バイオリギングによる 動物目線の海洋生物の行動観察

荒井修亮 Nobuaki Arai 京都大学フィールド科学教育研究センター, 日本バイオリギング研究会

1 バイオリギング

本誌の読者には聞き慣れない用語だと思うが、「バイオリギング」は、バイオ(生き物) + ログギング(ログをとる)を組み合わせた言葉である。英語では bio-logging または biologging と表記されるが、この言葉は実は日本の研究者が作り出した和製英語である。2003 年、内藤靖彦博士(国立極地研究所名誉教授)が中心となって開催された国際シンポジウム(International Bio-logging Science Symposium)⁽¹⁾でバイオリギングを用いた海洋生物の行動測定に関する研究成果の報告が行われ、この言葉が学術用語として定着するきっかけとなった。同シンポジウムはその後、英国、米国、オーストラリアで開催され、第5回が本年フランスで開催予定である。日本においては、内藤靖彦博士及び坂本亘博士(京都大学名誉教授)が中心となって2004年に日本バイオリギング研究会が組織され、現在約150名の会員が所属している。ちなみに Google Scholar で biologging をキーワードとして検索すると約21,600件がヒットする(2013年2月16日現在)。

生物の行動能力、行動範囲は、我々が想像する以上に高く、広く、人間の目視観察の範囲を大きく逸脱するため、長期間の観察は困難である。特に海洋生物の場合は、一部の例外を除いて海の中を泳ぎ回っているため、直接観察することがいかに困難であるかは容易に理解できよう。このような「見えない」海洋生物(海だけに限らないので、本当は水圏生物であるが)を直接観察する強力な手法がバイオリギングである。バイオリギングは「見えない」ものを「観る」技術である。

バイオリギングには、超小形のデータロガー(アーカイバルタグともいう)を海洋生物に装着して様々なデータを内部のメモリに記録し、データロガーを回収して記録されたデータを読み出す手法と、電波や超音波発信機

を海洋生物に装着して遠隔的に情報をリアルタイムで取得するいわゆるテレメトリー手法とがある。「バイオリギング」といった場合、狭義には前者を指す場合が多いが、ここではテレメトリー手法も「バイオリギング」として扱う。なぜならば、研究者としてはいずれこの両者が融合することを希望するからである。

2 マイクロデータロガー開発をリードする日本

1970年代、マイクロデータロガーは、水密容器に格納された時計仕掛けで巻き取られる記録計にデータを書き込むアナログ式のものから開発が始まった。簡単に分かることであるが、水密容器にかかる圧力は海面から10m潜るごとに1気圧増えていく。海洋で使用する測器は全てこの水圧に耐えることが求められる。さて、このアナログ式のデータロガーであるが、内藤靖彦博士らが中心となって1980年代後半には全長10cmを下回る超小形化に成功、南極においてアザラシ類、ペンギン類並びにウミガメ類などの潜水行動の研究に活用された。これらの海洋生物は子育てや産卵などのために、同じ場所、しかも陸域に戻ってくる習性があるので、装着したデータロガーを再び回収することが容易であるため、多くの研究が行われている。

1990年代に入るとデータロガーがデジタル化され、より小形化、センサの多様化が図られるようになった。特に近年は、動物の行動を詳細に記録することができ、加速度ロガーや地磁気ロガーなどが実用化され、水中における様々な行動の詳細が明らかになりつつある。また、画像や映像を記録するデータロガーも小形化されることによって、生物の目線によるイメージデータが得られるようになってきている(図1)。

データロガーによって、装着した生物の生理・活動情

図1 ビデオロガー、GPS アルゴス送信機などを切り離し装置の浮力材とともに装着したアオウミガメ
(撮影：奥山隼一)

図2 マイクロデータロガーとタイマー式ロガー切り離し装置を装着したメコンオオナマズ。タイ国バヤオ県メブン湖にて

報とその周辺の環境情報とを動物の目線で得ることができる。しかし、その動物がどこにいるのかという位置情報については、それらのデータから正確に求めることは難しい。最近では全地球測位システム（GPS）を利用した GPS ロガーが開発されて、高い精度での位置情報も取得可能であるが、水中では GPS 衛星からの信号が受信できないため、海洋生物の位置情報測定への利用はウミガメ類や海産哺乳動物など、呼吸時に水面に浮上する生物に限られている。水圧の問題とともに、海中で電波が利用できないということも海洋での測器開発の大きな障壁となっている。

データロガーは、得られたデータは全て内蔵のメモリに記憶されているので、データロガーを回収しなければ、全くデータを得ることができない。海洋生物の多くは、一旦放流されるとそれを再び捕獲することは大変困難である。このためデータロガーを用いた研究は、前述のとおり、営巣中の鳥類やアザラシ類、産卵期間中のウミガメ類を対象に行われてきた。唯一最大の欠点であるデータロガー回収の問題に対しては、タイマー式の回収装置によって設定した時間後にロガーを対象生物から切り離して浮上させ、回収する手法も開発されているが、装置自体がまだ大きいことと浮上させるための浮力材がどうしてもロガー本体よりも大きくなってしまふことなどから、装着できる生物は限られている（図2）。

マイクロデータロガーは、回収されたロガーから読み出される大容量・多項目の詳細なデータから対象生物の生息環境とその環境に対応した詳細な行動を再現することが可能である。しかし、個々のデータが得られた位置情報を得ることは、ウミガメ類や海産哺乳動物など呼吸のために水面に浮上した場合でない限りは困難である。このため、研究者は加速度・地磁気・速度データから近似的に移動経路を求める工夫をしているが、角速度を求められないために厳密な経路推定は困難である。

3 バイオテレメトリーを用いた位置情報の取得

対象生物の位置情報を測定する手法として使われるのが発信機を用いたバイオテレメトリーである。バイオテレメトリーでは、電波または超音波発信機を対象生物に装着し、その信号を受信することで追跡を行う。陸域や淡水域においては、電波発信機が用いられるが、電磁波の吸収・散乱が激しい海中では電波の代わりに超音波を用いる。また、地球的規模で移動する動物の場合は人工衛星を利用した発信機を用いる。

電波テレメトリーでは、鳥獣類のような陸域生物を主な対象種として、発信周波数が 30 ～ 300 MHz の発信機を使用する。受信には指向性の八木アンテナを用いて対象生物の位置を 2 か所以上の地点から求めて方位を推定する。動物追跡用の発信機は小形化できるので、昆虫にも装着可能な超小形の電波発信機によってミツバチの生活圏⁽²⁾を解析した研究もある。

電波が使えない海中に生息する海洋生物には超音波発信機によるバイオテレメトリーを用いる。発信周波数が 50 ～ 200 kHz の超音波発信機を装着した対象生物を追跡する方法としては、船舶に搭載した受信機による追跡（Active tracking）と水中にあらかじめ設置した設置型超音波受信機による追跡（Passive tracking）の 2 種類がある。前者の場合は、船上から水中に垂下したハイドロホンで発信機からの信号を調査員がモニタしながら対象生物を船舶で追跡する。後者の場合は、設置型超音波受信機のメモリに個体情報と受信時刻とが蓄積されるので、そのデータを定期的にダウンロードすることで、受信範囲内に到来した対象生物の情報を得ることができる。現在、最も一般的に使用されている AMRIX System Inc.（カナダ）製の超音波発信機は、69 kHz の超音波パルスによって ID コードや各種のデータ（水深、水温、加速度）をそれぞれの発信機に付すことが可

能である (<http://www.vemco.com/index.php>)。

設置型受信機による追跡では、受信機の受信範囲（半径約 500 m 以内）に発信機を装着した海洋生物が入った時刻と ID 及びデータを記録するため、その位置情報は半径数百 m 以内であるとしか分からない。それでも大海原の中でのおよその位置として貴重な情報であり、大規模な回遊を行う海洋生物の追跡ゲートとしての十分機能する⁽³⁾。近年、設置型超音波受信機の時刻同期を同期タグ（発信機）で行うことで、3 台以上の受信機で同時に信号を受信し、その到達時間差から位置を計測する手法が考案され、実用化が図られている⁽⁴⁾。我々の研究室においても、この位置測位システム VR2W positioning system (VPS) を使った実験を国内外で行っており、メバル、メコンオオナマズ、ズワイガニなどの行動を数 m から数十 m の精度で追跡できるなどの結果が得られている。更に我々の研究室では複数台のステレオ式自動水中音録音装置を用いて、超音波発信機の信号帯域である 60 ～ 85 kHz を低周波帯域（0 ～ 24 kHz）に変換して連続録音することで、数 cm 程度のより詳細な海洋生物の位置情報計測技術を開発している⁽⁵⁾。この装置の目的の一つは、養殖生けす内において群れをなして泳ぐ個々の魚の位置を正確に捉えることであり、予備的な実験ではクロマグロ当歳魚の遊泳行動を計測することに成功した。超音波を用いた水中での位置計測では、ハイドロホンに到着する超音波信号の到達時間差をいかに正確に計測できるかがポイントであるが、GPS が使えない水中での受信機間の時刻同期はなかなか困難である。

トランスポンダ方式による水中での位置測定⁽⁶⁾は古くから行われてきたが、トランスポンダの小形化や探査範囲の制限などから、海洋生物の追跡では現在は余り使用されることはない。しかし、技術開発の可能性としては、考慮すべき有効な手法と考えられる。

鳥類の渡りや、大形鯨類、ウミガメ類の大回遊などに代表される地球規模での移動を追跡するには、人工衛星を利用したアルゴスシステムが用いられる。アルゴスシステムは 1970 年代にフランス国立宇宙研究センター (CNES)、米国海洋大気局 (NOAA) 及び米国航空宇宙局 (NASA) によって開発された。2002 年からは日本の宇宙航空研究開発機構 (JAXA) も運用に加わっている。アルゴスシステムによる測位の原理は、高度約 850 km を周回する軌道衛星によって受信される地球局 (PTT) からの信号のドップラー効果を利用する。このため、位置の計算等は人工衛星が行うので、地球局は一定の電波信号だけを発信すれば良く、動物の追跡に適し

ている。しかし、原理的に位置測定の精度は余り良くないため、海洋生物を保護するための行動圏の推定などに用いる場合には注意が必要である。アルゴス送信機と GPS とを組み合わせた送信機をウミガメに装着してその行動圏を評価した Yasuda & Arai (2005)⁽⁷⁾によれば、行動圏の広さが 2 万倍から 5 万倍も異なったことが報告されている。このため、近年ではアルゴス送信機に GPS 受信機を組み合わせた GPS-アルゴス送信機が使用されることが多い。

4 マイクロデータロガーによるアオウミガメの潜水行動解析

タイ国のアンダマン海に浮かぶシミラン諸島は世界的なダイビングスポットである。シミランとはマレー語で「9」を意味する言葉で、この海域には九つの島々が点在する。このシミラン諸島の最南端に位置する小さな島、フーヨン島がアオウミガメの産卵地として有名で、タイ国海軍と海洋沿岸資源局の研究機関がアオウミガメの観察と産卵域の保護に当たっており、保護・育成した稚ガメを定期的に放流している（図 3）。アオウミガメは 1 シーズンの繁殖期間中、上陸・産卵を 10 ～ 15 日間隔で繰り返す。このため、産卵したアオウミガメにマイクロデータロガーを装着すれば、次の上陸・産卵時にロガーを装着した個体を再び捕獲することが可能であるため、ロガーを高い確率で回収できる。このようにロガーの装着・再捕獲を行うことで、産卵と産卵の期間（インタネスティング）にどのような行動をしていたのかを明らかにできる。我々は、タイ国海軍及びプーケット海洋生物学センターの協力の下、フーヨン島において、3 月（乾季）、6 月（乾季から雨季への移行期）、8 月（雨季）に上陸・産卵したアオウミガメ 3 個体の甲羅に深度データロガー（リトルレオナルド社、日本）を装着した。

図 3 シミラン諸島最南端のフーヨン島でアオウミガメの稚ガメを放流するために集まったタイ国海軍関係者と研究者たち

図4 深度データロガーで取得したアオウミガメのインタネスティング期間中における深度の時系列図

(安田十也 (2006); 恒星社厚生閣 水産学シリーズ 152「テレメトリー—水生動物の行動と漁具の運動解析」から転載)

その結果を図4に示す⁽⁸⁾。図から乾季と雨季とでは、インタネスティングにおける滞在深度が異なっていることが分かる。インタネスティングにおいて、アオウミガメは次回の産卵に備えてなるべくエネルギーを消費しないように休息しているといわれている⁽⁸⁾。海況が穏やかである乾季の個体1は水深0～40m、海況が悪い雨季の個体3は0～90mの水深帯を利用している。アオウミガメは肺呼吸を行うため、海底で休息中でも呼吸のために浮上と潜水を繰り返す必要があり、なるべくならば浅いところで休息の方がエネルギー的には有利である。それにもかかわらず、海況の悪い雨季においては、滞在水深を深くせざるを得ないわけである。

5 超音波バイオテレメトリーによるメバルの回帰行動

関西国際空港は、環境の保全に配慮した本格的な海上空港として1994年に大阪湾の泉州沖に開港した。埋め立てによって造成された空港島の護岸は一部を除いて石積みの緩傾斜護岸となっており、そこに海藻類を育成することで、多様な生物の生息場所となっている。更に空港島の周辺数百mの海域は大阪府漁業調整規則第39条によって水産生物の採捕が禁止されていることから、海洋生物の育成場として機能している。本海域に生息するメバルの行動を超音波バイオテレメトリーで追跡した。なお、メバルの分類については近年、DNA解析から3種に分類されることになったが、本稿では調査当時の表記としてメバルを用いる。

図5 メバルの放流追跡実験を行った海域。A, B, C地点で採捕したメバルに超音波発信機を装着し、放流地点R1とR2で放流して追跡した

(三田村啓理 (2006); 恒星社厚生閣 水産学シリーズ 152「テレメトリー—水生動物の行動と漁具の運動解析」から転載)

主に北太平洋に生息するメバル属 (*Sebastes* sp.) は生息場所に強く固執する性質があることが知られており、Yellow rockfish (*Sebastes flavidu*) では22.5 km離れた場所へ移送放流しても元の生息場所へ戻ることが分かっている⁽⁹⁾。我が国の周辺海域に生息するメバル類についても、このような性質があるのかどうかを超音波バイオテレメトリーによって確認した。

空港島東護岸の3か所 (A, B, C) (図5)⁽¹⁰⁾ で25個体のメバルを捕獲し、対岸の田尻漁業協同組合の水槽で4～5日間飼養した後に、麻酔下で外科的に超音波コード化発信機 (V8SC-6L, Vemco 社, 現在 AMRIX System Inc., カナダ) を腹腔内に装着した。発信機装着の影響がないことを少なくとも24時間の観察で確認した後に捕獲場所から最大で約4.5 km離れた2地点 (R1, R2) に放流した。放流後は、調査船に搭載した追跡型受信機 (VR28, Vemco 社) により追跡した。

空港島護岸 (R1) で放流されたメバル20個体は、放流直後から空港島東護岸に沿って移動を開始した。放流から4時間が経過すると一斉にそれぞれの捕獲場所の方向へ移動を開始した。放流から数日の間に、20個体のうち14個体がそれぞれの捕獲場所に戻った。このうち、空港島から約4.5 km離れた対岸の地点 (R2) で放流された5個体は、放流から11日以内に3個体がそれぞれの捕獲場所に回帰した。回帰率は地点Aで100% (3個体中3個体)、地点Bで60% (10個体中6個体)、地点Cで67% (12個体中8個体) となった。これら

の結果からメバルはほかのメバル属魚類と同様に、移送放流された場合、生息場所に回帰することが明らかとなった。それではメバルはどのようにして自分の生息場所を見付けることができたのだろうか？ 考えられるのは、視覚、嗅覚、その他の感覚機能である。このうち、視覚については舞鶴湾において視覚遮蔽実験を、嗅覚については空港護岸において嗅覚妨害実験を超音波バイオテレメトリーで行った。その結果、視覚を遮蔽した個体と遮蔽していない個体では生息場所へ戻る時間、頻度に差はなかったこと、ワセリンを鼻孔に詰めて放流した個体は放流地点から捕獲した地点へ戻る時間が有意に長かった⁽¹¹⁾。

6 最後に

マスコミでも動物目線での研究ということで取り上げられる機会が多くなってきたバイオリギングであり、3月に封切られた「ダイナソー・プロジェクト」という英国の映画では、映画史上初、恐竜目線というキャッチフレーズで恐竜にビデオカメラを取り付けるという設定である。確かに動物目線の映像には多くの驚く内容が含まれる。隔靴搔痒なこれまでのデータよりも映像は百聞は一見しかずだ。しかし、得られた映像データから科学的に意味のある知見に抽象化していくには、まだまだその解析手法がないのが現状である。画像データも含めて、バイオリギングで得られるデータは日々大きく、多様化しており、動物生態学におけるこのビッグデータをいかに要領良く的確に解析していけるかが、これからの課題となっている。

■ 文献

- (1) Y. Naito, ed, "Bio-logging science," Proc. Int. Symp. Bio-logging Science, NIPR, Tokyo, March 2003.
- (2) M. Hangen, M. Wikelski, and W. Kissling, "Space use of bumblebees (*Bombus* spp.) revealed by radio-tracking," PLoS ONE, vol.6, no.5, e19997, May 2011.
- (3) D.W. Welch, G.W. Boehlert, and B.R. Ward, "POST-the Pacific Ocean salmon tracking project," Oceanologica Acta, vol.25, no.5, pp.243-253, Sept.-Oct. 2003.
- (4) M. Espinoza, T.J. Farrugia, D.M. Webber, F. Smith, and C.G. Lowe, "Testing a new acoustic telemetry technique to quantify long-term, fine-scale movements of aquatic animals," Fish. Res., vol.108, no.2-3, pp.364-371, March 2011.
- (5) 新家富雄, 鴨志田隆, 市川光太郎, 三田村啓理, 荒井修亮, "魚類用高精度音響測位システムの開発," 信学技報, vol.111, no.191, pp.11-16, 2011.
- (6) T. Kuroki, K. Kawaguchi, W. Sakamoto, and

H. Watanabe, "A new telemetric apparatus to detect fish location and its surrounding water temperature," Bull. Jap. Soc. Sci. Fish., vol.27, no.10, pp.964-972, 1971.

- (7) T. Yasuda and N. Arai, "Fine-scale tracking of marine turtles using GPS-Argos PTTs," Zool. Sci., vol.22, pp.547-553, 2005.
- (8) S. Fossette, G. Schofield, M.K. S. Lilley, A.C. Gleiss, and G.C. Hays, "Acceleration data reveal the energy management strategy of a marine ectotherm during reproduction," Func. Ecol., vol.6, no.2, pp.324-333, April 2012.
- (9) H.R. Carlson and R.E. Haight, "Evidence for a home site and homing of adult yellowtail rockfish, *Sebastes flavidus*," J. Fish. Res. Board Can., vol.29, no.7, pp.1011-1014, July 1971.
- (10) 三田村啓理, "メバルの回帰・固執行動," テレメトリー — 水生動物の行動と漁具の運動解析, 水産学シリーズ, 山本勝太郎, 山根 猛, 光永 靖 (編), 日本水産学会 (監修), vol.152, pp.9-21, 恒星社厚生閣, 2006.
- (11) H. Mitamura, N. Arai, W. Sakamoto, Y. Mitsunaga, H. Tanaka, Y. Mukai, K. Nakamura, M. Sasaki, and Y. Yoneda, "Role of olfaction and vision in homing behaviour of black rock fish *Sebastes inermis*," J. Exp. Mar. Biol. Ecol., vol.322, no.2, pp.123-134, Sept. 2005.

荒井修亮

昭 32 年 1 月 30 日 生 ま れ 。 京 都 大 学 フィールド科学教育研究センター・農学研究科・教授。専門は海洋生物環境学。バイオテレメトリー、マイクロデータロガーによる水圏の生物の行動測定と解析。対象生物は、魚類、ウミガメ類、ジュゴンなど。日本バイオリギング研究会会長。著書：バイオリギング最新科学で解明する動物生態学 (京都通信社)、フィールド情報学入門 (共立出版) など。