

過去の地形条件における希少生物カブトガニの 孵化幼生の分散過程の復元と生息地保全

REPRODUCTION OF DISPERSION PROCESS OF ENDANGERED HORSESHOE CRAB LARVAE IN PAST TOPOGRAPHIC CONDITION AND CONSERVATION OF HABITAT

清野聡子¹・宇多高明²・三船修司³

Satoquo SEINO, Takaaki UDA and Shuji MIFUNE

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 国土交通省国土技術政策総合研究所 研究総務官 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

³正会員 理修 日本データーサービス(株)総合解析室 室長 (〒065-0016 札幌市東区北十六条東 19-1-14)

The dispersion process of hatchlings of horseshoe crab *Tachypleus tridentatus* at tidal flat off the Yasaka Rivermouth in Moriye Bay in Oita Prefecture was investigated by field observation and numerical simulation under the past condition without large-scale structures. Hatchlings of horseshoe crab creep out of the sea bottom of the spawning site between two hours before and after the high tide. Lagrangian analysis of neutral floats show that hatchlings can spread over the tidal flat, where larva horseshoe crabs live, by the dispersion effect of tidal currents in spite of low swimming capability. Dispersion capability is large off the mouth of large rivers.

Key Words : Horseshoe crab, hatchlings, dispersion, tidal currents, Lagrangian analysis, endangered species conservation, habitat restoration

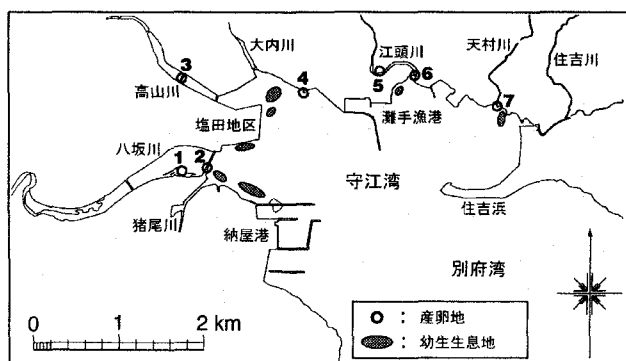
1. まえがき

水際環境の保全が重要視される現在, 希少種の生息地保全と人為改変のあり方の見直しが求められている. 改変の影響の極小化だけでなく, これまでに破壊された環境の修復も重要課題である. 水生生物はその生活様式や分布が水理条件により支配されるので, 生物学的視点からの検討だけでなく生息環境の水理的検討も必要である. とくに幼生は遊泳力が弱く, 流れが初期減耗に大きく影響する可能性が大きいことからこの種の検討が重要である¹⁾. その際, 生物種によって産卵数や生残に関する繁殖戦略や形態・遊泳能力の発達が異なるので, それに応じた解析を行う必要がある. 本研究ではこの手法を, 絶滅に瀕する希少な水生生物の生息地の復元や保全計画作成の問題点の整理に活用することを目的とした.

生きている化石として天然記念物級の扱いを受けてき

たカブトガニ *Tachypleus tridentatus* は, 埋め立てや干拓などに起因する生息地の喪失などにより数十年間に個体数が激減し, 絶滅危惧生物に指定されるようになった. その保護のためには生息地の環境の回復が求められる. その場合, 過去に生息地で行われた改変によって生態系のいずれの部分がどのような影響を受けたかを明らかにすることが重要である.

本種は, 夏季の大潮期の満潮時前後に内湾湾奥部の砂州で産卵する. 砂中で孵化した幼生は水中に孵出し干潟の幼生生息地へと分散しそこで成長する. 筆者らは, 潮流により幼生が産卵地から生息地へと到達する過程を, 数値シミュレーションにより予測することが可能なことを明らかにした²⁾. この計算は現況の地形条件で行われたが, 研究対象地の守江湾の地形は防波堤などの港湾施設の建設により過去に大きく変遷しており, カブトガニの幼生生息地もこれらの地形改変の影響を強く受けてきたと推定でき



- | | |
|------------|---------------|
| 1: 八坂川河口砂州 | 5: 江頭川下流内側岸砂州 |
| 2: 杵築大橋 | 6: 江頭川河口 |
| 3: 永代橋 | 7: 天村川河口 |
| 4: 首捻防波堤 | |

図-1 守江湾の形状とカブトガニの産卵地・幼生生息地

る。しかし過去の生息環境の現地調査は現在では不可能である。一方、生息環境を創出し、あるいは将来の環境変遷を予測する場合には、過去から現在に至る環境復元が非常に重要であり、これより得られる情報が十分に考慮に入れられなければならない。そこで防波堤等の構造物を撤去し、過去の海底地形に戻した条件下で潮流シミュレーションを行い、その結果をもとに過去のカブトガニ生息環境の復元を行う手法について検討した。

2. 空中写真を利用した守江湾干潟の地形改変の

変遷調査

図-1に示すように守江湾は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地や幼生の生息地が分布する³⁾。本研究では、まずカブトガニの生息地である守江湾の長期的な変遷を空中写真に基づいて調べた。同区域の空中写真は既に示した³⁾が、ここではカブトガニの産卵地・幼生生息地としての視点から改めて空中写真の判読を行う。空中写真による守江湾の変遷を図-2(a), (b), (c)に示す。

1966年では守江湾内には規模の大きな人工構造物はほとんどなく、海岸線の大部分は自然のままの状態にあり、湾口には住吉浜の砂嘴が細長く西向きに伸び、住吉浜から砂嘴の先端を回り込んで湾内の天村川河口へと砂浜が続いていた。このことは湾内の住吉浜から天村川河口に至る砂浜、および特に住吉川河口の砂州もまたカブトガニの産卵地になりうる可能性が高かったと推定できる。なぜなら現在の住吉川河口では砂州はなく護岸で固められているが、当時は現在カブトガニの産卵地となっている八坂川の河口砂州とよく似た河口砂州が存在したからである。また当時住吉浜砂嘴の先端部でも産卵が確認されていたが、住吉浜は当時緩勾配で一部に干潟を有するような砂浜海岸で、近傍には藻場があったとの証言がある。また住吉浜砂嘴の対岸の、八坂川と高山川の河口沖には干潟が広がり、

それらは納屋地区の南側に位置する権現鼻の海食崖から伸びる砂浜とつながっていた。

1977年では図-2(b)に示すように、湾中央において灘手漁港の防波堤の延伸と同時にその西側隣接部で埋め立てが開始された。湾口の納屋港と湾奥の守江港でも干潟の掘削と防波堤の延伸、北側隣接部での埋め立てが行われた。さらに住吉浜砂嘴の守江湾側と先端部が埋め立てられ護岸が建設された。これらによって沿岸の干潟面積が減少すると同時に、人工構造物に囲まれた結果干潟上の海水流動も変化したと考えられる。

1990年では図-2(c)に示すように灘手漁港が完成し、埋め立て埠頭と湾の中央部に向かって突き出た防波堤により湾が二分された。さらに干潟の南側の湾口には納屋港が完成し、南側から続く砂浜と干潟が分断された。住吉浜砂嘴周辺の緩勾配の浅海底は海砂利採取に起因して急深となり、同時に藻場を失った。水深の増大は砂嘴周辺部への波浪侵入を促進し、砂移動も活発化したために産卵地としての条件を満たさなくなったと考えられる。また防波堤の建設によって湾の入口の幅が狭まり小さくなった。一連の工事の結果、八坂川河口沖の干潟では河川水や河口からの流出土砂が海域へ拡散しにくい状態へと推移してきた。

3. カブトガニ孵化幼生の遊泳行動

流れの物理と生物学的情報を併せた考察を行う場合、孵化幼生の遊泳能力や分散過程についての知見が十分でないことから、多くの仮定を含まざるを得ない面がある。とくに数値計算の前提条件として、孵化幼生を完全な浮遊幼生と底生生物の両方の要素を持つ「浮遊力のある底生生物」と仮定して考察を行うことになる。孵化幼生の分散時の行動については、①目的地とする干潟まで自力で泳ぎ着く、②川底や海底を這って干潟に至る、③産卵地周辺の流れを利用して到達するの3通りが考えられるが、水生生物の幼生の多くは流れを利用して分散するので、③の可能性が高いと考えられる。その場合、産卵地や干潟周辺の流れのうち、潮流、残差流、海浜流のいずれを利用するかが問題となる。孵化後の浮遊時間が長いほど捕食されるリスクが高くなるため、可能な限り短時間で目的地の干潟に着底することが望ましい。強い海浜流は高波浪時にのみ起こるので頻度が低く、これに幼生の分散が依存すると考えるのは無理がある。より高い頻度で起こる流れは潮流か残差流である。残差流には、潮流の非線形性に起因する地形性の残差流や、密度成層に伴う残差流が考えられるが、干潟上は非常に水深が小さいことから地形性の残差流の方が卓越すると考えられる。しかしながら幼生が分散時に残差流を利用しているという確定的なデータがないため、本研究では潮流を利用していると仮定する。さらに潮流を利用する場合、何潮汐分による移動かが問題になる。数潮汐分の時間をかけて移動することも考えられるが、これもまた確

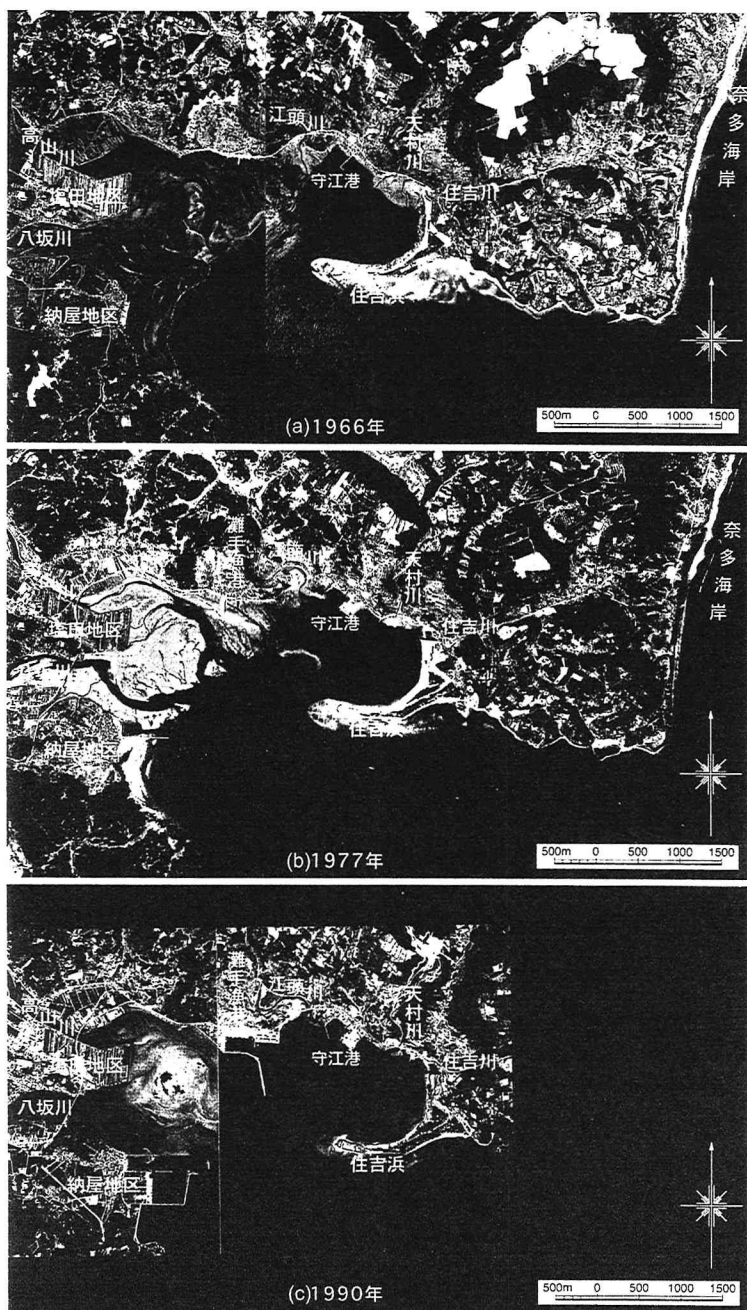


図-2 守江湾の空中写真(a:1966年, b:1977年, c:1990年)

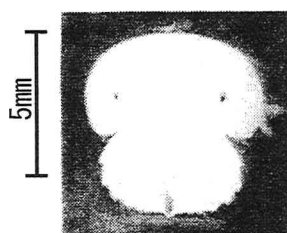


図-3 カブトガニ孵化幼生

定的な情報がない。そのため流れの解析における生物学的な仮定としては、1 潮汐分の潮流で分散すると考える。

カブトガニの孵化直後の幼生(1 齢幼生)は産卵地の砂中やその近傍の水中で発見されるのに対し、2 齢以後の幼生は干潟面を匍匐している状態で発見される。いま、カブ

トガニ孵化幼生の外部形態を調べると図-3のように体全体はほぼ円盤状であり、推進時の駆動を行うパドル列である鰓が腹面にある。後体は尾部両側が左右外側に張り出し、輪郭が丸みを帯びた四角になっている。また後端は尾剣がわずかに突出する。個体発生的には、2 齢幼生以降成体に至るまで後体は前体に較べて小さく、尾剣が大きく伸長する特徴と比較すると、本種の生活史の中では、孵化幼生のみは遊泳に非常に適した形態をしていると考えられる⁴⁾。

孵化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。しかし幼生から若体にかけての他成長段階での遊泳行動は不明である。また孵化幼生も成体も水中で常時遊泳しているのではなく、特に刺激を与えなければ水底を匍匐していると考えられる。また孵化

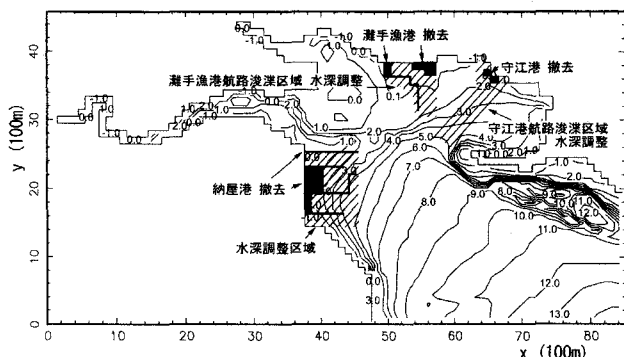


図-4 守江湾内の人工構造物の撤去条件

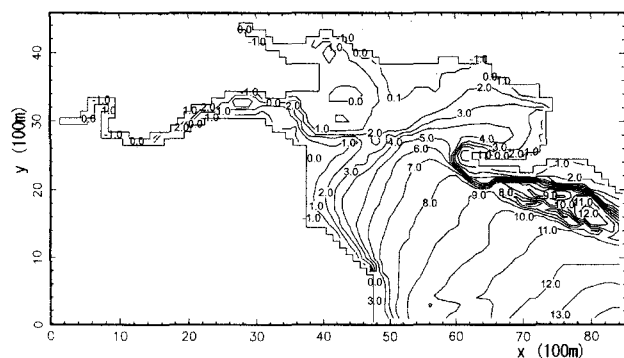


図-5 復元された海底地形条件

直後には走光性をもつために光源に向かって泳いで謂集する。

産卵地から幼生生息地までの分散の様子は直接観察されていないが、以上の生物学的な情報を総合すると孵化幼生の分散方式としては河床や海底を匍匐するのではなく、遊泳もしくは浮遊によると考えられる。

4. 守江湾の潮流解析

守江湾の過去の地形におけるカブトガニ孵化幼生の分散ルートを推定するために、防波堤等の構造物を撤去した地形で潮流シミュレーションを行い、その結果をもとに水粒子のラグランジュ的追跡を行った。撤去構造物は図-4のように納屋港、灘手漁港、守江港および防波堤とする。また水深は1996年の測量結果を用いたが、灘手漁港および守江港への航路部の浅瀬区域は周辺の水深と滑らかに接続させた。また納屋港の構造物部分(現在は陸上部)については、周辺地形と過去の空中写真(1948年)を参考に修正した。図-5には計算に用いた復元海底地形を示す。復元された海底地形では住吉浜砂嘴沖の海底掘削穴が残されているが、この掘削穴の存在は守江湾内の海水流動に及ぼす影響は小さいと考えて1996年の状態と同じにした。

守江湾には広大な干潟が広がっているために、潮流計算では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⁵⁾のモデルである。このモデルでは、密度変化の原因となる水温・塩分の変化がそれほど

表-1 潮流計算条件

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)
設定水位	+0.15m (M.S.L.)
層間摩擦係数	0.0020
海底摩擦係数	マ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。
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1.12m ³ /s 高山川で0.32m ³ /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0.0
水平渦動	0.4(m ² /s) (実測拡散係数と同値)
粘性係数	
鉛直渦動	0.0001(m ² /s)
粘性係数	
水平拡散係数	0.4(m ² /s) (実測拡散係数と同値)
鉛直拡散係数	0.0001(m ² /s) : エスチャリー(河口域)の一般値

大きくなく、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。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、ここでは鉛直流が計算でき、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－海底位)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。計算では3層モデルを用い、T.P. 2m以浅を第1層、2～5mを第2層、5m以深を第3層とした。潮流計算の計算条件は表-1に示す。潮流計算の現況再現性は前報²⁾で確認されているので係数等は前報の値と同じとした。

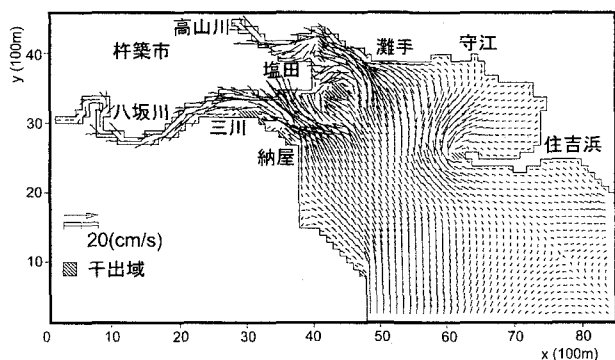


図-6(a) 上げ潮最強流時の流速ベクトル

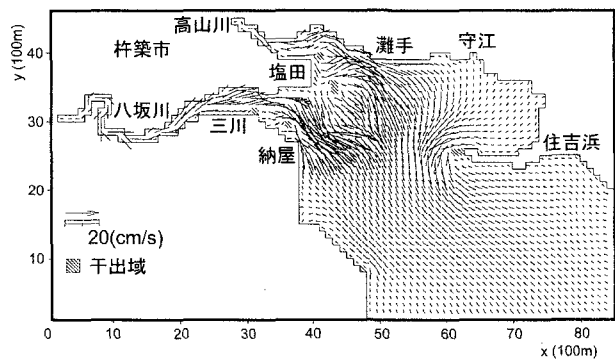


図-6(b) 下げ潮最強流時の流速ベクトル

5. 復元された守江湾における潮流

図-6(a), (b)には潮流計算に基づく上げ潮・下げ潮最強流速時の流速分布を示す。防波堤等の施設がなくなると守江湾内では全体にスムーズな往復運動に近い潮流流況となった。

カブトガニの孵化幼生の分散は、潮流計算結果より水粒子をラグランジュ的に追跡すれば把握できる。前報¹⁾では塩田沖のカブトガニ幼生生息地に着目し、高山川の永代橋直下および灘手地区にある首捻防波堤のカブトガニ産卵地から出現した一齢幼生の幼生生息地への到達可能性について調べた。本研究では復元された海底形状をもとに、過去の研究によってカブトガニの産卵地であることが確認されている5地点(八坂川河口砂州、高山川永代橋直下の湾曲部内岸側砂州、首捻防波堤、江頭川河口砂州および天村川河口砂州)からの幼生の出現を想定し、そこからの幼生の移動状況を調べた。なお、同じく産卵地であることが確認されている江頭川下流部の湾曲部内岸側砂州については、河口砂州からの出現と等価と考えられるので出現地点は河口砂州のみとした。

図-7には5産卵地点から孵出した幼生の移動状況を重ねて示す。また、前報¹⁾では首捻防波堤におけるフロート観測(1997年9月1日実施)の結果について述べたが、これに続いて同年9月3日に八坂川河口で実施したフロート追跡の結果を図-8に示す。満潮前2時間から満潮後2時間まで各1時間毎に投入したフロートの移動状況を重ねて示したも

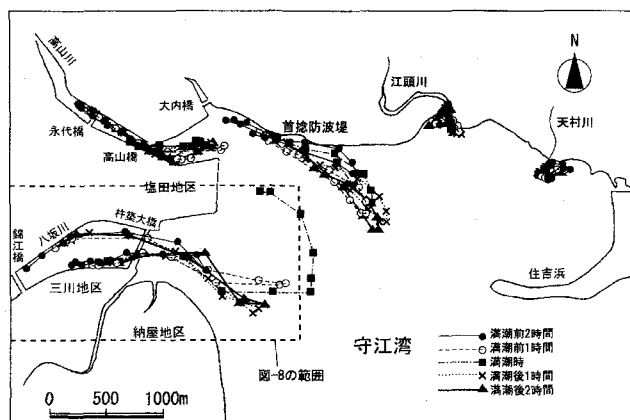


図-7 満潮前後に投入されたフロートの移動軌跡の重ね合わせ結果

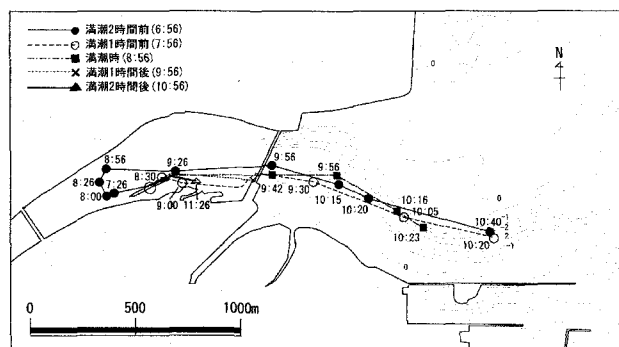


図-8 八坂川河口砂州に投入されたフロートの追跡結果(1997年9月3日観測)

のである。八坂川河口砂州から出現した幼生の移動状況については、観測では納屋港の防波堤有り、計算では防波堤なしではあるが、両者はほぼ同様な結果となり、人工構造物の影響はあまり強く受けていない。前報では灘手防波堤の産卵地から孵出した幼生は高山川沖の滞筋を横切って塩田地区沖の幼生生息地に到達しうることを明らかにしたが、過去の地形条件では同じ幼生生息地に八坂川河口の産卵地からも到達できた可能性がある。

6. 考察

表-2には5地点におけるフロートの移動状況をもとに、東西・南北方向の最大移動距離とそれらの二乗平均距離を一括して示す。これによれば、相対的に規模の大きな河川である八坂川と高山川では幼生の移動距離が大きいのに対し、江頭川と天村川河口では移動距離がごく短い。このことは江頭川や天村川河口周辺の幼生生息地は、これらの河口に近接する産卵地からのみ幼生が分散したものであることを示している。また高山川の河道内に位置する永代橋地点と河口沖の首捻防波堤を比較すると、湾内に位置する後者では約20%移動距離が大きく、干潟に近接する湾内の産卵地の方が幼生の分散が起こり易いことが分かる。

既に述べたように、江頭川では河口から約600m上流の

表-2 フロートの南北・東西移動距離

産卵地	最大移動距離(m)		二乗平均 距離(m)
	東西方向	南北方向	
八坂川河口			
三川地区	2353	795	2483
首捻防波堤	1498	1046	1827
永代橋	1358	584	1478
江頭川河口	374	335	502
天村川河口	372	226	435

湾曲部内岸側砂州にも産卵地がある。この産卵地からの幼生の流下は、退潮流・河川の自己流の作用に依存し、結果的に干潟上への移動については河口砂州から出現した幼生と同じ挙動を示すと考えられる。

陸上生物では、例えばサルやシカの群のように道路建設により移動が阻害されると個体群の分断が起き、遺伝的隔離を誘発して絶滅が促進されることが知られている。水生生物においても、移動・分散能力が小さい種では同様の現象が起きうると考えられる。カブトガニの場合には、八坂川河口から高山川河口に至る広大な干潟では様々な場所から流出した幼生が到達可能であったことから、遺伝的には良好な環境条件にあったと推定される。また広域への幼生の分散を考えるのであれば相対的に規模の大きな河川の河口砂州や湾曲部内岸側砂州で孵化した幼生のほうが有利である。

一方、東部の江頭川や天村川河口から出現した幼生は幼生出現時の地域的分散が十分行われず、幼生が産卵地沖の干潟に着底するという一対一の対応関係が基本となったと考えられる。したがって、規模がそれほど小さくなく、潮流による移動範囲が狭い河川の河口沖に幼生の生息地が見出された場合には、近接した河川の河口砂州などに必ず産卵地が存在することも分かる。産卵地の復元を考えた場合、健全な干潟があるのであれば、分散の可能性が高いことから相対的に規模の大きな河川の河口砂州での産卵地が個体群の存続に有利と考えられる。

中小河川の河口にあつては出水時に砂州がフラッシュされにくいとの理由から河口閉塞防止のためにしばしば砂州掘削が行われ、また過去に三面張りの護岸整備が広範に行われてきているが、カブトガニ個体群の維持の面から見れば、産卵地となる河口砂州を除去し、護岸前面に存在した狭い砂州を除去することはその沖合にある干潟の消失と同等の効果を持つことになる。大河川においては潮流による移動が大きいのにに対し、中小河川においては幼生の分散度が低く、産卵地と幼生生息地とが一対一対応を示すからである。

従来、カブトガニの保護対策として産卵地造成を目的とした養浜が行われてきたが、本研究で明らかにしたように、産卵地から出現した幼生の干潟への到達可能性と分散度について十分検討した上で産卵地造成や河口砂州の保全、海岸構造物の計画を行う必要がある。

また、水生生物の生息地の保全計画作成に流れのシミュレーション手法を用いる場合には、その繁殖戦略に対応した検討条件の吟味が必要である。特に生残がもっとも高いリスクに瀕する分散時には、生活史や運動能力が大きく影響する。多くの水生無脊椎動物では、親は数万～数十万個体分の産卵や幼生放出を行う。また、浮遊幼生の形態は突起を持つなど浮遊に特化し、体のサイズも数mmと小さい。これによれば広範に分散できるが、1個体あたりの生残率は低いことになる。いわば分散時に生残率が一気に低下することを前提とした繁殖戦略である。カブトガニはこれらと異なり、1親あたりの産卵数が数千個とオーダーが格段に小さい。また、体サイズは全長6-8mmと大型である。このため幼生の生残率が高く、1個体あたりの分散成功の確率は高いはずであつて、そのため生息環境の物理的条件が最適化されている必要がある。すなわちカブトガニのような「少なく産まれて着実に育つ繁殖戦略」の生物は、生息条件の若干の悪化でも影響を受け易く、絶滅に向かうことが考えられる。このタイプの海岸生物の保全には上記のような検討を行ったうえでの十分な生息地保全が望まれる。

謝辞： 本研究にあたり、石川忠晴東京工業大学教授には生物の分散過程の議論において多くのご示唆をいただいた。日本データーサービス(株)松本英明氏には、数値計算のご指導をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 清野聡子・塩崎正孝・宇多高明・後藤 隆・黒木利幸・中村利行：空中写真による干潟の微地形判読と現地踏査を組み合わせたカブトガニ生息地・産卵地調査法，水工学論文集，第45巻，pp. 1021-1026，2001.
- 2) 清野聡子・宇多高明・前田耕作・山路和雄：守江湾におけるカブトガニ産卵場の地形特性と孵化幼生の分散観測，水工学論文集，第44巻，pp. 1209-1214，2000.
- 3) 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.
- 4) Seino S., T. Kiyomoto and Y. Tsuchiya(2000): Reconsideration on Morphology of Horseshoe Crab, Proc. of the 1st Int. Symposium on Aqua Bio-Mechanisms, ISABMEC 2000, pp. 61-64.
- 5) 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.

(2001. 10. 1受付)