

海砂採取による海底地形変化がイカナゴ仔稚魚輸送に 及ぼす影響に関する研究

末永慶寛* ・田中和広**・増田光一***
藤原正幸****・佐々木 孝*****

1. はじめに

瀬戸内海の備讃瀬戸海域は、イカナゴ (*Ammodytes personatus*) の主産卵場の一つとなっている (藤原ら, 1992)。イカナゴは食物連鎖の重要な位置にあるため、イカナゴ資源の枯渇は海域の魚類生産に大きな影響を及ぼしかねない。イカナゴは孵化した後に浮遊生活に入り、この期間は特に産卵期である冬季の西風による流れの影響を大きく受ける (Nakata, 1988; 中田, 1995)。イカナゴが資源に加入するには、西風による吹送流により産卵場から成育に好適な海域へ輸送されることが必要となる。

またこの海域では建設工事の為の骨材資源として 1950 年代半ばから海砂採取が行われている。その骨材として採取される海砂の粒径がイカナゴの産卵場や生息場の底質粒径と合致しているため、直接的に産卵場や生息場を消失、減少させている。しかし 1998 年においてこの海域における海砂採取による直接的な砂堆域面積の減少は 1977 年頃と比較して 13% 程度であるにもかかわらず、イカナゴの漁獲量は 80% 以上低下している。この要因の一つとして海砂採取による水深の増大が、流れおよび仔稚魚の成育場への輸送を変化させているのではないかと考えられる。

日下部ら (2000) は大阪湾において観測を行い、イカナゴ仔魚の鉛直分布と摂餌に対する水中照度の影響について検討している。しかしイカナゴ仔稚魚輸送について数値モデルにより流体力学的に検討した例はなく、また鉛直移動もしくは水深の変化が輸送に与える影響について検討したものはない。

そこで本研究では備讃瀬戸海域における自己遊泳力の乏しい時期のイカナゴ仔稚魚を対象に、海砂採取による水深の変化が仔稚魚の成育場への輸送に及ぼす影響について、仔稚魚の鉛直移動を考慮した粒子輸送モデルにより定量的に評価することを目的とする。

2. 対象海域の概要

備讃瀬戸西部海域の計算領域および産卵場と成育場を図-1 に示す。瀬戸内海の流況は潮汐によって支配され、中でも M_2 分潮の成分による影響が最も大きい。図-2 に 5 m 以浅の冬季の恒流図 (俵, 1986) を示す。本島北沖で東向流が顕著で、広島南沖で西向流がみられる。

風については、イカナゴの産卵盛期である 12 月中旬～1 月上旬は西～北西の季節風が強く、平均風速は 3.5 m/s 程度である。備讃瀬戸海域で孵化したイカナゴ仔魚が 1 ヶ月後に同海域に残留する割合は約 14% であり残りの約 86% は播磨灘や大阪湾など東部へ移送される (Fujiwara ら, 1990)。産卵場に関しては、下津井から丸亀までの海域周辺 (唐川ら, 1980) と考えられる (図-1 参照)。

3. 数値モデル

イカナゴ仔稚魚の輸送は、流体力学モデル (藤原ら, 1997) により予め流場を計算し、そこに仔稚魚群と想定した粒子を流場に投入して流れによる輸送を計算する。

(1) 潮流の基礎方程式

流場の計算には静水圧近似を仮定したマルチレベルモデルを採用した。本モデルで用いる運動方程式、連続式、



図-1 計算対象領域および産卵場と成育場

* 正会員 博(工) 香川大学助教授 工学部
** 修(工) (株)日本港湾コンサルタント
*** 工 博 日本大学教授 理工学部
**** 正会員 博(農) 愛媛大学助教授 農学部
***** 正会員 工 修 香川大学助教授 工学部

自由表面の式、水温および塩分の拡散方程式は以下の通りである。ただし状態方程式は Knudsen の式に依った。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla_h \cdot (uu) + \frac{\partial(uw)}{\partial z} + f\mathbf{k} \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla_h \cdot (v_h \nabla_h \mathbf{u}) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_v \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} \right) \quad \cdots (1)$$

$$\nabla_h \cdot \mathbf{u} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \cdots (2)$$

$$p = \int_z^\eta \rho g dz \quad \cdots (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla_h \cdot \int_H^\eta \mathbf{u} dz = 0 \quad \cdots (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\mathbf{u}T) + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = \nabla_h \cdot (K_{Th} \nabla_h T) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad \cdots (5)$$

$$\frac{\partial Cl}{\partial t} + \nabla_h \cdot (\mathbf{u}Cl) + \frac{\partial(wCl)}{\partial z} = \nabla_h \cdot (K_{Ch} \nabla_h Cl) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Cv} \frac{\partial Cl}{\partial z} \right) \quad \cdots (6)$$

$$\rho = \rho(T, Cl) \quad \cdots (7)$$

ここで $\mathbf{u}$ は水平 2 次元流速ベクトル, w は鉛直流速, T は水温, Cl は塩分濃度, ρ は海水の密度, g は重力加速度, η は平均水面を基準とした自由水面位置(鉛直上方を正), H は水深, ∇_h は水平微分演算子, $v_h \cdot v_v$ はそれぞれ水平・鉛直渦動粘性係数, $K_{Th} \cdot K_{Tv}$ はそれぞれ水温に関する水平・鉛直乱流拡散係数, $K_{Ch} \cdot K_{Cv}$ はそれぞれ塩分に関する水平・鉛直乱流拡散係数, $\mathbf{k}$ は鉛直単位ベクトル(上方を正)である。

(2) 粒子輸送の基礎方程式

粒子輸送の基礎方程式(藤原ら, 1997)を以下に示す。

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t} = \mathbf{V} \quad \cdots (8)$$

$$\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0 \quad \cdots (9)$$

$$\mathbf{X}^{(n+1)*} = \mathbf{X}^{(n)} + \mathbf{F}^{(n)} \Delta t \quad \cdots (10)$$

$$\mathbf{X}^{(n+1)} = \mathbf{X}^{(n)} + \frac{\mathbf{F}^{(n)} + \mathbf{F}^{(n+1)*}}{2} \Delta t \quad \cdots (11)$$

$$\mathbf{F}^{(n)} = \mathbf{V}^{(n)} + \{(\mathbf{V}^{(n)} \cdot \nabla) \mathbf{V}^{(n)}\} \quad \cdots (12)$$

ここで $\mathbf{X}$ は 3 次元位置ベクトル, $\mathbf{V}$ は粒子位置での流速ベクトル, ∇ は微分演算子, Δt は計算時間間隔, 上付き添字の * はその時間レベルでの仮の値を表す。(8)および(9)式を, ルンゲ・クッタ法を用いて(10)~(12)式で近似して解く。

(3) 対象海域

対象海域内の主な成育場は唐川ら(1980)から, 産卵場より北西に位置する集積域と考えられる(図-1参照)。対象海域を水平方向に格子幅 500 m の正方メッ

シュに分割し, また鉛直上方には生物の行動特性および風による影響を詳細に検討するため 36 層(全層各々 2.0 m 厚)に分割して数値計算を行った。

(4) 境界条件

潮流は観測されている M2 分潮の潮汐調和定数を参考に振幅および遅角を設定し, 各開境界に潮汐波の波動として与えた。水温および塩分に関しては, 海域周辺で観測された 12 月の平均値を表層から 12 層毎に, 水温(9.8°C, 9.3°C, 9.0°C), 塩分(31.5 psu, 31.7 psu, 32.5 psu)と設定した。その他の開境界については自由流出の条件とした。陸地境界については流動場の計算過程では no-slip 条件, 粒子輸送の計算過程では free-slip 条件とした。

(5) パラメータ

計算に用いたパラメータを表-1に示す。

4. 数値計算結果および考察

(1) 流況の計算結果

産卵期の平均風である西風 3.5 m/s の条件下で計算を行った。潮流の計算結果は流速が 40~155 cm/s となり流向, 流速値とも観測された流況が概ね再現されたと考えられた。また図-3に上層(水深 3 m)および下層(水深 15 m)の算出した残差流場を示す。流向については上層で図-2と同様な傾向を示した。下層では広島および本島の南方で東向きの流れが卓越している。上層では流速も平均 2.6 cm/s 程度となり図-2の流況に近い値となった。

(2) イカナゴ仔稚魚の鉛直移動が輸送に果たす役割

日下部ら(2000)の観測結果により, 次のように仔魚の鉛直移動をモデル化する(図-4参照)。まず仔魚が存在する水深の 85% の位置(下層)を 8 時間維持し, その後 4 時間かけて海面から 25% の水深位置(上層)まで上昇する。8 時間その位置を維持し, その後 4 時間かけて水深 85% の位置に下降する。これを 24 時間周期で繰り返す。

表-1 計算に用いたパラメータ

Parameter	Definition	Value
γ_s^2	Surface friction coefficient	0.0013
γ_i^2	Internal friction coefficient	0.0001
γ_b^2	Bottom friction coefficient	0.0026
f	Coriolis parameter	$8.98 \times 10^{-5} 1/\text{sec}$
ν_h	Coefficient of horizontal kinematic eddy viscosity	70 m ² /sec
K_{Th}	Coefficient of horizontal turbulent diffusion of heat	10 m ² /sec
K_{Tv}	Coefficient of vertical turbulent diffusion of heat	10 ⁻⁴ m ² /sec
K_{Cv}	Coefficient of vertical turbulent diffusion of chlorinity	10 ⁻⁴ m ² /sec



図-2 対象海域の冬季恒流図 (5 m 以浅)

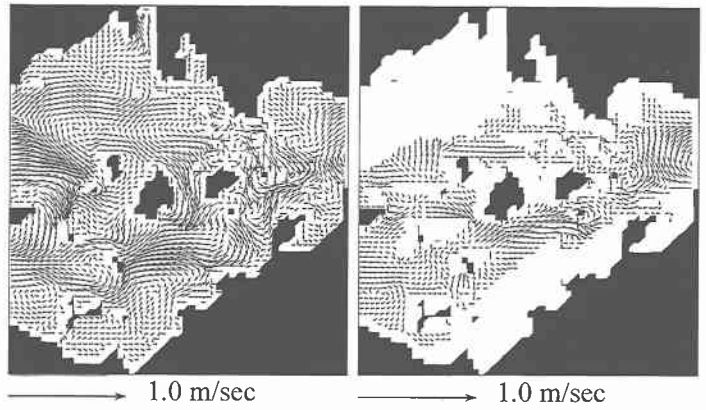


図-3 残差流の計算結果 (左: 上層, 右: 下層)

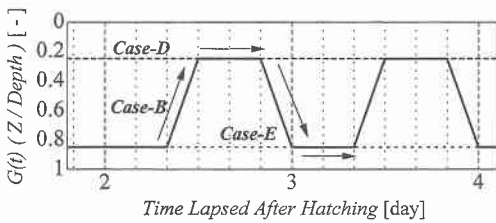


図-4 イカナゴ仔稚魚鉛直移動のモデル化

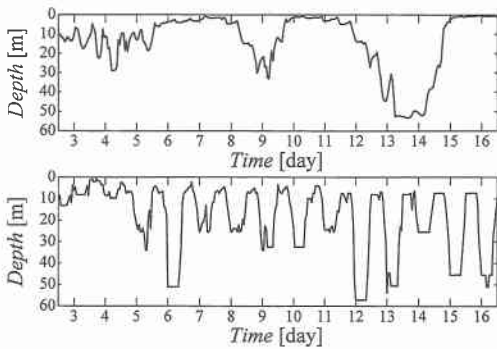


図-5 鉛直位置の時間変化 (上図: Case-A, 下図: Case-B)

返す。なおここでは鉛直流による微小変位を考慮する。

$$Z(t) = H(t)G(t) - w\Delta t \quad (13)$$

ここで t は孵化後の経過時間, $Z(t)$ は粒子の存在する水深位置, $H(t)$ は粒子の存在する水深値, $G(t)$ は水深に対する粒子位置の比率, w は鉛直方向流速, Δt は計算時間間隔である。

イカナゴ仔稚魚群の重心を想定した粒子を産卵場に配置し、孵化後 14 日間の輸送を計算した。なお使用した数値モデルは藤原ら (1997) により妥当性が検証されている。鉛直移動のパターンとして次の 5 種類を想定した。

Case-A: 能動的な鉛直移動は行わず、流れに対して全く受動的である場合。

Case-B: 体長約 4.0 mm になる孵化後 2 日目から鉛直移動を開始する場合。

Case-C: 体長約 4.5 mm になる孵化後 7 日目から鉛直移動を開始する場合。

Case-D: 昼間仔魚が多く分布する上層として海面から 25% の水深を維持する場合。

Case-E: 昼間に比べ、夜間仔魚が多く分布すると考えられる海底から 15% の水深を維持する場合。

ケース Case-B, Case-C は Fujiwara ら (1990) の成長曲線 (式 (14)) によってそれぞれ設定した。

$$l = 3.85 \exp(0.022\tau) \quad (14)$$

ここで l は仔稚魚の体長, τ は孵化後の経過日数である。全ケースにおいて西風 3.5 m/s の条件下で計算を行った。

図-6 (上段左から 5 つ) に海砂採取箇所の北縁に配置した Case-A~E それぞれの仔稚魚群の輸送経路を示す。水深は海砂採取前の状態で計算した。○は孵化地点, □は孵化後 14 日目の位置を表している。また図-5 は上図が Case-A, 下図が Case-B におけるこの仔稚魚群の鉛直位置の時間変化である。

Case-A と Case-B から鉛直移動をする場合としない場合では、輸送経路が大きく異なる。Case-E ではあまり輸送されず等深線に沿って移動した。逆に Case-A, Case-D の場合は、南北への移動量が多い。Case-C では鉛直移動を始めてからは Case-A と比べ南北へ振れることなく東へ輸送された。この傾向は Case-B でも伺える。また図-5 より Case-A では長時間表層で輸送される傾向が強い。以上より広島および本島北方に東向流があり、仔稚魚群は東方へ輸送された。Case-B では広島、本島の南方へ輸送されたが、鉛直移動をすることにより表層の西へ向かう残差流の影響よりも、下層の東への残差流の影響により東方へ輸送された。

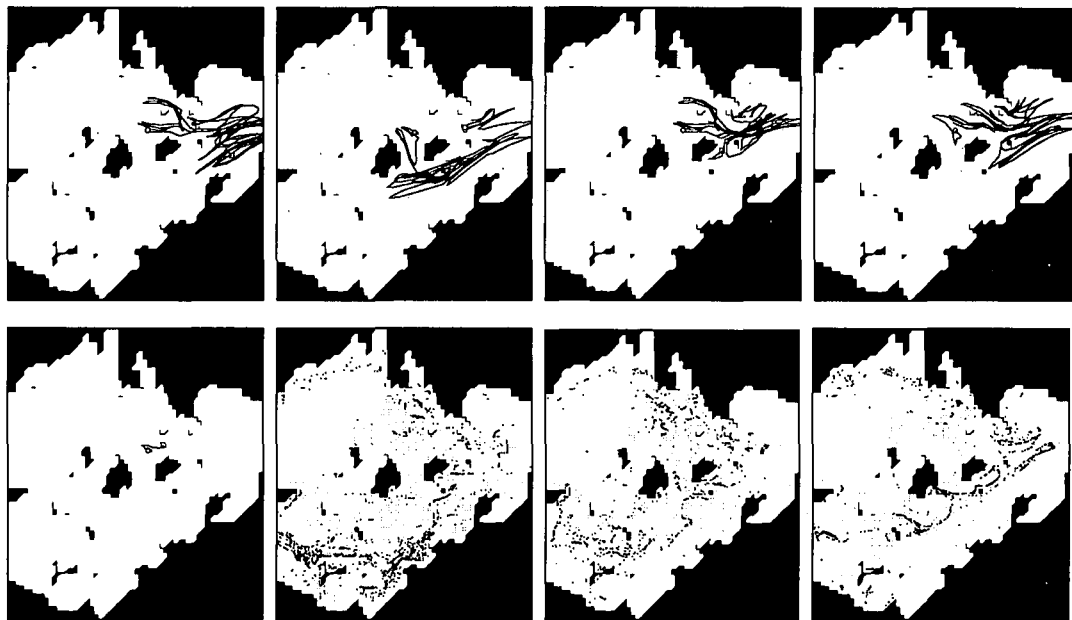


図-6 仔稚魚輸送の計算結果 (上段左から Case-A, Case-B, Case-C, Case-D, Case-E, Case-W00, Case-W05, Case-W08)

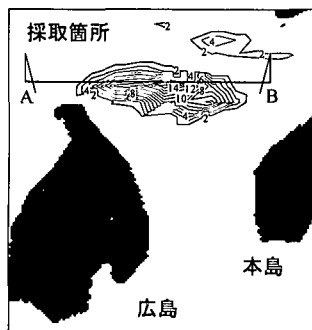


図-7 海砂採取箇所平面図

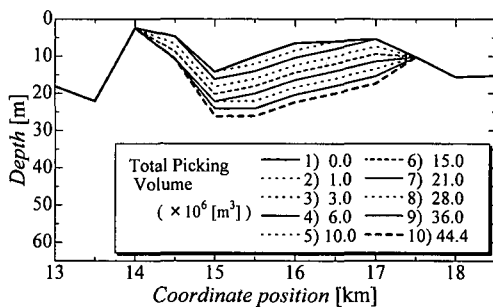


図-8 海砂採取箇所断面図 (A-B)

(3) 水深変化がイカナゴ仔稚魚輸送に及ぼす影響

海砂採取前の水深 (1950 年代の海図から推定) から採取後の水深 (平成 2 年) まで海砂の採取面積と水深を段階的に大きくしたときの滞留率の変化を検討する。水深変化を 10 段階に分け、その平面図および断面図をそれぞれ図-7, 図-8 に示す。まず海砂採取後の水深を用いて、Case-B の条件で 14 日間の仔稚魚輸送を計算した結果を図-9 に示す。孵化地点は (2) 同様、海砂採取箇所の北縁である。仔稚魚群は採取前と異なり本島南方へ輸送された後、燧灘方面へ流去してしまった。周辺に配置した他の粒子についても同様な傾向を示した。

西風 3.5 m/s の下、海砂採取後の水深による残差流の結果から採取前の水深による残差流の結果を差し引いた上層 (水深 3 m) の流速差ベクトルを図-10 に示す。また海砂採取量と仔稚魚群の滞留率との関係を図-12 に

示す。ここで滞留率とは配置した全粒子に対する孵化後 7 日目に各水域に輸送された粒子の割合と定義する。水域区分は図-11 に示す。例として図-6 の下段左 2 つ目から西風 0.0 m/s, 5.0 m/s, 8.0 m/s 時の仔稚魚群分散の計算結果を Case-W00, Case-W05, Case-W08 として示す。

まず西風の風速を変化させて滞留率の変化を検討した。水域 C では風速 0.0 m/sec から 8.0 m/sec に上がると約 12% 増, 10.0 m/sec になると約 32% 増となり、西風が強くなるほど仔稚魚は東へ輸送された。次に水深変化の影響を検討する。図-11 の水域 A および B は備讃瀬戸西部の主な漁獲場所であり成育場と考えられる水域である。水域 C は拡散経路であり、ここへ輸送された仔稚魚はその後、備讃瀬戸東部海域、播磨灘および大阪湾の成育場へ輸送され資源に加入する可能性が高い。水域 D も拡散経路であるがここに輸送された仔稚魚はその後、



図-9 海砂採取後の仔稚魚輸送計算結果



図-10 残差流差分ベクトル場計算結果

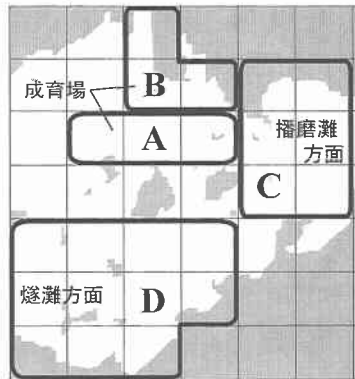


図-11 備讃瀬戸西部の水域区分図

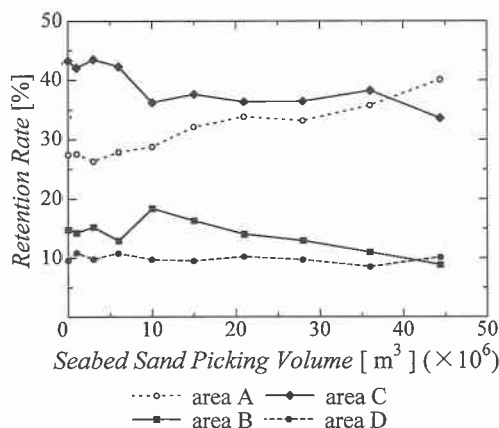


図-12 海砂採取量によるイカナゴ仔稚魚の滞留率変化

燧灘へ輸送される傾向が強く、資源に加入する可能性は低い。図-12より水域Aに滞留する仔稚魚群は海砂採取量が増えるにつれ増加するが、水域BおよびCでは逆に減少することが数値モデルにより示された。これは海砂採取箇所である園の州北部において、海砂採取による水深の増大により残差流成分が海砂採取前に比べ南に最大約35%ほど大きくなり輸送傾向が変化するため、採取前に水域BおよびCに輸送されていた仔稚魚の一部が水域Aおよび他の水域へ輸送されるようになった為だと考えられる。しかし仔稚魚が輸送された後、資源に加入すると考えられる水域A、BおよびCでは海砂採取前に比べ採取後では全体として滞留率が約17%減少しており、海砂採取による水深の増大がイカナゴ仔稚魚の成育場への輸送量を低下させていることが判った。

5. おわりに

本研究では備讃瀬戸海域におけるイカナゴ仔稚魚輸送

の数値計算を行った。以下に得られた結論をまとめる。

- 1) 日下部らによる観測結果から鉛直移動を考慮することにより、イカナゴ仔稚魚特有の輸送過程を把握することができた。これによりイカナゴ仔稚魚の輸送および体長別分布が計算できるようになった。
- 2) 海砂採取による水深の増大により、備讃瀬戸西部海域で資源に加入すると考えられるイカナゴ仔稚魚が約17%減少することを数値モデルにより指摘した。

参考文献

- 唐川純一・松村真作 (1980): 14. イカナゴ漁況予報のための既存資料の検討 南西海区水産研究所, 昭和54年度南西ブロック内海漁業研究会報, pp. 93-107.
- 日下部敬之・中島昌紀・佐野雅基・渡辺和夫 (2000): 大阪湾におけるイカナゴ *Ammodytes personatus* 仔魚の鉛直分布と摂餌に対する水中照度の影響, Nippon Suisan Gakkaishi, 66 (4) 号, pp. 713-718.
- 俵 悟 (1986): 浅海域における海況変動と漁況に関する研究, J. Shimonoseki Univ. Fish., 34 (1) 号, pp. 8-13.
- 中田英昭 (1995): 7. 風はイカナゴの生き残りにどのように影響するか?, 水産海洋研究, 第59巻, 第3号, pp. 322-324.
- 藤原建紀・中田英昭 (1992): (2) 瀬戸内海東部海域におけるイカナゴの資源変動—気象・海況との関連—, シンポジウム水産海洋, 第56巻, 第2号, pp. 199-200.
- 藤原正幸・末永慶寛・中田英昭・永澤 亨・山田東也 (1997): オイラー・ラグランジュ法によるマガレイ卵・仔魚輸送の数値実験, 水産工学, Vol. 34, No. 2, pp. 147-154.
- Fujiwara, T., H. Nakata and M. Tanda (1990): Biological and physical parameters of the population dynamics of sand eel larvae in the eastern Seto inland sea, Nippon Suisan Gakkaishi, Vol. 56, pp. 1029-1037.
- Nakata, H. (1988): Wind effects on the transport of Japanese sand eel larvae in the eastern part of the Seto Inland Sea, Nippon Suisan Gakkaishi 54 (9), pp. 1553-1561.