

## 東京湾におけるアサリ浮遊幼生の鉛直移動を考慮した モデル構築について

### A Study on Vertical Movement Model of Planktonic Larvae of Clam *Ruditapes Philippinarum* in Tokyo Bay

大塚 文和\*・川西 利昌\*・増田 光一\*

Fumikazu OTSUKA, Toshimasa KAWANISHI and Koichi MASUDA

**要旨:** 本研究は、東京湾におけるのアサリのネットワークの解析において重要となるアサリの鉛直的な移動を考慮した数値モデルを提示するとともに、その基本的な適用性を検討したものである。また、東京湾における内湾全域を対象とした「アサリプロジェクト」の観測結果を用いて、アサリ浮遊幼生の鉛直分布の平面特性をクラスター分析を用いて解析を行った。その結果、浮遊幼生の鉛直分布の特性の一面を明らかにすることができた。また、これらを踏まえて、浮遊幼生の移動シミュレーションを実施した結果、観測結果の基本的な特徴が再現された。

#### 1. 緒言

アサリは、我が国の食卓には欠かせない魚介類であるが、干潟の浄化機能にとっても重要な役割を果たしていることが確かめられており<sup>1)2)</sup>、環境保全にとっても重要な生物といえる。東京湾では、埋め立てなどによりアサリの生息場となり得る干潟、浅場は大幅に減少し、現状では、三番瀬や三枚洲のように埋立地の間に他の干潟・浅場とは離れて離散的に存在する状況となっている。しかし、これらの離散的な生息場間では、幼生供給を基本とするアサリのネットワークが存在し、アサリの生息にとって重要な役割を担っていることが指摘されている<sup>3)</sup>。

東京湾を対象にしたアサリネットワークについての研究は、「アサリプロジェクト」として東京湾

全域を対象に幼生の観測を行った粕谷<sup>4)</sup>らの研究や数値モデルによって幼生の発生場所や移動経路の推定等を行った日向<sup>5)</sup>、田中<sup>6)</sup>らの研究などがある。また、大塚ら<sup>7)</sup>は同化法を組み込んだ数値モデルによって東京湾における生息場間の幼生相互供給状況を推定した。しかし、これらの数値モデルを用いた研究では、いずれの研究もアサリ幼生は流れに対して完全に受動的なトレーサーとして取り扱い、アサリ幼生の遊泳能力に起因する鉛直移動は考慮されていない。

一方、アサリ幼生の鉛直移動についての研究は、石田ら<sup>8)</sup>や瀬戸<sup>9)</sup>らなどの研究がある。石田ら<sup>8)</sup>は、室内実験結果を基に、幼生は塩分を感知し、その成長段階における選択塩分を求めて移動（塩分選択行動）するものとして、塩分移動再現モデ

\* 正会員 日本大学理工学部 海洋建築工学科

ルを作成した。しかし、これを、自ら実海域に適用したシミュレーションを実施したが良い再現性は得られなかった<sup>10)</sup>。また、瀬戸ら<sup>9)</sup>は、ウバガイとアサリの浮遊幼生を対象に螺旋運動をしながら鉛直方向に移動するモデルを作成し、浮遊幼生が着底に至る過程を検討した。しかし、室内実験の範囲にとどまっており、実海域での適用には至っていない。鈴木ら<sup>11)</sup>は、三河湾を対象にアサリ浮遊幼生の供給源をリセプターモードモデルを用いて推定したが、このとき固定水深を中心に正規乱数を使って幼生の鉛直分布を考慮した。

今後、アサリネットワークにおける生息場間の幼生相互供給状況の解明を進めていく上では、移動形態として平面移動だけではなく幼生の発生・浮遊から沈降・着底に至る鉛直的な移動を考慮することが必要であるとともに、アサリ幼生の個体群としての各種個体差（幼生発生時殻長、成長速度、鉛直移動速度等）を考慮したより現実的なモデルが必要と考えられる。

著者ら<sup>12)</sup>は、鉛直1次元モデルを用いて幼生の個体差を考慮した成長モデルを作成し、それに遊泳能力を合わせた鉛直移動モデルを作成し、水平移動を考慮しない鉛直1次元モデルで、粕谷らの観測結果の再現計算を行い、個体群としての出現分布や基本的な鉛直分布特性が再現できることを明らかにした。

本研究は、アサリ浮遊幼生についての粕谷ら<sup>4)</sup>の現地調査で得られた殻長出現頻度分布を基にクラスター分析を行い、東京湾（内湾）における浮遊幼生の鉛直分布特性について解析するとともに、アサリ浮遊幼生の各種個体差および鉛直移動を考慮した3次元浮遊移動モデルを構築し、東京湾を対象にその基本的な適用性を検証することを目的とした。（なお、粕谷らの現地観測結果は、文献4)から引用した。）

## 2. 研究方法

本研究では、クラスター分析や幼生の平均成長速度の算出等において文献4)の粕谷らの2001年8月の現地観測結果（以下、対象観測結果という）を用いる。

### 2.1 アサリ幼生浮遊シミュレーション

アサリ幼生の浮遊シミュレーションでは、流況シミュレーションが前提となる。本研究では、流況シミュレーションモデルはマルチレベルモデルを用いた。基本式を以下に示す。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u^2) + \frac{\partial}{\partial y}(uv) + \frac{\partial}{\partial z}(uw) = f_0 v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial x} \quad (2)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( N_z \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(v^2) + \frac{\partial}{\partial z}(vw) = -f_0 v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_0}{\partial y} \quad (3)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left( N_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( N_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( N_z \frac{\partial v}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uT) - \frac{\partial}{\partial y}(vT) - \frac{\partial}{\partial z}(wT) + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left( k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial Cl}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(uCl) - \frac{\partial}{\partial y}(vCl) - \frac{\partial}{\partial z}(wCl) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial Cl}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial Cl}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial Cl}{\partial z} \right)$$

$$\rho = \rho(Cl, T) \quad (6)$$

式(1)は、連続の式、(2)および(3)は運動方程式であり、(4)および(5)は水温および塩分の拡散方程式である。ここで、 $u$ 、 $v$ 、 $w$ はそれぞれ $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向の流速(m/s)、 $T$ は水温(°C)、 $Cl$ は塩分を表す。 $N_x$ 、 $N_y$ 、 $N_z$ はそれぞれ $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向の渦動粘

性係数(m<sup>2</sup>/s)を表す。P0, ρ は圧力(Pa)、密度(kg/m<sup>3</sup>)を表す。また、Kx, Ky, Kz はそれぞれ x, y, z 方向の拡散係数(m<sup>2</sup>/s)を表す。基本的な計算条件を下表に示す。

表 1 基本的な計算条件

格子数	x軸	83
	y軸	136
	z軸	9
格子幅	x軸	500m
	y軸	500m
	z軸(第1~6層)	2m
	z軸(第7層)	8m
	z軸(第8層)	10m
	z軸(第9層)	海底まで
タイムステップ		5 sec
再現期間		19.5 days
外力		M2
コリオリパラメータ		f=2ωsin f (f=35.4°)
鉛直渦拡散係数		0.01
内部境界面摩擦係数		0.0013
海底摩擦係数		0.0026
流入流量		・河川15(江戸川、荒川、多摩川、鶴見川、隅田川、小櫃川、養老川、小糸川等) ・下水道等13(森ヶ崎、葛西、砂町、川崎、横浜等)

河川流量については、国土交通省水文データベース等より入手し、下水道放流流量については、東京都下水道局等より入手した。また、海上風については、東京湾周辺のアメダス観測値を基に、平面スプライン補間法を用いて1時間毎の海上風(2001年7~8月)を推定した。

流況の計算対象領域は、三浦半島剣埼と勝山浮島を結ぶ内側の領域とし、再現性は主に潮流楕円について観測結果と計算結果との比較で実施した。

アサリ幼生の浮遊シミュレーションでは、幼生浮遊シミュレーションの基本的な適用性を示すことを目的として、鉛直方向の幼生移動については幼生の鉛直移動モデルによるものと流れによる移流効果を考慮したが、水平方向の移動については流れによる移流効果に比べアサリ幼生の遊泳能力は小さく無視できるとして、流れに対して完全な受動的なトレーサーとして取り扱った。また、本研究では、鉛直移動モデルの基本的な適用性を示

すことを目的としていることからランダムウォーク等の効果は考慮していない。

アサリ幼生の鉛直位置は、計算時間間隔ΔT毎に次式で計算した。

$$Z_{T+\Delta T} = Z_T + (V_1 + V_2) \cdot \Delta T \quad (7)$$

ここで、 $Z_T$  及び  $Z_{T+\Delta T}$  は、それぞれ時刻T及びT+ΔTにおける鉛直位置であり、 $V_1$ ,  $V_2$ はそれぞれ鉛直流速、アサリ幼生の鉛直移動速度である。

なお、計算時間間隔を示すΔTは、繰り返し計算を行い、再現性を考慮して3分とした。

アサリ浮遊幼生の初期位置については、アサリの生息場を考慮すると干潟・浅場を対象にすべきと考えるが、本研究では幼生の鉛直移動を含めた基本的な浮遊状況をシミュレーションすることを目的としており、干潟を考慮した浮遊シミュレーションを対象としていないため、生息場と考えられる海域の沖側とした。

## 2.2 成長モデルの構築

アサリの成長モデルに関連する研究としては、着底期以降については Solidoro ら<sup>13)</sup>のモデルを東京湾盤洲干潟に適用した小沼ら<sup>14)</sup>の研究や同モデルを改良して伊勢湾伊勢地区に適用した花町ら<sup>15)</sup>の研究がある。Solidoro ら<sup>13)</sup>のモデルでは、餌料環境と水温が主な因子である。また、幼生期の成長については、鳥羽<sup>16)</sup>の実験的研究などがある。鳥羽の研究では、成長速度は水温に大きく依存することが確認され、水温を一定とした実験では時間に関してほぼ線形的な成長が確認されている。本研究では、幼生期を対象にすると共に、調査データも限られていると考えられることから、時間に関して線形的な成長を想定し、環境要因の変化や個体差に係わる成長速度の変動を乱数で表現することとした。

本研究で用いた成長モデルを式(8)に示す。

$$L = \alpha \cdot S \cdot T + L_0 \quad (8)$$

ここで、 $L$  は幼生の殻長 ( $\mu\text{m}$ )、 $\alpha$  は環境等に係わる変動 (一様乱数; 0.4~1.4)、 $S$  は幼生の成長速度 ( $\mu\text{m}/\text{d}$ )、 $T$  は日数 (day)、 $L_0$  は幼生発生時の殻長 ( $\mu\text{m}$ ) である。

幼生発生時の殻長  $L_0$  は、平均値と標準偏差で表現する正規分布 (正規乱数) で与えた。平均値については、既存資料を基に  $64\mu\text{m}$  とし、標準偏差については繰り返し計算によって観測データとの整合性から決定した。また、幼生の成長速度  $S$  についても、個体差を考慮して平均成長速度と標準偏差で表す正規分布 (正規乱数) で設定した。

平均成長速度については、対象観測結果の2001年8月2日および同年8月6日の観測結果についてコホート (同時発生個体群) 抽出を行い、4日間を隔てた8月2日と6日の結果から抽出されたコホートの関連性を検討し、同一コホートと考えられるものについて平均殻長の差をとり、4日間で除して平均成長速度とした。

成長モデルの適合性については、まず先に求めた平均成長速度を基に対象観測結果の8月2日の結果から抽出されたコホートについて、それぞれの発生日を逆算した。次に、逆算した幼生発生日をスタートに、成長モデルを用いて幼生の個体差を考慮して成長させ、8月6日の殻長頻度分布を再現し、対象観測結果の8月6日のものと比較することで成長モデルの再現性を検討した。

### 2.3 鉛直移動モデルの構築

アサリの浮遊幼生は、貧酸素水塊等の厳しい環境条件を除けば、着底行動に入るまでの幼生は個体差はあるものの自由に上下運動をしていることを仮定している。(この仮定は、本研究の成果でも

ある後述する鉛直分布特性から想定するものである。) ただし、幼生個体の密度は、成長とともに変化し、幼生の浮遊移動は流体との相対密度差によっても物理的に影響を受けると考えられる。

従って、本研究では、(8)式の成長モデルを基に、成長に伴って幼生密度を変化させて、幼生と海水の密度差を考慮する鉛直移動モデルを構築し、アサリ幼生の成長および鉛直移動を考慮した浮遊シミュレーションを実施した。

アサリ鉛直移動速度は、石田<sup>8)</sup>らが塩分差を起動力に定式化した形式に倣い次式で表した。

$$V = \beta V_{\max} \tanh \{k(\gamma \rho_b - \rho)\} \quad (9)$$

ここで、 $V$  は鉛直移動速度、 $V_{\max}$  は最大移動速度 ( $\text{cm}/\text{s}$ )、 $\gamma$  は運動補正係数、 $\rho$  はある時刻に幼生がいる位置における海水密度、 $\rho_b$  はある時刻における幼生の密度、 $k$  は幼生が周辺海水の密度との差を受けて、どの程度鉛直速度に反映させるかを表す感度パラメータ、 $\beta$  は個体差を表現する一様乱数である。運動補正係数は、殻長の大きさ等によって密度差による応答を変化させるための変数であり、密度差がゼロの場合でも鉛直移動を表現するためのものでもあるが、本研究では取りあえず  $\gamma=1$  としていることから係数と表示している。また、 $V_{\max}$  は石田<sup>8)</sup>の実験式を基に、成長モデルの形式を考慮して殻長を変数とする次式でモデル化した。

$$V_{\max} = A_L(L - L_0) + A_0 \quad (10)$$

ここで、 $A_L = 0.016/A_{av}$ 、 $A_0 = 0.0388$  であり、 $A_{av}$  は平均成長速度 ( $\mu\text{m}/\text{day}$ )、 $L$  はある時点における幼生殻長 ( $\mu\text{m}$ )、 $L_0$  は発生時の平均殻長 ( $\mu\text{m}$ ) である。上記の数値「0.016」及び「0.0388」については、石田<sup>8)</sup>らが実験<sup>8)</sup>から  $V_{\max}$  を求めたときの係数である。式(10)は、石田<sup>8)</sup>らが求めた  $V_{\max}$  は、時間についての一次関数であったが、本研究

では幼生殻長についての関数として表す必要があり、本研究では幼生殻長が時間について一次関数としてモデル化しているのをこれと連立して式(10)のように表現した。

アサリ幼生の密度については、瀬戸<sup>9)</sup>らの研究及び石田<sup>8)</sup>らの研究を参考にモデルを作成した。瀬戸ら<sup>9)</sup>は、沈降実験によりアサリ幼生の密度と殻長との関係を殻長が約75~200 $\mu\text{m}$ の範囲で求めている。従って、先の殻長範囲では瀬戸らの実験値を用い、殻長200 $\mu\text{m}$ 以上の幼生の密度は変わらないと仮定し、75 $\mu\text{m}$ 以下については殻長とともに漸減すると仮定しモデル化した。

また、感度パラメータkについては、当該パラメータを変化させて浮遊シミュレーションを実施し、その結果を基に決定した。

## 2.4 アサリ浮遊幼生の鉛直分布特性

東京湾内湾におけるアサリ幼生の鉛直分布については、鳥羽ら<sup>17)</sup>の研究がある。鳥羽らは、東京湾東岸中央部に位置する盤洲沿岸でのアサリ幼生の観測結果から小型幼生は表・中層で多く採取され表層あるいは表・中層での幼生密度が底層に比べ有意に高かったことを述べている。一方、東京湾中央部における傾向については、特定の観測点での結果から208 $\mu\text{m}$ までの殻長区分では鉛直層間の密度比率に明確な変化傾向は見られなかったとも述べている。著者らは、これらの結果を踏まえて、東京湾内湾全域に観測点を配置した大規模なアサリプロジェクト観測結果を利用して、東京湾内湾におけるアサリ幼生の鉛直分布の平面的特性をクラスター分析手法を用いて解析した。

東京湾内湾を対象に65点、3層(上層;0-4m, 中層;4-8m, 下層;8-12m)における殻長出現頻度分布を基に、幼生出現状況についてクラスター分析を行い、浮遊幼生の鉛直分布の形態が東京湾(内湾)でどのように変化しているのかについて検討

を行った。クラスター分析では、ウオード法を用いた。

なお、水産庁<sup>18)</sup>によるとトロコフォア幼生は海面表層に集中し、初期のD型幼生も上層を遊泳する傾向を示し、幼生は発育とともに底層を遊泳する傾向を強め、初期の拡散傾向とは対照的に滞留傾向を示すようになるとのことである。従って、これらの傾向とは逆に、下層に小型幼生が多く浮遊し、上層に大型幼生が浮遊する状況は存在するのかを確認するため、「下層の小型幼生(90~130 $\mu\text{m}$ )、上層の大型幼生(190 $\mu\text{m}$ 以上)」に着目して、クラスター分析を行った。

## 2.5 コホート解析

生物体長の度数分布を基に、複数の正規分布(同時発生個体群;コホート)に分別する方法は、堤ら<sup>19)</sup>や赤嶺<sup>20),21)</sup>などの方法がある。本研究では赤嶺の方法を使用した。アサリ幼生の殻長出現頻度分布をFとし、この出現頻度分布が正規分布の重ね合わせで構成されていると仮定して、正規分布の組み合わせで近似するものである。基本式を式(11)~(13)に示す。

$$f = \sum_{i=1}^n K_i \cdot N(\mu_i, \sigma_i, x) \quad (11)$$

$$N = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (12)$$

$$d^2 = \sum_{x=a}^b dx^2 = \sum_x (F-f)^2 \quad (13)$$

ここで、 $N(\mu_i, \sigma_i, x)$ は平均値 $\mu_i$ 、標準偏差 $\sigma_i$ とする面積を1に正規化した正規分布である。 $K_i$ は正規分布毎の面積を表す。求めるパラメータは、重ね合わせる正規分布の数をnとす

ると3n個であり、式(3)の $d^2$ を最小にするパラメータをMarquart法を用いて求めた。

上記の方法を用いて2回の殻長出現分布から推定した同時発生個体群(コホート)の平均値( $\mu$ )から平均的な成長速度を算出した。また、算出した平均成長速度を用いて、幼生の発生日を推定した。

なお、正規分布数nについては、観測データの解析結果および尤度から算出する赤池の情報量基準(AIC)<sup>20)</sup>を踏まえて決定した。

### 3. アサリ浮遊幼生の鉛直分布特性

2001年8月2日、6日および10日に実施された東京湾65点における対象観測結果について、「下層の小型幼生(90~130 $\mu$ m)、上層の大型幼生(190 $\mu$ m以上)」に着目して、クラスター分析を行った。クラスター分析により得られた領域区分を図1~3に示す。

これら図1~3の内、8月2日(図1)と8月10日(図3)についてはパターン色でみると湾中央部が青で浅海域前面が赤となるほとんど同様なパターンを示していることが確認できる。8月2日(図1)の赤と青で配色された領域について、それぞれに含まれる観測点毎の上層、中層及び下層の幼生殻長出現頻度を積算したものを図4および図5に示す。これらからも明らかなように湾中央部(青)では、深さに関係なく小型幼生が分布していることが確認できる。また、浅海域前面(赤)では明らかに小型幼生は上層に多く分布していることが確認できる。しかし、この傾向は、赤の領域については下層に当たる水深がある観測点が少ないという物理的な要因もあると考えられる。

8月6日(図2)のパターンについては、赤、青及び緑で配色された領域について、それぞれに含まれる観測点毎の上層、中層及び下層の幼生殻長出現頻度を積算したものを図6、図7および図8

に示す。8月6日のパターンは、8月2日に多く出現した小型幼生が成長して中型となったと考えられるため、中型幼生の比率が2日のものに比べ大きくなっている。その結果、浅海域前面(赤)と中央部(青)の傾向は8月2日および6日のものとほぼ同一であるが、緑の領域が浅海域前面(赤)と中央部(青)との中間的な分布を示しており、小型幼生、中型幼生及び大型幼生とも水深にかかわらずほぼ様な分布を確認できる。

なお、上記の特性は、対象観測結果が4日間隔の3回の観測結果のみあり、1時点(2001年8月)の結果であるともいえる。これを基本的な鉛直分布特性といえるためには鳥羽ら<sup>22),23)</sup>が実施したような浅海域前面での詳細な観測や周年的な解析が必要とも考える。



図1 クラスタ分析結果(2001.8.2)

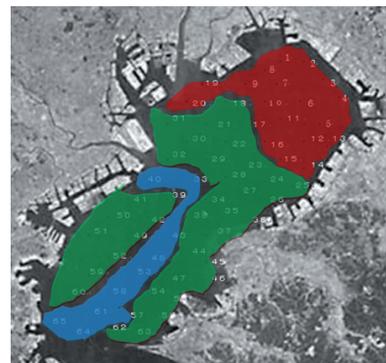


図2 クラスタ分析結果(2001.8.6)

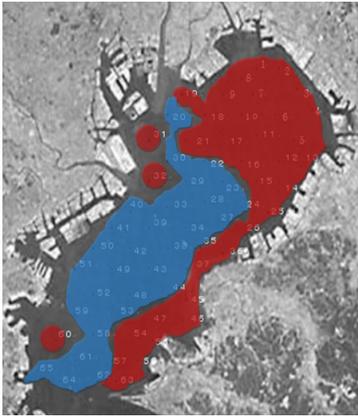


図3 クラスタ分析結果(2001. 8. 10)

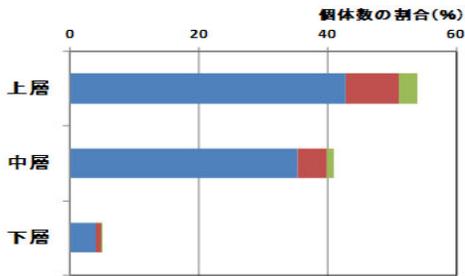


図4 浅海域前面(赤)頻度分布(2001. 8. 2)

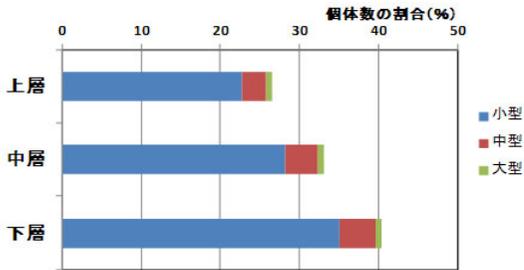


図5 中央部(青)頻度分布(2001. 8. 2)

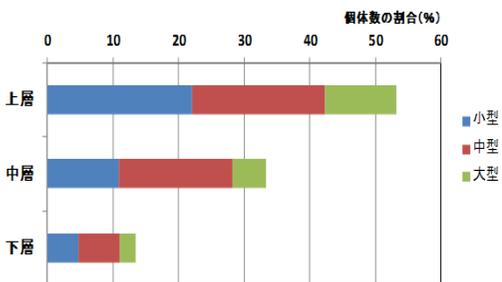


図6 浅海域前面(赤)頻度分布(2001. 8. 6)

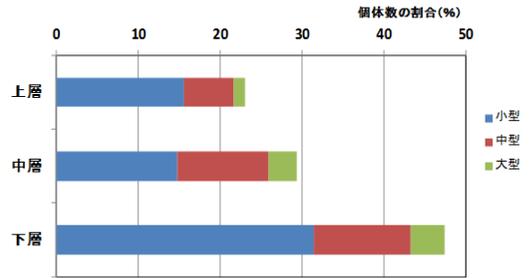


図7 中央部(青)頻度分布(2001. 8. 6)

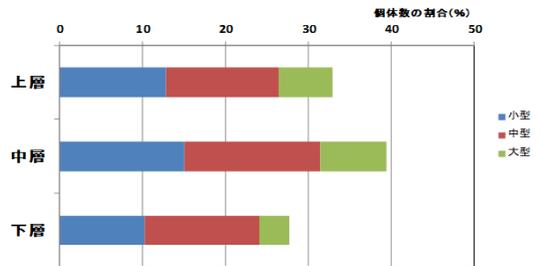


図8 浅海中央部(緑)頻度分布(2001. 8. 6)

## 4. 浮遊シミュレーション

### 4.1 成長モデルの再現性

成長モデルの再現性を検討することを前提に、8月2日と6日の観測結果について、コホート解析を行い、同時発生個体群の抽出を行った。その結果を図9および10に示す。これらの解析結果では、対象観測結果について全観測点(65点)の全層を積算したものを対象にした。

図9(8月2日)におけるコホートの数については、粕谷ら<sup>6)</sup>が整理した幼生の水平分布によると当日は三枚洲～羽田沖、市原前面～盤洲干潟周辺および富津付近の3海域程度で幼生の出現密度が顕著に高い傾向が見られることを踏まえ、観測出現頻度とコホートの重ね合わせ結果との整合性を検討して判断した。

また、図 10 に示す 8 月 6 日におけるコホートの数については、観測結果の幼生出現頻度（平面）分布からでは幼生発生群が捉えにくく、8 月 2 日におけるコホート数を踏まえて、コホート数が 3、4 および 5 の場合について赤嶺<sup>20)</sup>に倣い AIC を算定した結果、コホート数 4 の場合が AIC (53231) が最も小さかったため、最適なコホート数として 4 を採用した。

図 9 と図 10 を比較することにより、8 月 2 日のコホート 3 は、平均値が 120  $\mu\text{m}$  であり、4 日後の 6 日にも残存しているとともに、2 日のピークの顕著さを考えると 6 日にも顕著なピークを持つことが推定できる。従って、8 月 2 日のコホート 3 は、6 日のコホート 2 に対応づけるのが最も妥当と考えられる。また、8 月 2 日のコホート 2 は、コホート 3 との相対関係を考えると 6 日のコホート 1 に対応づけるのが妥当と考えられる。これらの関係から平均成長速度を推定した結果を、表 2 に示す。

表 2 に示すように、成長速度を確定できるのは、8 月 2 日のコホート 2、3 と 8 月 6 日の 1、2 とからであり、これらの平均値を求めると平均成長速度は 17.0  $\mu\text{m}/\text{day}$  になる。以下では、平均成長速度は 17  $\mu\text{m}/\text{day}$  として取り扱った。

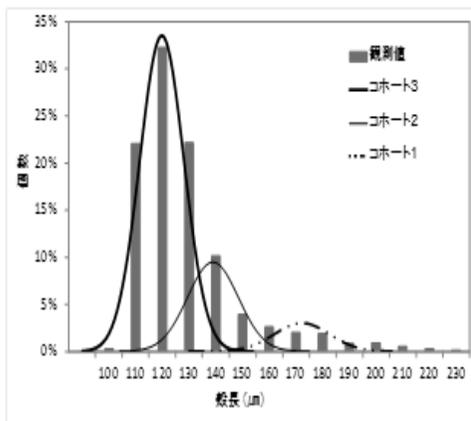


図 9 幼生殻長頻度分布 (2001. 8. 2)

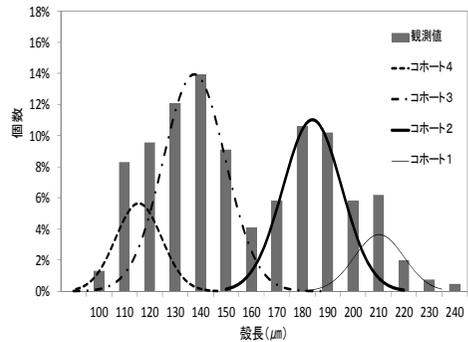


図 10 幼生殻長頻度分布 (2001. 8. 6)

表 2 成長速度算定結果

8月2日	8月6日	成長速度 ( $\mu\text{m}/\text{day}$ )	備考
コホート1	—	—	8/2の平均殻長が172.3 $\mu\text{m}$ で、8/6には殆どが着定期殻長となったと推定。
コホート2	コホート1	17.9	8/2の平均殻長が210.3 $\mu\text{m}$ で4日間成長したため成長速度が17.9 $\mu\text{m}/\text{day}$ となった。
コホート3	コホート2	16.1	8/2の平均殻長が119.8 $\mu\text{m}$ 、8/6の平均殻長が184 $\mu\text{m}$ で4日間成長したため成長速度が16.1 $\mu\text{m}/\text{day}$ となった。
	コホート3	17.9以上	8/2の観測直後に発生したと想定している。8/6時点の平均殻長：137.6 $\mu\text{m}$ (発生時64 $\mu\text{m}$ と仮定)
	コホート4	12.9以上	8/2の観測直後に発生したものと想定している。8/6時点の平均殻長：115.7 $\mu\text{m}$ (発生時64 $\mu\text{m}$ と仮定)

これらの結果を踏まえて、先に示した成長モデルで 8 月 2 日および 6 日の殻長頻度分布について再現した。8 月 6 日の再現結果を、図 11 に示す。

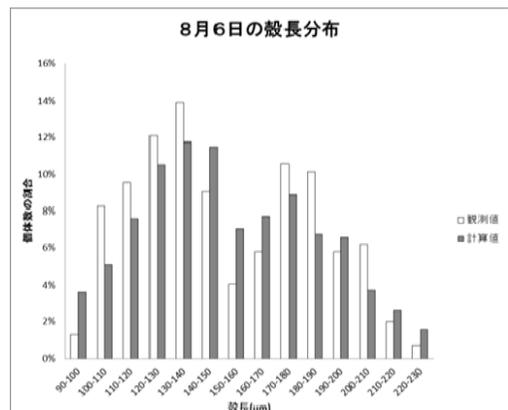


図 11 幼生殻長頻度分布再現結果 (2001. 8. 6)

図 11 の頻度分布の特徴は、2つのピークを持つ双峰分布をなしていることである。本モデルによる計算結果と観測結果は、2つのピーク及び分布全体の形状とも概ね一致しているものと判断できる。

## 4.2 浮遊シミュレーション結果

### 1) 流況シミュレーションの再現性

幼生の浮遊シミュレーションに先立ち、流況シミュレーション結果の再現性を検討した。代表点の潮流楕円比較図を図 12 に示す。図 12 における観測結果は、平成元年 8 月 23) の表層のものである。

図 12 で見ると、計算結果は観測結果を概ね再現していると判断した。

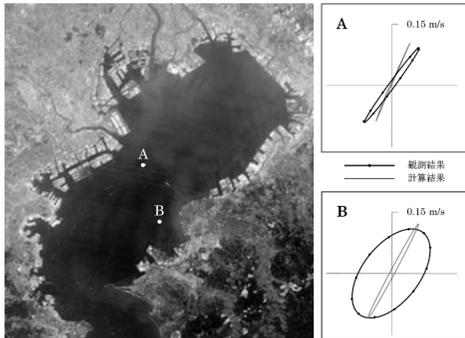


図 12 潮流楕円比較結果 (M<sub>2</sub>分潮)

### 2) 初期発生位置について

アサリ幼生の初期位置は、一般的には生息場が干潟や浅場であることから、本来は干潟・浅場を対象にすべきと考えるが、本研究では対象観測結果を基に、生息場と考えられる海域の沖側を初期位置とした。

8 月 2 日の殻長頻度分布 (図 9) で見ると、コホート 3 が出現比率として顕著なピークを示しており、出現数としても最も多く、その他のコホートに比べ約 4~10 倍程度多い。そのため、8 月 2 日のコホート 3 がどの観測点に依存しているのかをクラスター分析により抽出した。その結果を図

13 に示す。これによると、コホート 3 の個体群は、三枚洲付近、千葉市原沖、盤洲付近、横浜沖、富津沖及び金沢沖等に浮遊していたことが確認できる。そこで、本研究では、これらの海域の岸よりの位置をアサリ浮遊幼生の初期位置とした。また、初期水深は、表層での幼生粒子の鉛直移動 (上下動) と水平移動を確認するため、第 2 層 (2~4m) とした。

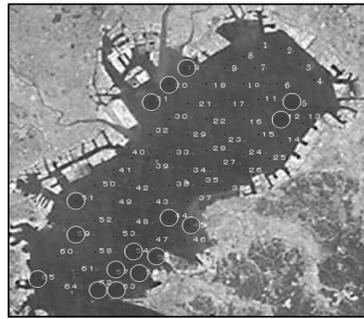


図 13 コホート 3 個体群 (8 月 2 日)

### 3) 浮遊シミュレーション結果について

本研究では、先のコホート発生時期の抽出・推定結果を踏まえてアサリ幼生個体群の発生時期を特定し、当該時刻に個体群を発生させ、成長モデルで成長させながら、逐次水平移動および鉛直移動を計算ステップ毎にシミュレーションした。

図 14~17 は、2001 年 7 月 27 日をスタートに、粕谷らの観測日 (2001 年 8 月 2 日) まで幼生の浮遊シミュレーションを実施した結果である。

この間、3 回 (7 月 27 日、29 日、30 日) の個体群 (コホート) を発生させながら幼生の移動をシミュレーションしたものであり、図中の灰色と黒色のマークが幼生群を示している。灰色のマークは、2 m 以上の水深で存在する幼生を表し、黒色のマークは 2 m より浅い層 (表層) で浮遊する幼生を表している。

図 14 は、8 月 2 日のコホート解析 (図 9) のコホート 3 を発生させた時点での幼生粒子の位置を

示している。この例では、幼生の発生は、2 m以上の水深で発生させると、幼生は 10 時間後（図 15）には多くが表層（0～2m）に浮上しながら浮遊していく状況が確認できる。さらに 10 時間後の図 16 では、表層、中層ともにそれぞれの比率を持ちながら浮遊拡散を拡大していく状況が表現されている。そして、図 17 に示す結果は、大凡 8 月 2 日の観測日に対応する結果である。対象観測結果について、8 月 2 日の特徴をみると、上層では三枚洲～羽田、横浜～金沢、千葉～市原、盤洲～富津に顕著に浮遊幼生が観測されており、三枚洲付近については合っていないが、その他の海域については集散傾向は一致しており、概ね再現されているものと考えられる。

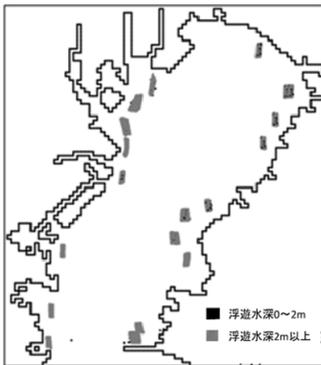


図 14 浮遊シミュレーション結果  
（7 月 30 日；コホート 3 発生時）

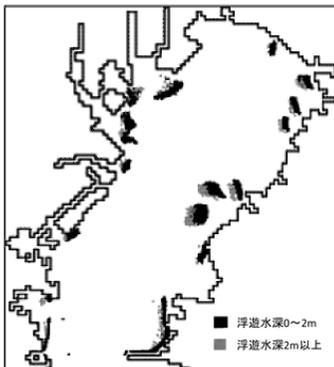


図 15 浮遊シミュレーション結果  
（コホート 3 発生から 10 時間後）

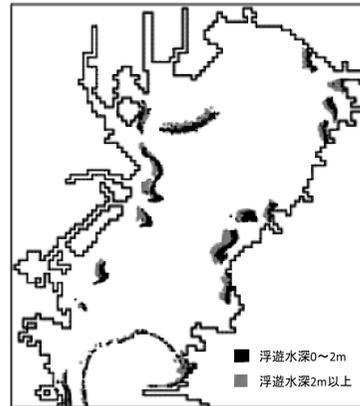


図 16 浮遊シミュレーション結果  
（コホート 3 発生から 20 時間後）

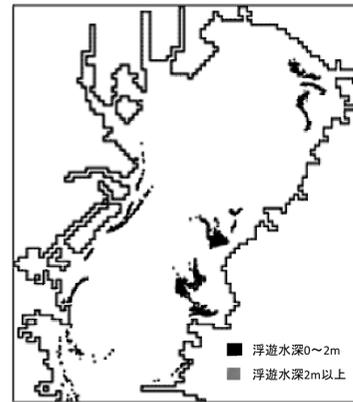


図 17 浮遊シミュレーション結果  
（8 月 2 日；観測日）

## 5. 結言

本研究は、アサリ幼生の観測結果である殻長出現頻度分布をクラスター分析することにより、干潟・浅場付近の沿岸部と湾中央部分とでは鉛直分布状況が大きく異なることが明らかとなった。特に、湾中央部では小型幼生（90～130  $\mu\text{m}$ ）は上層から下層まで同様に出現する特性が確認できるとともに大型幼生も上層、中層にも多く出現することが明らかとなった。

また、アサリ幼生の浮遊シミュレーションでは、成長モデルおよび鉛直移動モデルを組み込んで約

10 万個の幼生粒子を用いて浮遊シミュレーションを指向した。シミュレーション結果は、幼生の上昇、下降等の鉛直移動の基本的な動態を表せるとともに、平面的な分布特徴も概ね再現できたと考えている。

しかし、本研究で示した数値モデルでは、一般的にアサリの生息場されている干潟から沖合への幼生の流出や沖合から干潟への進入などは考慮されていない。また、本研究では、浮遊幼生の出現分布に大きく影響があると考えられる貧酸素水塊やクラゲ等の捕食生物との関係についても、考慮されていない。

今後は、各種ケースでの適用性の検討及び鉛直移動モデルの高度化を進めるとともに、干潟域を含めた浮遊シミュレーションや貧酸素水塊などの環境要素との関連を含めた浮遊シミュレーションが可能な数値モデルの開発を進めたいと考えている。また、それらを利用して、東京湾における幼生の相互供給を基軸としたアサリネットワークの解明を進める計画である。

## 引用・参考文献

- 1) 佐々木克之：アサリの水質浄化の役割，水環境学会誌，Vol. 24，No. 4，2001
- 2) 木村賢文，三好康彦，嶋津輝之，赤沢豊：人工海浜の浄化能力について（その2），東京都環境科学研年報，1991.
- 3) 古川恵太，粕谷智之：アサリのすむ海岸の整備に向けて，土木技術資料，45-7，2003
- 4) 粕谷智之，浜口昌巳，古川恵太，日向博文：夏季東京湾におけるアサリ浮遊幼生の出現密度の時間的変動，国土総合技術研究所，第8号，2003
- 5) 日向博文：東京湾におけるアサリ幼生の移流過程の数値計算，独立法人水産総合研究センター，2002
- 6) 田中昌宏：沿岸生態系の連続性を考慮した自然再生—その課題と戦略，沿岸環境関連学会連絡協議会 第11回シンポジウム予稿集，pp37-44，平成16年1月
- 7) 大塚文和・鳥飼千晶・秋保賢幸・弘中真央・増田光一・居駒知樹：東京湾を対象にしたアサリネットワークにおける生息場間影響の定量的評価について，海洋開発論文集2012
- 8) 石田基雄，小笠原桃子，村上知里，桃井幹夫，市川哲也，鈴木輝明：アサリ浮遊幼生の成長に伴う塩分選択行動特性の変化と鉛直移動様式再現モデル，水産海洋研究，69(2)，2005
- 9) 瀬戸雅文，栗山佳丈，長谷栄一，小林豊，荒川久幸：波浪場における二枚貝浮遊幼生の着底・分散機構に関する研究，海洋開発論文集，第23号，2007
- 10) 市川哲也，桃井幹夫，鈴木輝明，石田基雄：リセプターモードモデルを利用した造成適地選定手法，水産工学，Vol.46，No.3，pp.217-222，2010.
- 11) 鈴木輝明，市川哲也，桃井幹夫：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，水産海洋研究，Vol.66，No.2，pp.88-101，2002.
- 12) 大塚文和・川西利昌・増田光一：東京湾におけるアサリ幼生の鉛直移動モデルに関する基礎的研究，日本沿岸域学会研究討論会講演概要集，日本沿岸域学会，NO.25，2012
- 13) Solidoro, C., Pastres, R., Melaku Canu, D., Pellizzato, M. and Rossi, R. : Modelling the growth of *Tapes philippinarum* in Northern Adriatic lagoons, Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol. 199, 2000
- 14) 小沼晋，五島勇樹，中村由行：成長モデルを用

いた東京湾盤洲干潟での二枚貝による懸濁物除去量の推定, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 1126-1130, 2002.

- 15) 花町優次, 東博紀, 樋渡武彦, 水野知巳, 村上正吾, 木幡邦男: 成長モデルを用いた伊勢湾伊勢地区におけるアサリ資源量の変動要因の推定, 水工学論文集, 第 54 号, pp. 1603-1608, 2010.
- 16) 鳥羽光晴: アサリ幼生の成長速度と水温の関係, 千葉水試研報, No. 50, 1992
- 17) 鳥羽光晴, 山川紬, 庄司紀彦, 小林豊: 東京湾での周年採集によるアサリ幼生の鉛直分布の特徴, 日本水産学会誌, 78(6), 2012
- 18) 水産庁: 干潟生産力改善のためのガイドライン, 2008. 2
- 19) 堤裕昭, 田中雅生: 多毛類の個体群動態の調査解析法 (マイクロ・コンピュータを使用した体長の計測から世代解析まで), 日本ベントス研究会誌, No. 31, pp. 18-28, 1987.
- 20) 赤嶺達郎: Polymodal な度数分布を正規分布へ分解する BASIC プログラムの検討, 日水研報告, 35, pp. 129-160, 1985.
- 21) 赤嶺達郎: 水産資源のデータ解析入門, 恒星社恒星閣, 初版, 2010.
- 22) 鳥羽光晴, 山川紬, 庄司紀彦, 小林豊: 東京湾盤洲沿岸での夏季 1 潮汐間におけるアサリ幼生の鉛直分布の特徴, 日本水産学会誌, 79(3), 2013
- 23) 東京湾横断道路(株): 東京湾横断道路流況等調査 報告書, 平成 2 年 4 月

## 著者紹介

### 大塚文和 (正会員)

日本大学理工学部海洋建築工学科 (千葉県船橋市習志野台 7-24-1), 現在同大学助教, 工学博士, 建築学会会員。  
E-mail:otsuka.fumikazu@nihon-u.ac.jp



### 川西利昌 (正会員)

日本大学理工学部海洋建築工学科 (千葉県船橋市習志野台 7-24-1), 現在同大学特任教授, 工学博士, 建築学会会員。

### 増田光一 (正会員)

日本大学理工学部海洋建築工学科 (千葉県船橋市習志野台 7-24-1), 現在同大学教授, 工学博士, 建築学会会員。

## **A Study on Vertical Movement Model of Planktonic Larvae of Clam *Ruditapes Philippinarum* in Tokyo Bay**

Fumikazu OTSUKA, Toshimasa KAWANISHI and Koichi MASUDA

**ABSTRACT :** In this paper, a simplified growth model taking into account the individual differences of the larvae of clam *Ruditapes Philippinarum* was developed, and proved the validity of the growth model reproducing the results of the observations shown in distribution of frequency of appearance of larvae of different shell lengths. Also, we created a vertical movement model taking into account the individual differences with the difference of density between the sea water and the larvae serving as the impetus. The numerical simulation using these model approximately reproduced.

**KEYWORDS :** Tokyo Bay, *vertical movement model*, *simulation*