

底生動物「シオマネキ」の浮遊幼生分散と塩分環境

中 野 晋*・宇 野 宏 司**

1. はじめに

エスチャリーエンジニアリングにおいて生態系への配慮が重要になっている。生態系モデルの開発や計算能力の向上で、沿岸域での環境予測技術は向上しているものの、計算技術等の発展に比べ、エスチャリー生態系の実態把握が困難であるために、高度な生態系モデルを検証するためのデータセットの蓄積はすすんでいない。

特に干潟底生動物はその多くが浮遊幼生期を有しており、生活史を通じて陸域から水域まで広い空間を回遊する。したがって、これらの生態系への影響を知るためには対象種の生活史を考慮した環境予測技術の開発が必要である。そのため、浮遊幼生を対象にした分散シミュレーションは、水工学の分野でも著者ら (1997, 1998) や清野ら (2000) によって試みられてきたが、対象種の生物情報のモデル化が課題となっている。

本研究で対象とするシオマネキ (*Uca arcuata*) は、旧環境庁編「日本の絶滅のおそれのある野生生物」のなかで希少種に指定されており、今後個体数の激減が懸念されている。また干潟における生物多様性の観点からも保全が望まれている生物である。本種は 5 期の zoea 幼生期を経たのちに megalopa 幼生に変態し、約 1 ヶ月にわたる浮遊生活を経て干潟に回帰することが知られている。浮遊期における個体数の減少は著しく、この段階での生存が「種の存続」に与える影響は大きいと考えられるため、分散・回帰過程を把握することが重要である。

図-1 は、本研究で対象とする吉野川河口域におけるシオマネキおよびハクセンシオマネキ (*Uca lactea*) の生息分布図である。吉野川河口は上流約 14 km にわたって幅広い汽水域を有しており、シオマネキの生態を考える上で流れや塩分などの物理環境は無視できないものとなっている。そこで本研究では、現地調査の結果および著者らの開発した数値モデルを用いて吉野川河口の塩分環境、さらには孵化後数日間の幼生移動分散について検討した。

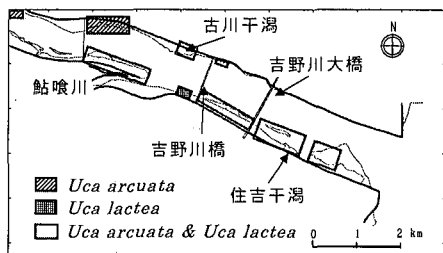


図-1 吉野川河口における *Uca* 属の生息分布状況

2. 現地観測および数値解析対象データの概要

(1) ソエア幼生と塩分分布調査

2000 年 7 月 11 日および 8 月 9 日に河口から 0.5~10 km の滞筋上の 11 点 (約 1 km 間隔) でシオマネキの zoea 幼生の採集調査を行った。観測日の潮汐状況は月齢 9 日の長潮で、採集は 11 時から 14 時の上げ潮時に行われた。採集は動物用の小型プランクトンネットを河床から水面まで鉛直曳きすることにより行い、同時に水温と電気伝導度を水温塩分計 (CTI サイエンス, P 103) により、0.5 m 間隔で測定した。採集したプランクトンは中性ホルマリンで固定して持ち帰った後、実体顕微鏡で zoea 数をカウントした。

(2) 数値解析対象データ

数値モデルの検証のために次の 2 種類のデータを使用した。

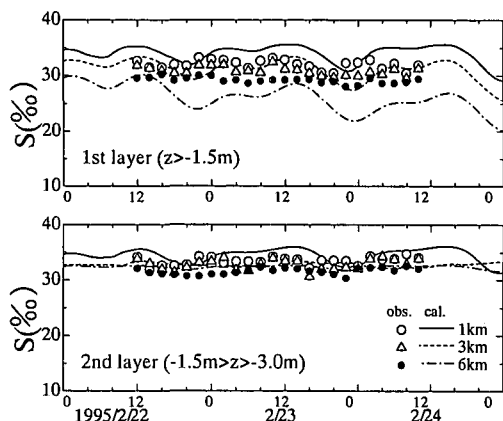
a) 塩分濃度分布調査結果 (旧建設省, 2000)

旧建設省は 1988~1995 年の間に河口域塩分濃度分布調査を 3 回実施しているが、その中でも調査継続時間が長い 1995 年 2 月 22 日~24 日の結果を数値解析対象データとして用いた。この調査では河口から第十堰 (14.5 km) までの間の 12 地点で、2 時間ごとに塩分鉛直分布が測定された。調査期間は渇水期であり、この時に第十堰を通過して河口域に流入した淡水流量は 2.2~3.2 m³/s である。

b) 水温・塩分連続観測 (高木ら, 1999)

吉野川河口域は冬期にスジアオノリの好漁場となっている。そのため徳島県水産試験場ではアオノリ養殖漁場

* 正 会 員 博(工) 徳島大学助教授 工学部建設工学科
** 学生会員 修(工) 徳島大学大学院工学研究科



図一2 塩分濃度分布調査結果に対する再現計算結果(上側：1層，下側：2層)

としての環境保全策を検討するため，冬期の水温・塩分調査を実施している．1997年にも10月9日～12月19日に河口から約3kmの地点(吉野川大橋付近，図一4参照)にてメモリー式水温塩分計(アレック ACT-16 K)による連続観測(水面下約1m)が行われた．この期間中の11月26日から27日にかけて中規模な出水(26日22時，時間最大流量2025 m³/s)があり，その際，河川水の淡水化とその後の塩分回復現象が観測された．

3. 数値計算

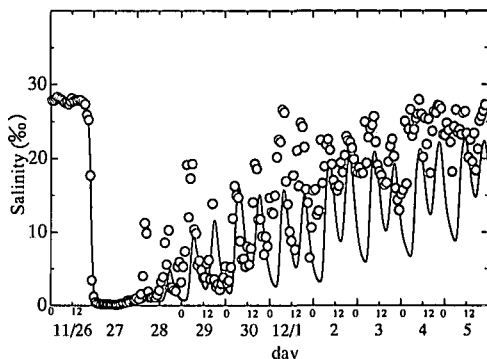
(1) FEM マルチレベルモデル

河口の塩分変動や幼生分散現象について考察する場合は，鉛直拡散を考慮した3次元的な取り扱いが重要となる．このため本研究では，干潟領域の干出・水没を考慮した三角柱要素のFEMマルチレベルモデルを構築した．連続式，ブシネスク近似を用いた運動方程式，塩分拡散方程式のそれぞれを各層内で鉛直方向に積分した式をガラキン法で離散化した．また時間積分はlumping factorによる数値粘性の最小化が図られる修正2段階陽解法を用いた．水平渦動粘性・渦動拡散係数はリチャードソンの4/3乗則，鉛直粘性・拡散係数はMunk-Anderson式に従う成層化関数で表現した．なお，計算層数は4層で，各層厚は表層から順に1.5 m，1.5 m，1.5 m，それ以深とした．また，解析対象領域は，河口から上流に向かって約10 km，沖合方向に約3 kmの区間であり，計算節点は2000，要素は3754である．

(2) 数値解析結果

a) 塩分濃度分布調査に関する解析

図一2は河口から1，3，5 km地点における塩分経時変化を示している．4層マルチレベルの計算結果と比較するため，平均水面下0.75 mと2.25 mの塩分観測値を内挿して求め，第1層と第2層の計算値と比較した．なお，



図一3 塩分回復現象に対する再現計算結果

第2層以深の塩分変化は小さく，第2層の結果とほとんど一致するため，示していない．湧水期で上流からの淡水流入量が少なく，全層にわたり高塩分状態となっている．1 kmと3 kmの計算値は観測値と比較的良好一致を示すが，5 km地点の塩分は過小評価となっている．これは第1層と第2層の間の鉛直混合が小さく見積もられているためではないかと思われる．

b) 塩分回復過程の解析

図一3は河口から約3 kmの地点に係留された水質塩分計(水面下約1 mに設置)による塩分観測結果である．1997年11月26日夜から27日にかけての出水により，29 ‰程度であった塩分が0になった後，塩分が回復してくる過程が明確に示されている．図中の曲線は3 km地点の塩分計算結果である．塩分の回復状況がある程度説明しているが，全体的に観測値に比べて塩分が小さめに計算されており，a)の計算と同様の特徴を示している．

上記の解析結果から，今回使用した数値計算モデルで吉野川河口域の塩分変動をある程度再現できており，計算モデルとして有効であることが示された．しかし，塩分を過小評価する傾向がみられ，鉛直拡散係数の評価モデルやパラメータ値の適合などさらに改善する必要が認められた．

4. 現地観測の結果

図一4に2000年7月，8月のzoea幼生分布調査の結果を示す．zoea幼生が多く採集された地点はB地点(河口から1 km)，C地点(同4 km)，D地点(同6 km)である．B地点は本河川でシオマネキの生息密度が最も高い住吉干潟から1 km程度下流であり，C地点は古川干潟から約1 km下流にあたる．またD地点もシオマネキが生息する干潟の前面水域である．このようにzoeaが多く採集された地点はいずれも親個体群の生息地よりいくぶん下流側の水域である．一方，吉野川におけるシオマネキの親個体群の生息範囲は河口砂州から吉野川鉄橋

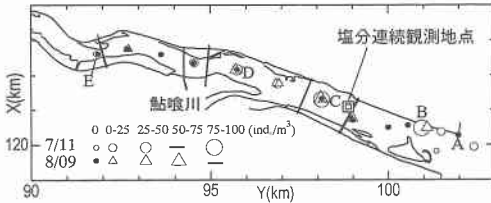


図-4 zoea 幼生分布調査結果

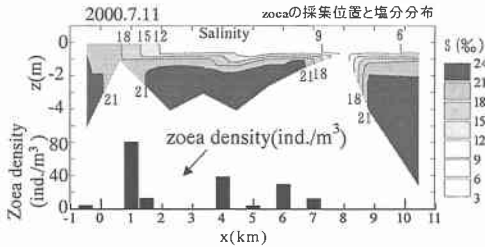


図-5 吉野川河口における塩分と幼生の分布

付近(約8 km)であるが、これより上流側では、zoea 幼生の生息密度が低くなる。図-5は、7月11日の調査で得た河口域の縦断方向の塩分鉛直分布と併せて zoea の採集密度を示している。図からわかるように河口から11 km 地点(図-4のE点)に至るまで表面から2 m 以深の塩分は20 ‰以上のほぼ一様で、その上を薄く淡水が流出している状況が見られる。河川流量の小さい時期には河口部の広い範囲で塩分環境が安定的に維持されており、こうした環境が zoea 幼生の生息に適しているものと考えられる。

5. 浮遊幼生分散シミュレーション

(1) 浮遊幼生分散モデル

浮遊幼生の移動分散過程については、これまでも幼生を中立粒子に見立て Lagrange 的に追跡することで検討されてきた(中野ら, 1997, 1998)が、その際、鉛直方向の移流や密度効果は考慮されていなかった。そこで本研究では幼生の浮遊・沈降機構が Stokes の沈降速度式で表現できるものと仮定し、移流速度とあわせて幼生の鉛直方向の移動量を評価した。いま、 x 方向、 y 方向、 z 方向の流速 u 、 v 、 w の流れ場における浮遊幼生の移動を考える。1ステップあたりの水平方向の移動距離は、分散を考慮した式(1)、(2)であらわされる。

$$\Delta x = \left[\frac{u \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial y} \Delta t \right) + \frac{1}{2} v \frac{\partial u}{\partial y} \Delta t}{\left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial x} \Delta t \right) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial y} \Delta t \right) - \frac{1}{4} \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} (\Delta t)^2} \right] \Delta t + \gamma \sqrt{2K\Delta t} \quad (1)$$

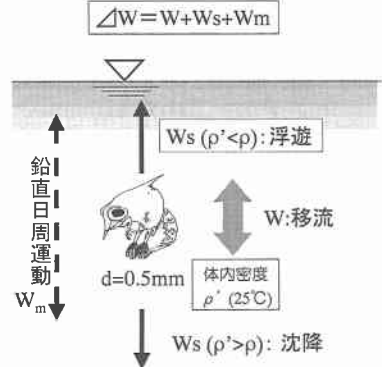


図-6 幼生の鉛直方向の移動量

$$\Delta y = \left[\frac{v \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial x} \Delta t \right) + \frac{1}{2} u \frac{\partial v}{\partial x} \Delta t}{\left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial x} \Delta t \right) \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial y} \Delta t \right) - \frac{1}{4} \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} (\Delta t)^2} \right] \Delta t + \gamma \sqrt{2K\Delta t} \quad (2)$$

ここに、 γ は平均値 0、標準偏差 1 の正規乱数で、 K は乱流拡散係数である。

一方、垂直方向の移動量については、図-6 に示すように移流による移動速度に加えて、沈降速度や zoea 自身の運動を考慮する。1ステップあたりの鉛直方向の移動距離は次式で表されるものとした。

$$\Delta z = (w + w_s + w_m) \Delta t \quad (3)$$

ここに、 w は各層の平均鉛直流速、 w_s は沈降速度で Stokes の沈降速度式で評価される。また w_m は zoea 自身の移動速度で一般的な動物プランクトンと同様に日中は底層に移動し、夜間には表面近くに移動する日周鉛直運動を考慮する。ここでは、著者(中野・宇野, 2001)の zoea の運動能力に関する室内実験結果を参考に、1 cm/s の速度で上下に遊泳すると仮定した。なお、Stokes の沈降速度式における沈降粒子の直径 d については zoea 幼生の平均的な体長から 0.5 mm とした。

これまでの著者らの調査より、シオマネキ幼生の孵化が 6～8 月の大潮に満潮時刻の前後 2 時間程度の間に行われることがわかっている。そこでシオマネキが生息する住吉干潟、古川干潟、河口砂州の 3 地点から満潮時刻の前後に 1000 個の幼生が放出されたものとして浮遊幼生の分散過程をシミュレーションした。なお、計算の途中で幼生が水深 0.01 m 以下の地点に移動した場合は打ち上げられて死亡するとみなし、その後の計算からは除外した。

表-1 に計算ケースを示す。zoea 幼生の日周鉛直運動の実態は現時点では不明であるが、これの幼生分散への影響を少しでも理解するため、case-α ではこれを考慮し

表-1 計算ケース

	計算層	Tide	幼生放出時刻	$Q(m^3/s)$	体内密度
case 01	単層	大潮	満潮	150	出現場所の海水に同じ
case 02	4層	大潮	満潮-2h	150	出現場所の海水に同じ
case 03			満潮		
case 04			満潮+2h		
case 05			満潮	50	
case 06			満潮	250	
case 07			満潮	150	5%, 25°C
case 08			満潮	150	30%, 25°C
case 09		小潮	満潮	150	出現場所の海水に同じ
case α	case 03 で、幼生の鉛直周運動を考慮				

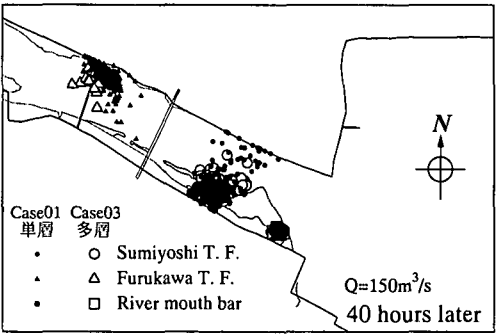


図-7 単層・多層による分散状況の比較

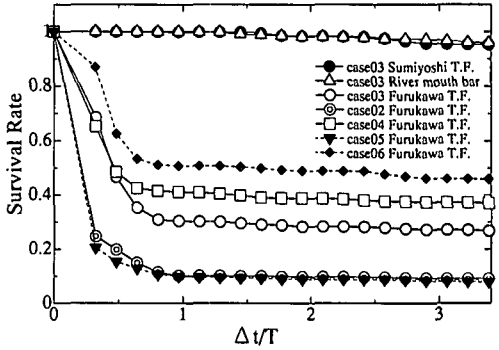


図-8 出現時刻、出現場所別にみた河道内生残率

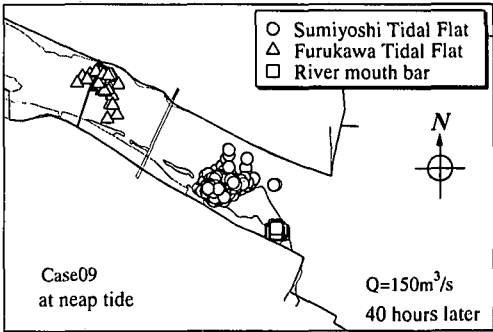


図-9 小潮満潮時の放出 (40 時間後)

た計算をおこなった。

(2) 単層・表層での比較

図-7 は、単層 (case 01) と 4 層 (case 03) での幼生分散状況 (幼生投入後 40 時間後) を示したものである。図から明らかなように、単層モデルの分散効果が大きい傾向がみられた。この理由としては、幼生分散が中層以深の流動と関係が深いことによると思われる。また、単層、多層いずれのモデルとも古川干潟での分散効果が大きかった。これは干潟の近傍にみお筋が存在しているため、より早く河口へ運ばれるためではないかと思われる。

(3) 孵化場所、孵化時刻別の河道内生残率

孵化場所別に河道内生残率を比較すると、住吉干潟や河口砂州から出現する幼生では高く、古川干潟では低いことが明らかになった (図-8, case 03)。前者では流れが滞留し比較的静穏な環境であるのに対し、後者ではみお筋があるため流れが速く、河道内に幼生が残留する確率は低くなっていると考えられる。また、孵化時刻の違いが河道内生残率に与える影響について古川干潟を例に調べたところ、満潮後 2 時間以内に孵化した場合の生残率が最も高いことがわかった (図-8, case 02, case 03, case 04)。著者らのおこなった室内孵化実験においても

満潮時 2 時間以内に孵化することが確認されているが、種の生存戦略上、孵化時刻は重要なようである。

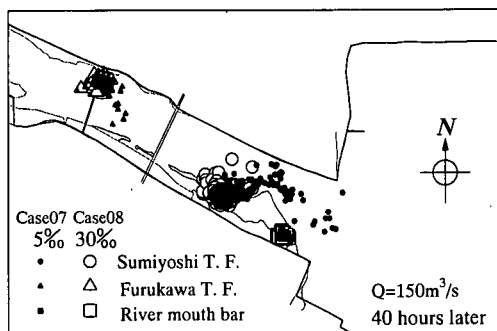
(4) 潮汐および流量の違いによる比較

図-8 の case 03, case 05, case 06 はそれぞれ上流からの淡水流入量が 150, 50, 250 m^3/s 時の古川干潟から放出された幼生の河道内生残率である。河川流量の変化は河道内生残率に大きな影響を及ぼし、特に濁水期 ($Q=50 m^3/s$) の生残率が低くなっている。

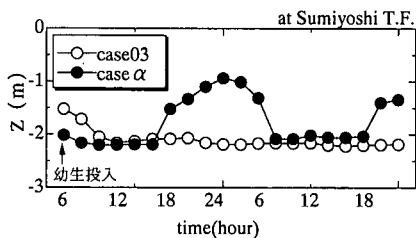
図-9 に、小潮満潮時に放出された幼生の 40 時間後の分散状況を示す。図-7 の大潮満潮時に放出された幼生の分散状況と比較して、住吉干潟や河口砂州から放出された幼生の分散の規模は小さいが、古川干潟からの幼生は、小潮時でもある程度分散していることがわかった。実際のシオマネキ幼生は大潮満潮時に放出されることが知られているが、これは種の保存戦略として幼生をできるだけ早く生存に最適な水域へと移動させるためではないかと考えられる。

(5) 初期塩分の違いによる比較

図-10 に初期の体内塩分が 5% および 30% の幼生が放出された場合の分散結果を示す。体内密度が 5% の場合、密度効果により幼生は浮遊するため、分散現象は表層流れに支配される。一方、30% の場合は、幼生自身の自重により沈降し、分散は底層の流れに依存する。同じ



図一10 初期塩分濃度の違いによる比較



図一11 鉛直日周運動

が明らかにされた。

本モデルを用いた幼生分散シミュレーションより、幼生分散過程が流量、潮汐、塩分等に大きく支配されることが明らかにされた。

謝辞：本研究は科学研究費基盤研究(C)(2)(代表・中野晋)，同(C)(2)(代表・岡部健士)，同(B)(2)(代表・鎌田磨人)以上3件の補助を得て実施された。また国土交通省徳島工事事務所，徳島県水産研究所鳴門分場からは貴重な観測データを提供いただいた。ここに記して各位に謝意を表する。

参 考 文 献

- 建設省徳島工事事務所(2000): 第十堰周辺の水環境—既往調査の結果—, 第十堰環境調査委員会資料。
- 清野聡子・宇多高明・前田耕作・山路和雄(2000): 守江湾内の八坂川河口沖干潟におけるカプトガニ孵化幼生の分散機構, 水工学論文集, 第44巻, pp. 1209-1214。
- 高木俊祐・酒井基介・宮田 匠(1999): アオノリ養殖漁場環境調査, 徳島県水産試験場事業報告書, 平成9年版, pp. 61-62。
- 中野 晋・真子昌樹・酒井勝司・北野利一・三井 宏(1997): 河口の環境指標生物「シオマネキ」の生態と水理・底質特性, 水工学論文集, 第41巻, pp. 283-288。
- 中野 晋・藤井 勇・真子昌樹・北野利一・三井 宏(1998): 浮遊幼生期を持つ潮間帯動物「シオマネキ」と河口部の流れとの関係, 水工学論文集, 第42巻, pp. 1153-1158。
- 中野 晋・宇野宏司(2001): 吉野川河口におけるシオマネキ幼生孵化と潮汐応答, 水工学論文集, 第45巻, pp. 1273-1278。

6. ま と め

本研究で使用したFEMマルチレベルモデルより、干潟の干出・水没を考慮した感潮河川の流れと塩分分布のシミュレーションが可能となった。

吉野川河口の塩分分布に関する現地調査の結果、吉野川河口は上流約11 kmまで塩水侵入がみられ、幼生の生育に適した幅広い汽水域を有していることがわかった。また、シオマネキ幼生の生息分布調査から、干潟から放出された幼生は、親個体の干潟近くを浮遊することや親個体の生息限界点より上流の水域には生息できないこと