東京湾におけるアサリ浮遊幼生の鉛直移動 モデルの構築について

大塚 文和¹・川西 利昌²・増田 光一³

¹正会員 日本大学助教 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)
E-mail:otsuka.fumikazu@nihon-u.ac.jp

²日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)
E-mail:kawanishi@cst.ocean.nihon-u.ac.jp

³正会員 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)
E-mail:masuda.koichi@nihon-u.ac.jp

東京湾におけるアサリ幼生の観測結果である殻長出現頻度分布を基に、それらを正規分布の重ね合わせで近似できるとした混合正規分布と捉え、最小2乗法により同時発生個体群（コホート）を抽出することにより、合理的に平均成長速度を推定した。また、その結果を踏まえて、アサリ幼生の発生時の殻長および成長速度について個体差を考慮した簡易な幼生成長モデルを構築し、殻長出現頻度分布の観測結果を再現することにより、成長モデルの妥当性を明らかにした。更に、アサリ幼生の殻長や鉛直移動速度等の個体差を考慮した鉛直移動モデルを構築し、鉛直1次元の基本的な再現シミュレーションを行い、モデルの妥当性を明らかにした。

Key Words : tokyo bay, generation structure, vertical movement, *ruditapes philippinarum*

1. 緒言

東京湾では、干潟・浅場域は埋立などにより大幅に減少し、現状においては湾内に離散的に存在する状況となっている。その結果、干潟・浅場に棲むアサリなどの生物は、埋立地の間に辛うじて残った浅場や人工的に造成された小規模の海浜などに生息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明らかになりつつある。

アサリネットワークについてのこれまでの研究は、粕谷ら¹⁾、日向ら²⁾、大塚ら³⁾などの研究があるが、粕谷ら¹⁾の研究は東京湾内湾全域を対象とした現地調査を中心としたものであり、日向ら²⁾や大塚ら³⁾の研究は、アサリ幼生の浮遊シミュレーションを中心としたものである。しかし、これらの研究で行われたアサリ幼生の浮遊シミュレーションは、平面移動のみを考慮しており、鉛直移動は考えられていない。

一方、アサリ幼生の鉛直移動についての研究は、石田ら⁴⁾や瀬戸⁵⁾らなどの研究がある。石田ら⁴⁾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⁵⁾。また、瀬戸ら⁶⁾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。

今後、アサリネットワークの解明を進めていく上では、より実際の現象に近い浮遊シミュレーションが求められており、移動形態として平面移動だけではなく幼生の発生・浮游から沈降・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を考慮したより現実的なモデルが必要と考えられる。

本研究は、アサリ幼生の個体群を対象に殻長組成解析によりコホート（同時発生個体群）を抽出し、幼生の成長速度及び発生日を推定した。また、アサリ幼生の各種個体差および鉛直移動を考慮した基本的なモデルを構築し、その適用性を検証した。

2. 研究方法

(1) 世代解析

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⁷⁾や赤嶺^{8),9)}などの方法がある。本研究ではアサリ幼生の殻長頻度分布の解析に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(1)～(3)に示す。

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

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

$$d^2 = \sum_{x=a}^b dx^2 = \sum_x (F - f)^2 \quad (3)$$

ここで、 $N(\mu_i, \sigma_i, x)$ は平均値 μ_i 、標準偏差 σ_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（ μ ）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。

図-1 混合正規分布とコホート抽出

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)⁸⁾を踏まえて決定した。

(2) 簡易成長モデルの構築

アサリの成長モデルに関連する研究としては、着底期以降を対象にSolidoroら¹⁰⁾のモデルを東京湾盤洲干潟に

適用した小沼ら¹¹⁾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¹²⁾の研究がある。Solidoroら¹⁰⁾のモデルでは、餌料環境および水温が主な変動要因である。また、幼生期の成長については、鳥羽¹³⁾の実験的研究などがある。鳥羽¹³⁾の研究では、成長速度は水温に大きく依存することが明らかとなっており、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、幼生発生から10日間程度の短期間の浮遊幼生期を対象にすることから、鳥羽¹³⁾の実験結果の成長特性を踏まえて、時間に関して線形的な成長を仮定した。また、環境要因による成長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。

本研究で用いた簡易成長モデルを式(1)に示す。

$$L = \alpha \cdot S \cdot T + L_0 \quad (4)$$

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

幼生発生時の殻長 L_0 は、個体差を考慮して正規分布（正規乱数）で与えられるものとした。このとき、平均値は石田ら⁴⁾の実験的研究を基に $64\mu\text{m}$ と設定し、標準偏差については鳥羽ら¹⁴⁾の成熟期の卵細胞径の分布を参考に、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、本研究の世代解析で求められる平均成長速度を用いた。

上記の簡易成長モデルを用いて、幼生発生時の殻長分布を成長させ、粕谷ら¹⁾の観測で得られた2001年8月2日及び6日の東京湾全域における殻長分布と比較することで、成長モデルの適用性を検討した。

(3) 鉛直移動モデルの構築

浮遊幼生は、先に示した成長モデルに従って成長し、成長に伴って幼生の密度も変化するものとした。そして、幼生と海水の密度差を起動力とする鉛直移動モデルを構築した。また、このモデルを用いて、アサリ幼生の次元の鉛直分布再現シミュレーションを実施した。

アサリ幼生の鉛直移動速度は、石田⁴⁾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。

$$V = \beta V_{\max} \tanh\{k(\gamma \rho_b - \rho)\} \quad (5)$$

ここで、 V :鉛直移動速度、 $V_{\max}$:最大移動速度(cm/s)、 γ :補正係数、 ρ :ある時刻に幼生がいる位置における海水密度、 ρ_b :ある時刻における幼生の密度、 k :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

ーラメータ、 β ；個体差を表現する一様乱数である。

アサリ幼生の成長に伴う密度変化については、瀬戸ら⁹が室内実験で求めた結果を用いた。また、 $V_{\max}$ は石田ら⁴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。

$$V_{\max} = A_L(L - L_0) + A_0 \quad (6)$$

ここで、 $A_L = 0.016/A_{av}$ 、 $A_0 = 0.0388$ であり、 A_{av} ；

平均成長速度($\mu\text{m/day}$)、 L ；ある時点における幼生殻長(μm)、 L_0 ；発生時の平均殻長(μm)である。

海水密度の鉛直構造については、粕谷ら¹⁾の観測結果を基にモデル化して設定した。式(5)の感度パラメータ k については、繰り返し再現シミュレーションを行い、決定した。

(4) アサリ幼生の一次元鉛直移動シミュレーション

本研究では、先に示した成長モデルおよび鉛直移動モデルの基本的な適用性を検討するため、一次元鉛直断面での簡易シミュレーションを行った。

アサリ幼生の鉛直位置は、計算時間間隔 ΔT として次式で表した。

$$Z_{T+\Delta T} = Z_T + (W + V)\Delta T + R \quad (7)$$

ここで、 Z_T 及び $Z_{T+\Delta T}$ は、それぞれ時刻 T 及び $T + \Delta T$ における鉛直位置である。また、 W 、 V はそれぞれ幼生の鉛直方向流速、幼生の鉛直移動速度であり、 R は拡散項である。本研究では、成長モデルおよび鉛直移動モデルの基本的な適用性を明らかにするため、対象空間（東京湾）を1次元化しており、 W と R については考慮していない。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1時間とした。また、このとき、鉛直方向は1 m毎の層に分割して計算した。

式(4)～(7)を用いて、粕谷ら¹⁾の観測結果を再現対象として、一様乱数 α と β を時間ステップ毎に変化させてアサリ幼生の一次元鉛直移動シミュレーションを実施し、成長モデル及び鉛直移動モデルの基本的な再現性を検討した。

3. 世代解析によるコホートの抽出・検討

図-2および図-3に観測結果から作成した幼生殻長頻度分布および世代解析によるコホート抽出結果を示す。図-2および図-3における幼生頻度分布は、粕谷ら⁹の東京湾全域を対象にした観測結果より作成

したアサリ幼生の殻長出現頻度分布であり、図-2が2001年8月2日の観測結果、図-3は4日後の8月6日の観測結果である。この分布の特徴は、図-2では明確ではないが、図-3では見られるように幼生の出現が多峰形を形成していることであり、これらを正規分布が重ね合わさった混合正規分布として、式(1)～(3)を用いて世代解析を行った。

図-2および図-3に示す正規分布は、それぞれ同時に産卵された個体群（コホート）を表わしていると考え、それぞれの平均値、標準偏差および個体数に対応する面積を算定し、整理した。この場合において、世代解析における正規分布（コホート）の数については、粕谷ら⁹の解析結果あるいは尤度から算定するAICを基に決定した。

図-2（8月2日）におけるコホートの数については、粕谷ら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、観測出現頻度と世代解析による抽出コホートの重ね合わせの整合性を検討して判断した。また、図-3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⁸⁾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。

従って、図-2および図-3に示すように、8月2日の出現頻度分布は3つのコホート、8月6日の出現頻度分布は4つのコホートから構成されているとして示した。これらのことより、表-1に示すように、8月2日から6日までの4日間で、新たに2つのコホートが発生していたことになる。ただし、8月6日のコホート1は、平均殻長が約 $210\mu\text{m}$ であり、このコホートの多くの幼生は既に沈降あるいは着底していて、観測されたものは残存幼生であると考えられる。

上記の世代解析結果を基に、コホート別の平均成長速度を推定した。図-2と図-3を比較することにより、8月2日のコホート2、コホート3は、8月6日のコホート1、コホート2に対応すると考えられることから、8月6日のコホート3、コホート4は8月2日の観測直後に発生したものと想定できる。これらの関係から平均成長速度を推定した結果を、表-1に示す。

表-1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 μm 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-2 コホート抽出(8月2日)

図-3 コホート抽出(8月6日)

表-1 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 μm 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138.9 μm 、8/6の平均殻長が210.3 μm 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 μm 、8/6の平均殻長が184 μm 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 μm (発生時64 μm 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 μm (発生時64 μm と仮定)

4. 成長モデルの再現性の検討

本研究で構築した簡易成長モデルを用いて、再現性を検討したものを図-4および5に示す。

図-4は、8月2日に観測された殻長出現頻度分布をコホート1を7月27日に発生させ、コホート2を7月

29日、コホート3を7月30日に発生させて再現したものである。再現計算に用いた個体数は、合計で75,000個である。また、図-5の計算結果は、8月6日に観測された殻長出現頻度分布を、先の3回の発生に加え、更に8月2日と8月3日にコホートを発生させて、再現したものである。再現計算に用いた個体数は、合計で168,000個である。

図-4についてみると、最頻度ランクは、計算結果および観測結果とも 110–120 μm で一致し、分布形状においても、計算結果は観測結果をほぼ再現することができたものと考えられる。

同様に、図-5は、図-4に示す計算結果の幼生を更に4日間成長させるとともに、先に示したコホート3およびコホート4を発生、成長させて求めた頻度分布を観測結果と比較したものである。図-5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が、計算結果と観測結果は2つのピークおよび全体の形状とも概ね一致している。従って、本研究で提示した簡易成長モデルの計算結果は、8月2日および6日に観測された殻長出現頻度分布を概ね再現しているものと判断できる。

図-4 成長モデル再現結果(8月2日)

図-5 成長モデル再現結果(8月6日)

5. 鉛直移動モデルの再現性の検討

本研究で構築した成長モデルおよび鉛直移動モデルを用いて、アサリ幼生の鉛直的な出現頻度を再現シミュレーションした結果を、図-6および図-7に示す。図-6および図-7に示す観測値は、粕谷らの観測結果¹⁾を基に、採取層別(0~4m, 4~8m, 8~12m)および成長段階別(D型幼生期、殻頂期幼生)について出現率を算定したものである。

図-6は、8月6日の幼生の鉛直分布を採取層別(0~4m, 4~8m, 8~12m)に再現したものである。図-7は、このときの成長段階をD型幼生期(90~130 μ m)と殻頂期(130~240 μ m)に区分しての再現性を検討したものである。図-6および7とも、計算結果は観測結果を概ね再現していることが確認できる。ただし、粕谷ら¹⁾の研究では、上層でクラゲなどによるアサリ幼生の捕食等の影響を推定しているが、本研究では考慮していない。

図-6 採取層別出現頻度(8月6日)

図-7 成長段階別出現頻度(8月6日)

図-8は、8月6日の計算結果における各コホート別の鉛直分布を示す。この結果から、発生が最も新しいコホート4は主に海面付近に位置し、成長するに従い(コホート3→コホート2→コホート1)海面から深い位置に移行していくことが鉛直移動パターンとして判別できる。このとき最も古いコホート1の個体群は、平均殻長が約210 μ mであり、着底期をむかえていると考えられるため既にほとんどの個体は沈降あるいは着底している状況が再現されているものと考えられる。

図-8 コホート別鉛直分布(8月6日)

6. 結 言

本研究は、まず東京湾におけるアサリ幼生の観測結果である殻長出現頻度分布を世代解析することによって、合理的に平均成長速度および幼生の発生日を推定した。そして、その結果を踏まえて、アサリ幼生の個体差を考慮した簡易な成長モデルを構築し、殻長出現頻度分布の観測結果を再現することにより、成長モデルの妥当性を明らかにした。また、アサリ幼生と海水の密度差を起動力とする個体差を考慮した鉛直移動モデルを構築し、鉛直1次元の基本的な再現シミュレーションを行いモデルの妥当性を明らかにした。

本研究で実施したアサリ幼生の成長・鉛直移動モデルによる現況再現シミュレーションは、東京湾全域を鉛直1次元で捉えたものであり、東京湾の流況等は考慮していない。したがって、今後は、より現実に近い浮遊シミュレーションでの適用性を検証するため、本研究で妥当性を明らかにした成長・鉛直移動モデルを、東京湾における3次元的な浮遊シミュレーションに適用していく計画である。

参考文献

- 1) 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報告, 第8号, pp. 1-13, 2003
- 2) 日向博文, 戸簾幸嗣: 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研究報告, pp. 59-66, 2005
- 3) 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, 第26巻, pp. 591-596, 2010.
- 4) 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), pp. 73-82, 2005.
- 5) 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.
- 6) 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, pp. 453-458, 2007.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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, pp. 17-20, 1992.
- 14) 鳥羽光晴他: 東京湾船橋地先におけるアサリの生殖周期, 日水誌, 59(1), pp. 15-22, 1993.

A STUDY ON VERTICAL MOVEMENT MODEL OF PLANKTONIC LARVAE OF CLAM *RUDITAPES PHILIPPINARUM* IN TOKYO BAY

Fumikazu OTSUKA, Toshimasa KAWANISHI and Koichi MASUDA

In this paper, by analysis of generation structure of population of created from observation results of larvae of the clam *Ruditapes Philippinarum* in Tokyo Bay, average growth rate and the spawning date of larvae was estimated in a rational manner. We could create a simplified growth model taking into account the individual differences of the larvae of clam *Ruditapes Philippinarum* in Tokyo Bay, and prove 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 and proved the validity of this model by conducting a basic vertical reproduction simulation.