

河川汽水域に生息する甲殻類の浮遊幼生分散のモデリングと回帰戦略の解明

Development of larval transport model of the brackish crustaceans: estimation of the dispersion and recruitment mechanism

福岡大学工学部 助教 伊豫岡 宏樹
鹿児島大学大学院理工学研究科 准教授 齋田 倫範
九州大学高等研究院 助教 田井 明

(研究計画ないし研究手法の概略)

本研究では、宮崎県五ヶ瀬川水系北川河口域を対象地域とする。まず、幼生輸送モデル構築に必要な不可欠な幼生の移動特性を室内実験で定量化し、流動モデルに組み込むことで幼生分布の再現を試みる。次に、水質・水理量（流速、密度分布など）と幼生分布に関する現地観測を実施し、モデルの検証を行う。

室内実験による幼生の鉛直移動特性の評価とモデル化：水槽実験により、塩分・光が幼生の挙動に与える影響を定量的に評価する。水槽内に塩淡成層を生じさせ、幼生が持つ塩分選択性による鉛直移動特性を評価する。加えて、光条件の違いによる走光性や日周移動を評価する。以上のデータをもとに幼生の挙動をモデル化する。

河川感潮域から浅海域を含む流動場の再現モデルの作成：3次元密度流モデルを利用して、北川河口域の流動シミュレーションを実施する。塩水楔などを正確に再現するために、申請者らが開発した手法により乱流統計量を実測し、モデルパラメータを設定する。

幼生輸送・分布特性ならびに水質・水理量の現地観測：GPSフロートを用いた観測を行い、幼生の水平方向輸送の検証データを取得する。その際、フロートの抵抗体の鉛直位置を変化させ、層毎の輸送特性を調べる。次に、プランクトンネットで幼生を採取し、分子生物学的手法によって種の同定を行い、幼生の分布を把握する。加えて、多項目水質計・ADCP等を用いて水質・水理量を測定し、塩水楔や流れの検証用データを取得する。

幼生輸送モデルの構築とハビタットスケールの見積もり：1で得られた幼生の鉛直移動モデルを2で構築した流動モデルに組み込み、幼生分布再現計算を行う。結果を3の結果と比較しモデルのチューニングを行う。構築された数値モデルを用いて、幼生のライフサイクル(1ヶ月程度)を通じた移動・分布(ハビタットスケール)を見積もる。

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 塩分選好性実験

実験には、福岡県糸島市、宮崎県延岡市で採取したカワスナガニの抱卵個体より孵化・飼育した浮遊幼生（ゾエア幼生）を用いた。採取した抱卵個体は5倍希釈した海水で飼育し、ゾエア幼生は孵化後水温26℃、塩分30PSUに調整した濾過海水を用いてワムシ(*Branchionus plicatilis*)を餌として飼育した。実験装置は、アクリル製パイプで作成した直径9cm、高さ300cmの円筒型水槽

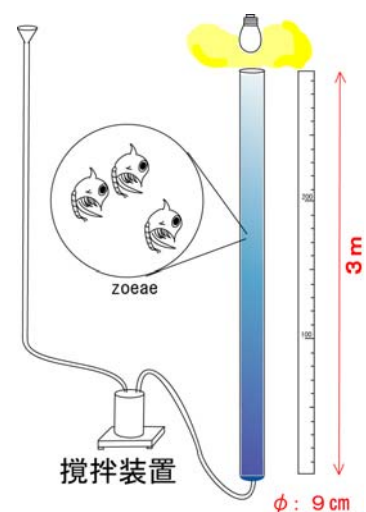


図1 塩分選好性実験装置概要

を用いた。水槽内に塩分躍層を形成させるため、濃度調整した海水を攪拌装置を通して塩分の低い順に水槽底面から注入した。水柱上層の塩分は0、底層の塩分は海水と同程度とし、中層には塩分勾配約 0.15cm^{-1} 程度の変化を持たせた。塩分の鉛直分布は、実験の前後に測定した。浮遊幼生を水柱に放つ際は、飼育環境からの急激な環境の変化をさけるため、チューブを用いて塩分20PSU付近に投入した（図-1）。幼生の分布は、幼生を投入し水槽の上方から白熱灯を水面で7500lux、水槽底面で500luxとなるような条件で照射した状態（明条件）で30分後、および消灯し暗幕で水槽を覆った状態（暗条件）で30分後に各2回、計4回を目視で記録した。実験には孵化後0日（1齢）、2日（1齢）、4日（1齢）、8日（ほぼ2齢）、15日（ほぼ3齢）のゾエア幼生を各条件で30個体用いた。

図-2に孵化後0日、2日、15日の水柱内の幼生および塩分の分布を、塩分を縦軸にとった幼生分布の経日変化を図3に示す。浮遊幼生の選好塩分の平均値は明条件、暗条件ともに齢期が高くなるにつれて高くなっていった。孵化後0日目は明条件で選好塩分の平均値が0.8PSU、暗条件で15.8PSUとなり強い正の走光性を示した（U-test, $p < 0.01$ ）。孵化後2日目には明暗条件ともにほぼ同じ塩分の領域に分布しており、孵化後0日目のように光の有無による分布の有意な差はみられなかった。孵化後15日目になるとほとんどの幼生が海水と同程度の高塩分領域に分布し、光の有無による分布の有意な差はみられなかった。

塩分選好性実験の結果より、孵化直後に急激な高塩分への選好性の移行がみられ、4日目以降は高塩分の領域にとどまる傾向があることからモノー式を参考にして塩分選好性の変化についての定式化を行った。（式-1）

$$S = \frac{D}{a + D} (35 - b) + b \quad \dots \text{(式-1)}$$

ここに、S：浮遊幼生孵化からの経過日数における選好塩分（PSU）、D：浮遊幼生孵化からの

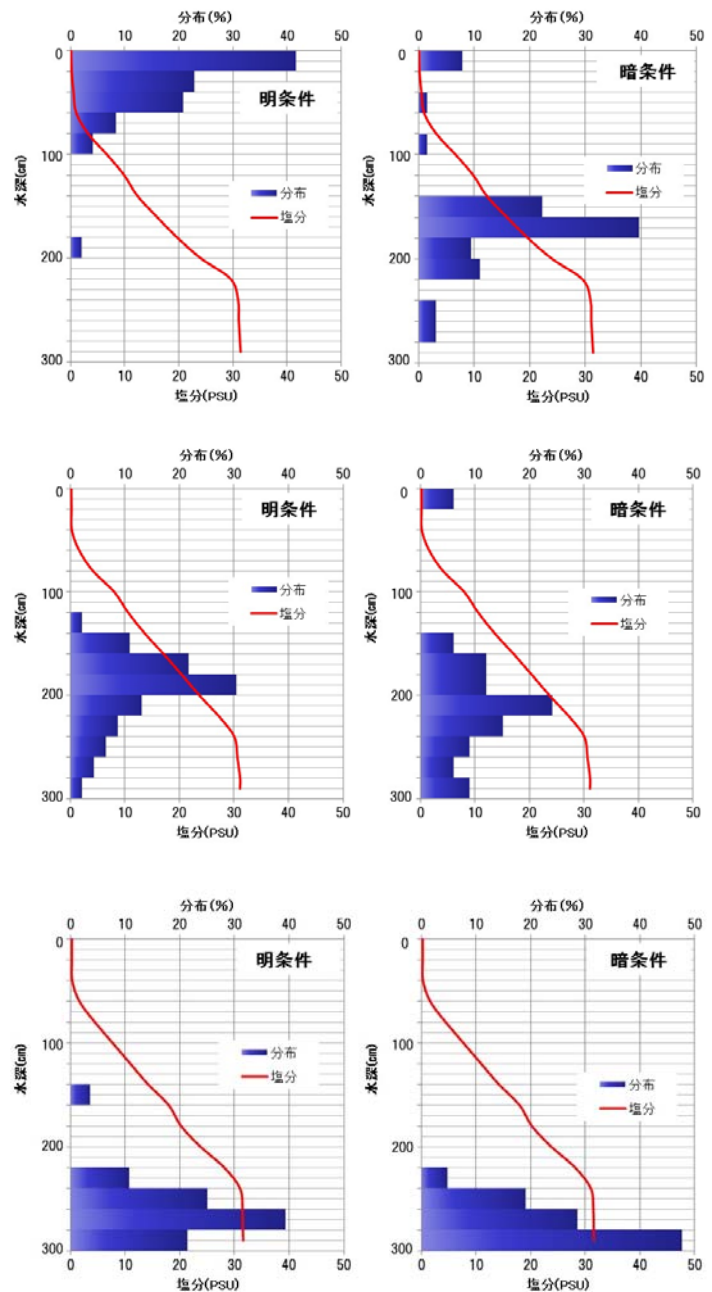


図2 塩分選好性実験装置概要

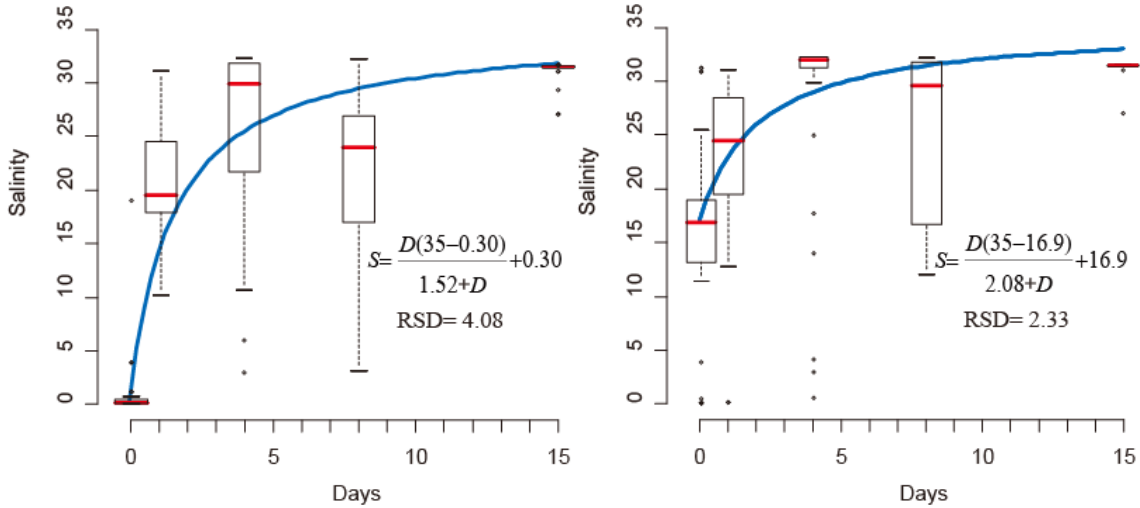


図3 選好塩分の変化(左：明条件，右：暗条件)

経過日数， a ， b :係数である．最小二乗法により白熱灯で照射した条件と暗幕をかけた条件の選好塩分の中央値を近似する係数 a ， b を決定したところ上方から白熱灯を照射した条件での回帰式の係数は $a=1.52$ ， $b=0.30$ ，円形型水槽に暗幕をかけた条件での係数 $a=2.08$ ， $b=16.9$ となった．

2. 浮遊幼生の挙動の数値計算

数値計算では得られる流動場に浮遊幼生に見立てた仮想粒子を与え，その挙動を検討した．粒子追跡計算においては，下式のように浮遊幼生の移流，浮遊幼生の拡散，浮遊幼生の選好性，浮遊幼生の沈降を考慮した．

$$X_{i+1} = X_i + \Delta X_{adv} + \Delta X_{diff} + \Delta X_{pref} + \Delta X_{sett} \quad (\text{式-2})$$

ここで， X_i はあるタイムステップの粒子位置， X_{i+1} は X_i の1タイムステップ後の粒子位置， ΔX_{adv} は移流による粒子移動量， ΔX_{diff} は乱流拡散による粒子移動量， ΔX_{pref} は各種選好性を含む浮遊幼生の遊泳による粒子移動量， ΔX_{sett} は浮遊幼生の沈降による粒子移動量である．河川流および潮流によって生じる浮遊幼生の挙動は，オイラー-ラグランジュ法によって算定する．流速シアを表す二次のオーダーの項まで考慮すると，1タイムステップ間の移流による浮遊幼生の移動距離は次式により求まる．

$$\Delta X_{adv} = u_E(X_i, t) \cdot \Delta t + [\nabla u_E(X_i, t) \cdot \{u_E(X_i, t) \cdot \Delta t\}] \cdot \Delta t \quad (\text{式-3})$$

ここで， $u_E(X_i, t)$ は位置 X_i ，時刻 t におけるオイラー流速， Δt はタイムステップである．なお， $\nabla = i\partial/\partial x + j\partial/\partial y + k\partial/\partial z$ である．

粒子追跡計算における乱流拡散の影響は一次のマルコフ過程で表現した．この場合，乱流拡散による粒子の移動は下式のように表現できる．

$$\Delta X_{diff} = u'_i \cdot \Delta t = (\rho u'_{i-\Delta t} + \gamma_{i-\Delta t}) \cdot \Delta t \quad (\text{式-4})$$

ここで， ρ は $0 < \rho < 1$ の定数， $\gamma_{i-\Delta t}$ は $N(0, \sigma_i)$ の正規乱数， σ_i^2 は乱れ強度であり，(式-5a)，(式-5b)で評価される．

$$\sigma_t = \sqrt{(1-\rho^2)K_t/T_L} \quad (\text{式-5a}), \quad \rho = \exp(-\Delta t/T_L) \quad (\text{式-5b})$$

T_L は積分時間スケール, K_t は渦拡散係数である.

浮遊幼生の各種選好性による挙動については, 石田ら (2005) によるアサリ浮遊幼生の塩分選択性の研究を参考にした. ただし, 石田ら (2005) が鉛直一次元モデルを用いているのに対し, 本研究では, 浮遊幼生の三次元的な挙動を表現する必要がある. そこで, 石田ら (2005) のモデルを踏襲しつつ, 水平移動を考慮できるように改良した. また, 同様の考え方にに基づき, 水温, 濁り (懸濁物質濃度), 明るさに対する選好性も考慮可能にした.

(1) 石田ら (2005) の鉛直移動モデルの概要

石田らの鉛直移動モデルでは, 浮遊幼生の移動量は以下のように表現される.

$$Z(t+\Delta t) = Z(t) + \{ W_{salt}(t) + \alpha \cdot (W_{max} - |W_{salt}(t)|) \} \cdot \Delta t \quad (\text{式-6a})$$

$$W_{salt}(t) = \beta \cdot W_{max} \cdot \tanh(k \cdot (SALT(Z(t)) - SALT_{base}(t))) \quad (\text{式-6b})$$

ここで, $Z(t+\Delta t)$, $Z(t)$ は, それぞれ時刻 $t+\Delta t$, t における浮遊幼生の鉛直位置, W_{salt} は塩分選択行動による移動速度, W_{max} は浮遊幼生の最大移動速度, $SALT_{base}(t)$ は式-1で評価された幼生の成長ステージに応じた選択塩分, $SALT(Z(t))$ は, 時刻 t における浮遊幼生の位置 $Z(t)$ の塩分, α , β は一様乱数 ($-1 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$) である. また, k は応答特性係数であり, 選好値 $SALT_{base}(t)$ と $SALT(Z(t))$ の差に対する応答の強さを表現するための定数である. さらに, $SALT_{base}(t)$ については, 一様乱数によって選択塩分の個体差を与えている.

(2) 浮遊幼生の遊泳方向 (移動ベクトルの方向の決定)

浮遊幼生の選好性による鉛直移動については, 石田ら (2005) の考え方にに基づき, 上下いずれかの方向にのみ生じることとした. 一方, 水平移動については, 全方向にランダムな選好値探索行動をするようにした. すなわち, 浮遊幼生の移動範囲を模式的に表現すると図4に示す半球のようである.

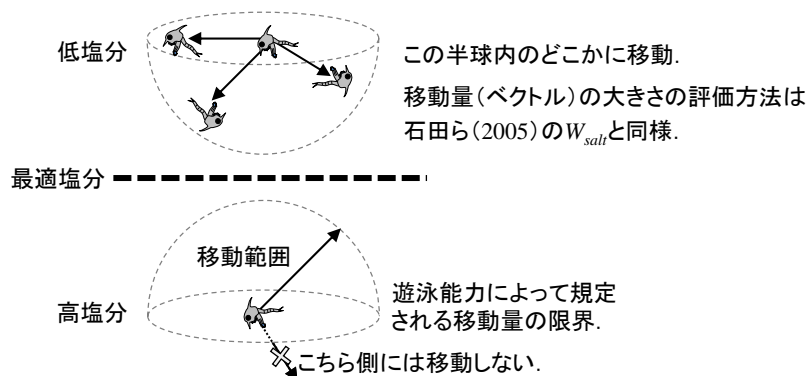


図4 浮遊幼生の移動方向 (塩分選択性の例)

(3) 浮遊幼生の移動距離（移動ベクトルの長さの決定）

浮遊幼生の移動量については、式-6b で計算される W_{salt} で評価した。ただし、本研究では水平移動を許容ため、浮遊幼生の鉛直移動効率が悪くなる。この点は、前述の応答特性係数 k を調整することで対処した。

(4) 浮遊幼生の選好値の個体差

本研究では、個体差を①上限，下限を設定して一様乱数で与える方法と②平均値，標準偏差を設定して正規乱数で与える方法の2種類を選択可能にした。

浮遊幼生の沈降速度については、ストークスの式で評価することとし、下式で算定した。

$$\Delta X_{sett} = \vec{w}_s \cdot \Delta t = \frac{(\rho_l - \rho_w) \vec{g}}{18\mu} d^2 \cdot \Delta t \quad (\text{式-7})$$

ここで、 \vec{w}_s は沈降速度 $(0, 0, w_s)$ ， ρ_l は浮遊幼生の密度， ρ_w は水の密度， \vec{g} は重力加速度 $(0, 0, -g)$ ， μ は水の粘性係数， d は浮遊幼生を球体とみなした場合の直径である。

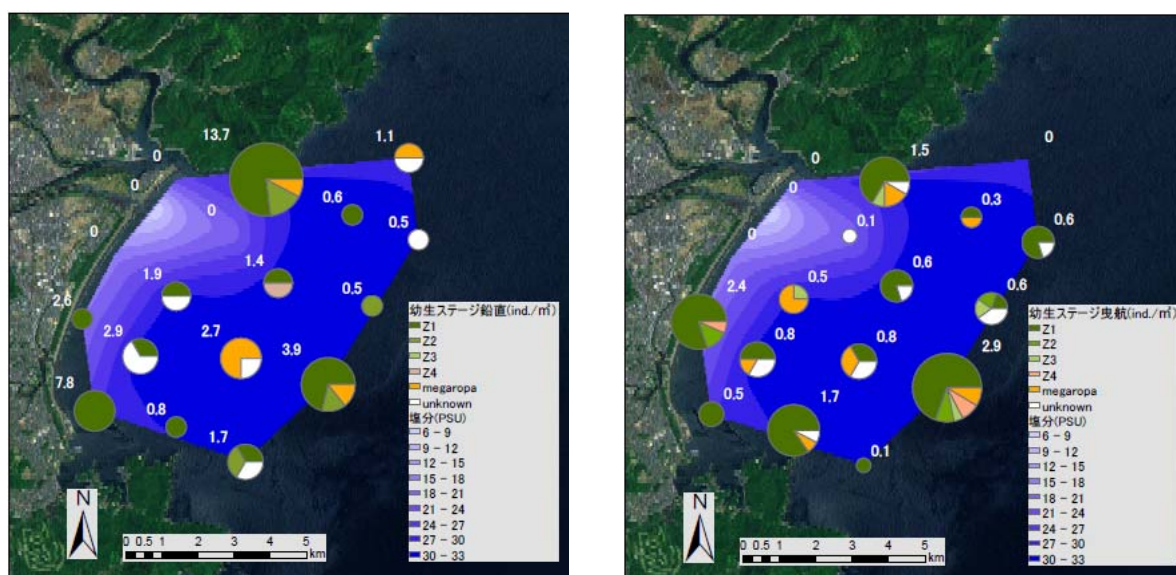


図5 カニ類幼生の分布密度・幼生ステージ・表層塩分

3. 分布調査

調査は宮崎県延岡市北川の河口の延岡湾沿岸域約30km²を対象に対象領域がほぼ均等となるよう18地点を設け、北川にてカワスナガニが幼生を多く放出する期間と重なる9月10日から11日の日没後に行った。調査船が調査地点に到着した後、北原式定量プランクトンネット（100 μ m）を投入し、海底からの鉛直引きによるサンプルを採取した後、再度プランクトンネットを投入し、表層を5分程度曳航して表層のサンプルを採取した。鉛直引きのサンプル回収時には、多項目水質計（HYDROLAB社DS5）を用いて、水深30mまでの塩分を約10cm毎に記録した。帰港後、サンプルを100%エタノールに保存し、実験室にてカニ類の幼生のみを抽出し顕微鏡で遊泳毛を観察することにより成長ステージを記録した。

図5に幼生分布調査の結果を示す。河口近くの表層塩分が低い地点ではカニ類の幼生が採取されなかった。また浮遊幼生の最終ステージであるのメガロパ幼生が10%程度含まれていた。

幼生密度は、表層よりも鉛直引きのほうが高く、室内実験と同様カニ類の幼生はある程度の深い場所に分布していると考えられる。

4. まとめ

浮遊幼生は孵化直後に強い走光性を示し昼夜の日周鉛直移動を行うが、数日後には高塩分領域に留まると考えられる。この移動特性により汽水域上流部で孵化後、走光性により低塩分領域に侵入することで迅速に幼生の生育に適した高塩分領域に移動し、その後は高塩分領域にとどまることで、出水等により沖合に流されるリスクを低減していると考えられる。今後は、現地調査により採取された幼生のDNA解析を進め、汽水性のカニ類の分布を明らかにするとともに、塩分選好性の変化を考慮した浮遊幼生期移流分散モデルを河川及び湾沿岸の流動計算に組み込み、生活史を考慮した汽水性甲殻類のハビタットスケールの推定および回帰過程を再現する計算を行う予定である。

（ 発 表 論 文 ）

八坂康平，伊豫岡宏樹，山崎惟義，渡辺亮一，浜田晃規，カワスナガニ浮遊幼生の塩分選好性と回帰戦略に関する研究，土木学会西部支部研究発表会，pp. 795-796，2014。（口頭発表）

八坂康平，伊豫岡宏樹，山崎惟義，渡辺亮一，浜田晃規，カワスナガニ浮遊幼生期の塩分選好性と回帰戦略に関する研究，水環境学会九州支部研究発表会概要集，pp. 18-19，2014。（口頭発表）