

守江湾内の八坂川河口沖干潟における カブトガニ孵化幼生の分散機構の解析

DISPERSION MECHANISM OF HATCHLINGS OF HORSESHOE CRAB
TACHYPLEUS TRIDENTATUS AT TIDAL FLAT OFF THE YASAKA
RIVERMOUTH IN MORIYE BAY

清野聡子¹・宇多高明²・前田耕作³・山路和雄⁴

Satoquo SEINO, Takaaki UDA, Kosaku MAEDA and Kazuo YAMAJI

¹正会員 農修 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学科助手 (〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1)

²正会員 工博 建設省土木研究所河川部長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)

³東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学科研究生

⁴パシフィックコンサルタンツ(株)九州本社 (〒819-0004 福岡県福岡市西区姪浜町33-1 パシコン福岡ビル)

Dispersion mechanism of hatchlings of horseshoe crab *Tachypleus tridentatus* at tidal flat off the Yasaka Rivermouth in Moriye Bay in Oita Prefecture was investigated by field observations of tidal currents and numerical simulation. Hatchlings of horseshoe crab creep out of the sea bottom of the spawning site between two hours before and after the high tide. Field observation of tidal currents on and off the tidal flat and Lagrangian analysis of neutral floats modeled hatchlings show that hatchlings can reach tidal flat, where larva horseshoe crabs live, by the dispersion effect of tidal currents in spite of their low swimming capability. This well explained observed results.

Key Words : Horseshoe crab, hatchling, dispersion, tidal currents, Lagrangian analysis

1. まえがき

「生きている化石」として知られるカブトガニ *Tachypleus tridentatus* (節足動物剣尾類) は、かつては瀬戸内海や九州北部の内湾干潟などに広く生息していたが、高度成長期に広範に行われた埋立などにより環境が激変した結果、現在では絶滅危惧種とされるほどに生息数が減少している。水際環境の保全が重要視される現在、このような絶滅危惧種など、希少種の生息地保全と、土木事業との両立策が求められている。水生生物は、その生活様式や分布が水理により支配される。特に、幼生時の生活史(初期生活史)は、種の存続上重要な段階にある。幼生は一般に遊泳力が弱いため、捕食者に襲われても逃避が困難で、摂餌力も弱く、この段階での初期減耗が激しい。よって、保全計画の作成ではこの段階の生存条件を重視する必要がある。幼生の分散機構解明への水理的方法論の援用は、生物海洋学の創生期から海流や潮流の現地観測を中心に行われ¹⁾、その後数値シミュレーションも多用されるようになった。しかし、現在でも生物分散の水理的解析を行う場合、なお生息環境条件や遊泳力などの対象生物側の定量的情報が欠如していることが多い。よって、生物情報の定量化に努めるとともに、既知の定性的情報の生物学的妥当性を評価した後に、外挿を行うこ

とが必要である。例えば、中野ら^{2,3)}は吉野川河口干潟におけるシオマネキの生態と水理の関係について研究した。筆者らも、カブトガニの生態の解明と生息環境の保全を目的として、大分県八坂川河口沖に広がる干潟を対象として現地観測により同様な観点より研究を行ってきている^{4,5,6)}。カブトガニの繁殖個体は、番となって夏季の大潮期の満潮時前後に、内湾湾奥部や河川感潮域の砂浜や砂州に産卵に訪れ、海底面下約 20cm の砂中に産卵する。卵は約 50 日以上 の発生期間を経て、砂中で孵化に至る。この孵化後の幼生(1 齢幼生)は、産卵場の砂中から海底面まではい上がった後、干潟の幼生生息地へと分散し、そこで成長することが知られている。守江湾内の幼生生息地は、干潟の空中写真判読から清野ら⁴⁾が示したように、波浪や河川流の強い作用を受けない安定した干潟に限定されており、産卵場と幼生の生息地とは場所的にかなり離れている。しかし、実際に 1 齢幼生が産卵場から干潟の生息地に到達可能かどうかについて調べた観測はない。そこで、夏季の大潮期の満潮時前後において、すでにカブトガニの産卵場であることが確認⁵⁾されている、首捻防波堤の産卵場からフロートを投入し、移動状況を追跡した。また物理的分散機構を明らかにするために、干潟内外での潮流観測や潮流の数値シミュレーションを行った。

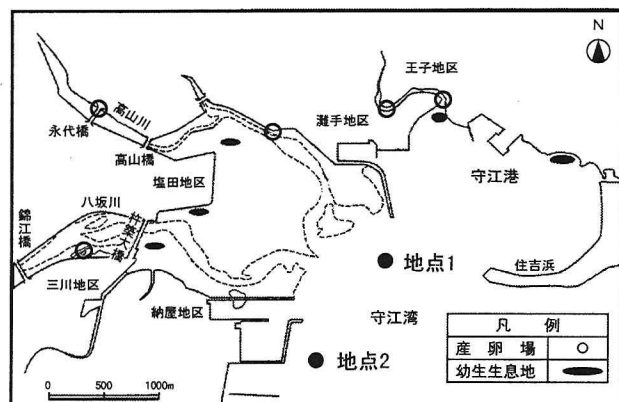
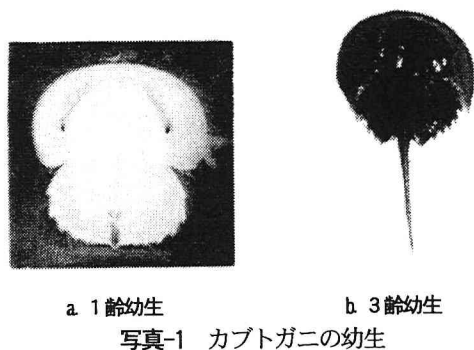


図-1 守江湾におけるカブトガニ産卵場と幼生の生息地の分布

2. カブトガニ孵化幼生の遊泳行動の特徴

カブトガニの1齡幼生は、写真-1aに示すように後体がうちわ状に幅広となっており、尾剣が小さい。2齡以上では後体が相対的に小さくなり、尾剣が伸長する（写真-1b）。1, 2齡間の形態変化より、それに対応した生活形態の変化が見られる。孵化直後の1齡幼生は産卵場の砂中やその近傍の水中で発見されるのに対し、2齡以降の幼生は干潟面を匍匐している状態で発見される。1齡幼生は背面を下にした遊泳行動を取るが、この体勢は成体においても観察される。しかし他段階での遊泳行動は十分わかっていない。静水中での1齡幼生の遊泳運動は、鰓板を波打たせて（パドルング）、不規則な螺旋状の軌跡を描いて上昇する不安定な運動である。しかしこの運動は継続できず、遊泳をやめて落下するのが頻繁に観察される。また流水中では、流れに向かって泳ぐ様子が観察されるので、走流性を持つといえる。以上より、本研究では、カブトガニの1齡幼生を、完全な浮遊幼生でも底生生物でもないpelagic benthosと仮定して考察を行う。

1齡幼生は砂浜、2齡幼生は干潟と生息域が異なることから、その間に幼生が能動的あるいは受動的に移動して分散することになる。分散時の行動については、①自力で目的地とする干潟に泳ぎ着く、②自力で川底や海底を這って干潟に至る、③産卵場周辺の流れを利用して到達する、の3通りが考えられる。しかし上述の議論より、パターン③の可能性が高いと想定される。

3. 守江湾のカブトガニ産卵場・生息地および孵化のタイミング

守江湾は、図-1 に示すように別府湾北部に位置する面積 5.0km² の小規模な湾であり、この湾周辺では図示する場所にカブトガニの産卵場や幼生の生息地が分布する⁴⁾。

カブトガニ孵化幼生の水中への出現タイミングについては前田⁷⁾の研究があり、例えば図-2は、首捻防波堤の産卵場における幼生の出現状況の観測結果である。横軸は満潮時を基準とした時間差であり、50個体以上の幼生が

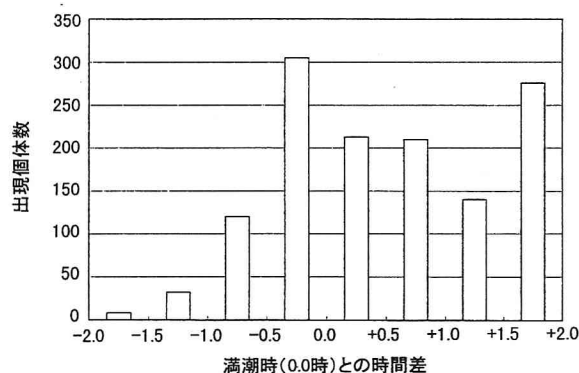


図-2 カブトガニ1 齡幼生の出現時刻と満潮位の関係

出現した8調査日について、30分間毎の出現個体数を合計して求められている。幼生は満潮前後2時間以内に出現しているが、出現個体数は満潮前が465個体、満潮後が842個体と満潮後のほうが多い。このようにカブトガニの幼生は満潮前後に出現するために、孵化幼生の移動は海底から現れた瞬間における産卵場の流れに大きく支配される。

4. 守江湾の潮位と潮流の観測

守江湾の杵築大橋直下での、1997年9月21日～10月22日の潮位観測データの調和分解によれば、当海域の潮汐振幅はM₂分潮が卓越している。また平均水面はT. P. 0.15m、朔望平均満・干潮位は0.92m・-0.62mにある。

守江湾内の潮流特性を明らかにするため、干潟上と干潟沖において観測を行った。干潟上における潮流観測は、1999年5月12日15時～5月13日10時（大潮期）に行った。調査地点は、図-3に示す塩田地区前面干潟上の2地点（測点1, 2）である。干潟上に3軸電磁流速計（アレック電子社製モデルACM16M-7）を設置し、海底上0.2mの流れを0.5s間隔で5分間測定した。

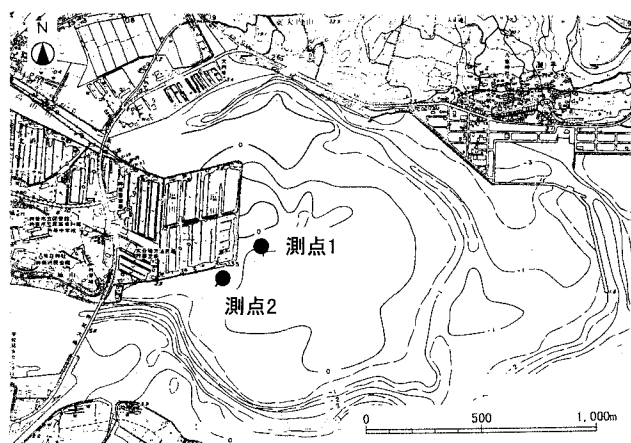


図-3 干潟上における潮流観測地点の位置

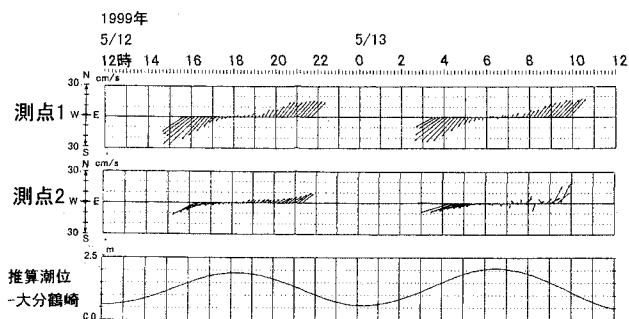


図-4 干潟上における平均流の経時変化

大分港の潮位とともに、測点1, 2で観測された平均流の経時変化を図-4に示す。測点1では、上げ潮時は南西に、下げ潮時は北東方向に流れ、滞筋に沿った流れとなっている。測点2では、上げ潮時は南西～西流とほぼ塩田地区南護岸に沿った流れとなり、下げ潮時は北東流となっている。両地点ともに上げ潮時に流速が大きく、恒流成分が存在している。そこで、5月12日の観測記録から恒流成分を求めると、測点1では $N281^{\circ}$ 方向に 1.3cm/s 、測点2では $N293^{\circ}$ 方向に 2.6cm/s の恒流となった。

干潟沖の潮流観測地点は、図-1に示したように、干潟沖の八坂川、高山川および守江港からの下げ潮流が合流する地点1、およびその沖合の納屋港沖の地点2である。観測時期は、地点1では1998年11月4日12時～11月19日12時、地点2では1998年11月4日12時～11月5日13時（大潮期）とした。図-5には、流向別流速階級別の頻度分布を示す。地点1の表層（海面下1m）では、干潟の外縁線とほぼ直交する、北西および南東方向モードの流れが卓越し、この2方向で全体の25.0%を占める。その平均流速は 2.8cm/s である。下層（海底上1m）では、北北西および南流が卓越し、この2方向で全体の27.7%を占める。

地点2の表層（海面下1m）では、図-1に示したように南北に延びた納屋港の防波堤の影響を受けて、北北西または北流が卓越しており、この2方向で全体の40.0%を占める。下層（海底上1m）では北流が圧倒的に卓越しており、

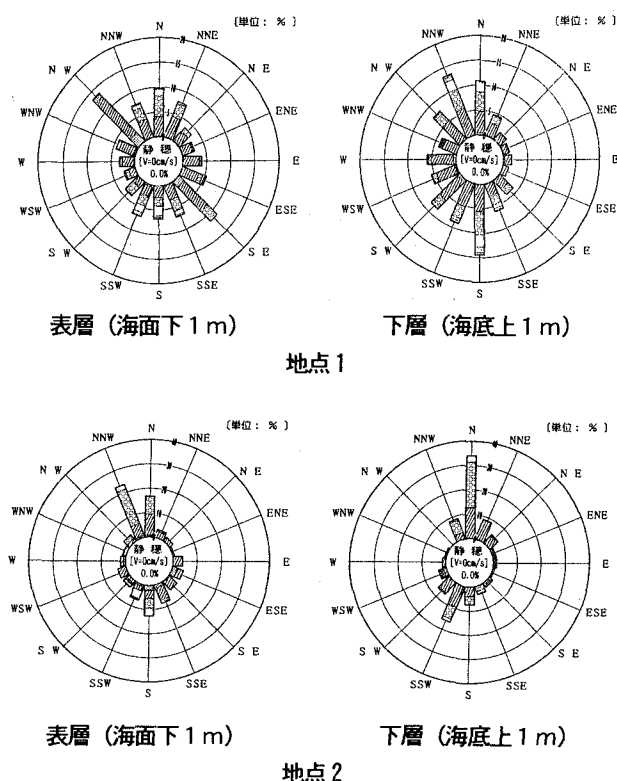


図-5 干潟沖における潮流の流向別流速階級別の頻度

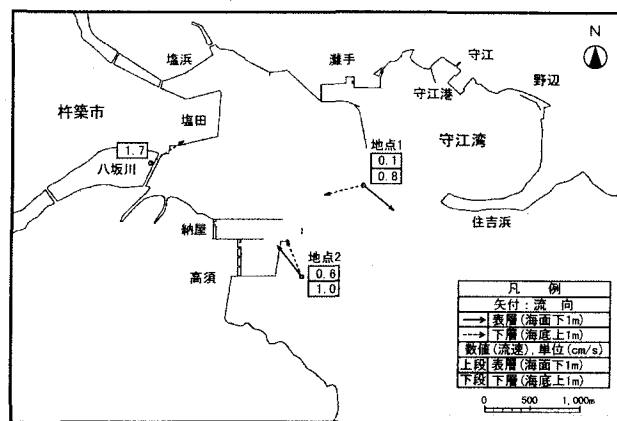


図-6 2地点で観測された恒流

この方向で全体の34.0%を占める。流速は弱いものの、地点2では上下層とも北向き、すなわち湾内方向への流れが卓越している。

次に、地点1の15昼夜観測データについて最小自乗法による調和分解を行い、10分潮の調和定数および恒流(V_0)を求めた。さらに当海域の流況を把握するために、潮汐に起因した潮流の変化として平均大潮期の流況と潮流以外の成分としての恒流（平均流）について検討した。恒流を図-6に示す。流速は微弱であるが、表層（海面下1m）では時計回りの環流が生じている。一方下層（海底上1m）では、西流傾向を示し湾内に向かう流れとなっている。

表-1 潮流計算条件一覧

計算領域	8400m×4500m
水深	1996年の深浅測量図による
メッシュ長	100m×100m (84×45メッシュ)
層分割	第1層 海面～T. P. -2. 0m 第2層 T. P. -2. 0m～-5. 0m 第3層 T. P. -5. 0m以深
タイムステップ	6s
全計算時間	48時間 (満潮からスタートして4潮汐分)
基準水位	+0. 15m (M. S. L.)
水平渦動	$0. 4 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$
粘性係数	
表面摩擦係数	0. 0013
層間摩擦係数	0. 0020
海底摩擦係数	マンニングの粗度係数を0. 03とし、Chezy式により水深の関数として与える。
水平拡散係数	$0. 4 \times 10^4 \text{cm}^2/\text{s}$
鉛直拡散係数	$1 \text{cm}^2/\text{s}$: エスチャリー (河口域) の一般値
干出水位	0. 05m
水位境界	東端・南端境界上で振幅0. 77m [平均大潮期の潮位振幅値] 周期12. 00hr
河川境界	八坂川で $1. 12 \text{m}^3/\text{s}$ 高山川で $0. 32 \text{m}^3/\text{s}$ の流入条件
塩分濃度	初期値・境界値は33. 0 河川流入水は30. 0

5. 守江湾の潮流解析

守江湾内の潮流の平面的な挙動を把握するために、現地潮流調査に基づいた潮流計算を行った。守江湾には広大な干潟が広がっているために、干潟の干出を考慮できるモデルを採用した。本解析で用いる計算モデルは藤原ら⁸⁾のモデルである。このモデルでは、密度変化の原因となる温度・塩分濃度の変化がそれほど小さくなく、かつ水の非圧縮性を仮定し、圧力による変化を無視して、連続の式と運動方程式を差分化して解くものである。また熱収支と塩素量についてはそれぞれ移流拡散方程式を用いる。さらに、状態方程式については、塩素量と水温から密度を計算するためのKnudsenの式を用いる。

一般的な海域において適用される3次元モデルのうち、鉛直流が計算でき、成層期、非成層期の区別なしに適用できるマルチレベルモデルを用いた。このモデルは海域を直方体のセルに分割し、その中で基礎方程式を積分し、解を求めるものである。また、本計算では、各計算点表層の干出・没水の判定によって移動境界処理を行った。

海域にある計算点表層の層厚 (水位-水深) が一定値 (0. 05mと設定) より小さくなった場合、その点は干上がったとみなし、隣接点との全ての境界を不透過に、境界上での流速をゼロとした。また、ある海域の水位が、隣接する陸地の高さより一定以上高くなった場合、その陸地に海水が流入し水没するとみなした。この時、海-陸の境界を透過境界とし、その陸地に海域の水位・水質を外挿した。同時刻に一つの陸地へ複数の海域からの流入が生じた場合には、水位・水質は各々の平均値とした。これらの処理を毎時間・全計算点 (表層) で行った。こうして汀線を潮位によって変化させ、それを境界条件として潮流計算を行った。潮流計算の計算条件を表-1に示す。

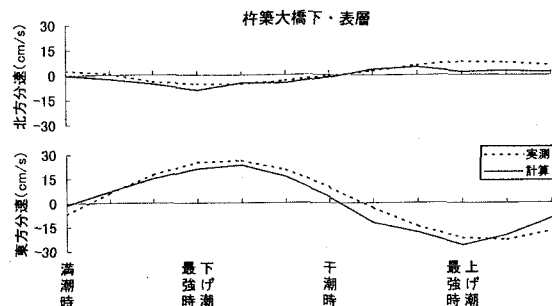


図-7 杵築大橋直下での潮流計算結果と現地調査結果との比較

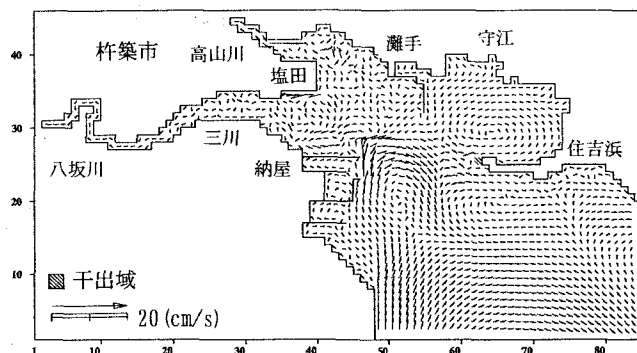


図-8 計算された平均流の分布 (表層)

6. 潮流の実測値との比較

現地観測時の表層・下層を計算上の第1, 2層とし、現地調査地点1, 2および杵築大橋直下での調査結果をもとに、現地で得られた平均大潮期の1時間おきの流向・流速と平均大潮期の潮流計算値を比較し、流れの現況再現性を調べた。現況再現性は、流向・流速から求められるベクトル成分を北方・東方分速に分け、その変化状況を比較することにより判断できる。一例として杵築大橋直下での潮流観測結果の調和分解後、計算された平均大潮期の流速と計算値の時間的変化は、図-7に示す通りである。流況は概ね一致しており、現況再現性が得られている。

各時刻の潮流を計算した後、それらの残差流成分として求めた表層の平均流の分布は図-8に示す通りである。平均流は計算条件から判断すると、密度流と潮汐残差流の合成流と考えられる。河川域は河川流の影響を受け、河川を下る流れとなっているが、干潟周辺の流れは複雑であり、八坂川河口部や高山川河口部では所々に反時計回りの環流を生じている。とくに特徴的な流れとしては、高山川から八坂川へ向かう流れで、その一部は塩田南側護岸に沿って八坂川を遡上し、杵築大橋下流域で向きを転じ、八坂川へと流入している。八坂川を下ってきた流れは、湾外へ流出する流れ、守江港内へ向かう流れ、および高山川を遡上する3つの流れに別れ、干潟部では地形性の反時計回りの環流を形成している。一方、納屋港と住吉浜砂嘴の間の海域では、時計回りの環流が形成されている。この環流は図-6に示した実測値とほぼ対応を示している。

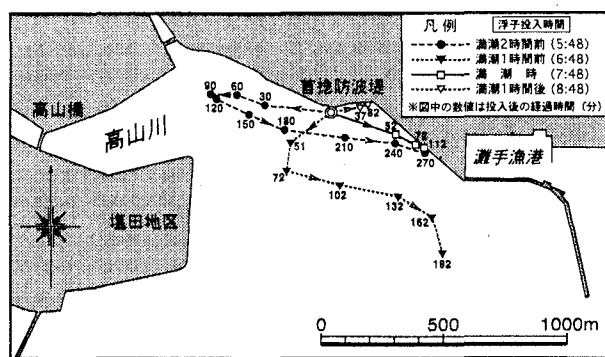


図-9 首捻防波堤周辺でのフロート追跡結果

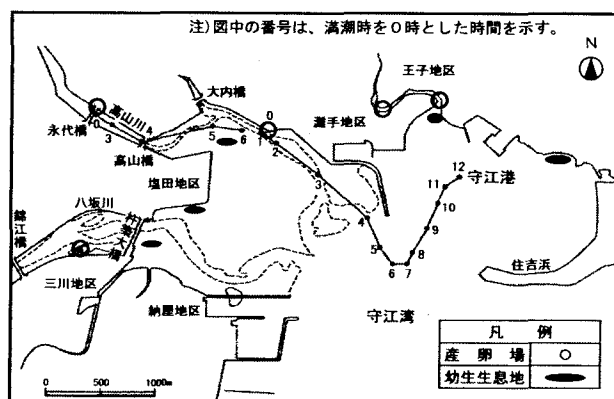


図-10c カブトガニ孵化幼生の推定分散ルート(満潮時)

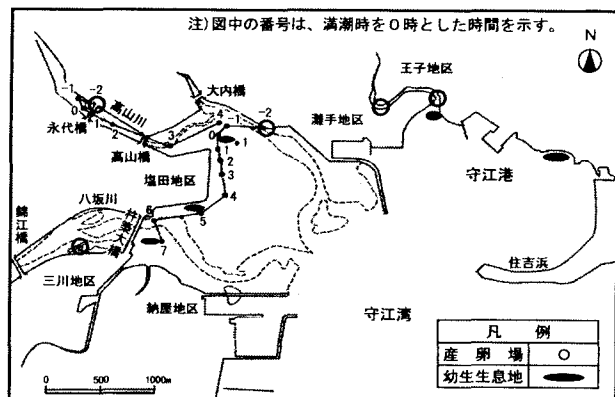


図-10a カブトガニ孵化幼生の推定分散ルート(満潮前2時間)

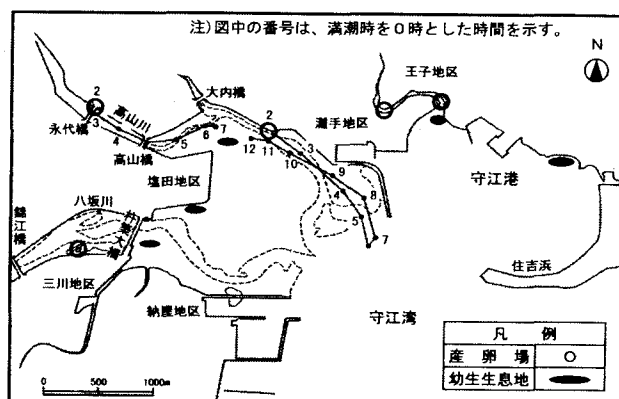


図-10d カブトガニ孵化幼生の推定分散ルート(満潮後2時間)

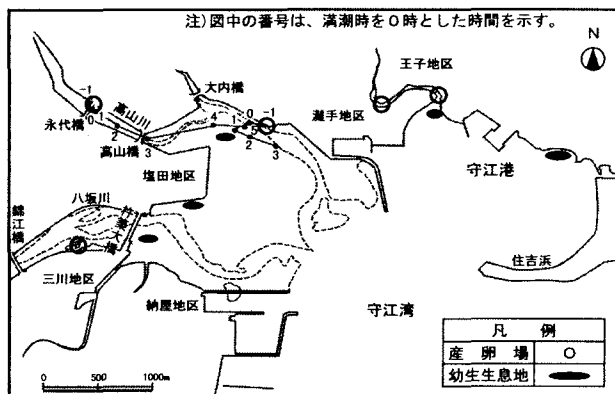


図-10b カブトガニ孵化幼生の推定分散ルート(満潮前1時間)

7. カブトガニ孵化幼生の分散解析

まず、孵化幼生の分散解析の検証データを得るために、首捻防波堤周辺で錘付きビニールボールを用いたフロート観測を1997年9月1日に実施した。図-9にはフロート追跡結果を示す。満潮2時間前に投入されたフロートは高山川沖の流路を遡って2時間後には塩田地区の北側へ到達したあと、下流方向へと流れの向きが変化した。そしてこの間、塩田地区沖の干潟上を流れている。満潮1時間前に投入されたフロートは反時計回りに回転しながら下流方向へ流れた。しかし、満潮時以降に投入されたフロートは下流方向に流れており、塩田地区沖には到達していない。

カブトガニの1齢幼生を、完全な浮遊幼生でも底生生物でもないpelagic benthosと仮定すると、孵化幼生の運

動は水粒子の運動とほぼ同様になると考えられる。その場合、中野ら²³⁾と同様な考えにより、潮流シミュレーション結果をもとに水粒子をラグランジュ的に追跡すれば、産卵場からの幼生の分散機構の把握が可能になる。図-10a, b, c, dには、カブトガニ生息地分布とカブトガニ孵化幼生の推定分散ルートを示す。なお、時間の基準は満潮時とする。

(1) 満潮2時間前に出現した場合(図-10a)

首捻防波堤の産卵場から出現した孵化幼生は、満潮1時間前から満潮時に、この海域周辺で形成される反時計回りの環流に乗り、塩田地区沖の幼生生息地に到達した。この状況は観測結果とほぼ一致する。さらに、1時間後に環流から分岐した流れに乗った幼生は、塩田地区東側護岸に沿って南下し、5時間後には塩田地区南側護岸周辺の幼生生息地に達した。その後、強い西流に乗り、八坂川を遡り7時間後には八坂川右岸の生息地に達した。一方、永代橋の産卵場から出現した孵化幼生は、上げ潮流に乗ってしばらく高山川を遡上した後、下げ潮となって満潮時から4時間後には塩田地区沖の幼生生息地のごく近傍に到達した。

(2) 満潮1時間前に出現した場合(図-10b)

首捻防波堤の産卵場から出現した孵化幼生は、上げ潮流に乗り、満潮1時間後には塩田地区沖の幼生生息地の近傍に達した。しかし、満潮1時間後は下げ潮流に転流しているため、下流方向へ急速に流される。この結果も観測結

果をよく説明している。一方、永代橋の産卵場から出現した孵化幼生は、下げ潮流に乗って下流に運ばれ、4時間後には塩田地区沖の幼生生息地の近傍に達した。

(3) 満潮時に出現した場合 (図-10c)

首捻防波堤の産卵場から出現した孵化幼生は、出現直後は上げ潮に乗って高山川河口へと遡上したが、満潮1時間後に転流する下げ潮流に乗り高山川沖の滞筋を流下し、灘手漁港の防波堤を大きく迂回して流れ、12時間後には守江港沖に達した。到達地点は、江頭川河口沖の幼生生息地に近接してはいるが、到達地点の水深は約3.5mと大きく、かつ守江港にも近いため、幼生が最終的に生息地に到達可能かどうか疑問である。永代橋の産卵場から出現した幼生は、下げ潮流に乗り5.6時間後には塩田地区沖の幼生生息地の近傍に達した。このことから、永代橋の産卵場から出現した幼生は塩田地区沖の幼生生息地に到達可能と言えるが、首捻防波堤から出現した幼生は到達が困難と考えられる。

(4) 満潮2時間後に出現した場合 (図-10d)

首捻防波堤の産卵場から出現した孵化幼生は直ちに下げ潮流に乗り、高山川沖の滞筋を流下して7時間後には灘手漁港の防波堤先端沖に達した。そこから上げ潮流に乗って遡上し、12時間後には幼生生息地近傍まで到達した。しかしこれだけ長い時間幼生が浮遊状態を保てるかどうかは疑問である。永代橋の産卵場から出現した幼生は、下げ潮流に乗って下流に輸送され、7時間後に、高山川河口の幼生生息地の近傍に達した。この場合も、首捻防波堤から出現した幼生は塩田地区沖の幼生生息地に到達しにくく、永代橋直下の産卵場から出現した幼生のほうが塩田地区沖の幼生生息地に到達しやすいことが分かる。

以上のようにフロート観測と、潮流シミュレーションに基づく水粒子のラグランジュ的追跡によれば、少なくとも首捻防波堤と永代橋から出現したカブトガニ幼生は、海底面からの出現時間によっては比較的短時間で干潟の幼生生息地に到達可能なことが結論される。

8. まとめ

カブトガニ生息地の保全のためには、対象生物の生活史を考える必要がある。その種が回遊や移動を行う場合には、生活史の完遂を支える物理的条件、特に外的要因から大きな影響を受け易い孵化幼生の分散については、流れの条件が満たされる必要がある。したがってカブトガニの保護においては、単にミクロ的に見た産卵場の保全だけではなく、人工構造物の構築などによる、潮流場の変化についても十分な注意を払う必要がある。とくに守江湾の塩田地区のように、干拓地の護岸が直線的に延ばされたり、あるいは防波堤などの施設が建設されると、その背後に反流域が形成されたり、あるいは構造物に沿った流れが生じ、それによって従来カブトガニの孵化幼生が到達可能であった場所に到達が不可能になる事態も想定

される。また、カブトガニの産卵場と幼生生息地との関係に関して、潮流条件によっては産卵場に最も近接する生息地のみが幼生生息地とは限らないことも明らかになった。これらのことは、湾内の干潟全体を視野に入れたカブトガニ生息地の保全を進めるべきこと、そしてカブトガニの孵化幼生の分散については、サンプリング調査や潮流観測だけではなく、本研究で明らかにした数値シミュレーションが有効な手段となることが明らかである。今後、各種地形改変が希少種の生息環境に及ぼす影響の評価や、あるいは影響のより少ない案の作成において、本研究で示した手法の有効利用が期待される。

謝辞：守江湾では、下水道の終末処理場の施設が湾岸に建設されているが、干潟に及ぼす排水の影響検討とその軽減策について、九州大学工学部の楠田哲也教授を委員長とし、筆者らも委員として参加した公共下水道終末処理場環境影響調査委員会が開催された。本研究では、杵築市下水道課の許諾を得てこの委員会の成果の一部を活用させていただいた。カブトガニ幼生の現地調査においては杵築市カブトガニ保護推進委員会のご協力を得た。パシフィックコンサルタンツ(株)九州本社の徳田正史氏に研究遂行上のご尽力をいただいた。また、解析の一部は(財)河川環境財団の河川整備基金による清野への研究支援をもとに行われた。これらの方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) Eric L. MILLS: Biological Oceanography -An Early History, 1870-1960, Cornell University Press, London, England, p. 378, 1989.
- 2) 中野 晋, 真子昌樹, 酒井勝司, 北野利一, 三井 宏: 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, 1997.
- 3) 中野 晋, 藤井 勇, 真子昌樹, 北野利一, 三井 宏: 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, 1998.
- 4) 清野聡子, 宇多高明, 真間修一, 三波俊郎, 芹沢真澄, 古池鋼, 前田耕作, 日野明日香: 絶滅危惧生物カブトガニの生息地として見た守江湾干潟の地形・波浪特性, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1096-1100, 1998.
- 5) 清野聡子, 前田耕作, 日野明日香, 宇多高明, 真間修一, 山田伸雄: カブトガニは何故その岸辺に産卵するのか?-産卵場の地形・堆積物・波・流れの特性-, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 1091-1095, 1998.
- 6) 清野聡子, 宇多高明, 大分県: カブトガニの棲む干潟-八坂川の河川改修と環境保全-, 大分県, p. 57, 1999.
- 7) 前田耕作: カブトガニ *Tachypleus tridentatus* の1齢幼生の生態と産卵地の物理環境, 東京大学大学院総合文化研究科広域システム科学科修士論文, p. 112, 1999.
- 8) 藤原正幸, 明田定満, 武内智行: マルチレベル密度流モデルの開発と人工湧昇流への適用, 水工研技報, 14, pp. 13-35, 1992.

(1999. 9. 30 受付)