

# 電波一超音波バイ型バイオテレメトリーシステムによる カブトガニの行動モニタリング

清野 聡子\* ・土屋 康文\*\* ・Ron O'Dor\*\*\* ・宇多 高明\*\*\*\*  
西原 繁朝\*\*\*\*\* ・釘宮 浩三\*\*\*\*\* ・渡辺 憲隆\*\*\*\*\*

## 1. ま え が き

近年, 各地の沿岸・汽水域では環境保全が大きな問題となっている。特に, 底生生物は環境改変のインパクトを受けやすいので, その保全策を作成するためには, その行動エリアをより正確に特定することが必要とされる。そのためには詳細でかつ長期間にわたる観測が必要であるが, 人力による観測には限界があり, 可能な限り自動化した観測システムが求められる。バイオテレメトリーは, 生物に発信器を装着して放し, 行動の軌跡を追跡する方法である。陸上生物に対しては, 大型の哺乳類, 鳥類を中心に電波発信器が使われており, 技術的にも実用段階にある。一方で, 水中生物に対しては, 調査機器が高価なこと, 生物の行動範囲が広く受信エリアを越えやすいこと, 水中の地形や人工構造物による信号の反射や遮蔽が発生しやすいことなどから, 技術的な進展が乏しい。また, 水中生物の行動調査には, データの回収率を上げるために大量に標識して放流し再捕する方法が水生生物を中心に一般的に用いられている。よって, 調査計画においては, 量的要素を重要視するため, 1 個体に対する標識コストを下げる傾向がある。その観点からすると, バイオテレメトリーは, 発信器のコストが高いために, 回収率が高い動物でなければ成果が上げにくい。

筆者らはカブトガニの生態に興味を持ち, 大分県守江湾の干潟において各種の調査を行ってきた。カブトガニ *Tachypleus tridentatus* は, 「生きている化石」として, また近年は絶滅危惧生物として興味深い生物である。発生学や血清学などの分野では知見が蓄積されているが, その高名に因らず, 野外生態については生活史も含め不明点が多い。それは, 従来の調査が, 海岸で観察可能な繁殖期や幼生期に限定的に行われていたためと考えられる。特に成体の繁殖期以外の行動は, 漁業者の情報による推定以上の知見がない。

沿岸・汽水域の環境保全を図るには, そこでの生態系保全が必要となる。その際, 構成種全種の生態調査は事実上不可能なので, 現地の環境を代表する種を選定する必要がある。カブトガニは, その生活史において沿岸の多様な環境を必要とする種であり(清野, 1999), かつ生息地においては漁業と沿岸環境保全の持続的両立のシンボルであり, 社会的意味も持つ(清野, 1998)。よって本種の生態研究は沿岸環境保全と結び付けることが出来る。

近年の沿岸域開発においては, 土木事業者も生態系保全への配慮を求められるが, その生息実態が不明なために生息環境全体を考慮した実効的な保全計画が立てられない状況にある。以上より, 本研究では, カブトガニの生活史のうち未解明である, 成体の生息域の時空間利用の解明を目的とし, 電波一超音波バイオテレメトリーを用いたカブトガニの行動の長期モニタリング手法を開発した。カブトガニは, バイオテレメトリー実験の対象としても他の水生生物に比べてメリットが大きい。すなわち, ①個体サイズが大きく, 発信器を装着しやすい, ②底生生物であり, 発信器の重量や形状が行動に影響しにくい, ③寿命が 10 年以上あり, 成体の死亡率も相対的に低いために, 実験期間中の生存が期待できる, といった理由である。今回導入した方法は, 国内では初めてのタイプの長期モニタリング法で, 現在試験段階ではあるが, 水中生物生態調査の中での意義とともに, 環境モニタリングの観点からも技術的可能性と問題点を検討した。

## 2. カブトガニの生態に関する既往の研究

カブトガニは, 図-1 の模式図に示すように, 生活史を通じて沿岸の異なる環境を利用する生物である(清野ら, 1999)。繁殖期の 6 月から 9 月に繁殖個体がペアとなって来浜する。産卵は砂浜で行われ, 砂浜の地下約 15 cm に卵塊が埋められる。50-60 日の卵発生期間を経て, 1 齢幼生は地下から地表面まで這い上がり外界に孵出する。波や流れなど環境の物理的な力を利用して適当な場所に分散してたどり着き, 捕食される危険も最小限に抑える必要がある。水中への出現のタイミングは, 大潮の夜間に

\* 正会員 農修 東京大学助手総合文化研究科広域システム科学科  
\*\* 総合ビデオサウンド  
\*\*\* Dr. Sci. Prof. Department of Biolog, Dalhousie University, CANADA  
\*\*\*\* 正会員 工博 建設省土木研究所河川部長  
\*\*\*\*\* 大分県杵築市役所 耕地水産課長  
\*\*\*\*\* 住吉浜開発(株)

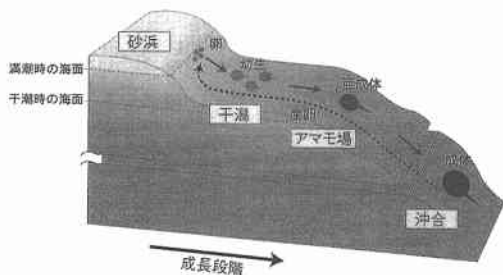


図-1 カブトガニの生活史と生息地

集中していること、また、時期は春よりも秋であり、潮が満ちて幼生の周囲に浸水が始まるのが引き金になることが、近年の調査によって明らかになってきた(前田, 1999)。幼生は干潟上で約10齢まで脱皮を繰り返して成長し、沖合に移動する(日野, 1999)。

図-1に示した各段階の生息環境に関し、いくつかの研究が進められてきた。まず、産卵場に関して、清野ら(1998a)は、守江湾内の小規模な防波堤周辺の水はけのよい砂浜が良好な産卵場となっていることを地形環境・波・流れとの関係から考察した。また土屋ら(1998)は、河川の河口に近い湾曲部内岸側砂州もまたカブトガニの産卵場となることを守江湾に注ぐ江頭川での現地調査から明らかにした。一方、幼生の生息地である干潟に関して、清野ら(1998b)は、守江湾の干潟の地形分類を行い、カブトガニ幼生の生息場が、河川流や波浪の強い作用を受けない安定した干潟であることを明らかにした。この点は、1997年の大規模洪水において、干潟への洪水流の作用後の地形測量からも確認された(宇多ら, 1999)。しかしながら、カブトガニの生活史のうち最長時間を有する成体になってからの生態は、生息場所、行動パターンなどは不明のままである。特に繁殖個体は、産卵のため大潮時の夜間に多く来浜するが、産卵以外の時間に沿岸で滞留していると考えられるものの、実際の行動は不明である。また、越冬を海底の堆積物中で行うと予想されているが、それも確認されていない。成体の生態調査の方法としては、漁網による混獲の情報からの推定しかなく、内湾では潜水調査も透明度が不良のため困難である。調査法の改善を図るため Seino et al. (1995) は、バイオテレメトリーを導入して、本種の水中での追跡の可能性を検討した。以下では、これらの点について Seino et al. (1995) のデータをも含んで検討を加える。

### 3. 第1回現地観測(追尾形式)

調査地の守江湾(図-2)は別府湾内にあり、さらに湾口部で砂嘴が伸長しているため、閉鎖性水域となっている。この地の個体群は、周辺で人工的な放流事業などが

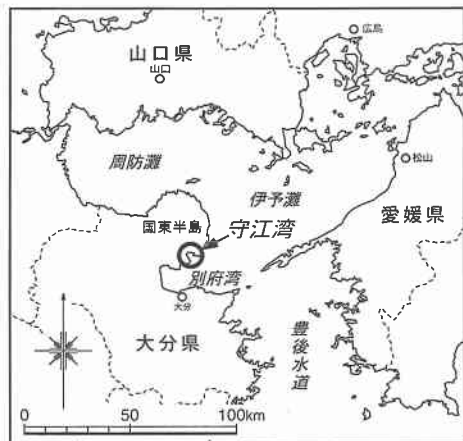


図-2 観測地の大分県守江湾

行われていないため、国内での数少ない野生個体群と考えられている。

実験用として漁網にかかった成体の提供を受けた。成体の雌雄各1尾に対し、使い捨て型超音波発信器(Vevnco V16T-5L)の装着実験を行った。本種はその形態から海底を匍匐していると考えられるため、信号の遮蔽を受けない背甲に発信器を装着することが適当と考えた。その際、発信器は円筒形であり背甲は湾曲しているために、接着部の隙間を埋める必要が生じた。また、成体調査による影響を最小化するため、電池が切れた後に発信器が自然に脱落するような装着法を考案した(写真-1)。このため、背甲に強力接着剤でダイモテープを貼り、その下に銅線を通し、さらに発信器の周囲に発泡スチロールのベッドを作って安定性を高めた。背甲の中央は隆起しているため、発信器は正中線と背甲隆起の間の左側の湾入部に装着した。このため、左右のバランスをとるよう右側にバランサーを付けた。

実験は、繁殖個体が来浜する期間の大潮時の1994年9月3日とした。放流は、湾奥部の産卵地首捻防波堤(地点A)でペアになっていた雌雄2尾を用いて行い、放流個体のうち雄1尾には回収のために十分な長さのテグスを装着した。信号の検知は指向性ハイドロフォン(V-10)により、信号が来る方向と距離はシグナルの強度で判断し、ボートで探索しながら追跡を行った。

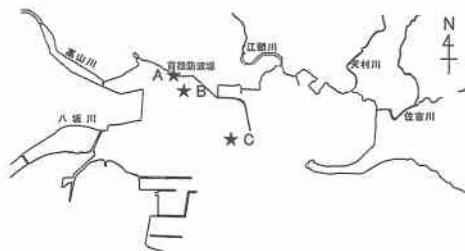
追跡の結果、放流後に雄は湾奥部から直線的に湾筋にそって湾口部(地点C)に進み、そこで移動を停止した(図-3)。また、雌は湾奥部(地点B)に滞留した。さらに実験終了13時間後に雌が放流した産卵地に回帰したのが発見され、放流時の雄と異なる個体とペアを組んでいた。雷雨のため短時間で実験を終了したが、以下が明らかとなった。①カブトガニは発信器を装着しても移動



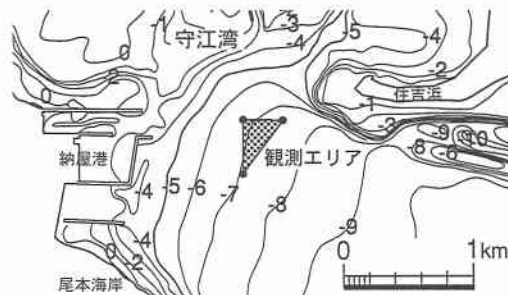
写真一 発信器を装着したカブトガニ



写真二 防波堤上に設置した受信機 (待ち受け型 I)



図三 追尾型による観測結果 (1996年9月3日)



図四 電波-超音波パイ型バイオテレメトリーシステムによる観測エリア

などの行動に大きな支障はない。②内湾の浅海部では、超音波信号の反射が激しく、信号の強度による検知に熟練を要する。③1例ではあるが雌雄で放流後の行動の差異が見られた。④同じ個体が産卵地に戻る場合がある。その際、当初のペアが解消しても、次の満潮時には異なる個体とペアを形成する。

#### 4. 第2回現地観測 (待ち受け形式 I)

同じ守江湾において1996年に設定を改良した実験を行った。追尾による動物の逃避行動を誘発しないための方法として、待ち受け型の無指向性ハイドロフォン (VR-65) を導入した。湾内に突出した灘手漁港の防波堤の先端部が湾中央部に達しているため、そこに受信システム (VR-60) を設置し (写真二)、9月前半の15日間、モニタリングを行った。これにより半径700m以内の信号発信の有無と時刻、および個体番号が記録できた。それにより、カブトガニが干潟周辺の簀笥付近に停滞し、満潮時に移動する個体の行動が確認された。しかしこの方法では、動物の挙動についての時空間的情報が特定しにくい状態にあった。

#### 5. 第3回現地観測 (待ち受け式 II)

観測では、守江湾に生息するカブトガニの成体5個体に標識を付け、越冬期間にあたる1997年9月から1998

年3月の半年間、継続観測を実施した。写真一のように前体部の背甲に小型の超音波発信器 (V16T-5L) を装着し、生息地の湾内に順次放流した。実験に使用した発信器は使い捨てタイプのもので、電池寿命2~5箇月、水中重量18g、半径15mm、長さ10cmの円筒形である。現時点の技術では、生物の運動に対する影響を最小限にしたものである。超音波信号は、50.0~76.8kHzである。動物からの信号から、位置、個体番号、水温の時系列データが得られる。使用した電波-超音波パイ型テレメトリーシステムは、超音波発信器を装着した動物と、観測者がいる陸上間にパイの中継基地を置く方法である。カブトガニからの超音波信号を、湾内に係留した3つのパイが順次受信し、電波信号に変換して陸上局に伝送する。陸上局のコンピュータが、信号到達時刻の時間差から三角測量の原理を応用して湾内の2次元的位置を特定する方法をとっている。図四にはパイの位置と観測域を示す。観測エリアは、カブトガニが湾奥で繁殖を行い、それ以外の時期には湾外でも漁網にかかることから、湾内外の季節移動を行うことを前提として設置場所を考えた。その時期に必ず通過すると予測される湾口部に、繁殖期以降に観測網を敷き、湾外への移動に関する情報を得た。3つのパイで、3辺が600m、540m、420mの



写真-3 観測用プイの設置作業 (待ち受け型 II)

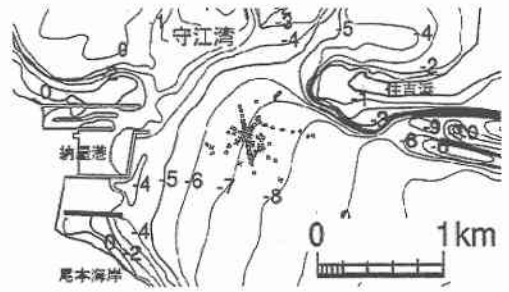


図-5 観測結果 (1999年11月15日)

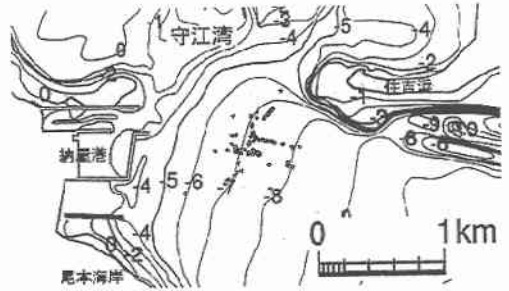


図-6 観測結果 (1999年11月16日)



写真-4 洋上に設置した観測プイ (待ち受け型 II)

三角形のエリアを湾口部に位置する住吉浜砂嘴の沖に設置し、その周辺を通過する標識個体の追跡を行った(写真-3, 写真-4)。技術的に中継局のプイ間の距離が約500 m と制限されたため、実験水域の空間スケールからすれば小さいエリアであるが、良好な受信結果を得た。

観測結果の一例を図-5 および図-6 に示す。図-5 は1997年11月15日の受信データをプロットしたものである。放流個体5尾のうち、3尾からの信号が受信された。個体により移動の軌跡が異なることが示された。同様に図-6 に示すように、翌日の11月16日には、さらに1尾からの信号が受信され、4個体の軌跡が捉えられた。

前述のように、水中生物を対象としたバイオテレメトリー実験では、放流個体からの信号の回収率が100%期待出来ないことが多く、調査のコストパフォーマンスが問題となる。しかし本研究では、放流した5個体全てが湾口部の受信エリアを一度は通過し、図-6 のように個体からの信号捕捉率が80% (5個体中4個体) にも達した。

また、湾口部の砂嘴沖の斜面に留まり、水深7 m から8 m の間を1箇月以上往復する個体が確認された。また、エリア外に出ていた個体が、再び一時的にエリアを通過する行動も観測された。例数は少ないながらも、放流個体全てが一定の観測エリアを通過したことから、当該調査水域のカブトガニは、繁殖期が終わった後に湾口部を通過、もしくは滞在することが考えられる。また、観測エリア内に継続的に滞留せず、頻繁に出入りする個体も観測されたことから、「冬期には越冬のため冬眠的な生活を送る」と従来言われてきたカブトガニの成体の生態についての推測に再考を促すこととなった。またカブトガニ成体が留まる場所は、深浅図によれば湾の入口の湾入部であること、海岸線に沿って湾奥へと向う沿岸流(砕波起源)が砂嘴の先端から剝離し、沖向きの流れとなる位置に相当する。このような場所は、恒常的な海水交換(生物に対しては ventilation)が行われている場所であることも注目される。

本研究では、比較的大型の底生生物であるカブトガニを実験対象としたが、他種でもその体サイズと遊泳力が適せばこの方法が応用可能である。また、観測エリアの範囲はプイを増設すれば拡大できることから、広域的なモニタリング手法として有効である。

## 6. 水中生物に対するバイオテレメトリーの技術的可能性と問題点

筆者らは、カプトガニのバイオテレメトリー実験を同じ調査地で3つの方法で行ってきた。動物に装着する発信器は、いずれの方法においても基本的に同じ方式のもので、超音波信号を発生し、内部電池を持つ使い捨てタイプである。

まず、追尾型は、指向性ハイドロフォンにより、放射したカプトガニからの信号強度から発信地点を特定する方法を用いた。この方法では、観測者が小型船舶に乗船して追尾するために、その騒音により「追われる者は逃げる」可能性が否めない。また、常に洋上で、人間が動物からの信号を拾い続けなければならないため、追尾は時間的な制限があり、十分な量のデータが得られない。以上の理由により、野外生態調査法としては未熟といわざるを得ない。

待ち受け型Ⅰでは、動物の逃避行動を誘発しないように無指向性ハイドロフォンを導入した。しかし、この方法では動物の挙動についての時空間的情報の特定が困難であった。また、信号の反射が激しいので、実験に用意できた発信器の信号強度の検討が必要と考えられた。すなわち、オーダーメイドの発信器は浮魚を対象としているため、内湾や浅海域では強度が強すぎる。また、調査地の深度や海底地形に適合して強度が調整できれば理想的である。

そこで、待ち受け型Ⅱとして、電波一超音波プイ型バイオテレメトリーシステムを導入した。これにより、少なくとも数箇月のオーダーで連続観測が可能となった。その結果、解決すべき問題は多いが、カプトガニ成体の行動の長期モニタリングに成功しつつある。

これらの結果から、以下が検討事項となった。①水中生物の追跡方法の効率化と長期化、②内湾など沿岸環境に適合したシステム開発の必要性、③浅海のベントスで底質中に潜行する行動をもつ種への適用、④調査機器の低価格化、⑤沿岸環境モニタリングと動物行動学的知見

の総合化、などである。新規開発だけでなく、現存の技術の応用も含め今後の技術的發展が望まれる。

謝辞：カプトガニのバイオテレメトリーによる行動研究は、東京大学・ダルハウジー大学（カナダ）・大分県杵築市の共同研究として過去3回行ってきた。特に、電波一超音波プイ型システムの導入にあたっては、カプトガニ生息地保全計画作成を目的として、大分県土木建築部河川課の深いご理解とご援助を得た。実験にあたり杵築市、杵築漁業協同組合のご協力とご援助を受けた。図版作成にあたって三波俊郎氏、行田悦資氏、清本隆司氏のご協力を得た。ここに記して謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 宇多高明・清野聡子・真間修一・山田伸雄 (1999): 台風 9719 号に伴う洪水による八坂川河口沖干潟の地形変化の現地観測, 水工学論文集, Vol. 43, pp. 437-442.
- 清野聡子 (1998): 水産学における「価値」問題—カプトガニを例として—, 月刊海洋, Vol. 30, No. 4, pp. 238-242.
- 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 (1998 a): カプトガニは何故その岸辺に産卵するのか? —産卵地の地形・堆積物・波・流れの特性—, 海岸工学論文集, Vol. 45, pp. 1091-1095.
- 清野聡子・宇多高明・真間修一・三波俊郎・芹沢真澄・古池 剛・前田耕作・日野明日香 (1998 b): 絶滅危惧生物カプ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, Vol. 45, pp. 1096-1100.
- 清野聡子・宇多高明・大分県 (1999): カプトガニの棲む干潟—八坂川河川改修と環境保全—, 大分県, p. 57.
- 土屋康文・清野聡子・宇多高明・釘宮浩三・軸丸恒宏・前田耕作 (1998): カプトガニの産卵地に配慮した河川改修, 第4回河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, pp. 171-176.
- 日野明日香 (1999): カプトガニ *Tachypleus tridentatus* の幼生の保全生物学的研究 (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).
- 前田耕作 (1999): カプトガニ *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).
- Seino, S., O'Dor, T., Hamada, T., Tsuchiya, Y., Tsuchiya, M., Nishihara, S. and Kawahara, M. (1995): Horseshoe Crab Spawning Patterns in Japan Observed by Acoustic Telemetry, BIOTELEMETRY XIII, pp. 205-208.