

魚礁後流の海水交換に関する研究

杜 多 哲*

1. ま え が き

水産有用生物の増殖を目的として、各種構造物の設置、投石等が盛んに行なわれている。これらの内、魚類の蛸集を目的とした魚礁は、通常水深数十 m 以深の海底上に設置されるのに対し、コンブ胞子やアワビ、ウニ等の浮遊幼生の沈着を目的としたものは、稚仔沈着礁等、目的に応じた名前が付けられており、水深数 m の極浅海域に設置される（本報告では、これも魚礁と呼ぶことにする）。後者の場合は、直接的に、胞子・浮遊卵・幼生の集積を目的としたものであり、前者の場合も、その魚類蛸集の原因の一つとして、魚礁背後へ上流から流下してきた栄養塩・飼料プランクトンがとり込まれ、他の海域に比べて滞留することが挙げられている。

いずれの場合も事業を合理的に進めていくうえで、胞子・浮遊幼生・餌料プランクトンの比重や、行動といった種固有の特性を知るとともに、物体背後の流れが、物質の移流・分散に及ぼす影響について定量的に明らかにしておく必要がある。具体的には、ある形状の物体がある流れの場に設置した場合に、対象とする生物・物質が主流域からどの程度物体背後域にとり込まれるか、逆に背後域の物質がどれだけ主流域に流出していくかということのマクロに知る必要がある。

流れの中に物体を設置した場合に、物体の背後に周囲よりも流速の小さい領域（後流域）が生じることはよく知られ、数多くの研究がなされているが、それらは自由流線の剝離、物体背後の平均流速分布、乱れの分布、運動量の収支等に重点を置いた研究が多く、これらの結果から、主流域から後流域への物質のとり込み、その後の

流出などについての知見を得ることはできない。

本研究では、魚礁後流域が物質の分散に及ぼす影響を明らかにするための基礎的研究として、二次元の矩形構造物を選び、模型周辺での流速・乱れの特性を測定するとともに、前面から一様に矩形パルス状に染料を投入した場合の模型背後の濃度変化を測定し（図一1）、濃度の輸送という立場から見た後流域の特性を明らかにすること、また主流域と後流域との濃度交換を定量的に求めることを目的とした。

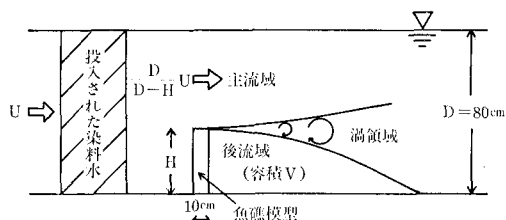
2. 実験方法

実験は、幅 1.5 m、長さ 65 m、高さ 1.25 m の流水水槽で行なった。この水槽は貯水槽、高水槽、試験部水路からなっており、流量調節用のバルブ部に電磁流量計が取り付けられている。

試験部水路の水深は、水路末端に設けられた堰板で調節でき、本実験においては水路中央での水深を 80 cm に保って行なった。また、高水槽から試験部水路へのふき出しの影響による大きな渦を消すために上流部に多孔板 2 面、かごに詰めたサンフレックス 2 面、メッシュの細かい金網 1 面を設置した。

水深 D (80 cm)、模型幅 (10 cm) は一定とし、平均流速 (U) を 10, 17, 24 cm/sec、模型高さ (H) を 0, 10, 20, 30 cm に変化させた。また、 $U=14.9$ cm/sec、 $H=30$ cm について追加実験を行った。全実験ケースは 13 ケースである。

ほとんどのケースにおいて、40~150 の測点で、流速・濃度の測定を行った。濃度の測定は次のようにした。5~6 本の濁度計センサーを使用し、その内の 1 本は染料投入状態をチェックするために構造物前面に固定した。模型前面で矩形パルス状に投入された染料は一部は主流域を去り、一部は、後流域にとり込まれ徐々に流出していく。従って、各測点で濃度の時間的な変化を測定することによって、その測点の特性を知ることができる。なお、染料投入実験を繰り返すと、実験水槽が回流式であるため、水槽全体の基準濃度がわずかに上昇する。実験に用いた濃度範囲では、濃度—電圧の関係は直線関係を示していたことから、染料投入前の濃度を基準



図一1 濃度測定模式図ならびに領域の分類

* 正会員 水産庁水産工学研究所

内を構造物からの剥離によって生じた渦が通過して行くものと考えられる。従って、物質輸送の立場からは主流域と後流域の交換を行なう領域と考えることができる。

(3) 上で述べた各領域は、はっきりと分かれるわけではなく、一定の幅をもち段階的に変化するものである。従って、本研究のようにマクロ的に後流域の濃度輸送を議論しようとする場合には、各領域に対する何らかの基準を設ける必要がある。ここでは、後流域の一つの基準として、 $\bar{u}=0$ の線、ならびに $\sqrt{\bar{u}^2}/|\bar{u}|=1$ の線を取り、その境界線より、構造物側の領域の大きさを比較した。その結果を図-7 に示す。図より、各流速とも、構造物の高さ H が増大するほど、 S/H (S : 面積) が、ほぼ直線的に増加していることがわかる。このことは、後流域の大きさが、ほぼ相似であることを意味している。 $H=30\text{ cm}$ の場合には、かなりのばらつきが見られるが、流速測定メッシュ間隔が構造物から離れると粗くなっており、これについての原因をここで追求することはできない。

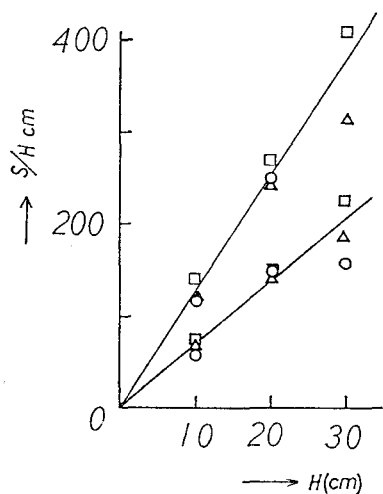


図-7 $\bar{u}=0$ ならびに $\sqrt{\bar{u}^2}/|\bar{u}|=1$ で囲まれる領域の比較
(□: CASE 1, ○: CASE 2, △: CASE 3)

4. 主流域と後流域との濃度交換

これまで述べてきた実験結果から、構造物背後の流れの場合、また、そこでの濃度輸送の機構についてある程度明らかになった。一方実用上の立場からは構造物背後での微細な機構よりも、構造物を設置したことによる物質輸送過程の変化を全体として知ることが必要である。本章ではこの立場から、物質の交換に関するマクロ的なモデルを組み立てた。

現象は、2次元で表わされると仮定し、紙面に直角方向の単位幅当たりについて考える。水塊は図-1に示す様に大まかに3つの領域に分類でき、それぞれ主流域・後

流域・渦領域と呼ぶ。渦領域は主流域と後流域の物質の交換を行なう領域と考えられ、近似的には無視することができる。

主流域と後流域の間には単位時間当り Q の水の交換(量)があり、それによって濃度が輸送される。ここで主流域・後流域の容積、濃度を V_M, V_W, C_M, C_W とする。

この場合、後流域の濃度を支配する方程式は以下の様に表わせる。

$$\frac{d(C_W V_W)}{dt} = -(C_W - C_M)Q \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$C_M = C_M(t) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで主流域は、本来後流域の影響を受けるが、主流域が後流域と比べて大きいこと、また実験結果よりこの領域は構造物前面とほとんど同じ濃度の時間変化を示したことから、この領域の濃度は後流域とは独立に決まるものと考えた。

式(1)の両辺を V_W で割って

$$\frac{dC_W}{dt} = -\frac{Q}{V_W} C_W + \frac{Q}{V_W} C_M$$

ここで

$$\frac{Q}{V_W} = \alpha$$

とおき式(2)を考慮すると

$$\frac{dC_W}{dt} + \alpha C_W = \alpha C_M(t) \quad \dots\dots\dots (3)$$

α は、単位時間当り、後流域の容積に対してどれだけの水が交換されたかを示しており、交換速度係数と定義する。

主流域において濃度の変化が $0 \leq t \leq b$ の間に矩形パルス的に変化する場合を考えると

$$C_M(t) = \begin{cases} C_m & (0 \leq t \leq b) \\ 0 & (b \leq t) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。この場合の解は

$$C_W(t) = \begin{cases} C_m(1 - e^{-\alpha t}) & (0 \leq t \leq b) \\ C_m(1 - e^{-\alpha b})e^{-\alpha(t-b)} & (b \leq t) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5)$$

従って、 $b \leq t$ における濃度実測値から、交換速度係数 α を求めることができる。

後流域としては、各ケースとも $\bar{u} \leq 0$ の領域をとった。領域内に含まれるすべての測点での濃度測定値の平均をとり、後流域の濃度変化を代表するものとした。平均化に際しては各測点の代表面積によって加重平均処理を行った。

主流域については便宜上 $1 \leq x/H \leq 3$, $1.5 < Y/H$ の範囲に含まれる測点の代表面積による加重平均をとり、値が最大となり安定している部分の平均を C_m とした。また染料放出時間がほぼ 50 秒で安定しており、主流域の

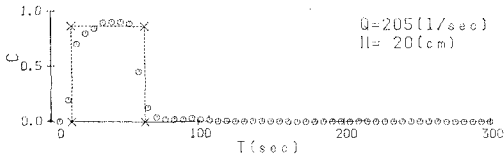
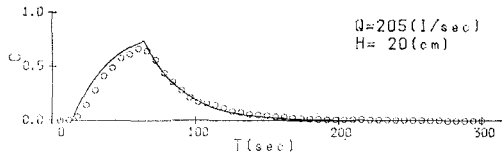


図-8 主流域における濃度変化への矩形のあてはめの一例



(—: 計算値 ○: 実験値)

図-9 実験値と計算値の比較

各測点における測定値も約 50 秒の間最大値をとっていることから、 b は一律 50 秒とした。なお、ここで用いた濃度測定値は、データ処理の項で述べたように基準点をもとに無次元化してある。測定値に矩形をあてはめた一例を図-8 に示す。

α は、便宜的に後流域の代表値が最大となる点から 6 秒後と 42 秒後の間の値について対数を取り、最小二乗法によりその傾きを求めて決定した。

各ケースについて、得られた α , C_m および b を式(5)に代入して求めた計算値と実験値を対比させた一例を図-9 に示す。実線は計算値、○ は実験値をそれぞれ表わしている。図より明らかに両者はよく一致しており、交換モデルに妥当性があると言える。

5. 交換速度係数の表示

得られた交換速度係数の値は、 $\alpha=0.022\sim0.067$ の範囲にわたっている。ここでは、この値がどういった要因によって規定されているかについて考察し、交換速度係数を統一的に表現することを考える。

主流域と後流域との単位境界面当りの交換量は、模型端より生ずる渦の発生周波数 (f) と循環 (Γ) に比例し、渦の流下速度 s に反比例する。従って

$$\frac{dQ}{dt} = C_1 f \cdot \Gamma / s \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに l は模型端よりの境界面上の距離であり、 C_1 は比例定数である。 f , Γ は模型上部の縮流部流速 kU ($k=D/(D-H)$) によって決まり、渦度 kU の運ばれる割合 (速度 $kU/2$) と等しいから¹⁾

$$f\Gamma = \frac{k^2 U^2}{2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

渦の流下速度は U と kU の平均に比例すると考え

$$s = C_2 U(1+k)/2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに C_2 は比例定数である。式(7), (8)を式(6)に代入して積分し、さらに実験結果から、

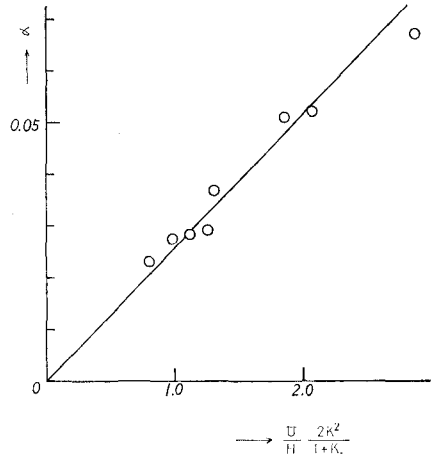


図-10 交換速度係数

$$V_w = C_3 H^2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

(C_3 は比例定数) を用いて整理すると

$$\alpha = \frac{Q}{V_w} = C_4 (U/H) \frac{2k^2}{1+k} \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。実験値をこの形で整理して図-10 に示す。

この図より $C_4=0.027$ が得られ交換速度係数 α は、

$$\alpha = 0.027 \frac{U}{H} \left(\frac{2k^2}{1+k} \right) \quad \dots\dots\dots (11)$$

と表わされる。 k の値はその定義から $k>1$ であり、また実用的に $k<1.7$ ($H/D<0.4$) と考えることができ、実験は、ほぼこの範囲と一致していることから、式(11)によって、交換速度係数の予測を行なうと考えられる。

6. む す び

以上のことから、幅の狭い二次元の矩形構造物という限られた形状のものについてはあるが、流れの場に設置された場合の、主流域との物質の交換について、一応予想が可能になったと考えられる。この結果の水産への応用の例としては、一度後流中にとり込まれた物質の平均滞留時間が、

$$T = \frac{1}{C_0} \int_0^\infty C_0 e^{-\alpha t} dt = \frac{1}{\alpha} \quad (\text{sec})$$

で定義され²⁾、これは濃度が e^{-1} に減少するまでの時間と等しいことから、餌料プランクトンの寿命、水産生物の浮遊幼生期の長さ、産卵場からの到達時間等とを組み合わせることにより、魚礁配置・増殖場造成の規模等に関する一つの目安を与えることに用いることが考えられる。今後の問題としては、対象とする生物の選択性について、定量的に明らかにする必要がある。特に、後流域は、流速が小さく、相対的に、生物の選択行動能力が増大すると考えられるが、その中でも構造物との位置によって微妙な変化がある。

餌料プランクトンの行動や浮遊幼生の着底に関与する流速は、相対値ではなく、絶対値であると考えられるから、海域、種ごとに適正な構造物規模が存在することも考えられる。こういった生物の選択性を定量的に把握するとともに、その種に適した、構造物の形状、配置等を研究していくことが今後必要である。

謝 辞： 本研究にあたり、適切な助言を戴いた水産工学研究所水産土木工学部長中村 充博士、環境改変研

究室長萩野静也氏ならびに高知大学農学部教授木村晴保博士に謝意を表わすとともに、実験にご協力頂いた今村均氏（当時東海大学学生）および樋口明彦氏（当時東京大学学生）に厚く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 谷 一郎：流れ学，岩波書店，p. 268, 1972.
 - 2) 宇野木早苗：海水交換とその素過程について，沿岸海洋研究ノート，第17巻第2号，pp. 89~98, 1980.
-