

沿岸海域の拡散現象と水産生物環境

農業土木試験場 水産土木 中村 充

1. はじめに

水産における海洋開発の工学問題は、水産用施設の設計、施工に関する部門、水産生物環境の制御に関する部門および生物の物理環境反応に関する部門とに大別される。第一は主として力学的問題に人工漁獲の設計外力とか、養殖施設に付らく波力といったものである。第二は水および海底環境の制御に関するもの、海水の流動・拡散促進工、海水の流動拡散抑止工、海底改善工からなる。第三は水産生物の流水に対する耐性とか、溶存酸素の許容濃度とかいった環境と生物のかかわり合いに関する問題を扱う。

ここでは主として第二の水産生物環境の制御に割って述べる。

2. 発生初期浮遊幼生の拡散と増殖

(1) 生物種の再生産

種のある stage の時間的变化量はこの stage の種の絶対量に比例する。すなわち、

$$\frac{dP}{dt} = (D - I)P \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 P : 種の存在量、 D : 種の発生率、 I : 種の減耗率、 t : 時間である。まず種の発生から親となるまでの過程を考えよう。そうすると、発生率は 0 であるから

$$\frac{dP}{dt} = -IP \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 $I = \text{const.} = I_r$ と扱える時間区間 T_r について、(2) 式の解は

$$\left. \begin{aligned} P &= Ae^{-I_r t} \\ 0 \leq t \leq T_r \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 A : $t = 0$ (時間区間の初期) における種の存在量である。さて種の発生量を P_0 、時間区間 T_r における減耗率を I_r とすれば、発生後の時刻 t における生残量 P は、

$$\begin{aligned} P_1 &= P_0 e^{-I_r t} \\ P_2 &= P_0 e^{-I_r T_0} e^{-I_r t} \end{aligned}$$

$$P_n = P_0 e^{-(I_r T_0 + I_r T_1 + \dots + I_r T_n)} = P_0 e^{-\left(\sum_{i=0}^{n-1} I_r T_i + I_r t\right)} \quad \text{----- (4)}$$

M を親の数、 P_m を親にまで成長し得た種の数、 m は親となるまでの stage 数とすると、再生産率 R は、

$$P_m = P_0 e^{-\left(\sum_{i=0}^{m-1} I_r T_i\right)} \quad \text{----- (5)}$$

$$R = \frac{P_m}{M} \quad \text{----- (6)}$$

(4) あるいは (5) (6) 式から増殖の方法について (若干の考察を行なう。

さく、 P_m を増大させるには P_0 を増大させるか、 $\sum I_r T_i$ を小さくするからである。 P_0 を増大させることは親集団を大にすることであり、 $\sum I_r T_i$ を小さくすることは減耗を少なくすることである。

ここで P_m に対する P_0 は積の形であり、 $\sum I_r T_i$ はべき乗であることに注意を要する。図 1 にこの向の様子を示す。図中親集団を増大した場合と減耗因子を小さにした場合との交点 A より左側が親となる場合は親集団を大にすることが有利であり、右側の場合は減耗因子を抑制することが有利である。

また、図 2 に示すように減耗因子を抑制する場合、各 stage における減耗が和の形であることも重要である。すなわち、 $I_r T_i$ の中で最も大きいものを小さくすることが必要で、析落している小さい因子をいくらか改善しても P_m は大とならない。減耗因子 I_r 間の独立性の議論は残ろうが、現状における最大の阻害要因を知る上で、このような整理は重要と考える。

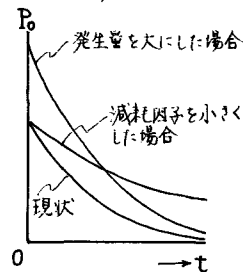


図 1. 増殖の方法

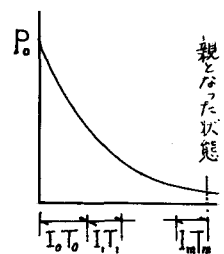


図 2. 減耗因子と増殖

(2) Plankton Stage 幼生と拡散

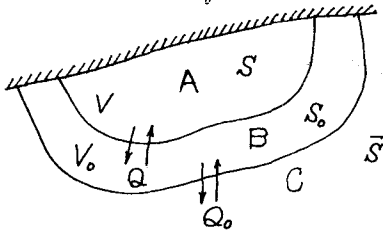


図3. 浮遊幼生濃度と海域区分

親から発生した初期幼生は水中に拡散し、流れの影響を受けつつ着底場を求め、この間食害等の自然減耗を受けると同時に流出する。

初期幼生が発生した漁場近傍に生残し着底する量は概略以下のように推算できる。

いま仮の場合に、いくつか検討してみよう。親から発生を受け、漁場海域(図3中のA)が、その外縁海域(図3中のB)とQ(ℓ/日)なる海水交換を行ない、更に外縁海域の外側に外海域(図3中のC)があり、そこではQ0(ℓ/日)なる海水交換が行なわれている。そして、それぞれの海域と入る人の中の浮遊幼生濃度は一定値α, α0, ᾱであるとする。そしてこれらの時間的变化を検討する。A, B, Cの海域区分は流路線調査等で完全混合と扱える領域とする。B海域が小さく直ちにC海域につながる場合もある。この場合、発生を受けた海域Aに稚貝として沈着する量P1は(7)式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \frac{V e^{rT_0} + V_0 e^{-rT_0}}{V + V_0} P_0 e^{-I_0 T_0} + \ell T_H V \\ I_0 &= \frac{1}{2} (\alpha + \alpha_0 + \bar{\alpha}_0 + K + K_0) \\ r &= \sqrt{I_0^2 - (\alpha_0 K + K_0 \alpha + K K_0 + \bar{\alpha}_0 \alpha + \bar{\alpha}_0 K)} \\ \ell &= \frac{\bar{S} \bar{\alpha}_0 \alpha}{\alpha_0 K + K_0 \alpha + K K_0 + \bar{\alpha}_0 \alpha + \bar{\alpha}_0 K} \\ (\alpha, \alpha_0, \bar{\alpha}_0) &= \left(\frac{Q}{V}, \frac{Q}{V_0}, \frac{Q_0}{V_0} \right) \end{aligned} \right\} \text{----- (7)}$$

ここに、V, V0: A, B海域の平均水容積(m³)

Q, Q0: A - B, B - C海域間の海水交換量

T0, TH: 幼生の浮遊期間, 産卵期の長さ

K, K0: A, B海域の自然減耗率

$\bar{S}$: C海域の浮遊幼生濃度

P0: 産卵期間中の全発生量

(4)式は以下のように導かれる。

A, B海域の浮遊幼生濃度をS, S0とし、単位時間当りの発生量をPとして、A, B海域の浮遊幼生の収支式はそれぞれ、

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

$$\dot{S}_0 = \{(S - S_0)Q - K_0 S_0 V_0 - (S_0 - \bar{S})Q_0\} / V_0$$

両式よりS0を消去して

$$\dot{S} + \{(\alpha + K) + (\alpha_0 + K_0 + \bar{\alpha}_0)\} S = \{P - \alpha \alpha_0 - (\alpha_0 K_0 + \bar{\alpha}_0)\}$$

$$(\alpha + K) S = \frac{P}{V} (\alpha_0 + K_0 + \bar{\alpha}_0) + \frac{P}{V} + \bar{S} \alpha \bar{\alpha}_0 \text{----- (8)}$$

(8)式にP = F(t)を与え積分すればSが求まる。浮遊幼生は発生後T0時間浮遊し、その後着底するので、t = 0で発生した時の濃度Stを求め、(8)式とくに当たっての条件と物理拡散に定休を置いて、K = K0 = 0とし、

$$t = 0 \text{ 時, } S_t = P/V + \bar{S}$$

$$t = \infty \text{ 時 } \bar{\alpha}_0 = 0 \text{ のとき } S_t = P/(V + V_0) + \bar{S}$$

$$\bar{\alpha}_0 \neq 0 \text{ のとき } S_t = \bar{S}$$

の条件で積分して

$$S_t = \frac{P}{V} \cdot \frac{V e^{rt} + V_0 e^{-rt}}{V + V_0} e^{-I_0 t} + \ell \text{----- (9)}$$

t = T0で着底するのでA海域内の着底量はS10V, 産卵全期間では、

$$P_1 = \int_{T_0} S_{10} V dt$$

となり(7)式を得る。

【例】 熊本県の蘇州、白川河口海域のアカリの浮遊幼生

この海域はアカリ・ハマグリ的好漁場であり、図4に示す浮遊幼生分布が観測され、A海域は13m以上で浅、B海域5~10m深、C海域は10m以上と区別される。そうすると概略

$$\text{A海域水容積 } V = 6.7 \times 10^7 \times 2.5 = 1.68 \times 10^8$$

$$\text{B海域水容積 } V_0 = 4.6 \times 10^7 \times 7.5 = 3.45 \times 10^8$$

$$\text{larva自然減耗率 } K = K_0 = 0.052 \text{ (半日)}$$

(注. 上城(大分県)によるハマグリ値を代用)

$$\alpha_0 / \alpha = V / V_0 = 0.47$$

$$\bar{\alpha}_0 = 0.43 \text{ (半日)}$$

(注. 北上恒流 0.15 m/sec , 対象海域 15 km として恒流によって流去するとした。)

において, 海水交換率 α, α_0 によってどのような larva 濃度となるかを求めてみる。

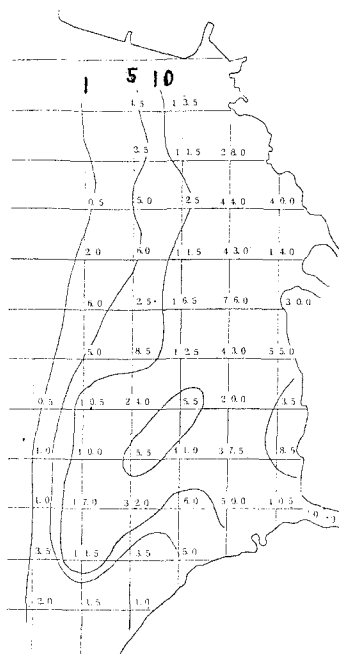


図4. 浮遊幼生分布図(個/ m^3)

観測された larva 濃度は発生初期のものから着底直前のものまでと考えられるから, (9)式を用いる。

また, 観測結果では沖合へ向けて急激に larva 量が入っており A 海域平均 24000 個/ m^3 に対し, C 海域は 500 個/ m^3 以下であるので C 海域の larva 濃度 $\bar{S}$ を省略する。そうすると,

$$\begin{aligned} S &= \int_0^{T_0} S_0 dt \\ &= \frac{P}{V+V_0} \left\{ \frac{1}{r-I_0} \left\{ e^{-(r-I_0)T_0} - 1 \right\} - \frac{\alpha/\alpha_0}{r+I_0} \left\{ e^{-(r+I_0)T_0} - 1 \right\} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

(10)式を用いて S を計算すると図5のようになる。

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

$$P = \frac{16,000 \times 10^6 \times 5 \times 10^5}{5 \times 2 \times 30 \times 5 \times 2} = 2.7 \times 10^{12}$$

と見る。ここに1個体重を 5 gr 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 を観測値で定めることにする。

調査結果によれば A 海域 larva 濃度平均 24000 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 larva 濃度は,

$$S = 52,000 \text{ 個}/\text{m}^3$$

と考えられる。

さて A 海域濃度 $52,000$ 個/ m^3 となるような α および I_0 を求めると図5で

$$\frac{S}{P} = \frac{52,000}{2.7 \times 10^{12}} = 1.9 \times 10^{-8}$$

よって, $\alpha = 0.14$ (半日) および $I_0 = 0.379$ (半日) である。

よって年間の larva 総着底個数 P_1 は以下のようになる。以下の数値を(17)式に代入する。

$$V = 1.68 \times 10^5 \text{ m}^3$$

$$V_0 = 3.45 \times 10^8 \text{ m}^3$$

$$K = K_0 = 0.052 \text{ (半日)}$$

$$\alpha = 0.14 \text{ (半日)}$$

$$\alpha_0 = 0.0658 \text{ (半日)}$$

$$\bar{\alpha}_0 = 0.43 \text{ (半日)}$$

$$I_0 = 0.379 \text{ (半日)}$$

$$T_0 = 36 \text{ (=18日)}$$

これらの値を用いて

$$r = 0.2181$$

$$P_1 = 1.00 \times 10^{-3} P_0$$

P_0 の値は前述の成貝量 $16,000$ トン, 1個体重 5 gr 産卵量 50 万粒/個, 雌雄比 $1:1$ として

$$P_0 = \frac{16,000 \times 10^6 \times 5 \times 10^5}{5 \times 2} = 8 \times 10^{14} \text{ 個}$$

よって

$$P_1 = 8 \times 10^{11} \text{ 個}$$

である。

単位面積当りの着底個数にすれば

$$a = \frac{8 \times 10^{11}}{6.7 \times 10^7} = 1.2 \times 10^4 \text{ 個}/\text{m}^2$$

以上の推定値は各種の条件設定があり, 特に産卵資源量, 自然減耗率, 海水交換などによって上記の数値は異なるように考えられる。しかし, 最悪の条件である減耗速散率 I_0 および産卵資源量との相乗値を実測値によって求めたことになるので, 個々の因子に若干の相違があっても上記の数値は大きくは変らない精度

ものであると考えられる。

さて、1年間における沈着稚貝量 $\alpha = 12,000$ 個が十分な量であるか否かは沈着後の減耗率によって検討される。この海域で作れい計画があり、これによって海水交換率 α が5割大となり、

$$\alpha = 0.21$$

となったと仮定すれば

$$\alpha_0 = 0.0987$$

$$I_0 = 0.430$$

$$\gamma = 0.232$$

$$P_1 = 2.63 \times 10^{-4} P_0$$

$$= 2.13 \times 10^{11}$$

$$a = 3.17 \times 10^3 \text{ 個}/\text{m}^2$$

となり、着底稚貝数が約 $1/4$ となる。

この例に見るように、浮遊幼生の沈着には拡散が大きく関係していることが判る。減耗因子 I_0 に占める拡散と自然減耗の割合は

$$\frac{\alpha + \alpha_0 + \bar{\alpha}_0}{K + K_0} = 6.1$$

有時海に面した閉鎖的な海域でさえ拡散の方が大きな割合を占める。

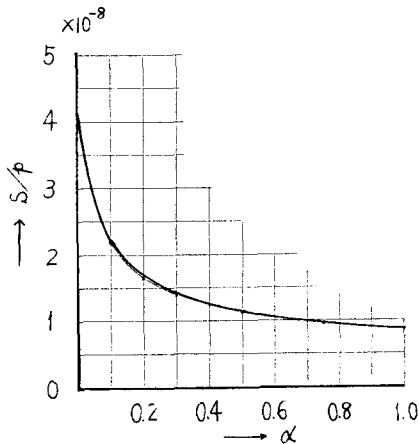


図5. 海水交換率とlarva濃度発生量比

3. 海水の流動拡散促進工の現状

この技術は主として養殖場や内湾など汚染しやすい海域の浄化技術である。これには潮流利用・潮流利用・内部流利用などがある。湾口が狭く上げ潮で流入・下げ潮で流出するような湾では、湾口が狭すぎると湾内の水位が十分上昇しないうちに外海は下げ潮になってしまい、干満差が外海に比し著しく小さい場合には湾

口を拡大することによって内外海水の交流量を増大させることができる。また湾口が広過ぎる時は湾口流速が小さく、流入水が湾奥へ到達せず湾口付近に漂って次の下げ潮で流出し海水交換が起こらない場合には湾口を縮小する。このような閉鎖性の湾では海水交換を最大にする最適湾口規模が存在し、この規模とする湾口改善技術があり、京都府久美浜湾をはじめ数例の事業が行なわれている。水深4~5m以下の浅い湾・潟では作れい工がある。これは水深が浅いため、水が下げ潮で湾口に近よりながら、次の上げ潮で戻ってしまい海水の交換が悪い所に用いる。湾口から湾奥に図6のように湾筋(ミオ筋)を振る。ミオ筋は海底抵抗が相対的に小さくなって流速が速くなり、海水の流動は主としてここを通して行なわれるようになり、外海との海水の交流・交換を大にすることができる。これは松島湾や松川浦ほか多くのノリ・カキ漁場で実施されている。この工法は深くなると有効でなくなる。水深が大きい場合で往復潮流のある場合には図7に示す潮流制御が有効である。これは潮流エネルギーの利用型であり、流動エネルギーがありながら海水交換に役立っていない場合に用いる。図7の導流堤配置で往復潮流は実線方向に流れ易く、点線方向に流れにくい(流れ易さの差約5割)。したがって海水は実線方向に漸次流動し海水交換が大となる。この工法は規模の大小に拘わらず流れの運動エネルギーが大である程有効である。筆者がこの導流堤工法を瀬戸内海の明石海峡に適用した場合の試算では、瀬戸内海と黒潮の海水交換は約7倍となり、現状負荷での水質汚染は解消する。工費は約2,000億円程度である。瀬戸内海の浄化と黒潮系の水産生産力の増大とを考えると詳細に検討する価値のあることである。例えは波エネルギー利用の海水流動促進工で波のエネルギーをV字型に狭窄して集中し堤上を越波させて平均水位を高め、この水位差で水を導流する。若手県豊平町の平磯の岩盤作れい(コンブ・アソビ・ツニの増殖溝)の通水に用いている。

4. 海水の流動拡散抑制工の現状

この技術は増殖対象種の環境造成に最も重要な技術といえる。水の栄養度、水温、溶存酸素その他適正な環境とした水塊を流まさせることなく、この場を対象種の保護育成を図るのである。しかも水を定まさせるこ

とのない環境ではなければならない。

ある海域の水を淀ませることなく、それになが海流などの主潮流によって流されない水塊形成技術である。この一方法は循環流形成技術である。循環流域の水は、この周囲を流れる一般流から独立した水塊形成ができる。図9は一部が水面下にある堤防で、これに波が当たると水面下にある堤頂では波のエネルギーが流れのエネルギーとなり図のように循環流ができて一般流から独立できる。この工法は岩手県田老町でアソビ浮遊幼生の拡散抑止に用いることにしている。

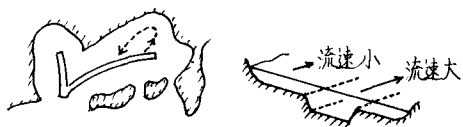


図6. ミオ筋工による海水交換の促進



図7. 導流堤による潮流制御

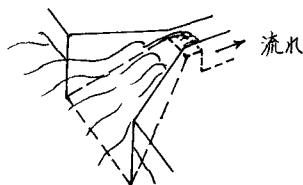


図8. 波エネルギー集中による越波取水工

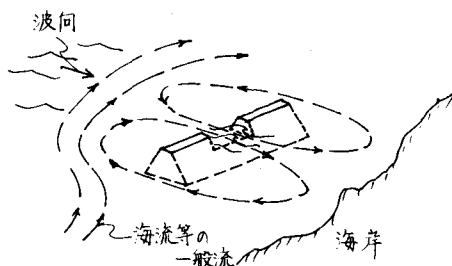


図9. 波による循環流の発生と一般流からの独立水塊形成

また図7に示す潮流制御工を利用して浮遊期幼生の着定場、幼稚仔保育場への輸送を行なうことも検討している。

5. 海水の流動拡散促進, 抑止工の展望

海水の流動拡散制御は原則的に、潮汐、潮流、波などの自然エネルギーを利用して行なう。このための諸工法の開発を行なってきたが、これに加えて新たに内部波エネルギー利用をあげておく。これらのエネルギーを地形性構築物によって制御しようというのである。

(1). 海底堤防による内部波制御

内部波が陸棚斜面、海谷上縁あるいは湾内に侵入してくると、内部波状、あるいは内部流となり、波峰分岐あるいは内部跳水を生じ沿直混水域を作る。この結果の一つは底層水を湧昇させ表層水の富栄養化、水温の平均化、漂流・懸濁物の集積、流れ場の局所性に起因する底質環境の多様化、加速流、減速流、憩流場の混在、など好ましい漁場環境が作られ、またこの現象と湾内で発生させれば着しい海水交換促進工となる。図10は内部波記録の模式図(スライドで示す)である。

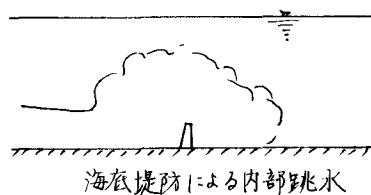
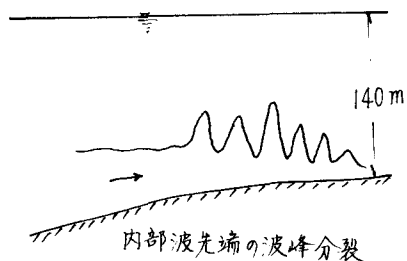
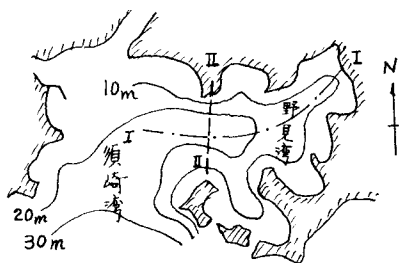


図10. 内部波の事例

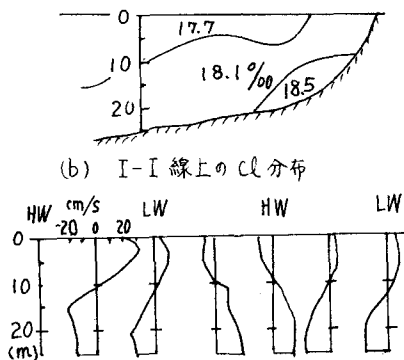
図11は内部潮汐(潮汐による内部波)が湾の海水交流に大きく影響している例で、図は高知県にある野見湾の例である。野見湾は須崎湾に接続し、同湾は新佐川、伊予洗川、桜川他の河川が流入し、表

層塩分濃度が低い。図11(b)に湾軸に沿った塩素量鉛直分布模式図を示す。これによると湾奥に湾口底層水に接続する水層があり、湾岸流域の存在することが判る。また図11(c)は湾口Ⅱ-Ⅱ断面における流速分布の一部を示す。漲潮時には表層が流出、底層が流入し、落潮時には底層より流出、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して流入・流出が生じ、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Ⅱ-Ⅱ線で $2.4 \times 10^4 \text{ m}^2$ であるから Tidal volume による流速は日潮不等における低潮差 0.3 m、高潮差 1.06 m に対してそれぞれ平均流速、 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 , 0.2 m/sec で潮汐による断面平均流速とは比較にならない。密度成層のある海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判る。

(a) 野見湾平面図



(b) I-I 線上の Cl 分布



(c) II-Ⅱ 線における流速分布

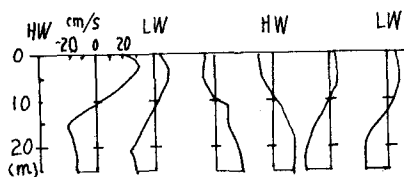


図11. 野見湾における海水交換

(2) 人工岬による流れのハグ離と降下・湾岸流
半島・岬など突出海岸の周辺に良好漁場が形成されている。これは岬による流れのハグ離とその内側の反流域の形成など流れの多様性の中で水質、底質の多様性を生じるためと考えられる。ハグ離線は図12に示す観測結果等から降下流帯を形成し潮境を形成する。岬等地形規模が小さいとハグ離を生じることなくポテンシャル流線に近い流れとなり、水理環境として岬は存在しないと同一となる。このようなとき岬規模を人工的に補完して、岬としての水理環境をもたせることが考えられる。一例を島根県長尾岬における実測例で示す。観測は十個の海流板をほぼ300mの正方形に投入し、陸上よりトランソーム追跡をした。海流板水深を海面下2mと25mの2組で行った。十個の海流板で作る面積をS、平面流速を $\vec{v}_s$ とすると、

$$\text{div } \vec{v} = \text{div } \vec{v}_s + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\therefore \frac{\partial w}{\partial z} = -\text{div } \vec{v}_s \quad \text{また} \quad \text{div } \vec{v}_s = \frac{1}{S} \frac{dS}{dt}$$

水深Zにおける発散を近似的に

$$\text{div } \vec{v}_s = A \nabla^2 + B$$

$$\text{とすると、} z=0 \text{ で } B = (\text{div } \vec{v}_s)_{\text{surf}}$$

$$z=h \text{ で } (\text{div } \vec{v}_s)_{\text{bott}} = Ah + B$$

$$\therefore A = \frac{1}{h} \{ (\text{div } \vec{v}_s)_{\text{bott}} - (\text{div } \vec{v}_s)_{\text{surf}} \}$$

これから、鉛直平均流速は

$$\bar{w} = -\frac{h}{6} \{ (\text{div } \vec{v}_s)_{\text{bott}} + 2(\text{div } \vec{v}_s)_{\text{surf}} \}$$

として求められる。これから一例として図12のA線に沿って $\bar{w} = -10^{-1} \text{ cm/sec}$ 、B線沿いは $+3 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ 程度が得られる。

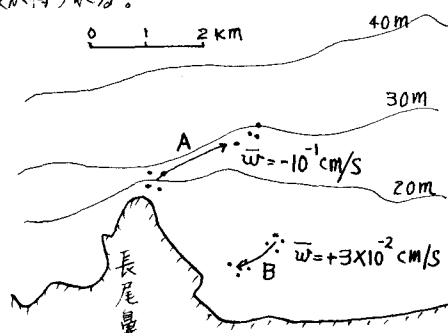


図12. 海流板追跡(S.51.8.23)