

リセプターモードモデルを利用した干潟域に加入する二枚貝浮遊幼生の 供給源予測に関する試み —三河湾における事例研究—

鈴木輝明^{1†}, 市川哲也², 桃井幹夫²

The Approach to Predict Sources of Pelagic Bivalve Larvae Supplied to Tidal Flat Areas by Receptor Mode Model: A Modeling Study Conducted in Mikawa Bay

Teruaki SUZUKI^{1†}, Tetsuya ICHIKAWA² and Mikio MOMOI²

Artificial creation of shallows, including tidal flats and the establishment of sanctuary, is necessary to restore decreasing resources of the bivalves and their related water purification function. Therefore, it is important to choose areas that will be the most effective for the recruitment and/or supply of pelagic larvae. We selected the short-necked clam (*Ruditapes philippinarum*) as a target species, and observed vertical distribution of the larvae. Using a receptor mode model, we tried to predict trajectories of the pelagic larvae towards the Isshiki tidal flat areas, where is the biggest fishery ground for short-necked clams in Mikawa Bay. The results showed the following: (1) Pelagic larvae are distributed in the mid layer at a depth of about 3 m by some autonomous behavior; (2) Relatively stable amount of biomass in the Isshiki tidal flat areas depends on multiple larval supply sources; (3) Sources of supply vary greatly with temporal wind-induced currents; (4) Main sources of larvae supplied to the Isshiki tidal flat areas exist at the inner part of the bay, so there is a great possibility that the larval supply might have been greatly damaged by extensive coastal reclamation in the past, and by the hypoxic conditions in recent years; and (5) Artificial shallows should be constructed at the inner-part of Mikawa Bay so that the small shallows, still in existence at the inner part of the bay, will become more important. The receptor mode model used in this study has been useful in solving some of the difficult problems faced in restoring bay environment, such as, "where is the best location to site artificial shallows and/or protected areas?"

Key words: Mikawa Bay, *Ruditapes philippinarum*, tidal flat area, wind-induced drift, bivalve larva, receptor mode model, numerical simulation

はじめに

干潟を含む浅場は、アサリ等有用水産生物の漁場として、また、底生生物群集による水質浄化の場として優れた機能を有することが知られている。反面、埋立などの人為的な環境改変の影響を最も受けやすく、既に多くの干潟・浅場が喪失している（菊池，2000）。その修復策として干潟・浅場の人工的造成が注目されているが、多くの技術的課題

が残されており（今村，1998；木村，1998）、地盤高、底勾配、地盤安定性といった土木工学的条件に加え、水質、底質等の生物の生息環境条件を考慮に入れた検討が進められている。例えば、今尾ら（2001）は貧酸素化海域における浅場造成手法として、造成対象海域ごとの貧酸素化特性に応じてマクロベントスの生息およびそれに伴う水質浄化機能を維持できる造成地盤高を算出することを提案し、貧酸素化海域では従来の一層厚覆砂方式よりも費用対効果で顕著に優れていることを示した。また、鈴木ら（2000）は、底質改良の目安とされている従来の一層の底質基準（日本水産資源保護協会，1995）に対し、マクロベントスによる水質浄化機能が維持されうる限界底質濃度を個別の海域ごとに求め、それを達成する方式が湾の水質改善により有効であることを提案した。これらの研究は、マクロベントス

2001年10月16日受付，2002年2月20日受理

¹ 愛知県水産試験場

Aichi Fisheries Research Institute, 97, Wakamiya, Miya-cho, Gamagori 443-0021, Japan

[†] teruaki_suzuki@mail.pref.aichi.jp

² (株)シーティーアイ

CTI Co., Ltd., 1-27-2, Meieki-minami, nakamura-ku, Nagoya 450-0003, Japan

による水質浄化機能を発現させるためにどのような水質、底質、地盤高が望ましいかという視点に立っているが、どこに造成するのが望ましいかという適地選定の条件については触れていない。適地としては、水質浄化機能の高いろ過性マクロベントスの自然加入が期待できるかどうか？という条件や、逆に、湾全体への効果的な浮遊幼生の供給が可能か？といった条件が重要であろう。ろ過性マクロベントスの内、アサリ (*Ruditapes philippinarum*) は重要な水産資源であると同時に、水質浄化機能の中心的役割を担っている (青山, 2000; 佐々木, 2001a)。しかし、資源は減少傾向にあり、その主たる原因としては埋立による干潟・浅場の減少が指摘されており (佐々木, 2001b)、資源量の減少に伴う漁獲圧力の増加も憂慮されている。今後、資源を回復し、湾の水質浄化機能を向上させるためには、生息場の積極的な造成や資源保護区域の設定が必要であるが、その際、浮遊幼生の加入や供給の面で、最も効果的な海域を選定することが重要である。著者らは、三河湾における最大のアサリ漁場である一色干潟域を例とし、アサリ浮遊幼生の鉛直分布の観測結果をもとに浮遊幼生の様々な鉛直分布様式を仮定することによって、一色干潟域への浮遊幼生の供給経路及び供給源を数値シミュレーションによって推測することを試みたので報告する。数値モデルはラグランジェ粒子の移動追跡を時間的にさかのぼるリセプ

ターモードモデルを応用した。

方法

1. アサリ浮遊幼生の鉛直分布

アサリ浮遊幼生の存在確認と鉛直分布の特徴を明らかにするため、1998年5月27日13時00分から5月28日13時00分にかけての大潮時に、Fig. 1に示す三河湾一色干潟域の沖合のSt. 1 (水深DL-5.5m) において愛知県調査船「しらなみ」(総トン数30トン) を係留し、3時間間隔で海面下-1m, -3m, 底上+1mの各水深からポンプ採水(500l)を行い、目合い100 μ mのプランクトンネットでろ過採集した。採集したサンプルは船上で5%中性ホルマリンにより固定後、冷蔵し、帰港後速やかに光学顕微鏡下で初期殻頂期 (early umbo) の140 μ m以上の幼生を交装の形態観察によって同定 (田中, 1982)、計数した。また、採集時には水温、塩分 (EMS社製EMS-12)、クロロフィル色素量 (インパイスフィジック社製バリオセンスII型) の鉛直分布を同時測定した。クロロフィル色素量はバリオセンスの値からアセトン抽出蛍光法 (日本海洋学会, 1990) の値を基に換算して求めた。

2. アサリ浮遊幼生漂流過程の計算方法

2.1 浮遊幼生漂流時の流動場の算出方法

流動場の計算には3次元非定常傾圧流動モデルを応用し

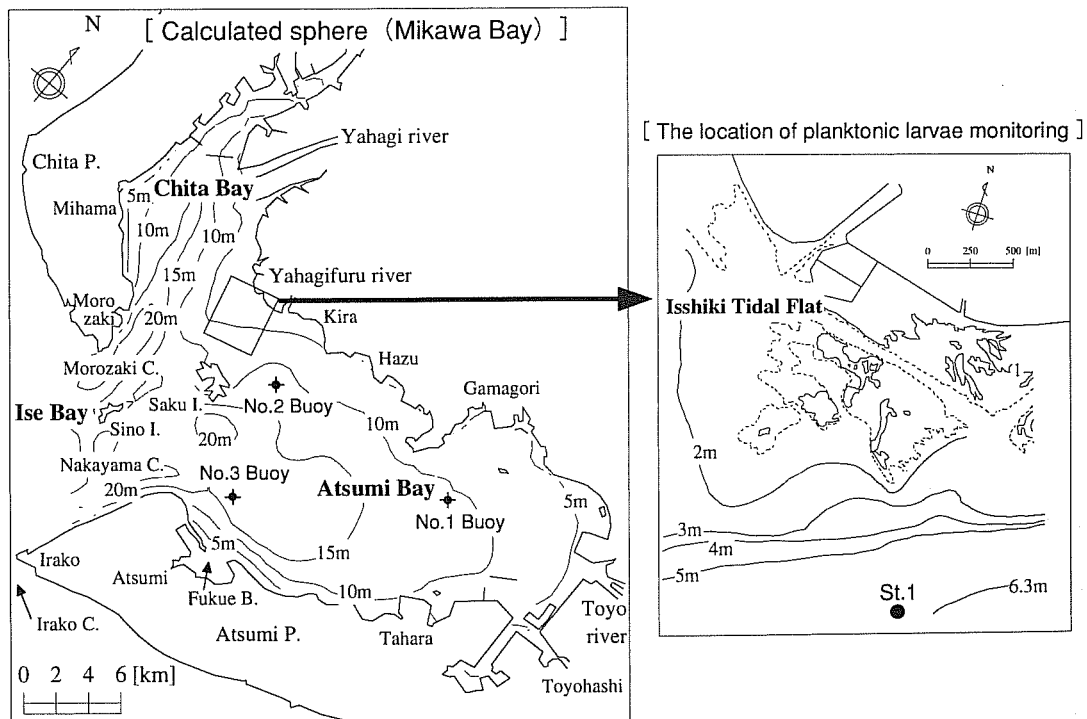


Figure 1. Left figure shows the calculated sphere and the location of three automatic observational buoy systems and Right shows the sampling station for pelagic larvae of short necked-clam (*Ruditapes philippinarum*) off Isshiki tidal flat (Depth is shown by Tokyo Bay Mean Sea Level (T.M.S.L.) and dotted line shows Mean Low Water Springs).

Table 1. Conditions and parameter values for hydrodynamic model in Mikawa Bay.

| Content | Selected value |
|---|---|
| Area | Mikawa Bay |
| Grid interval | 200 m~500 m |
| Level locations | Level 1 MWL~2 m Level 2 2~4 m Level 3 4~7 m Level 4 7~10 m Level 5 10~15 m Level 6 15 m ~ bottom |
| Calculated Period | Start time: May 1 in 1998 End time : May 30 in 1998 Time step: 8 seconds |
| Boundary condition (Tidal level) | Tidal fluctuation was approximated by dominant 5 tidal constituents (M ₂ , S ₂ , K ₁ , O ₁ and Sa) in Morozaki and Irako. |
| Boundary condition (Temp. Sal.) | Based on the measurements obtained at No. 3 Buoy. |
| River discharges | Yahagi and Toyo river: Based on the daily discharge data by the River Bureau, Ministry of Construction, Japan. Yahagifuru river: 0.1×Yahagi river. |
| Surface wind Meteorological parameters | Hourly local wind field was estimated based on the three Buoy data. Based on the daily mean measurements in Irako and Nagoya by the Meteorological Agency of Japan. |
| Coriolis parameter | $8.29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ [N 34°45'] |
| Surface friction coefficient | $0.001 \times (0.7 + 0.4 W)$ [As a function of wind speed W (m s ⁻¹)] |
| Bottom friction coefficient | 0.0026 |
| Horizontal eddy viscosity/diffusivity | $2.71 \times 10^4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ |
| Vertical eddy viscosity/diffusivity | Predicted by the turbulence closure model. |

た. 数値モデルは静水圧近似, ブシネスク近似, f平面近似を導入した回転地球流体の運動方程式, 流量連続式, 熱・塩分保存式および状態方程式に基づいて, 速度の3軸成分, 潮位, 水温・塩分の時空間分布を予測した (例えば, 中田, 1993). 鉛直混合過程の定式化には乱流モデル (Mellor and Yamada, 1982) を適用し, 成層による浮力効果には勾配リチャードソン数による経験的な冪関数表現 (Munk and Anderson, 1948) を利用した. また, 干潟域については海面の移動境界条件を適用し, 計算された潮位が限界水深を下回った場合は, 当該メッシュを陸と判断し, 干潟判定の限界水深を 10 cm と設定した. 流動シミュレーションの計算条件を Table 1 および以下に示す.

2.1.1 計算範囲と分解能

計算範囲は知多半島の師崎と渥美半島の伊良湖岬以東の三河湾全域を対象とし, この範囲を最小 200 m~最大 500 m の格子で分割した (Fig. 2). 鉛直方向には 6 層の区分を設けた.

2.1.2 計算期間

受精卵から底生生活への移行期にあたるフルグロウン期 (full grown) に達するまでのアサリの浮遊幼生期間は漂流

海域の水温や餌条件に大きく依存し, 2~4週間程度とされている (全国沿岸漁業振興開発協会, 1997). 餌条件については不明であるが, 水温については, 観測時の海水温は約 22°C であり, 漂流期間中の平均水温は愛知県水産試験場自動観測ブイ (Fig. 1) の表層データからすると, それよりも低い約 20°C であると推測された. 鳥羽ら (1995) は水温 20°C で着底変態時までの日数が受精後 14~16 日という飼育結果を報告している. 井手尾ら (1994) の成長式 $Y=110.08+5.19966X$ (Y : 殻長, X : 日齢, 飼育水温 20.2~23.5°C) で着底変態時の殻長を 190 μm とし, 日齢を計算すると, ほぼ同じ 15 日と計算される. また, 上妻 (1994) の飼育実験では 20°C, 12 日~17 日で 190~220 μm の着底変態期のサイズに達している. 鳥羽 (1992) の成長率式 $GR=0.377 \times T-2.96$ (GR : 成長率; T : 水温) で漂流期間を推測すると, 着底変態時の殻長 190 μm , 初期値 110 μm , 水温 20°C で生育日数は 17 日と計算され, 受精後日数は 19 日となり, 上述の値よりはやや長くなる. これらの知見から漂流期間は 12 日~19 日と推定される. ここでは浮遊幼生期間を 2 週間と仮定し, 流動シミュレーションの計算期間は 1998 年 5 月 1 日から 30 日までの 1 ヶ月間とした.

2.1.3 湾口境界条件

三河湾口の潮汐条件には、師崎、伊良湖両検潮所における潮汐調和定数（海上保安庁、1983）から生成した1998年5月の計算潮位の変動を拘束した。水温・塩分の境界条件については開境界とし、湾口に最も近い愛知県水産試験場自動観測No. 3ブイ (Fig. 1) の連続測定データを利用して時間変化を設定した。

2.1.4 気象要素及び河川流量

流動シミュレーションには海上風、日射量、雲量、接水気温、相対湿度の各気象要素および河川流量を入力した。海上風はFig. 1に示す3基の自動観測ブイの時間観測値を利用し、平面スプライン補間法を使って1998年5月1日0時より30日24時までの海上風系を毎時刻に推定した。ただし、No. 3ブイの5月20日から27日までの風向・風速は機器の故障により欠測となったため、No. 2ブイの値を準用

した。その他の気象要素（日射量、雲量、気温、湿度）は空間的に一様と仮定し、1998年5月の測候記録（名古屋地方気象台、1998）に基づいて日平均値の時間変化を設定した。河川流量は一級河川である矢作川と豊川については、国土交通省中部地方整備局より入手した毎日の実測値を設定し、矢作古川については、過去の実測データに基づいた矢作川との流量比を1/10と見積もり、期間中の流量変化を設定した。

2.2 リセプターモードモデルによる粒子位置計算の方法
浮遊幼生に見立てた粒子の空間位置を、計算された流動場をベースに時間をさかのぼってもとめるリセプターモードモデルの基礎式は、Spauldingら (1994) やNakata (1994) によるオイルスピルの流出源特定解析で用いられたものを参考に、以下のように定式化した。

$$X^{t-\Delta t} = X^t - V \cdot e^{i\theta} \cdot \Delta t$$

$$z^{t-\Delta t} = z^t + (\alpha \cdot w_p - k \cdot (z^t - z_0)) \cdot \Delta t$$

ここで、 t は時刻、 Δt はタイムステップ、 $X^t=(x^t, y^t)$ は時刻 t における粒子の水平位置、 z^t は鉛直座標、 $V=(u, v)$ は流れの水平速度成分である。浮遊幼生のような漂流体は流れ方向にある程度の分散幅をもって移流すると考えられるため水平流のドリフト角 θ を設けた。ここで、 θ は $(-60^\circ \leq \theta \leq 60^\circ)$ と仮定し、一様正規乱数を使って幼生の水平分散を模擬した。なお、 i は複素数である。鉛直方向も同様に考え、 w_p は乱流による幼生の最大移動速度とし、乱流を考慮するための係数 α ($-1 \leq \alpha \leq 1$) で一様正規乱数を使って幼生の鉛直分散を模擬した。また、 z_0 は幼生が最も多く分布する深度で、ここでは後述する観測結果に基づいて3mと仮定した。 k は幼生が水深 z_0 へ移動する速度係数であり、 z_0 から離れるほど速く鉛直方向に移動すると仮定した。 w_p および k の値を変えることにより任意の鉛直分布を想定することができる。この鉛直方向の分布中心を固定する漂流期間では、流動モデルから計算された鉛直方向の流速は用いず、流れに受動的に移動する期間については鉛直流速を考慮した。Fig. 3に鉛直分布の与え方を模式図で示した。

2.2.1 計算ケース

時間さかのぼり計算は流動場の相違による漂流過程の比較

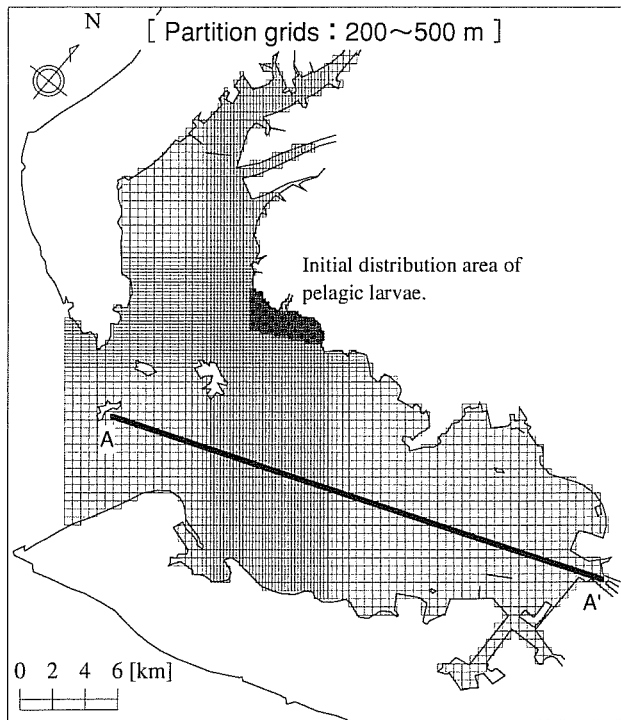


Figure 2. The partition grids for hydrodynamic model.

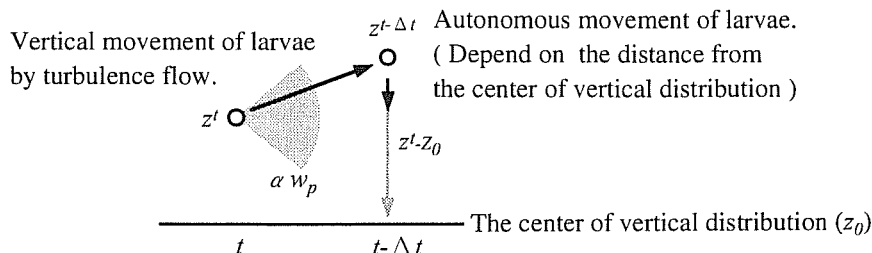


Figure 3. Conceptual figure for the calculation of vertical behavior of planktonic larvae.

Table 2. Conditions of vertical distribution patterns of pelagic bivalve larvae in the six simulation cases conducted at two different calculation periods (24:00 on May 27→00:00 on May 14; 24:00 on May 15→00:00 on May 2) by receptor mode model

| Case No. | Conditions of vertical distribution pattern of larvae |
|----------|---|
| Case 1 | Larvae were distributed at the depth of 3 m ($w_p=0.0$; $k=0.0$) during calculation period. |
| Case 2 | Larvae were distributed around 3 m depth with vertical small dispersion ($w_p=10.0$; $k=0.00005$) during calculation period |
| Case 3 | Larvae were distributed around 3 m depth with vertical large dispersion ($w_p=10.0$; $k=0.00001$) during calculation period |
| Case 4 | From the beginning of calculation, larvae were distributed around 3 m depth with vertical small dispersion ($w_p=10.0$; $k=0.00005$), and during 12 hours before the end of calculation, larvae were left entirely to the oceanic flow conditions. |
| Case 5 | From the beginning of calculation, larvae were distributed around 3 m depth with vertical small dispersion ($w_p=10.0$; $k=0.00005$), and during 48 hours before the end of calculation, larvae were left entirely to the oceanic flow conditions. |
| Case 6 | During 48 hours after the start of calculation, larvae were distributed at the lowest layer, and thereafter larvae were distributed around 3 m depth with vertical small dispersion ($w_p=10.0$; $k=0.00005$), and then during 12 hours before the end of calculation, larvae were left entirely to the oceanic flow conditions. |

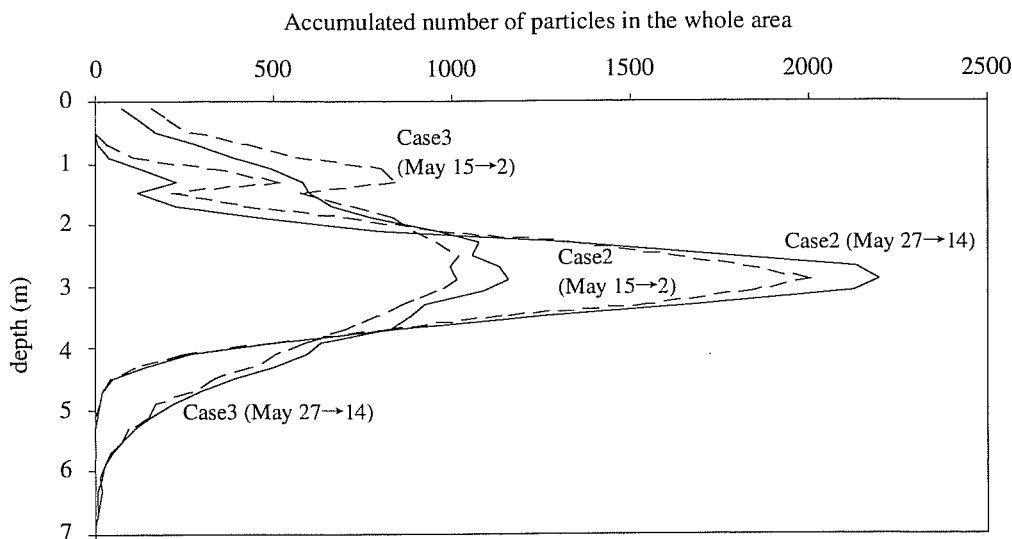


Figure 4. Calculated vertical distributions of pelagic larvae at Case 2 and 3 at two calculation periods (24:00 on May 27→00:00 on May 14; 24:00 on May 15→00:00 on May 2).

を行うため2期間（1998年5月27日→5月14日；1998年5月15日→5月2日）について行った。5月前半の計算はあくまでも流動場の相違による漂流過程の比較を行うための仮想的な計算であり、アサリ浮遊幼生の存在や漂流期間は5月後半と同じと仮定している。浮遊幼生はその成長段階によって、あるいは、昼夜間、干満潮、環境水中の水温や塩分によって鉛直分布や移動特性が変化するとされている（全国沿岸漁業振興協議会，1997）が詳細は不明である。従って、幼生の分布様式の与え方によって想定される計算ケースは無限に増えることになるが、今回は上述の2期間についてそれぞれ、Table 2に示した6ケースの分布様式に

限定して漂流実験を行った。

Case 1は鉛直分布を水深 z_0 ($z_0=3$ m) に2週間固定した場合、Case 2は水深 z_0 を中心に小さな分散を持った鉛直分布を2週間固定した場合、Case 3は水深 z_0 を中心にCase 2より大きな分散を持った鉛直分布を2週間固定した場合であり、これら3ケースはいずれも水深3mを中心にしてその上下にどの程度分散しているかに相違はあるが、浮遊期間中、流動に対して受動的な漂流期間は無いと仮定している。水深 z_0 を中心にしたこれら3つの異なった鉛直分布はTab. 2中に示す w_p , k により設定した。このパラメーター設定により得られた最終時刻の計算海域全体で累計した漂流粒子

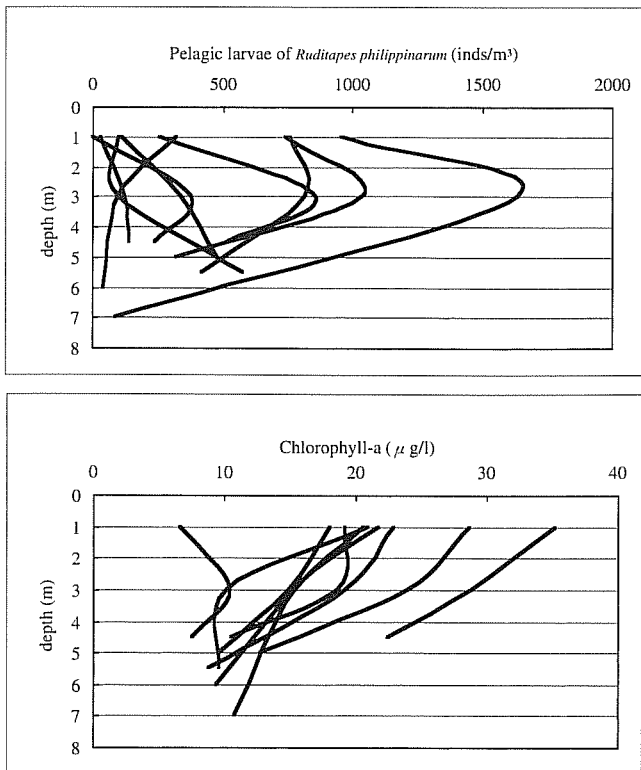


Figure 5. Upper figure shows the vertical distributions of the pelagic larvae ($140\ \mu\text{m}$) of the short necked clam (*Ruditapes philippinarum*) and lower shows the vertical distributions of the chlorophyll pigment at St.1, observed at 3-hour intervals from 13:00 on May 27 to 13:00 on May 28, 1998.

の鉛直分布の結果を Case 2 (小さな分散) および Case 3 (大きな分散) を例として Fig. 4 に示す。

Case 4 は受精後トロコフォア幼生になる 12 時間 (全国沿岸漁業振興開発協会, 1997) は自律的移動を行わず, 流れによる受動的な移動のみとし, その後は Case 2 と同様に水深 z_0 を中心に小さな分散を持った鉛直分布を固定した場合, Case 5 は初期浮遊幼生の受動的移動時間を受精後ベリジャー幼生になる 48 時間 (全国沿岸漁業振興開発協会, 1997) とし, その後は水深 z_0 を中心に小さな分散を持った鉛直分布を固定した場合であり, これら 2 ケースはいずれも受精直後の幼生の自律的な鉛直移動は流動に対して小さいと仮定し, 流れに受動的である期間の存在を想定している。

Case 6 は Case 4 のように受精後トロコフォア幼生になる時間 (12 時間と仮定) は受動的移動とし, その後は水深 z_0 を中心に小さな分散を持った鉛直分布に固定するが, 殻頂完成期の後期 (ここでは漂流終了前 2 日間と仮定) は着底変態に備えて最下層にのみ分布すると仮定した場合である。Case 4, 5, 6 で浮遊期間中の自律的な鉛直移動を行う期間中に Case 2 で想定した小さな分散を持った鉛直分布に固

定した理由は, 計算ケースが多くなりすぎることもあるが, 結果で後述するように, 観測結果からは Case 1 の仮定は非現実的であり, また Case 3 では 10m 以深海域への無効分散が多くなるため, これらの計算条件の設定は現実的ではない可能性が高いと推測したためである。浮遊幼生を想定した漂流粒子は Fig. 2 中に示した海域に約 16,000 個配置した。

結果

1. アサリ浮遊幼生の鉛直分布観測結果

Fig. 5 に 3 時間ごと 9 回のアサリ浮遊幼生 ($140\ \mu\text{m}$ 以上) の鉛直分布を一括して示す。得られた観測結果からは, 潮時や昼夜で浮遊幼生密度や鉛直分布様式に特に一定の傾向はなく, 塩分やクロロフィル色素との相関もみられなかったが, 全体としてみると Fig. 5 に示すように表面下 $-3\ \text{m}$ が最も密度の高い鉛直分布が一般的であり, 特に幼生が高密度の時にはその傾向が顕著であった。幼生のサイズについては $170\ \mu\text{m}$ 以上の殻頂完成期の大型個体が主体 (7~8 割程度) であった。対照として植物プランクトンの鉛直分布についてクロロフィル a を指標として見てみると, 表層で高く, 底層で低い分布傾向を示し, 塩分との負の相関 ($R^2=0.33$) がみられた。

2. 流動シミュレーション

漂流実験を行った二つの計算期間中 (① 5 月 2 日 → 5 月 15 日; ② 5 月 14 日 → 5 月 27 日) の平均流の第 1 層 (海面 ~ 2 m) と第 4 層 (7~10 m) の水平分布, 縦断面における鉛直分布を Fig. 6 に示した。断面図は, 流況を視覚化するために 6 つの計算層で得られた流速を鉛直補間して密な間隔で描いてある。二つの計算期間とも, 表層は湾奥から湾口へ, 底層は湾口から湾奥へと流れる傾向にあり, その流向の変化は水深 4~5 m 付近を境に起こっていた。二つの計算期間における平均流はほぼ同様の傾向であるが, 詳細に見ると矢作古川河口の一色干潟周辺の流れは 5 月前半と後半で微妙に違っている。5 月後半の表層流は渥美湾奥からの西向きの流れが卓越していたが, 5 月前半は矢作川河口からの南下流も強く, 一部, 佐久島南部を經由し, 中山水道に流入する流れが存在していた。

再現性を考察するため, 三河湾内に設置された 3 台のブイ (No. 1~3: 位置は Fig. 1 参照) の流向・流速, 塩分の連続測定データについて計算値と比較した。Fig. 7 と Fig. 8 に 1998 年 5 月下旬 (5 月 21 日 → 5 月 30 日) の 10 日間のデータを例示した。流向・流速はブイの表層観測水深 (海面下 3.5 m) に相当する層の計算値と比較を行い, 塩分は表層 (海面下 3.5 m) と底層 (海底上 2 m) について比較した。

流向・流速については, 細部に不一致は認められるものの, 全体として No. 1, No. 2 ブイの再現が良好であった。しかし, 湾口に近い No. 3 ブイでは観測値にみられる南西

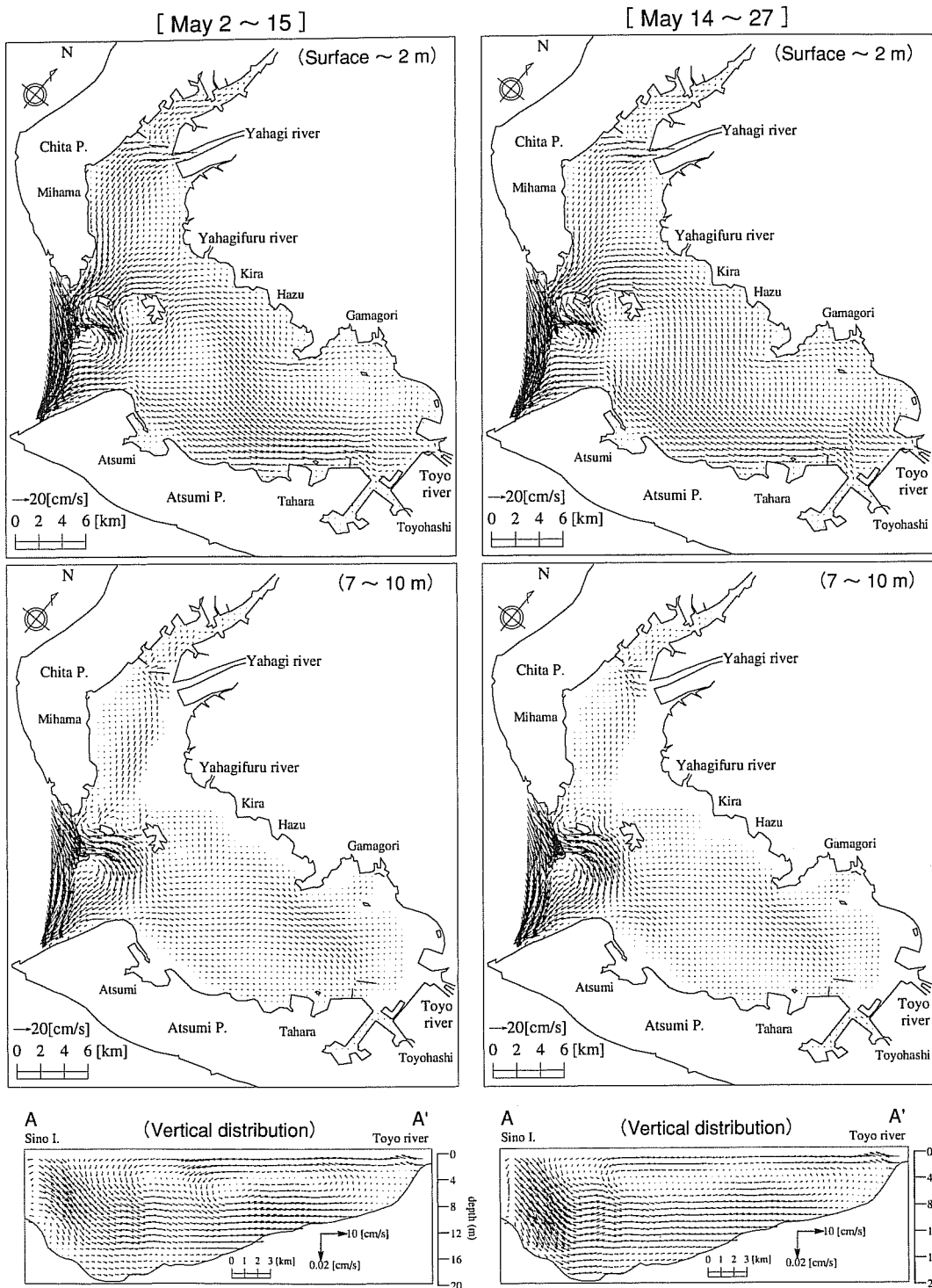


Figure 6. Spatial patterns of mean flow in the upper layer (between surface and 2 m), in the lower layer (between 7 m to 10 m) and in the longitudinal cross section (A-A') calculated by the hydrodynamic model. Figures on the left-hand side show the results at the period from May 2 to May 15, 1998 and the ones on the right-hand side show the results at the period from May 14 to May 27, 1998.

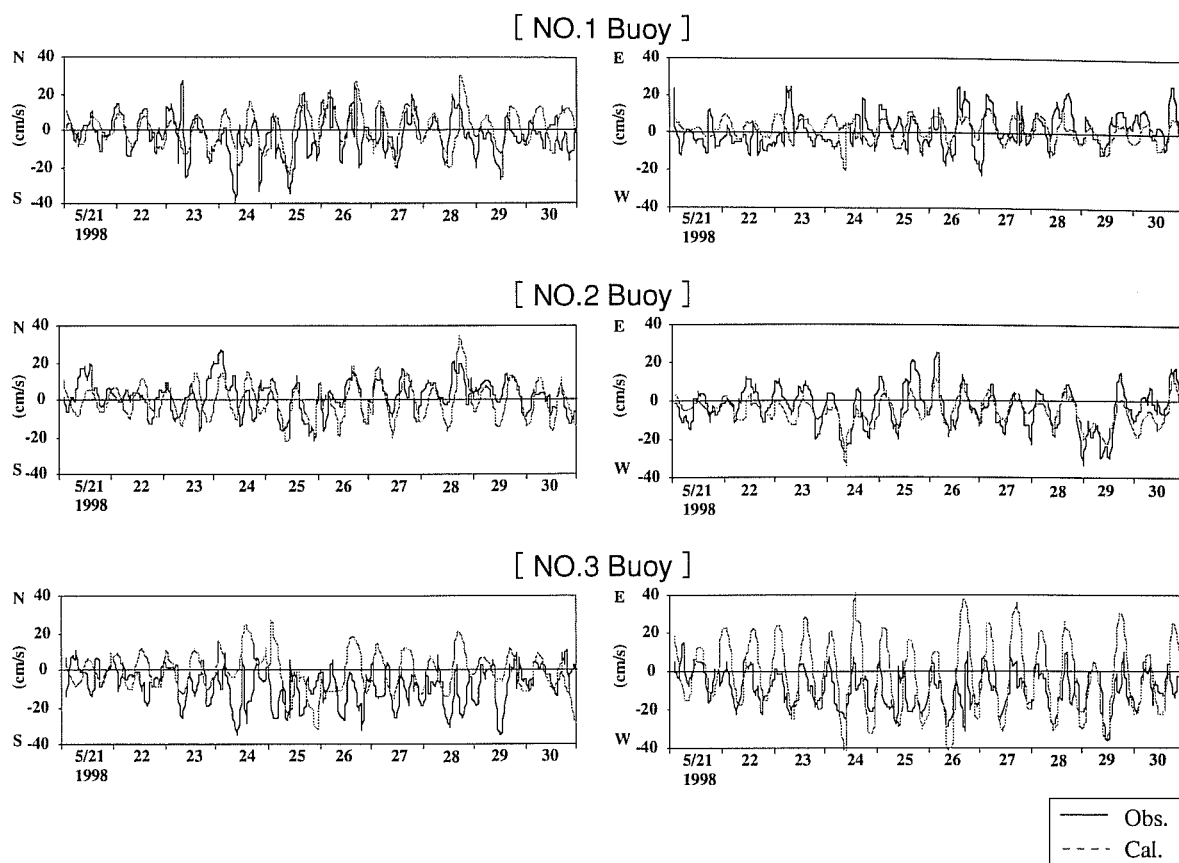


Figure 7. Comparisons of surface flow between the model results and observations by three automatic observational buoy systems in Fig. 1.

流の傾向が計算値では顕著ではなかった。塩分についても、流動と同様にNo. 1, No. 2ブイでは、水塊変動の傾向、上下層の勾配とも合理的に再現されたが、No. 3ブイ底層ではモデル結果が観測より2psu程度低く計算され、観測された上下層間の顕著な勾配がモデルでは十分表現できなかった。しかし、No. 3ブイの5月上・中旬では表層、底層ともモデル結果が良好であったことから、5月下旬のNo. 3ブイの風向・風速計の故障による欠測のために、三河湾南部湾口域の海上風の推定が不十分であったことが原因と推測された。結果として、No. 3ブイ付近の表層における強い南西流が不十分で、それに伴う伊良湖水道から中山水道底層を經由しての高塩分水の貫入が表現できなかったと思われる。

3. リセプターモードモデルによるアサリ浮遊幼生供給源
リセプターモードモデルにより推測した一色干潟域への浮遊幼生供給源について、二つの漂流期間におけるCase 1からCase 6までの最終計算結果をFig. 9およびFig. 10に示した。なお、図左側の点列は伊勢湾からの供給を示す。2週間の時間さかのぼり漂流の結果、10m以深のアサリ母貝がほとんど分布しない海域への逆漂流粒子が多い（以降、無

効分散と称する）ケースは、その計算条件の設定が現実と乖離していると見ることもできる。なお、図中の漂流粒子の濃淡は重なり合いがあるため、漂流量の多寡を正確には表現しないし、計算終了時の5月14日0時、5月2日0時はいずれも引き潮時にあたっているため、粒子はやや離岸傾向にある。

3.1 5月後半（5月27日から5月14日）の場合

3.1.1 Case 1, 2, 3（漂流期間中の鉛直分布を固定した場合）

5月27日から2週間さかのぼった漂流実験 (Fig. 9) で、漂流期間中の鉛直分布を3種類に固定したCase 1, 2, 3の水平分布を見ると、一色干潟域やそれ以東の三河湾北部沿岸域一帯から、対岸に位置する渥美半島の付け根部分の豊橋市から田原町地先にかけての沿岸が浮遊幼生の供給源となっており、鉛直分布の分散が大きくなるほど、分布範囲は広くなる傾向にあった。特に、Case 3では知多湾東岸の矢作川河口域、渥美町地先の福江湾や伊勢湾にも小さな供給源が見られたが、主たる供給源は変わらなかった。これはアサリ浮遊幼生の主群がFig. 6に示す渥美湾奥から湾口に向かう表層流に乗るためであり、鉛直分散が大きくなるにつ

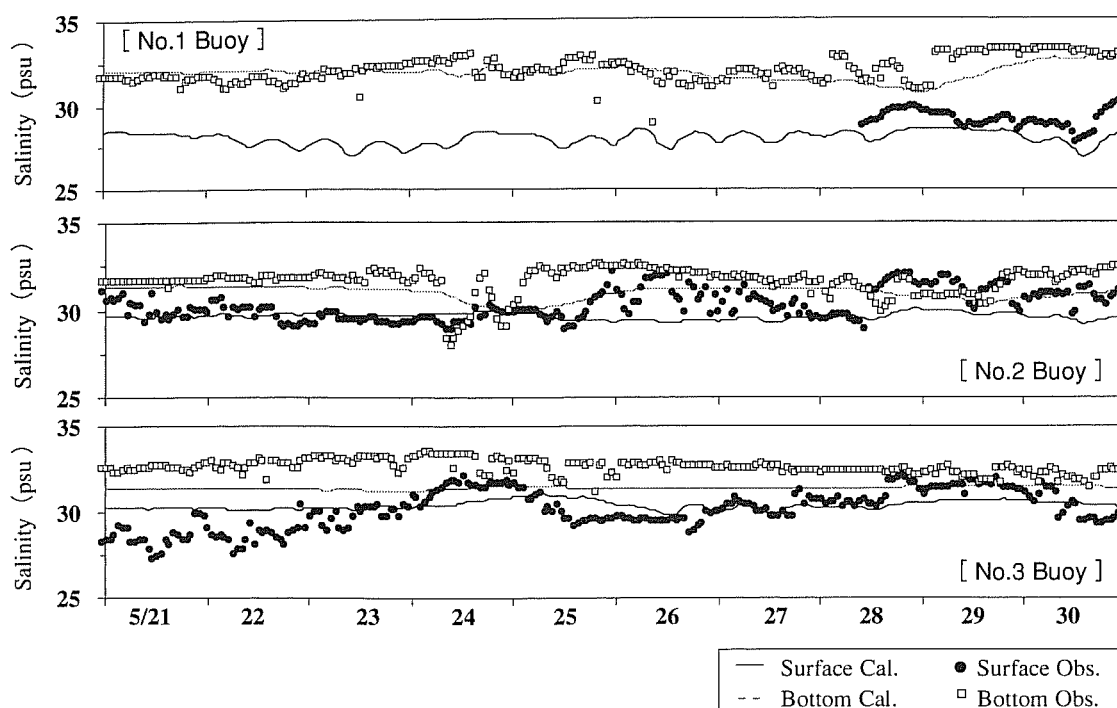


Figure 8. Comparisons of salinity (psu) between the model results and observations by three automatic observational buoy systems in Fig. 1.

れ底層に分布する一部がその流系からはずれ、他の流系に乗ったためと思われる。しかし、このCase 3ではアサリ母貝が分布しない水深10m以深海域への無効分散が多くなるため、この鉛直分布の設定は現実を反映していない可能性が高く、この中ではCase 2が最も現実的である。

3.1.2 Case 4, 5 (浮遊幼生の初期に流れに受動的な期間を与えた場合)

Case 2を基本として、受精後12時間(計算終了前12時間)および48時間(計算終了前48時間)を流れに受動的と仮定したCase 4, 5の結果を見ると、供給源が若干広がった程度でCase 2とあまり変化はなかった。これは、受動的移動を想定した計算終了前12時間から48時間の分布域での流動場では、鉛直流が上昇傾向で、かつそれほど大きくなく、分布中心から下層へはあまり移動しなかったためと推定される。

3.1.3 Case 6 (浮遊幼生の初期に流れに受動的な期間を与え、殻頂完成期の後期に最下層に分布を固定した場合)

Case 4を基本として、浮遊末期の48時間(計算開始後48時間)は最下層に位置するという仮定を附加したCase 6は、Case 4とはそれほど変化しなかったものの、渥美半島先端の福江湾や伊勢湾にも供給源が発生した。これは計算開始後最初の48時間は一色干潟周辺部の比較的水深の浅い場所を漂うため、最下層の流れが分布中心と大きな差が無

かったものの、一部粒子が佐久島東部の反時計回りの底層流系や師崎水道を経由して伊勢湾から知多湾に流入する底層流系にのったためと考えられる。

なお、計算された漂流経路から見ると、5月下旬のNo.3ブイ付近の再現流動と観測値との不一致は漂流粒子の最終的な分布にあまり大きな影響は与えていないと推測された。

3.2 5月前半(5月15日から5月2日)の場合

3.2.1 Case 1, 2, 3

5月15日から5月2日の流動場で行った漂流結果(Fig. 10)を5月27日から5月14日の流動場で行ったCase 1, 2, 3の漂流結果と比較すると、①知多湾奥部沿岸一帯も供給源となっている、②渥美半島付け根の田原町地先の供給源が豊川河口域から蒲郡市地先海域に移動している、③佐久島周辺が新たに供給源となっている、④伊勢湾にも供給源がある、ことなどが特徴的であった。知多湾や伊勢湾への供給源の拡大は鉛直方向の分散が大きくなるほど顕著であった。しかし、Case 3では5月後半での結果と同様にアサリ母貝が分布しない水深10m以深海域への無効分散が多くなるため、この中ではCase 2が最も現実的であろう。

浮遊粒子が知多湾方向に流れる過程を詳細に見ると、計算開始後からの最初の5日間ほど(5月15日→5月10日)であり、この時期は矢作川方面から強い流れが、一色干潟周辺を通過して渥美湾奥に流れていた。この一色干潟域の

[May 27 → 14]

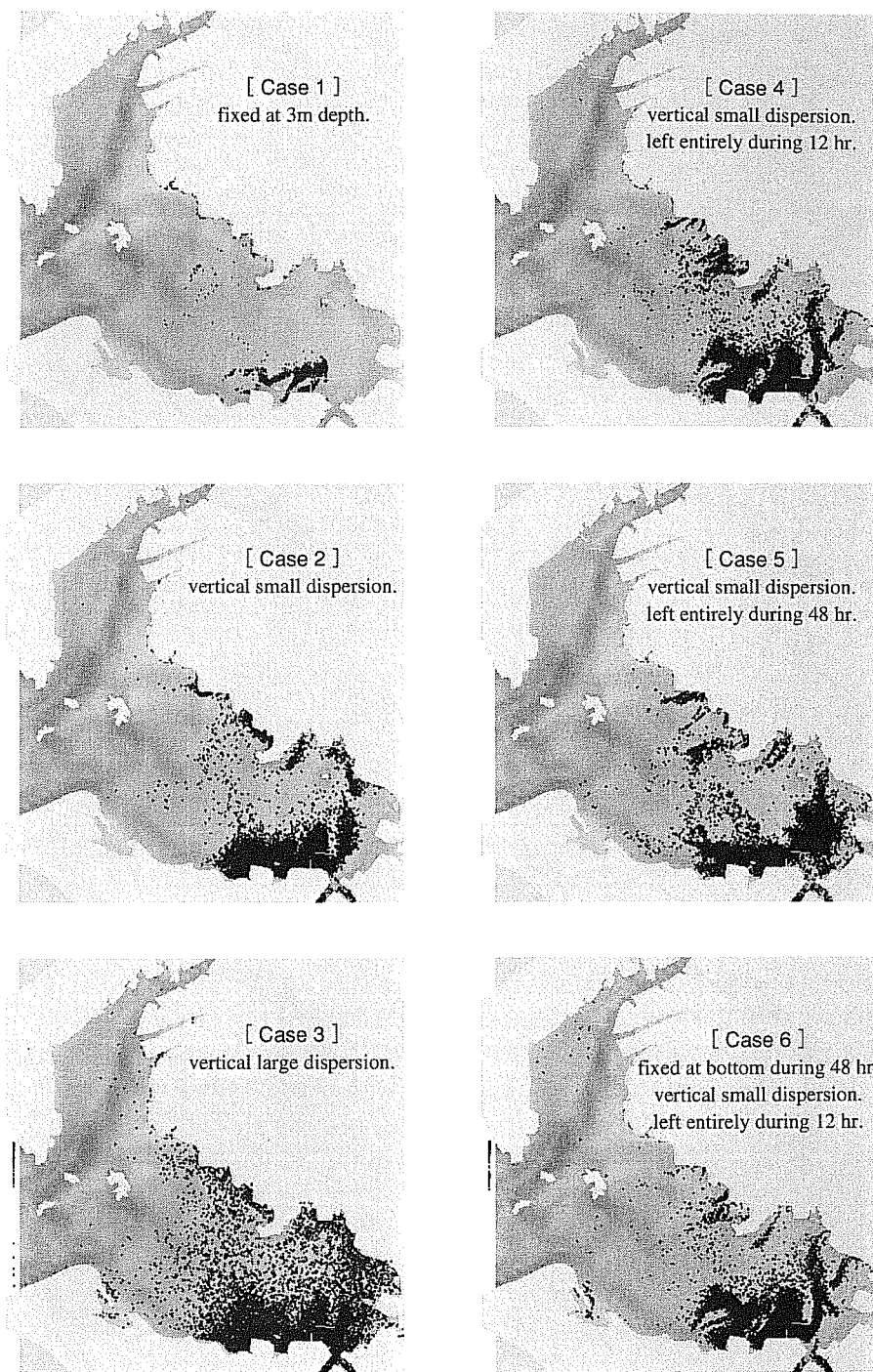


Figure 9. The final horizontal distribution patterns of pelagic larvae on six cases calculated by receptor mode model at the period from May 27 to May 14, 1998.

南下流の存在により、さかのぼり計算では知多湾側にも浮遊粒子が移行したものと考えられた。このことはFig. 6に示した平均流からも推測できる。一色干潟域の流れは5月前半と後半で微妙に異なっており、5月後半の表層流は渥

美湾奥からの西向きの流れが卓越していたが、5月前半は矢作川方面からの南下流も強く、佐久島南部を經由し、中山水道に流入していた。この流れを生じさせたのは、5月12日から5月15日にかけて一時的に吹いた強い北風であ

[May 15 → 2]

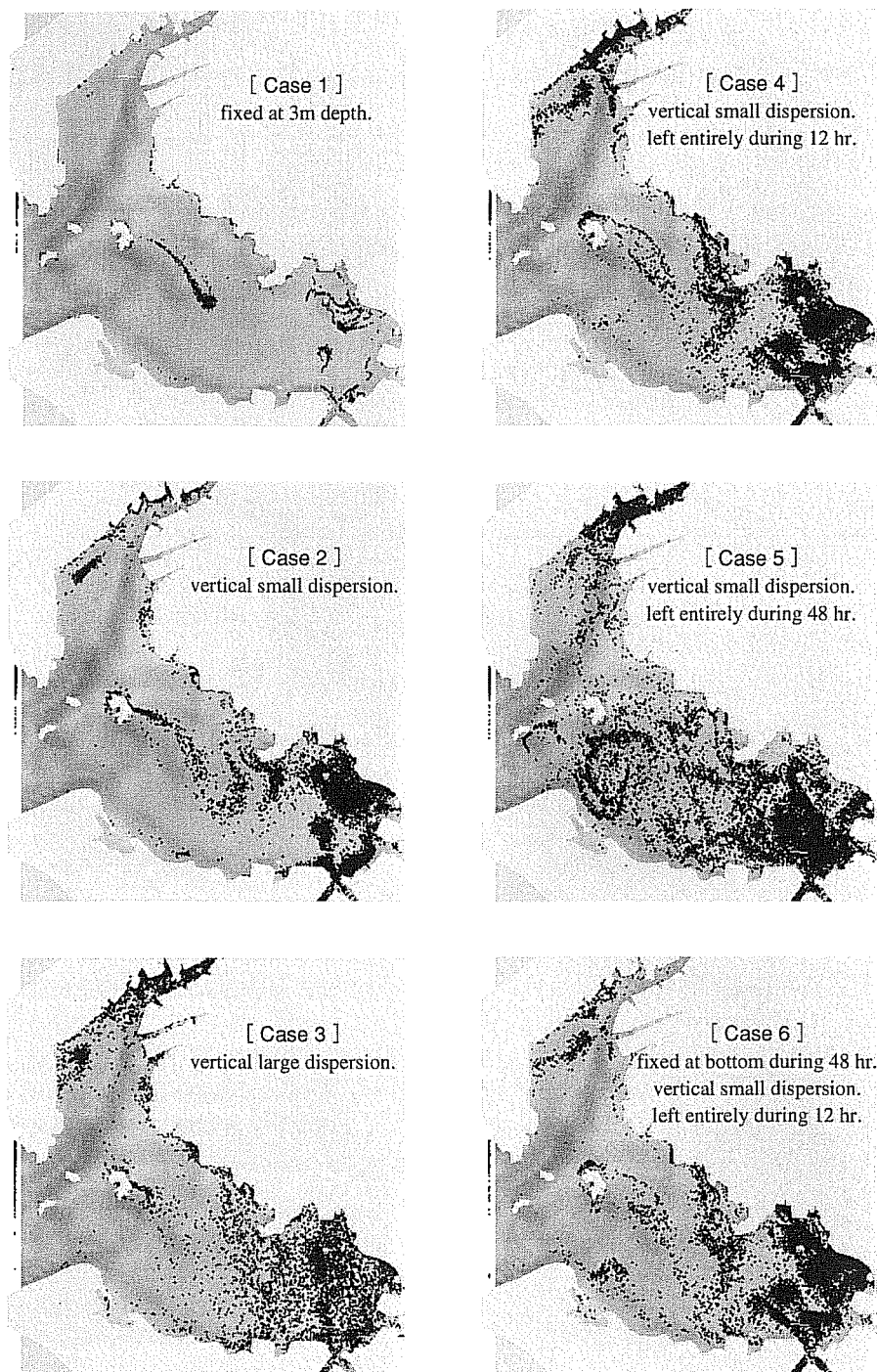


Figure 10. The final horizontal distribution patterns of pelagic larvae on six cases calculated by receptor mode model at the period from May 15 to May 2, 1998.

ると推測された。

3.2.2 Case 4, 5

Case 4の結果を見ると, Case 2とほとんど変化はなかった。しかし, Case 5の結果を見ると, 特に渥美湾側の無効

分散が広がり, 佐久島の供給源が篠島に移行した。これは, 受動的移動を想定した計算終了前12時間では, 浮遊幼生は3mの分布中心からあまりはずれなかったが, 48時間の受動的移動では5月2日から5月3日にかけての一時的な強

い南～南東の風のために鉛直方向の乱流が発達し、浮遊幼生が分布中心から大きく外れ、様々な流動場に拡散したためと推定される。しかし、このCase 5は無効分散域が大きく広がったことから計算条件の設定が現実的ではなく、48時間よりも短い時間で自律的な鉛直移動を行うようになる可能性が高いと考えられる。

3.2.3 Case 6

Case 6はCase 4と大きな変化がなかった。これは上述したように計算開始後最初の5日間ほど（5月15日→5月10日）の表層流は矢作川方面から、一色干潟周辺を通過して渥美湾奥に流れていたため、Case 4では分布中心付近の幼生はその影響で知多湾側に移行したが、計算開始後48時間は最下層に位置すると仮定したCase 6の場合でも、一色干潟周辺部の海域は浅く最下層まで分布中心付近とほぼ同じ流向であるため、知多湾側への移行量がCase 4とほとんど変わらなかったためと考えられる。

5月前半は後半に比べいずれのケースとも伊勢湾からの供給が顕著であったが、この理由は計算開始直後の北風による南下流によって知多湾側へ移行した粒子が、Fig. 6に示す師崎水道下層を経由しての伊勢湾系水に乗ったためと考えられる。

考察

1. アサリ浮遊幼生の鉛直分布

Fig. 5に示すようにアサリ浮遊幼生は何らかの自立的な行動様式により、植物プランクトンとは異なり、水深3m付近の中層に集中分布する傾向が強い。隣接する伊勢湾の東部海域における1997年6月から7月にかけての分布観測でもアサリ浮遊幼生は水深3m付近に多く分布するという結果が得られており、今回の結果と一致している。また、Fig. 4に示した鉛直分布の計算結果では水深6m以深にはほとんど分布しないという結果となったが、伊勢湾東部の水深15mの海域における観測でも5mより深い水深での出現量が極めて少ないことと一致している（日本水産資源保護協会、未発表）。山田ら（1996）は伊勢湾の知多半島先端海域においてアサリ浮遊幼生の鉛直分布を観測し、水面下5mの中層に多く分布することを報告している。今回の一色干潟沖合域における結果は中層に分布中心を持つという点でそれと類似していたが、今回の我々の観測も山田らの観測も表層、中層、下層の3層の結果であり、鉛直分布傾向は一致するが、正確な鉛直分布様式を決定するには至っていない。流動場とともに鉛直分布はアサリの水平分布を決定する最も重要なファクターであることは明らかであり、より詳細な鉛直分布観測や飼育実験が必要であろう。

2. 一色干潟域へのアサリ浮遊幼生供給源予測

6ケースの内、受精から着底と浮遊を繰り返すフルグロウン期までの漂流過程として可能性が高い計算ケースは鉛直分布観測の結果や非生息域への無効分散の程度から、Case

2、Case 4およびCase 6と推定される。受精からトロコフォア幼生までの期間が流れに受動的（Case 4）、また、殻頂完成期の後期の2日間は最下層に存在する（Case 6）といった仮定が妥当かどうかの検証は今後の課題であるが、結果を概観すると、5月後半（Fig. 9）及び5月前半（Fig. 10）のいずれの場合にも、上述の3つのケースでそれほど大きな差は生じなかった。Case 4でCase 2とそれほど顕著な差が現れなかったのは、受動的移動時間を、鉛直流が上昇流傾向にある湾奥部で漂流するため、流向が分布中心のある水深の流れとは逆向きの下層流には乗りにくく、かつ比較的静穏なことによる鉛直乱流が小さいため、浮遊幼生が3mの分布中心から大きく離れないためであろうと推測される。Case 6でも顕著な差が現れなかったのは、最下層に位置すると仮定した48時間は一色干潟周辺部の比較的水深の浅い場所を漂うため、最下層の流れが分布中心の流れと流向に大きな差が無かったことによっている。しかし、詳細に見ると5月後半のCase 6の場合にはCase 2やCase 4と異なり伊勢湾や渥美半島先端部の福江湾にも供給源の可能性が示唆された点が異なっており、殻頂完成期後期の2日間程度の挙動は分布に影響を与える重要な要素であることを示唆していた。

5月後半と5月前半の流動場における結果を見ると、渥美湾奥にアサリ浮遊幼生の供給源が見られたのは共通していたが、5月前半のケースで知多湾側や伊勢湾に供給源が見られた点は大きく相違していた。共通していた理由は浮遊幼生が渥美湾における湾奥から湾口に向けての表層流に乗ったためであり、相違していた理由は、強い北風に起因する5月15日から5月10日にかけての一時的な一色干潟域の南下流の存在によっている。

5月前半のCase 6がCase 4と知多湾奥部の供給源が異なる分布になったのも、この一時的な吹送流に起因している。一色干潟域への浮遊幼生の供給には一時的な風も大きな役割を果たしていることは重要であり、また、一色干潟域のアサリ資源が他海域よりも安定しているのは今回の5月後半と前半のケースから推測されるように、渥美湾系だけでなく、時に知多湾系、伊勢湾系の浮遊幼生の供給があることにより供給源が多様化していることによっている可能性も見逃せない。さらに、流動場が様々に変化する二週間という比較的長い漂流期間にもかかわらず、一色干潟域周辺やその近傍にも供給源が想定されることも特徴の一つである。

現在までに得られているアサリ浮遊幼生の鉛直行動様式に関する知見は極めて限られている（全国沿岸漁業振興開発協会、1997）が、今回検討した計算ケースの中で、Case 6が最も実態に近いと仮定した時、現在の三河湾におけるアサリの最重要漁場である一色干潟域への浮遊幼生供給源は一色干潟近傍だけでなく埋立が進行し環境が悪化している渥美湾奥や知多湾奥に多く存在している傾向が見られ

た。渥美湾奥の干潟・浅場は1970年代に1200ha程度が埋め立てられたが、埋め立て海域に漁業権を有していた豊橋市内6漁協のアサリ漁獲量の推移(第14~19次愛知農林水産統計年報)を見ると、埋立前の1967年に約13,000tあった漁獲が埋立後は約2,000tに激減している。現在の愛知県全体のアサリ漁獲量(2000年; 9,079t)を上回る量が埋立前の豊橋市周辺だけで漁獲されていた。佐々木(1998)は埋め立てにより失われた海域では面積当たりで $1.6\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ の漁獲量があったと計算し、同様に求めた東京湾の値($0.32\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$)の5倍となることから、かつてそこが極めて生産力の高い優良な漁場であったことを示唆している。現在、一色干潟域のアサリ生産は水流噴射式桁網の合法化と膨大な稚貝移植によりかろうじて漁獲量を維持しているが、過去ほどの稚貝の大量発生は見られていない。このことは今回の数値模擬実験から推測されるように、湾奥の埋立が、一色干潟域へのアサリ浮遊幼生の供給を大きく減少させたことによっている可能性も否定できない。

今回の試みは海上風の一部データの欠測等により流動場の再現性が良好でない部分があったことや、浮遊幼生の行動様式についてはいくつかの未解明の仮定に基づいているものの、供給源予測という目的達成のためには、気象、海象の自動観測システムやそれに基づいたレセプターモードモデルが有効なツールとなる可能性を示している。同じラグランジェ的見方で浮遊幼生の挙動を評価する際、ある場所の産卵群による浮遊幼生の漂流経路を順時間で推測する方法と、今回のように、ある場所の浮遊幼生の供給源を逆時間で推測する方法がある。前者は埋立等による資源への影響を評価するといったケースでは有効である。しかし、干潟・浅場造成適地や資源保護区の選定といったケースでは、事業規模が経済的な理由や海面利用の制限等から限定されるため、より効率的な場の選定やその科学的根拠が必須となる。アサリ個体群は三河湾全域の干潟・浅場に分布しているため、前者は計算ケースが無限大となりあまり適していないが、後者は主要なアサリ漁場を効果のターゲットとするため、より合理的な評価方法と言えよう。たまたま今回は一色干潟域での試みであるが、このレセプターモードモデルによる供給源の予測は三河湾の任意の場所・時間で、幼生が濃密に確認されれば、その時間を初期値に流動場のリアルタイムシミュレーションを行い、幼生の大きさから推測される漂流時間で観測された地点からの漂流追跡が行えるという利点がある。その意味では極めて簡便な方法である。浅海域の埋め立てに関する影響評価や干潟・浅場造成の要請、資源保護区の設定は、水産業界が現在直面している問題であり、簡便さも重要なファクターの一つと思われる。

今回は供給源予測の方法論に主眼を置いた試みではあるが、今後の三河湾における干潟・浅場造成の適地としては、湾奥部の旧干潟・浅場域の前面が望ましく、またそれら埋

立地内にわずかに残っている干潟・浅場の価値はますます重要であり、遊休化している埋立地を干潟・浅場にすることも検討する価値があることなどを示唆している。

今後はアサリ浮遊幼生の行動様式に関する知見をより積み重ね、数値模擬実験の精度を高める必要がある。また、この試みによりアサリ浮遊幼生の漂流はわずかな鉛直分布様式や、風等による一時的な流動場の変動に大きく左右されることが示唆されたため、実海域における分布から幼生の移動に関する情報を得るためには、流動場の同時把握も前提とした観測体制のさらなる整備や観測頻度の向上が必須であろう。

謝 辞

本報告を取りまとめるにあたり、本論文を校閲して頂いた東海大学海洋学部中田喜三郎博士、計算手法について有益な助言、協力を頂いた(株)シーティーアイ田口浩一氏、寺澤知彦氏、英文を修正して頂いたMs Linda Worland、観測を行った水質調査船「しらなみ」乗組員及び愛知県水産試験場研究員諸兄および浮遊幼生の同定や知見の収集に関して協力頂いた(有)生物生態研究社、柳橋茂昭氏にこの場を借りて深く感謝する。本研究は愛知県の漁場生産力向上技術開発試験、および人工生態系機能高度化技術開発試験の一部として行われた。

引用文献

- 青山裕晃(2000)三河湾における海岸線の変遷と漁場環境。愛知県水産試験場研究報告, 7, 7-12.
- 井手尾寛・岩本哲二・大橋 裕(1994)アサリ種苗生産試験。山口県内海水産試験場報告, 23, 64-6.
- 今村 均(1998)人工干潟造成の現状と課題。沿岸の環境圏, フジ・テクノシステム, 東京, 1112-1121.
- 今尾和正・鈴木輝明・青山裕晃・甲斐正信・伊東永徳・渡辺 淳(2001)貧酸素化海域における水質浄化機能回復のための浅場造成手法に関する研究。水産工学, 38, 25-34.
- 海上保安庁水路部(1983)日本沿岸潮汐調和定数表。
- 菊池泰二(2000)干潟は、いま:総論。海洋と生物, 22, 300-307.
- 木村賢史(1998)水質浄化場としての人工干潟(海浜)の設計。沿岸の環境圏, フジ・テクノシステム, 東京, 1122-1136.
- 松村貴晴・岡本俊治・黒田伸郎・浜口昌巳(2001)三河湾におけるアサリ浮遊幼生の時空間分布一間接蛍光抗体法を用いた解析の試み一。日本ベントス学会誌, 56, 1-8.
- Mellor, G. L. and T. Yamada (1982) Development of a turbulence closure model of geophysical fluid problems. Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851-875.
- Munk, W. H. and E. R. Anderson (1948) Notes on the theory of the thermocline. J. Mar. Res., Vol. 1.
- 名古屋地方気象台(1998)愛知県気象月報。(財)日本気象協会東海本部, 平成10年5月。
- 中田喜三郎(1993)生態系モデル。J. Ad. Mar. Tech. Conf. 18, 99-138.
- Nakata, K. (1994) Oil spill fate model developed in Japan and future plan. J. Ad. Mar. Tech. Conf. 11, 177-192.
- 日本海洋学会(1990)海洋観測指針(気象庁), 428 pp.
- 日本水産資源保護協会(1995)水産用水基準(1995年度版), 68 pp.
- 佐々木克之(1998)内湾および干潟における物質循環と生物生産28干潟と漁業生物2。三河湾のアサリ。海洋と生物, 20, 404-409.

- 佐々木克之 (2001a) アサリの水質浄化の役割. 水環境学会誌, **24**, 207-210.
- 佐々木克之 (2001b) 干潟・浅海域の浄化力. 科学, **71**, 902-911.
- Spaulding, M. L. and A. Chen. (1994) A shell based approach to world wide oil spill modeling. J. Ad. Mar. Tech. Conf., **11**, 127-141.
- 鈴木輝明・青山裕晃・中尾 徹・今尾和正 (2000) マクロベントスによる水質浄化機能を指標とした底質基準試案—三河湾浅海部における事例研究—. 水産海洋研究, **64**, 85-93.
- 田中弥太郎 (1982) 二枚貝浮遊幼生の同定—16. 海洋と生物, **18**, 23-27.
- 鳥羽光晴 (1992) アサリ幼生の成長速度と水温の関係. 千葉水試研報, **50**, 17-20.
- 鳥羽光晴・深山義文 (1995) アサリ人工産卵における産卵量および卵径と, 卵・幼生の生き残りの関係. 水産増殖, **43**, 315-321.
- 上妻智行 (1994) アサリ種苗生産における採卵および幼生飼育技術. 福岡県水産海洋技術センター研究報告, **2**, 67-77.
- 山田 智・岩田靖宏・柳澤豊重 (1996) 三河湾におけるアサリ浮遊幼生の分布—移流, 拡散, 加入過程—. 月刊海洋, **28**, 150-156.
- 全国沿岸漁業振興開発協会 (1997) 沿岸漁場整備開発事業 増殖場造成計画指針 ヒラメ・アサリ編 平成8年度版, 316 pp.