

# 人工湧昇流構造物の魚礁効果\*

柳 哲雄\*\*・中嶋 昌紀\*\*

## On the Effect of Man-made Structure for Upwelling as an Artificial Reef

Tetsuo YANAGI\*\* and Masaki NAKAJIMA\*\*

### Abstract

The field observations and numerical experiments on the effect of man-made structure for upwelling as an artificial reef are carried out. It was observed that much fish gather just above the man-made structure for upwelling only during the strong tidal current. From the results of numerical experiment, this is thought to be due to that suspended sediments on the sea bed are upwelled just above the man-made structure because of the mutual interaction between strong tidal current and man-made structure.

### 1. はじめに

沿岸漁場の再開発を目的に愛媛県と五洋建設㈱は人工湧昇流構造物を豊後水道東部海域に設置し、底層の未利用の栄養塩を表層に湧昇させることに成功した(柳・中嶋, 1990)。

現地の漁民によると、この人工湧昇流構造物の周囲には魚が蠣集していることが報告されており、人工湧昇流構造物が底層水の湧昇効果のみならず、魚礁効果も発揮していることが期待される。

本稿ではこの人工湧昇流構造物の人工魚礁としての効果の有無を明らかにすることを試みる。

### 2. 現地観測

人工湧昇流構造物は1987年10月に Fig. 1. に示す豊後水道東部、日振島と御五神島の間水深約 50m の海域に Fig. 2. に示すように設置された。

人工湧昇流構造物の設置前と設置後に Table 1. に示すように愛媛県水産試験場、五洋建設㈱、愛媛大学・東京大学地震研究所により人工湧昇流構造物設置点周辺で魚群探知機(200 kHz)による魚影調査がほぼ月1回の頻度で行われた。Table 1. の中に示した流速は設置海域における潮流観測結果より得られた10分潮の潮流調和定数(柳・中嶋, 1990)を用いて計算された、魚群探知

機による現地調査時の  $M_2$  潮流楕円主軸方向の合成潮流流速を表している。

Table 1. に示すように構造物設置前の3回の魚群探知機による調査では1回も魚影は見られなかったが、構造物設置後は特に流速が大きい時、季節や上げ潮流(+)  
・下げ潮流(-)時に関わらず、魚影が多く観測されている。Fig. 1 に五洋建設が行った調査の際の魚群探知機を乗せた観測船の航跡を示す。人工湧昇流構造物を中心に潮流の主軸方向に平行にA-a~G-gの7本の観測線を設けて、それぞれ500m間の観測が行われた。

観測結果の1例として1988年5月17日のものを以下に示す。この日には Fig. 3. に示すように上げ潮流時、下げ潮流時に計3回の観測が行われた。1回目の上げ潮流時には Fig. 4. に示すように魚影は観測されなかったが、2, 3回目の下げ潮流時には Fig. 5. に示すように人工湧昇流構造物直上を中心に濃い魚影が観測された。他の時期の観測結果もほぼ同様で、魚影が見られる中心の場所は常に人工湧昇流構造物の直上であった。

以上の観測結果から I) 人工湧昇流構造物周辺には、季節に関わらず、流速の大きい時に魚が蠣集し、流速の小さい時に魚は蠣集しない傾向がある、II) 魚は構造物直上を中心に蠣集する、ことが明らかとなった。

人工魚礁に蠣集する魚は次のような行動性を示すと言われている。1) アナゴやカサゴのように魚礁に体を接触させ、その隙間を住処する、2) メバルやカワハギのように魚礁に対して至近距離で常に一定の距離を保って定位する、3) アジやサバのように魚礁によって作られ

\* 1990年4月21日受理

\*\* 愛媛大学工学部海洋工学教室

Department of Ocean Engineering, Ehime University, Bunkyo 3, Matsuyama 790, Japan.

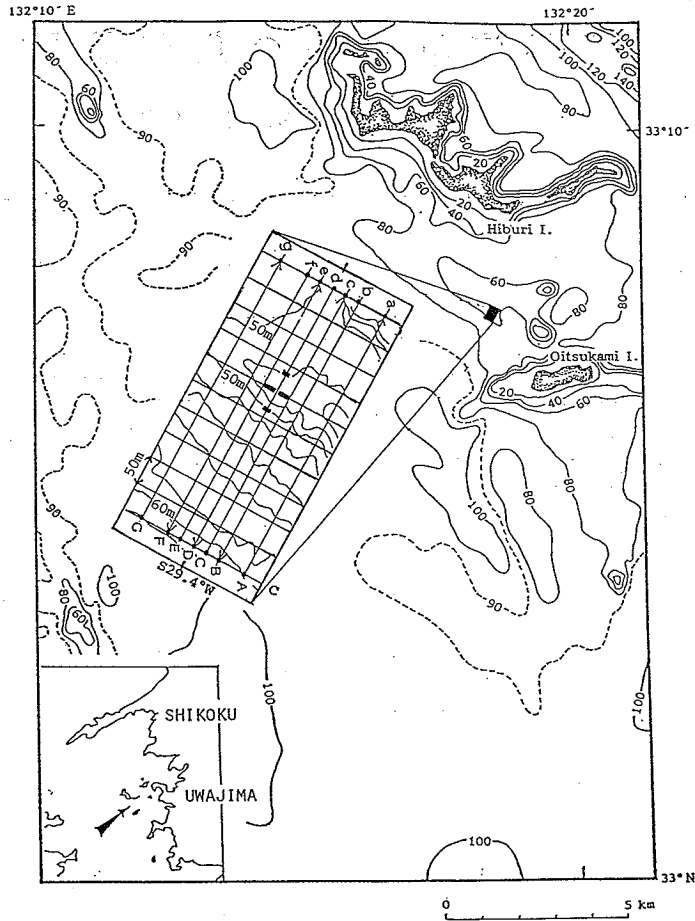


Fig. 1. Map showing the observation site. Four black squares in the insert figure denote man-made structures for upwelling. Seven lines of a-A~g-G denote the ship route for the echosounder observation.

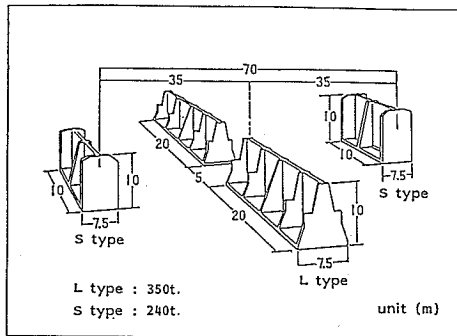


Fig. 2. Scale and arrangement of man-made structures for upwelling.

る内部波の刺激を受けるように魚礁からかなりの距離を保って定位する(小川, 1984; 中村, 1989)。

今回の観測結果によれば, 2) の理由で魚が鯛集しているとする観測結果 1) の流速に対する依存性は説明出来ないし, 3) の理由で鯛集しているとする密度躍層が消滅し, 内部波が存在しない冬季にも魚が鯛集していることを説明出来ない。

ところで人工湧昇流構造物設置前と設置後では海底のベントス量が急減している(柳・中嶋, 1990)。このことは人工湧昇流構造物の設置により設置海域の海底付近の流動環境が変化し, そのことがベントス量の変化につながり, 更に魚の鯛集と関連している可能性を示唆する。

Table 1. Results of echosounder observation. ○ means the existence of fish shadow and no fish shadow. E: Ehime Prefecture Fisheries Observatory, G: Penta-Ocean Construction Co.Ltd., O: Ehime University and Earthquake Institute, University of Tokyo.

date	time	current speed cm s <sup>-1</sup>	fish shadow	
1987. 8. 9	11:00	-40	—	E
1987. 8.16	16:00	-15	—	E
1987. 8.24	11:00	-25	—	E
1988. 5.16	11:20	-20	○	G
1988. 5.16	15:30	+30	○	G
1988. 5.17	6:00	+ 5	—	G
1988. 5.17	10:00	-25	○	G
1988. 5.17	11:00	-20	○	G
1988. 5.17	12:00	-10	—	G
1988. 6.17	8:45	+ 5	—	E
1988. 8.26	9:10	-20	○	O
1988. 8.26	13:20	+20	○	O
1988. 9.20	12:30	+15	○	E
1988.10.17	12:30	-30	○	E
1988.11.17	12:30	-25	○	E
1988.12. 2	11:00	+20	○	E
1989. 1.10	14:30	-30	○	E
1989. 2.14	11:10	+ 5	—	E
1989. 4.20	12:40	-20	—	E

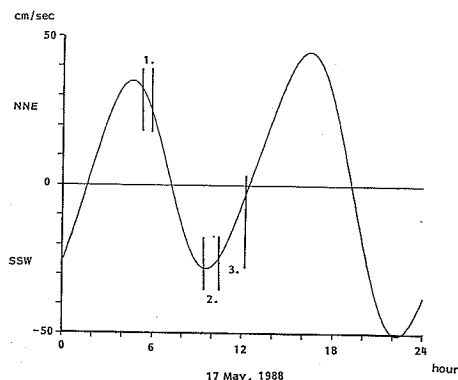


Fig. 3. Temporal variation in tidal current on 17 May, 1988. Echosounder observations were carried out during 1., 2. and 3..

そこで人工湧昇流構造物設置による観測海域の流動の変化、海底付近のベントスやデトリタスを含む懸濁粒子の分散状況の変化、それらの魚が鯛集との関連の有無を以下の数値実験によって検討してみる。

### 3. 数値実験

流速の観測結果(柳・中嶋, 1990)から, 人工湧昇流構造物の設置により鉛直断面積が2割減少したのに比例して, 潮流流速は約2割増大したことが分かっている。このことは人工湧昇流構造物による流速変化は鉛直2次元断面内で生じていることを示している。更に魚の鯛集は Fig. 5. に示すように人工湧昇流構造物直上を中心にして3次元的な拡がりには限られていて, 現象を鉛直2次元的に扱っても充分近似できると考えられる。そこでここでは人工湧昇流構造物設置海域の M<sub>2</sub> 潮流楕円の主軸方向に沿った鉛直2次元断面内の流速変化, 海底付近の懸濁物質の分散に関する数値実験を行う。

流動の基礎方程式は密度一様, 非圧縮, プシネスク近似, 非静水圧近似のもと以下のように書ける。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + A_h \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + A_v \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

ここで  $t$  は時間,  $u$  と  $w$  は  $x$  (水平),  $z$  (鉛直) 方向の流速,  $\rho_0$  は海水の密度,  $p$  は圧力,  $g$  は重力加速度,  $A_h$  と  $A_v$  は水平, 鉛直の渦動粘性係数を表す。流線関数  $\phi$  を導入する。

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial z}, \quad w = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (4)$$

(4)を用いて(1)-(3)は次のように書き直せる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \zeta \quad (5)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + w \frac{\partial \zeta}{\partial z} = A_h \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + A_v \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2} \quad (6)$$

(5), (6)式を空間的には中央差分, 時間的にはリープフロッグ法で差分近似して, 適当な境界, 初期条件のもとで数値的に解く。特に移流項の差分に関しては荒川ヤコビアンを用いた (ARAKAWA, 1966)。

Fig. 6. に示すような深さ 70m, 長さ 840m の人工湧昇流構造物を含む海域を考え, 空間的には横 35m × 深さ 5 m の格子に分割した。海面は固定し, 海面と海底ではスリップ条件を与え, 左右の水平境界で潮流に相当する流入, 流出を与えた。したがって海面と海底での流線関数に関する境界条件は以下のようになる。

17 May, 1988 5:20-6:10

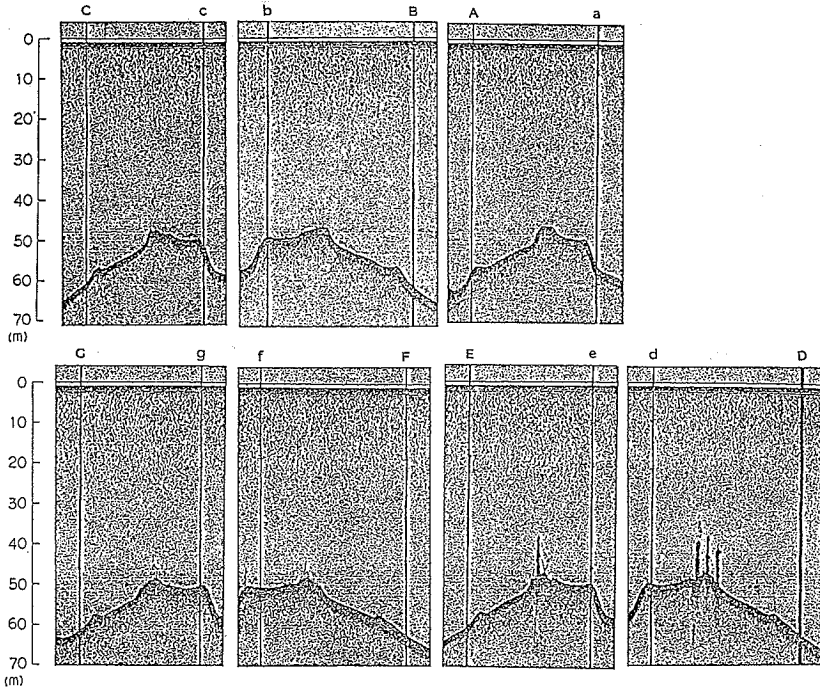


Fig. 4. Results of echosounder observation 1. during 5:20-6:10 on 17 May 1988.

17 May, 1988 9:35-10:35

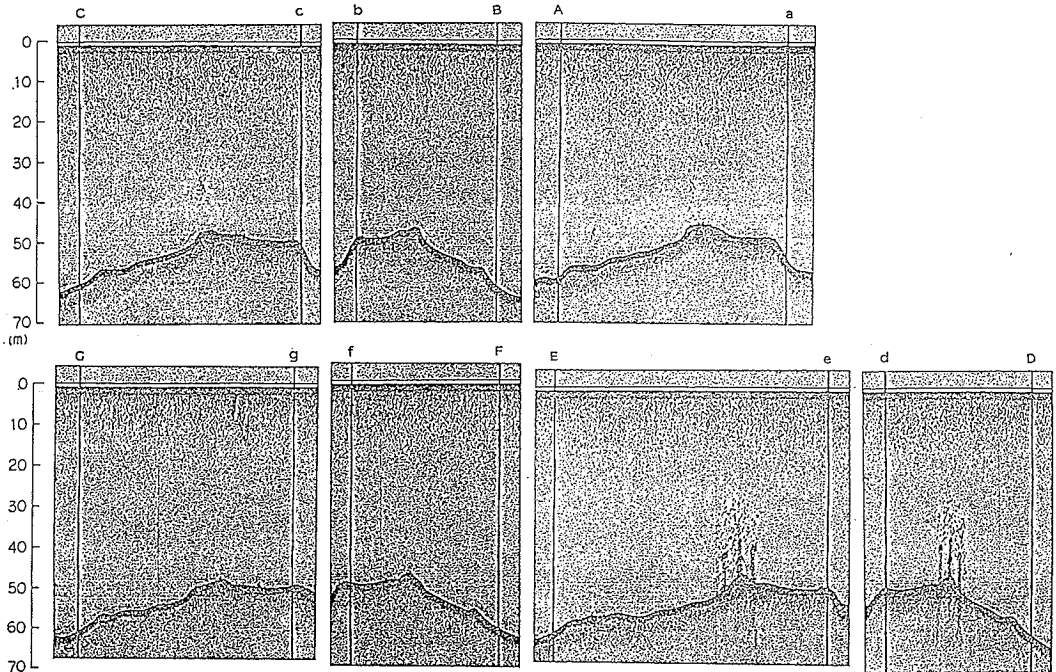


Fig. 5. Results of echosounder observation 2. during 9:35-10:35 on 17 May 1988.

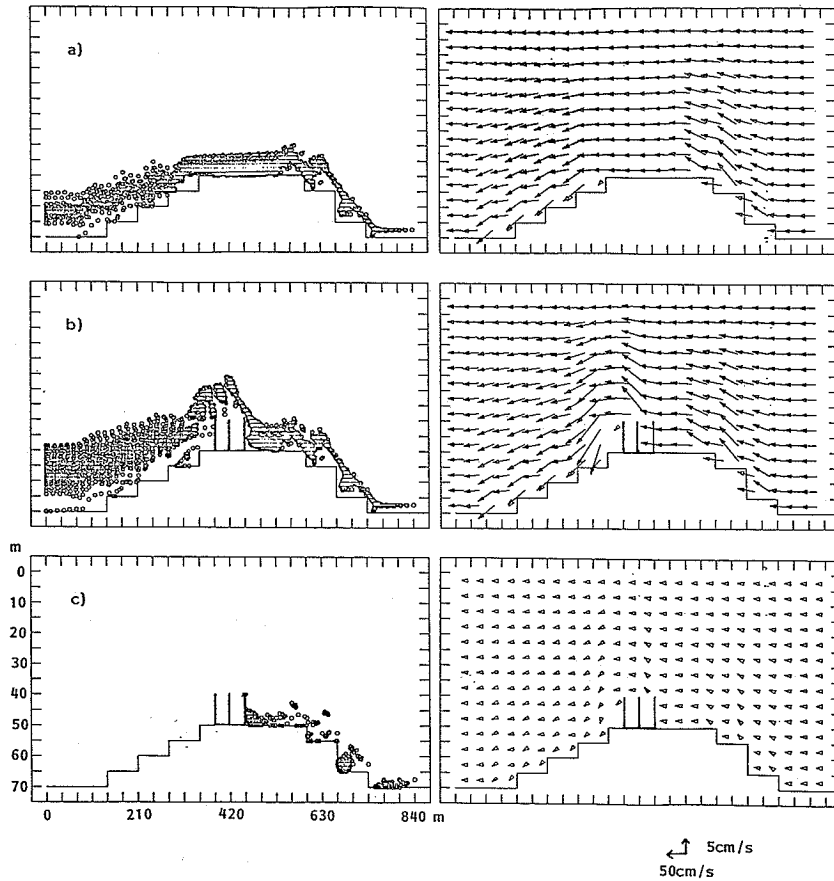


Fig. 6. Results of numerical experiments on the dispersion of suspended sediments near sea bed in the cases of a) tidal current of 50 cm/s without man-made structures, b) tidal current of 50 cm/s with man-made structures and c) tidal current of 5 cm/s with man-made structure.

$$\begin{aligned} \phi &= Q(t) & z &= 0 \\ \phi &= 0 & z &= -h(x) \end{aligned} \quad (7)$$

ここで  $Q(t)$  は水平境界で与える潮流流量,  $h(x)$  は水深を表す。  $A_h=100\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $A_v=1\text{cm}^2/\text{s}$  として, a) 人工湧昇流構造物設置前, 水平境界から  $50\text{cm/s}$  の流れを与えた場合, b) 人工湧昇流構造物設置後, 水平境界から  $50\text{cm/s}$  の流れを与えた場合, c) 人工湧昇流構造物設置後, 水平境界から  $5\text{cm/s}$  の流れを与えた場合の流動を計算した。そして得られた流動の計算結果をもとに次のようにして海底直上に存在する懸濁物質 (ベントスやデトリタスを想定している) の物質分散の様子をオイラー・ラグランジュ法を用いて計算した。

ある時刻  $t^n$  に  $X^n$  に存在した懸濁物質の  $\Delta t$  時間後の

位置  $X^{n+1}$  は以下の式を用いて計算する (柳ほか, 1989)。

$$X^{n+1} = X^n + V\Delta t + (FV) \cdot V\Delta t^2 + w_s\Delta t + R \quad (8)$$

ここで  $V(u, w)$  は(5)-(7)によって計算された流速ベクトル,  $w_s$  は懸濁粒子の沈降速度,  $R$  は乱れによる位置の分散を表し, 次式で与える。

$$R = \gamma' \sqrt{2\Delta t D} \quad (9)$$

ここで  $\gamma'$  は平均 0 で標準偏差 1.0 の正規乱数,  $D(D_x, D_z)$  は分散係数を表している。懸濁粒子の初期条件としては最初人工湧昇流構造物の上流の海底上に一様に存在しているとした。  $w_s=0.3\text{cm/s}$ ,  $D_x=100\text{cm}^2/\text{s}$ ,  $D_z=1\text{cm}^2/\text{s}$  として行った a)~c) の計算結果を Fig. 6. に示

す。人工湧昇流構造物が存在して流速が大きい場合のみ海底付近の懸濁物質が構造物の直上に舞い上がっていることが良くわかる。もし魚がこの懸濁物質を捕食するために蝟集しているとすれば、この計算結果は構造物が存在し、流速が大きい時にのみ人工湧昇流構造物直上に魚が蝟集するという魚群探知機による観測結果をうまく説明出来る。

この計算において結果に最も大きな影響を及ぼすパラメータは懸濁粒子の沈降速度  $w_s$  である。すなわちより大きな  $w_s$  を用いれば、懸濁粒子はすみやかに沈降してしまっ、b) の場合も懸濁粒子が構造物の直上に舞い上がらない。一方より小さな  $w_s$  を用いれば、懸濁粒子は容易に舞い上がって a)~c) すべての場合に Fig. 6. b) に似た計算結果が得られる。海底直上の懸濁粒子の沈降速度に関する観測結果はほとんど存在しないが、今後何らかの方法で観測してみたいと考えている。

#### 4. おわりに

人工魚礁に魚が蝟集する理由としては 1) 陰影効果説、2) 餌料効果説、3) 渦流効果説、4) 逃避場所説、5) 本能説など様々な要因が推定されており、さらに近年では視覚あるいは音響効果などの影響の有無も言われている。加えてこれらのいくつかの効果が相乗して魚を蝟集していることも考えられるが、いまだにはっきりした答えはないように見える。

本稿ではひとつの可能性として構造物周辺の強い流れにより、海底表面のベントスやデトリタスといった懸濁

粒子が構造物直上に巻き上げられ、それを捕食するために魚が蝟集するという機構を考えた。

今後海底設置型魚群探知機を用いての魚の蝟集の時間変化、海中カメラによる蝟集する魚の種類の特定の観測などの新しい観測手法を用いた研究を行って、海底の構造物周辺に魚が蝟集する機構を定量的に解明していきたいと考えている。

本研究を進めるにあたり貴重な観測資料を提供して頂いた愛媛県水産課、愛媛県水産試験場、五洋建設㈱の関係各位、有意義な議論をして頂いた愛媛大学工学部の武岡英隆助教授、観測・数値実験に御協力して頂いた東京大学地震研究所の日比谷紀之博士、数値計算に協力して頂いた愛媛大学工学部の磯田豊助手、岡田慎一氏、更に貴重なコメントを頂いた査読者に深甚なる謝意を表する次第である。

#### 文 献

- ARAKAWA, A (1966) Computational design for long-term numerical interpretation of the equations of fluid motion. *J. Comput. Phys.*, **1**, 119-143.
- 中村 充 (1989) 水産環境における内部波の役割. *月刊海洋*, **21**, 556-561.
- 小川良徳 (1984) 魚礁と蝟集魚. 「人工魚礁」, 佐藤修編, 恒星社厚生閣, 32-45.
- 柳 哲雄, 岡田慎一, 塚本勝己 (1989) 放流直後のマダイ稚魚の挙動に関する数値シミュレーション. *水産海洋研究*, **53**(4), 378-384.
- 柳 哲雄, 中嶋昌紀 (1990) 人工湧昇流構造物による海況変化. *水産海洋研究*, **54**(1), 1-8.