

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*

柳 哲雄**・岡田慎一**・塚本勝巳***

Numerical Simulation of Red Sea Bream Juveniles Directly after the Stocking*

Tetsuo YANAGI**, Shin-ichi, OKADA** and Katsumi TSUKAMOTO***

Abstract

The numerical simulation of stocking of red sea bream (*Pagrus major*) is carried out. The field experiment of stocking of red sea bream juveniles was carried out at Nyuzu cove in the Bungo Channel on 26 June, 1988, and juveniles of different body sizes were released. Sampling was made for 3 days after the release. The largest group of 39 mm in total length were recovered in the largest number and the recovery rate of the smallest group was the lowest. Such difference in the recovery rate is well reproduced in the numerical experiment considering the flow field and the behavioural characteristics of red sea bream juvenile. Such numerical simulation will be useful to plan the effective stocking of juveniles.

1. はじめに

近年、沿岸漁業の振興策のひとつとして“獲る漁業から育てる漁業へ”のキャッチフレーズのもと栽培漁業の推進が叫ばれ、各地で稚魚の放流が盛んに行われるようになってきた。沿岸海域の漁獲量の増大に結び付くような効果的な稚魚放流技術を確立するためには、斃死率の大きい放流直後の稚魚の行動を詳細に明らかにする必要があることは言うまでもない。しかるに現在まで放流直後の稚魚の振舞いを詳細に明らかにした研究例はほとんど存在しない。

本研究は大分県の入津湾で行われたマダイの稚魚の放流に関する詳細な現地観測結果と3次元数値模型実験によるマダイ稚魚の挙動に関するシミュレーション結果を結合させて、放流直後の稚魚の行動特性を明らかにし、より効果的な稚魚放流技術を確立するための今後の研究の一助と為そうとするものである。

* 1989年7月7日受理

** 愛媛大学工学部海洋工学教室
Department of Ocean Engineering, Ehime University, Matsuyama 790, Japan

*** 東京大学海洋研究所
Ocean Research Institute, University of Tokyo, Minami-Dai 1-15-1, Nakanoku, Tokyo 164, Japan

2. 放流実験

1988年6月26日～6月29日、大分県の入津湾 (Fig. 1) において日本栽培漁業協会と東京大学海洋研究所によってマダイの稚魚放流実験が行われた (日本栽培漁業協会上浦事業場, 1989; TSUKAMOTO *et al.*, MS)。6月26日午後1時 (上げ潮時), Fig. 1 中の入津湾中央部の放流点の表層より, Table 1 に示すような3種類の平均全長を持つマダイの稚魚がそれぞれ10～40万尾ずつ同時に放流された。その後3日間にわたって, Fig. 1 中の地曳定点と舟曳定点において, 稚魚の再捕が行われ, 結果的に Fig. 2 に示すような再捕稚魚の分布が得られた。0.68%と最も再捕率の高かった平均全長 39.4 mm の稚魚は湾全域に亘って海岸近くの底層と湾口の浅瀬付近の底層に分布していた。また平均全長 18.5 mm の稚魚は湾奥の海岸付近の底層に分布していたが, 再捕率は0.063%と低かった。平均全長 10.7 mm の稚魚は湾奥の海岸付近でのみわずか3尾しか再捕されなかった。

稚魚放流実験と同時に海況調査も行われた。水温, 塩分の水平, 鉛直分布観測の結果得られた, 6月26日の上層(0～2 m), 中層(2～5 m), 下層(5 m～海底)の密度の水平分布を Fig. 3 に示す。上層の湾奥に密度 1.022 g/cm³ 程度の軽い海水が分布しているが, 中層は密度

1.023 g/cm³, 下層は密度 1.024 g/cm³ の海水で占められ, 水平的な密度勾配は上層以外にはほとんど存在しない。

3. 数値実験

3.1. 流況・密度分布

マダイの稚魚の放流直後の行動をシミュレートするためには, まず入津湾の流況, 密度分布を再現しなければ

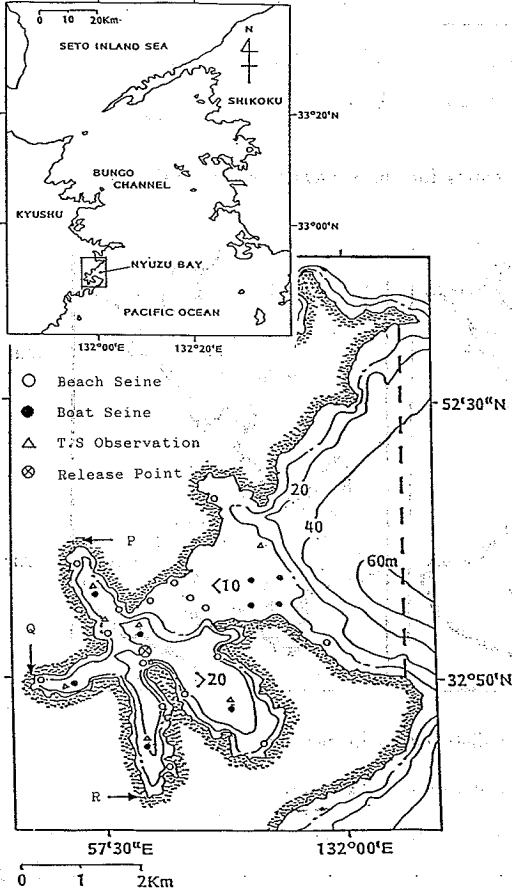


Fig. 1. Nyuzu cove. Numbers show the depth in meter. Dashed line shows the open boundary of the numerical model.

ならない。湾内の流動と密度分布を支配する基礎方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - f \mathbf{k} \times \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu_h \nabla^2 \mathbf{v} + \nu_z \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial z^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = -\nabla \cdot \mathbf{v} \quad (2)$$

$$p = \rho_0 g \zeta + \rho_0 \int_0^z B dz \quad (3)$$

$$B = \frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0} g \quad (4)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla B = k_h \nabla^2 B + k_z \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} \quad (5)$$

ここで \mathbf{v} は水平流速ベクトル, w は鉛直流速, ∇ は水平微分演算子, f はコリオリ・パラメータ, \mathbf{k} は鉛直方向の単位ベクトル, ρ_0 は鉛直平均密度, p は圧力, ν_h は水平渦動粘性係数, ν_z は鉛直渦動粘性係数, g は重力加速度, ζ は平均水面上の水位, B は浮力, k_h, k_z は水平, 鉛直渦動拡散係数を表す。

運動学的な境界条件に関しては, 陸岸では粘着, 海面と海底では次の境界条件を与えた。

$$\rho_0 \nu_z \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} = \rho_a c_a |W| W \quad z=0 \quad (6)$$

$$\nu_z \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} = c_b |v| v \quad z=-H \quad (7)$$

ここで ρ_a は空気の密度, c_a は海面の抵抗係数, W は風ベクトル, c_b は海底摩擦係数, H は水深を表す。

(1)-(7) 式を差分法で計算機で解くが, 入津湾を水平的には 200 m 格子に分割し, 鉛直的には上層(0~2m), 中層(2~5m), 下層(5m~海底)に分割した。

まず入津湾内で最も卓越している流動である潮流を再現することを試みる。入津湾内に潮汐・潮流観測点が存在しないために, 放流実験当時の潮汐・潮流を直接知ることは出来ない。そこで入津湾と同じ潮汐特性を持ち, すぐ北にある佐伯湾の主要10分潮の潮汐調和定数 (Table 2; 海上保安庁水路部, 1985) を用いて, 放流実験当時の入津湾の潮汐を再現した (Fig. 4)。湾内の密度は一様

Table 1. Results of experimental stocking of the red sea bream juveniles in Nyuzu cove.

Date of release	Total length (mm)	No. fish stocked ($\times 1000$)	No. recover	Recovery rate (%)
G 1	39.4(20.9-52.3)	178	1220	0.68
G 2	18.5(12.5-25.0)	214	134	0.063
G 3	10.7(8.5-14.6)	364	3	0.00082

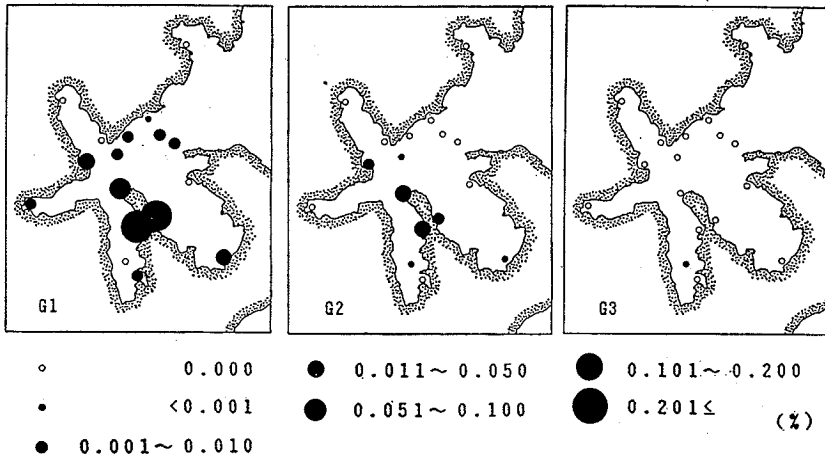


Fig. 2. Horizontal distributions of stocked juveniles for three days after the release.

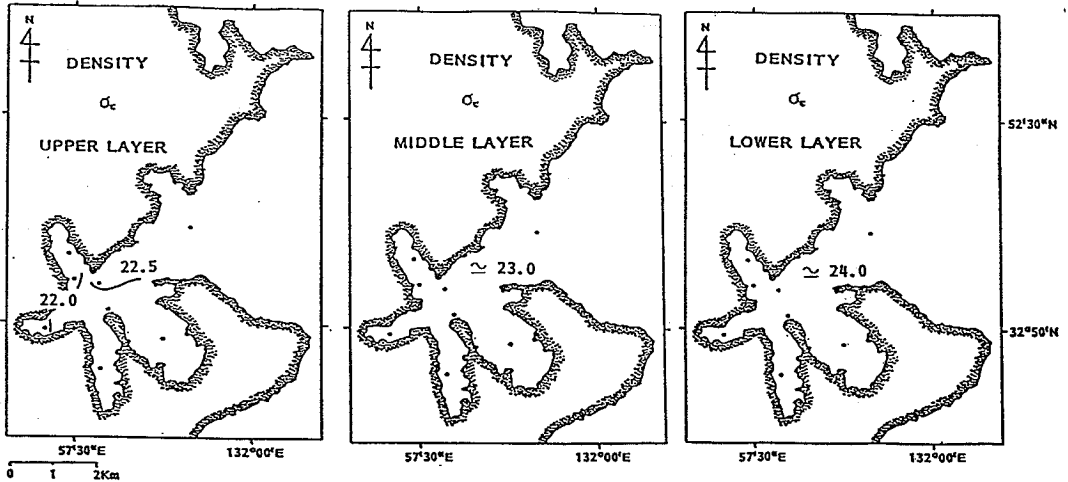


Fig. 3. Observed horizontal density distribution in each level.

Table 2. Harmonic constants of tide at Saiki Bay.

	M ₂	S ₂	K ₂	N ₂	K ₁	O ₁	P ₁	Q ₁	M ₄	MS ₄
AMPLITUDE	51.9	23.0	6.3	9.5	20.3	16.0	6.8	3.3	0.6	0.7 (cm)
PHASE LAG	175.9	201.4	201.4	174.2	192.1	161.7	192.1	161.7	189.0	10.0 (deg)

で風は吹いていないとし、Fig. 4の潮汐を数値模型の外洋の境界条件として Fig. 1中の破線の場所で与えて、原始法(YANAGI and OKAMOTO, 1984)で解いて得られた6月26日午後1時の上げ潮流最盛時の上層の流況をFig. 5(a)に、6月26日午後7時の下げ潮流最盛時の上層の流況をFig. 5(b)に示す。湾口にある浅瀬上で潮流流速は40 cm/secを越えているが、湾内では5 cm/sec以下と微弱である。中層、下層の流況も湾口の浅瀬付近を

除けば上層とほとんど同様である。

湾内の密度分布を決定している流れは潮流より変動周期の長い潮汐残差流、密度流、吹送流である。そこでまず潮流の計算結果を6月26日～6月29日の間平均して潮汐残差流を求めた。次に密度流と吹送流を計算するために、海面で実際の加熱と風の応力を、陸からの淡水供給のあるP, Q, R点(Fig. 1)では河川からの浮力フラックスを次のように与えた。

$$-k_z \frac{\partial B}{\partial z} = \frac{g\alpha Q}{\rho_0 c_p} \quad z=0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial B}{\partial z} = 0 \quad z=-H \quad (9)$$

$$Q_r = (B_r - B)R \quad \text{at P, Q and R} \quad (10)$$

ここで α は熱膨張係数, Q は海面熱収支, c_p は定圧比熱, B_r は河川水の浮力, R は河川水の流量を表す。外洋境界においては浮力の水平勾配は 0 という境界条件を与えた。このような現実の浮力と風応力の境界条件を与え, セミ・インプリシット法 (大西, 1978) で (1)~(10)式を解いた結果得られた上層, 中層, 下層の残差流 (潮汐残差流, 吹送流, 密度流を重ね合わせたもの)分布を Fig. 6 に, 密度の分布を Fig. 7 に示す。上層で湾外に向かう 5~10 cm/sec の残差流が卓越しているが, 中層, 底層の湾奥に向かう残差流速は浅瀬近傍以外では

微弱である。さらに計算された密度分布は観測されたそれを良く再現している。

計算に用いた各パラメータを Table 3. に示す。

3.2. 放流稚魚の挙動

ある時刻 t_n に X_n に存在したマダイの稚魚の Δt 時間

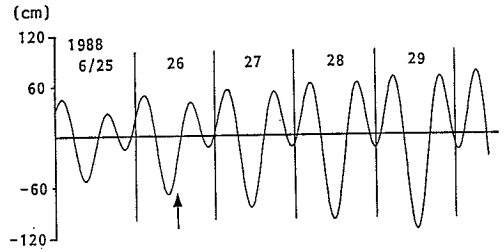


Fig. 4. Estimated tidal variation in Nyuzu cove. Arrows show the time of stocking.

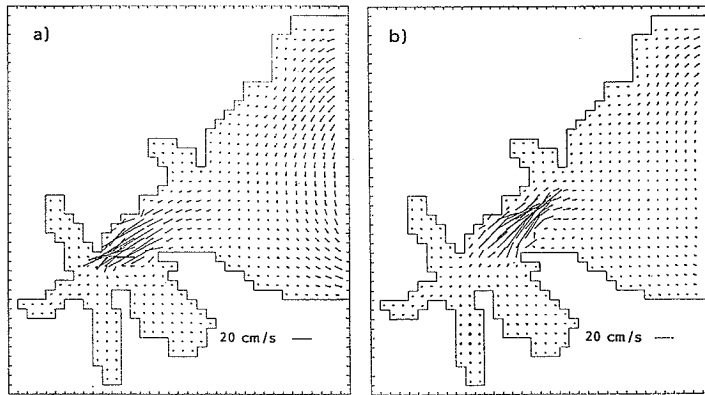


Fig. 5. Maximum flood tidal current in the upper level at 13:00 on 26 June (a), and maximum ebb one at 19:00 on 26 June (b), 1988.

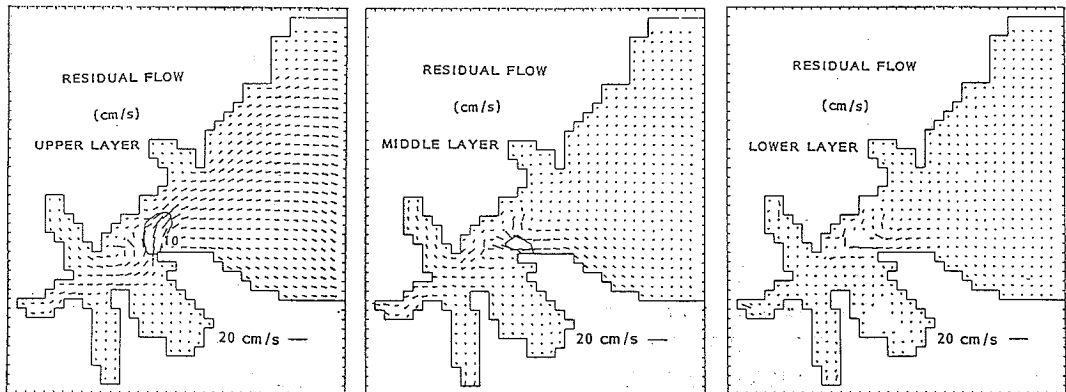


Fig. 6. Residual flow in each level.

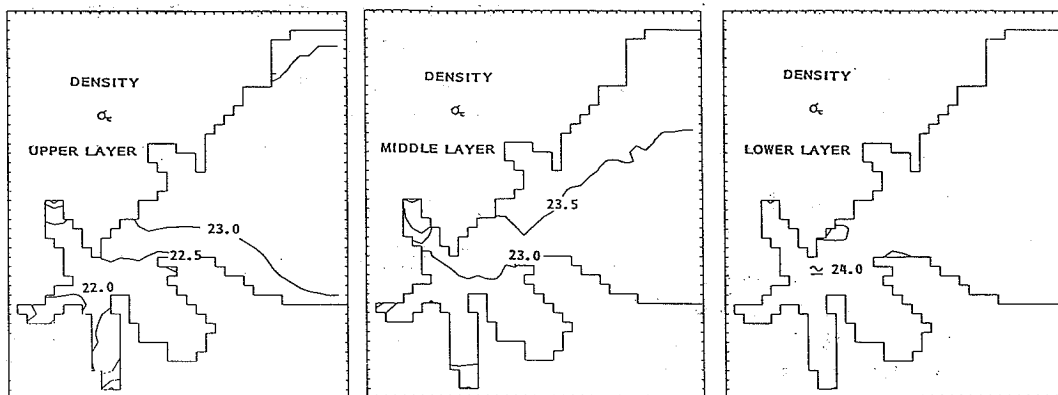


Fig. 7. Calculated horizontal density distribution in each level.

Table 3. Parameters used in the numerical experiment.

Horizontal grid scale	$\Delta x=200$	(m)
Time step	$\Delta t=20$	(sec)
Horizontal eddy viscosity	$\nu_h=1.0 \times 10^4$	(cm^2/sec)
Vertical eddy viscosity	$\nu_z=10$	(cm^2/sec)
Horizontal eddy diffusivity	$k_h=1.0 \times 10^4$	(cm^2/sec)
Vertical eddy diffusivity	$k_z=10$	(cm^2/sec)
Gravitational constant	$g=980$	(cm/sec^2)
Coriolis parameter	$f=7.8 \times 10^{-5}$	(/sec)
Bottom frictional coefficient	$ca=2.6 \times 10^{-3}$	
Surface frictional coefficient	$ca=1.3 \times 10^{-3}$	
Overall mean density	$\rho_o=1.0238$	(g/cm^3)
Atmospheric density	$\rho_a=1.2 \times 10^{-3}$	(g/cm^3)
Heat flux	$Q=300$	($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{day}$)
Specific heat	$C_p=0.932$	($\text{cal}/\text{g}/^\circ\text{C}$)
Heat expansion coefficient	$\alpha=0.2 \times 10^{-4}$	(/ $^\circ\text{C}$)
River discharge	$P, Q, R=40$	($\text{cm}^3/\text{sec}/\text{cm}$)
Wind speed	$(w_a, w_b)=(200, 0)$	(cm/sec)

後の位置 X_{n+1} は次式によって計算出来るとする (柳・磯辺, 1987)。

$$X_{n+1} = X_n + v\Delta t + (\nabla v) \cdot v\Delta t^2 + w_s\Delta t + R \quad (11)$$

ここで v は 3.1 で計算された潮流と残差流を合わせた流速ベクトル, w_s は稚魚自身の上昇, 下降速度, R は乱れや稚魚の遊泳による位置の分散を表し, 次式で与える。

$$R = \gamma \sqrt{2\Delta t D} \quad (12)$$

ここで γ は平均 0 で標準偏差 1.0 の正規乱数, D は分散係数を表す。(11)式は複雑な地形に因る流速シアが稚魚の移動に関係することを考慮し, 流速シアの影響も含んでいる。 w_s に関しては稚魚の大きさに応じて, TSUKAMOTO *et al.* (MS) の実測結果をもとに次のよう

な特性を与えた。なお入津湾では夏季 15 m 以深には貧酸素水塊が発達するので, 稚魚は 15 m 以深に移動することはない。

- 1) 平均全長 39 mm: 昼間は 15 m 以浅の海底付近に分布し, その場の海水流速の 1/2 で移動し, 夜間は海底に着底し, 移動しない。
- 2) 平均全長 18 mm: 昼間は 10~15 m 層に分布し, その場の海水流速の 2/3 で移動し, 夜間は 10~15 m 層に分布し, その場の海水流速で移動する。
- 3) 平均全長 10 mm: 昼間は 0~15 m 層に均一に分布し, 夜間は体内の浮袋の調整作用により浮上して, 0~5 m 層に分布する。昼間も夜間もその場の海水流速で移動する。

稚魚の移動に関する水平分散係数を $10^6 \text{ cm}^2/\text{sec}$, 鉛直

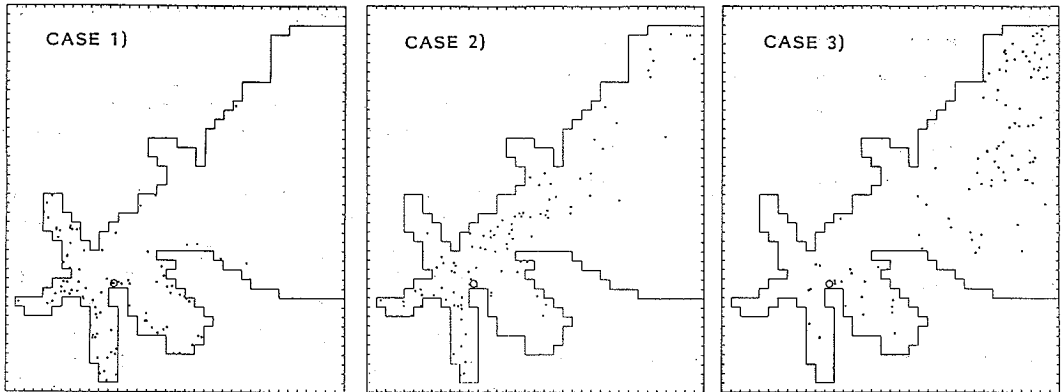


Fig. 8. Calculated horizontal distributions of stocked juveniles with average total length of 39mm (1), 18mm (2) and 10mm (3) in the case of horizontal dispersion coefficient of $10^6 \text{cm}^2/\text{sec}$.

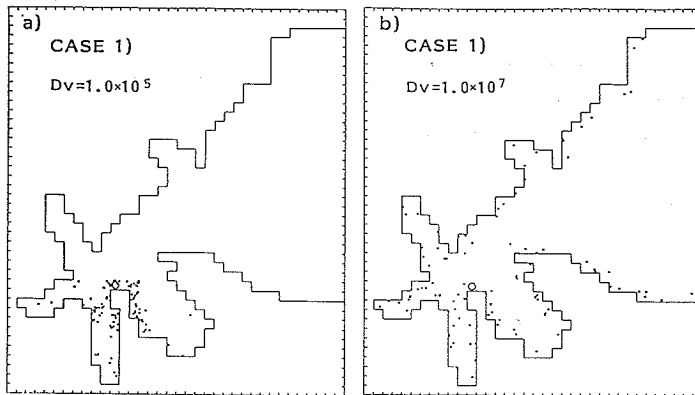


Fig. 9. Calculated horizontal distribution of stocked juveniles in the case of horizontal dispersion coefficient of $10^5 \text{cm}^2/\text{sec}$ (a) and of $10^7 \text{cm}^2/\text{sec}$ (b).

分散係数を $10 \text{cm}^2/\text{sec}$ として計算したそれぞれの稚魚の3日後の分布状況を Fig. 8 に示す。3) の場合は上層の密度流のためほとんどの稚魚が湾外に流出していくこと、2) の場合は湾外に流出する稚魚と、湾奥に留まる稚魚に2分されること、1) の場合はほとんどの稚魚が湾内に留まることなどがわかる。この計算結果は稚魚の全長が大きくなるほど湾内での再捕率が良かったという現場実験結果や、Fig. 2 に示したサンプリング定点における再捕尾数の分布と定性的には良く一致している。

4. 考 察

稚魚の挙動追跡に用いた水平分散係数 $10^6 \text{cm}^2/\text{sec}$ は水平のメッシュサイズ 200 m の数値計算に使われる通常分散係数の値としては大きすぎる。もし見かけの拡散係数がリチャードソンの法則に従うとすれば、経験的に

得られている次式により、ある決まった水平スケールの分散係数の大きさは推定できる。

$$D = Ka = cl^{4/3} \quad (13)$$

OKUBO (1974) のダイアグラムによれば、 l が 200 m の場合 Ka は $2 \times 10^9 \text{cm}^2/\text{sec}$ 程度となる。この Ka をもとに地形の複雑さも考慮し、本数値実験の $\nu_h = k_h = 10^4 \text{cm}^2/\text{sec}$ が決められている。

平均全長 39 mm の稚魚に対して、水平分散係数を Fig. 8 で与えたものより1桁づつ大きくしたものと、小さくしたものの結果を Fig. 9 に示す。小さくしたものは稚魚の分散が小さくて、観測結果を再現出来ない。また大きくしたものも稚魚が分散しすぎて、これもまた観測結果を再現出来ない。結局 $10^6 \text{cm}^2/\text{sec}$ という水平分散係数は海水中の受動的な物質の分散係数としては大きすぎるが、稚魚のように自ら遊泳力を持って、分散しようと

するものの分散係数としては適当なのだろう。

以上の現地観測結果と数値実験結果より、マダイの稚魚放流に関しては体長の小さいものは流動の影響が大きく定着率が悪くなるが、体長の大きいものは流動の影響を受けることが少なく、定着率も良くなるので、なるべく体長の大きいものを放流することがより効果的であることがわかった。

5. おわりに

以上、数値シミュレーションの手法によりマダイの放流稚魚の挙動の再現を試みて、ある程度定性的には満足の出る結果を得ることが出来た。

今後より詳しい稚魚の行動特性、アナゴなどの捕食や共食いによる稚魚の死亡率などの生物特性も考慮して、より定量的な数値シミュレーションを試みて行きたいと考えている。

本研究は日本栽培漁業協会と第三著者が大分県の入津湾で行ったマダイ稚魚の放流実験結果を未発表の資料も含めて利用して行ったものである。貴重な観測資料を

提供して頂いた関係各位に深く感謝する次第である。

文 献

- 海上保安庁水路部 (1985) 潮汐調和定数表.
日本栽培漁業協会上浦事業場 (1989) 昭和63年度事業報告.
OKUBO, A. (1974) Some speculations on oceanic diffusion diagrams. Rapp. Proc. Verb., Cons. Int. Expor. Mer., **167**, 77-85.
大西行雄 (1978) 沿岸海域の数値実験. 海洋環境の科学, 堀部純男編, 東京大学出版会, 246-271.
TSUKAMOTO, K., H. KUWADA, J. HIROKAWA, M. OYA, Y. SEKIYA, H. FUJIMOTO and K. IMAIZUMI (MS) Size-dependent mortality of the red sea bream juveniles released with otolith-tagging in News Bay. J. Fish Biology (to be submitted).
YANAGI, T. and Y. OKAMOTO (1984) A numerical simulation of oil spreading on the sea surface. La mer, **22**, 137-146.
柳 哲雄, 磯辺篤彦 (1987) 河口域での懸濁粒子の挙動に関する数値実験. 沿岸海洋研究ノート, **25**, 61-66.