dots + \frac{S_{10}}{(k+r-1)!} \left(\frac{Qt}{V} \right)^{k+r-1} \right\} e^{-\alpha t} \end{aligned} \dots\dots\dots (3.17)$$

となる。浮遊ラーパーは $t = T_0$ にならなければ着底しない。よって $t = 0$ で発生した群の k セルへの着底量 a_k (個/m²) は、

$$\begin{aligned} a_k = h \left\{ S_{k0} + S_{k-10} \left(\frac{QT_0}{V} \right) + \frac{S_{k-20}}{2!} \left(\frac{QT_0}{V} \right)^2 + \right. \\ \left. \dots\dots\dots + \frac{S_{10}}{(k-1)!} \left(\frac{QT_0}{V} \right)^{k-1} \right\} e^{-\alpha T_0} \end{aligned} \dots\dots\dots (3.18)$$

ここに、 h は k セル内の点の水深である。

i セル内で $t = 0$ における産卵量を p_i 個とすれば

$$S_{i0} = \frac{p_i}{V}$$

k セルにおける産卵期間 T_H 中の全着底量 p_k は

$$\begin{aligned} p_k &= \int_0^{T_H} a_k dt \\ &= h \left\{ \frac{P_k}{V} + \frac{P_{k-1}}{V} \left(\frac{QT_0}{V} \right) + \frac{P_{k-2}}{V \cdot 2!} \left(\frac{QT_0}{V} \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. \dots\dots\dots + \frac{P_1}{V (k-1)!} \left(\frac{QT_0}{V} \right)^{k-1} \right\} e^{-\alpha T_0} \end{aligned} \dots\dots\dots (3.19)$$

ここに、

$$P_i = \int_0^{T_H} p_i dt$$

すなわち P_i は i セルにおける産卵期中の全産卵量である。

移流 $Q = 0$ の場合には各セルは独立に濃度が定まって

$$\left. \begin{aligned} S_k &= S_{k0} e^{-\alpha t} \\ \alpha &= \frac{1-D}{V} Q_n \\ p_k &= h \frac{P_k}{V} e^{-\alpha t_0} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3.20)$$

以上の式から海浜に定着性の貝の着底量の計算ができる。

この理論は非生物の分散にも適用できる。図-3.5 のモデルで $i = 1$ のセルにのみ負荷があるとする
と、(3.16)式で $k = 1$ とおいて、 $t = 0$ における負荷濃度は、

$$S_1 = S_{10} e^{-\alpha t}$$

(3.17) 式から、

$$S_{nr} = \frac{S_{10}}{r!} \left(\frac{Q t}{V} \right)^r e^{-\alpha t}$$

負荷物質のこわれる平均寿命を T_0 とし連続負荷を考えれば濃度 $\hat{S}$ は p を単位時間当りの負荷として、

$$\begin{aligned} \hat{S}_1 &= \frac{p}{V} \int_0^{T_0} e^{-\alpha t} dt \\ &= \frac{p}{\alpha V} (1 - e^{-\alpha T_0}) \dots\dots\dots (3.21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{S}_{1+r} &= \frac{p}{r! V} \cdot \left(\frac{Q}{V} \right)^r \int_0^{T_0} t^r e^{-\alpha t} dt \\ &= \frac{p}{r! V} = \left(\frac{Q}{V} \right)^r \cdot \left\{ \frac{r!}{\alpha^{r+1}} - e^{-\alpha T_0} \sum_{i=1}^{r+1} \frac{r!}{\alpha^i (r-i+1)!} T_0^{r-i+1} \right\} \dots\dots\dots (3.22) \end{aligned}$$

$T_0 \rightarrow \infty$ とすれば保存物質負荷における濃度となる。このとき、

$$\hat{S}_1 = \frac{p}{\alpha V} \dots\dots\dots (3.23)$$

$$\begin{aligned} \hat{S}_{1+r} &= \frac{p}{r! V} \left(\frac{Q}{V} \right)^r \int_0^{\infty} t^r e^{-\alpha t} dt \\ &= \frac{p}{r! V} \left(\frac{Q}{V} \right)^r \frac{\Gamma(r+1)}{\alpha^{r+1}} \dots\dots\dots (3.24) \end{aligned}$$

となる。 $\Gamma(x)$ はガンマ関数で数表が準備されている。 Q , Q_n , D は波以外に風や海・潮流の支配を受け実測によることが望ましい。波について Radiation stress を用いた推算法が提案されている。

参 考 文 献

- 1) 梶浦欣二郎：海洋における内部波，海洋物理学Ⅱ，東大出版会，1976
- 2) 富永政英：海洋波動，共立出版，1976
- 3) 島根県水試：島前湾大規模増殖場開発事業調査報告書，1975
- 4) 島根県水試：島前湾大規模増殖場開発事業調査報告書，1976
- 5) 島根県水試：島前湾大規模増殖場開発事業調査報告書，1977
- 6) 大久保明：生態学と拡散，築地書館，1975