

バイオリギングで探る海洋動物の行動・生態

国立極地研究所・総合研究大学院大学複合科学研究科 高橋 晃周

1. バイオリギングとは何か？

動物の行動や生態を研究するためには、その動物をよく観察しなければならない。当たり前のことであるが、野生動物を観察した経験が少しでもある人ならば、それがいかに難しいことか想像できると思う。例えば、公園の街路樹で暮らすシジュウカラ。木の枝にとまったところを数十秒見ることはできても、木から木へ次々と移動していく個体を追いかけて観察し続けるのは簡単ではない。まして、海を広く動き回る海洋動物を観察するのは難しい。そのためか、動物の行動についての研究は、屋内でじっくり観察できる陸上動物で先行して進んできた。高校生物の教科書(数研出版)を開いてみると、動物の行動についての章には、イトヨの求愛行動、ミツバチの8の字ダンス、ハイイロガンのひなの刷り込み行動などの、室内もしくは半野外環境下での古典的な研究が取り上げられているが、野外における最近の研究についての記述はほとんどない。

野外で自由に動き回る動物をどうやって連続的に観察するか？その必要にせまられて開発された新しい計測手法がバイオリギングである。バイオリギングとは、バイオ(生物)とロギング(記録をとる)という言葉を組み合わせて、日本の研究者が提案した学術用語である。動物に小型の記録計を取り付け、動物の行動・生理・生態などに関する情報を取得する技術のことをいう。人が観察して記録を取るのが難しいならば、動物自身に記録を取ってもらおうという着想である。この手法は、1970年代に南極のアザラシやペンギンの研究からスタートした。水中での観察が難しいアザラシやペンギンが、どれくらいの深さまで、どれだけの時間潜水しているのだろうと疑問に思った研究者が、深度計を自作したのが始まりである。現在ではいろいろな記録計が、世界のさまざまな海域で魚類、ウミガメ類、海鳥類、海生哺乳類などの研究に使われている¹⁾。本稿では、バイオリギングで明らかになってきた海洋動物(特にアザラシ、海鳥)の行動・生態について紹介したい。

2. 研究の手法

バイオリギングによる研究の成果を紹介する前に、まず手法について簡単に説明しておこう。バイオリギングによる研究では、動物に装置を取り付け、それを後から回収することでデータを得るため、動物を2度捕まえる必要がある。海鳥は、卵を温めたりひなを育てたりする繁殖期間中、えさを取るために海にあるえさ場と巣の間の移動を何度も繰り返す。したがって、親鳥が海へ出て行く直前に記録計を装着し、巣に戻って来たところで回収することが可能で、バイオリギング手法を使ううえで非常に好都合である。アザラシも、子育てや換毛のために決まった上陸場に戻ってくる種が多く、海鳥と同じやり方が使える。

バイオリギングを使用する際の注意点は、動物の自然な行動を阻害しないために、十分に小型の記録計を用いることである。バイオリギングの歴史は装置の小型化との闘いであるともいえる。国立極地研究所を中心とした日本の研究チームでは、記録計の小型化に過去30年近くにわたって取り組んで来た。耐圧のケースに入った記録計は、スペースを最大限活用するために、データ記録用のメモリ、センサー、電池などがびっしりと詰めこまれている(図1)。高度な小型電子技術を生かした日本のバイオリギング技術の評価は高く、世界各国の研究者たちが日本製の記録計を用いている。

バイオリギングで得られる情報は、記録計にどんなセンサーを搭載するかによって変わる。移動に関しては、GPS(全地球測位システム)で動物の位置が、圧力センサーで潜水深度が計測できる。また、加速



図1 耐圧ケース(上)に入った加速度記録計(下)

度センサーで動物の体の振動が記録でき、体の振動パターンから、歩行、飛翔、ひれの動きなどの行動を読み取ることができる。プロペラの回転数を記録すれば、

遊泳速度が計測できる。また、生理状態に関しては、温度センサーで体温を、体の電位計測で心拍数を記録できる。カメラの映像から、動物周辺の環境の情報を得ることもできる。小型で電力消費の少ないセンサーの登場が、バイオリギングの発展に大きく貢献している。

3. 「深海」まで潜水する動物たち

バイオリギングの成果として、アザラシやペンギンといった動物たちが、どれくらいの深さまで、どのくらいの時間潜水しているのかを明らかにしたことがあげられる²⁾。その結果によると、光合成による生物生産が一般に高いとされる0~200mの光が届く範囲の深さ(有光層)の中でえさを取る種類が多い。しかし、キングペンギンやエンペラーペンギン、アザラシ類などでは、有光層を大きくこえて、海洋生物学でいう「深海」(水深200mより深いところ)まで潜水しているものもいることがわかってきた(表)。ペンギンやアザラシは、ヒトと同じ肺呼吸動物である。すなわち、水面の息継ぎで肺や血液、筋肉中に蓄えた酸素に頼って、これほど深く、長い潜水を繰り返しているのである。

表 さまざまな海洋動物の最大潜水深度と最長潜水時間の記録

種名	最大潜水深度	最長潜水時間
アデリーペンギン	180m	5.9分
キタオットセイ	256m	9.9分
キングペンギン	343m	9.2分
エンペラーペンギン	564m	27.6分
ウェッデルアザラシ	741m	67分
キタゾウアザラシ	1735m	109分
ミナミゾウアザラシ	2133m	120分

なぜ「深海」まで潜水するのか？当然えさを取るためにだと考えられるのだが、200mをこえた深度に動物の要求を満たす量のえさが本当に存在するのだろうか？それはどんな種類のえさなのか？この疑問に答えるため、私たち極地研のチームでは、カリフォルニア大学と共同で、カリフォルニアの海岸に繁殖のために上陸するキタゾウアザラシを調査した。キタゾウアザラシは一年のうちの10ヶ月を海で過ごし、400mをこえる潜水を絶え間なく繰り返す、北太平洋の代表的な海洋動物である。えさ取りの回数を調べるために、アザラシの下顎に加速度記録計を取りつけた。ゾウアザラシはえさを捕らえるときに、

大きな口を開け、その口の開閉にともなう引力でえさを口に取り込む(吸い込み型採餌)。口の開閉にともなう顎の振動を記録し、えさ取りの回数を調べようという新しい試みである。またえさの種類を調べるために、アザラシの頭に新規に開発した小型の赤外線カメラ記録計を取りつけた。その結果、キタゾウアザラシの約3ヶ月間におよぶ回遊中のえさ取り回数の記録を初めて得ることができた³⁾。それを見ると、アザラシは最大1200mの深さまで潜水しており、500mをこえると口を頻繁に開閉させえさを取っていた(図2)。アザラシは回遊中に平均4000回の潜水を繰り返すが、そのうちおよそ80%の潜水で1回以上の捕食が記録されており、また潜水深度が深いほど捕食の成功率は高かった。また頭に取りつけたカメラ記録計には、ハダカイワシ等の深海性魚類が写っていた。ハダカイワシなどの魚が大量に分布し効率よくえさを取れるため、ゾウアザラシはわざわざ「深海」へと潜水を繰り返すらしいことがわかってきた。しかし、光がほとんど届かない深度で、クジラのようにエコーロケーションを使えないアザラシが、どのようにえさを見つけるのだろうか？まだ大きな疑問が残されている。

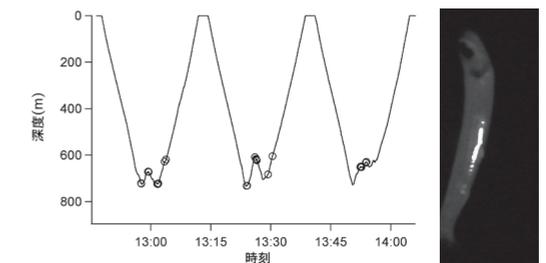


図2 キタゾウアザラシの3回の潜水の深度記録(線)と捕食が起こった深度(○)。捕食は600m以深に集中している(左)。頭に装着したカメラにより深度521mで撮影されたハダカイワシ(右)。

4. なぜ長く潜水できるのか？

アザラシやペンギンが深くまで潜る理由は、有光層以深にも十分なえさがいるかららしい。では、それほどまでの深さに到達するための長い潜水が、なぜ可能になったのだろうか？潜水動物は、酸素と結合するタンパク質(ヘモグロビン、ミオグロビン)が多く、多くの酸素を体内に保有することが昔から知られている。しかし水中で酸素を節約し、長く潜水するためのさまざまな生理的、行動的な調節が明らかになったのは、最近のことである²⁾。

まず生理的な調節として、アザラシやペンギンは潜水すると心拍数を急激に低下させ、体全体にめぐる血液の流れを抑え、酸素消費量を減らす。潜水直後の心拍数の低下の度合いは、潜水が長く続くときほど大きく、動物は潜水時間を予測して心拍数を調節しているらしい。そして脳や筋肉など、必要な部位に選択的に酸素を供給するしくみになっている。また、ペンギンやウミガラスなどでは、腹部の皮下など、体の周辺部分の体温が数度下がる。

また、行動的な調節として、アザラシやペンギンは距離当たりで最もエネルギー効率のよい速度(秒速 1.5 ~ 2.5m)で泳いでいることが、遊泳速度の計測から明らかになった。車に例えれば、最も燃費のよい速度で動いているということである。速度が速すぎると、ひれや翼をより頻りに動かさねばならず、余計な酸素を使うことになる。一方、速度が遅すぎると、えさのいる深度までの移動が長時間になり、体の維持のために余計な酸素が必要になる。また、動物たちは水中で発生する浮力を使い、なるべくひれや翼を動かさずに泳いでいることがわかった。例えば、アザラシは一般に体密度が水より高く水中では体が沈む(負の浮力をもつ)ので、えさのいる深度までひれを動かさずに受動的に沈んでいくことで、酸素消費量を抑えていることがわかった(図3)。

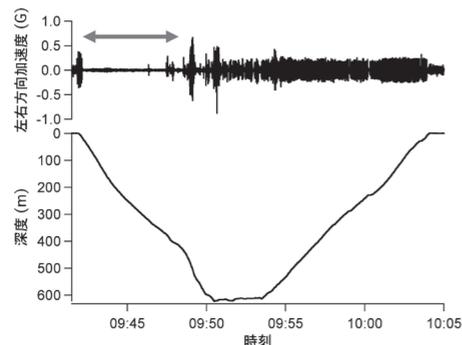


図3 キタゾウアザラシの1回の潜水中の深度(下)と体軸の左右方向の加速度(上)の記録。矢印は加速度の振動がほとんどなく、アザラシがひれを動かさずに負の浮力で沈んでいった期間を示す。

高校生物の教科書には、「生物が、生息環境に対して、形態的、生理的あるいは行動的に有利な形質を備えていることを適応という」との記述がある(数研出版)。アザラシやペンギンは、水中環境に適応した動物の例としてあげられることが多いが、その具体的な生理的、行動的適応の研究は、バイオリギ

ング技術の進展によってようやく始まったといっただろう。

5. 海鳥の地球縦断飛行

バイオリギングの成果として、次は空を飛ぶ海鳥に目を向けてみよう。2004年に、足環につけた数グラムの小型照度記録計(ジオロケータ)を用いて、鳥のいるおおよその位置を推定する手法が確立され、その後、海鳥の渡り行動の研究が飛躍的に進んだ⁴⁾。

繁殖を終えた後、多くの海鳥は繁殖地を離れ、長距離を移動して越冬海域へと向かう。これまでの渡りの記録で、最も長距離を移動するのは、グリーンランドで繁殖し南極海で越冬するキョクアジサシである⁵⁾。この鳥は8月にグリーンランドを出発すると、大西洋の赤道域を経由して11月に南極海へ到達する。南極海で越冬(南半球の夏期間)した後、4月に南極海を離れ、6月にグリーンランドに戻って次の繁殖を始める。渡り期間中の総飛行距離は7万 kmにおよぶ。これは地球を約1.8周する距離に相当する。わずか100g程度の鳥がこれだけ長距離を飛行するのは本当に驚きである。これまでも、個体標識の足環が偶発的に回収された記録から、南極海で越冬するキョクアジサシがいることは知られていた。しかし、ジオロケータによって、渡りの研究はそうした偶然にたよる必要がなくなり、さらに、渡りの間の詳細な移動経路の解析が可能となった。その結果、多くの種で研究が進み、今では、キョクアジサシとは逆に、南極周辺で繁殖し、北極で北半球の夏期間を過ごす海鳥がいることもわかってきている。

北極や南極の海鳥ほどダイナミックではないが、日本で繁殖する海鳥も長距離の渡りをする。日本周辺の離島で夏に繁殖する海鳥オオミズナギドリは、冬には赤道付近まで移動し、春先にまた日本近海へ戻ってくることがわかった(図4)⁶⁾。渡り期間中の総移動距離は1万 kmをこえる。

こうした海鳥の渡りの研究は、世界のさまざまな海域の生態系が互いにつながっていることを示唆する。南極の生態系に何か異変がおこれば、その影響は北極で繁殖する海鳥にも現れる可能性がある。バイオリギングで得られる移動に関する正確な情報は、動物の保全を考えるうえでも重要になると思われる。

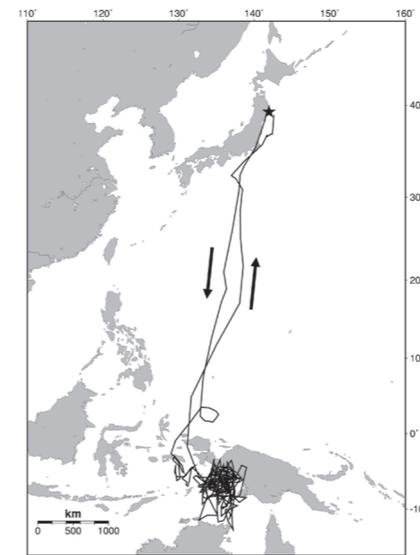


図4 オオミズナギドリの繁殖地(★)から赤道付近への渡りの移動経路の一例

6. 動物目線で環境変化を見る

バイオリギングを使って計測した動物の行動から、動物周辺の環境の情報を得ることも可能である。南極大陸沿岸の海水下は、アイスアルジーなどの藻類が繁茂し、オキアミや魚が豊富に生息する海域であると考えられている。しかし、厚い氷に阻まれて直接観測することが難しいため、これまでオキアミや魚の密度や分布に関する知見は限られていた。

2010年12月、私たちは小型の耐圧ビデオ記録計をもって南極昭和基地の近くにあるアデリーペンギンの繁殖地を訪れた。そして、ペンギンにビデオ記録計を取りつけ、氷がびっしりと張った海の中でペンギンがえさと遭遇し、捕食の様子を詳しく明らかにすることが出来た⁷⁾。ペンギンは海水下でもナンキョクオキアミを捕食していた(図5)。群れに遭遇すると、1秒間に2匹ものオキアミを食べ、平均して潜水1時間あたり180匹ほどのオキアミを食べていることがわかった。また、オキアミとの遭遇は、10~70mの幅広い深度で起こっていた。一方、ペンギンはボウズハゲギスという10cm程度の魚を食べることもあったが、遭遇は海水の直下の5m以浅の深度に限られていた。このようなペンギンの捕食行動は、海水下でのオキアミや魚の密度、分布を反映すると考えられる。

現在、南極では、水温等の変化によって海水の分布状況が変化することが懸念され、それが海水下の

オキアミや魚に影響を与えるのではないかと予想されている。一方、ペンギンの年々の繁殖の成功度は、繁殖地周辺の海水状況と対応して変化している²⁾。おそらく、えさ生物の密度や分布の変化が、ペンギンの繁殖に影響を与えていると考えられる。今後、ビデオ記録計を装着したアデリーペンギンの行動からの海水下のえさの密度や分布の観測を継続することで、動物目線で南極に現れる環境変化をとらえたいと考えている。

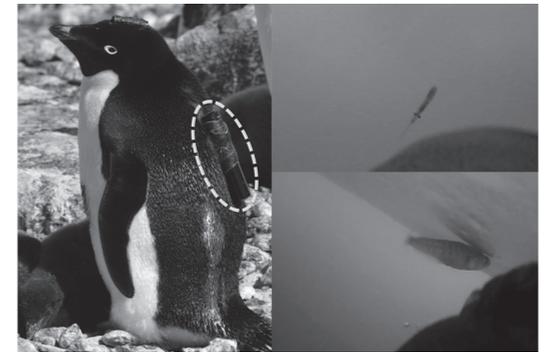


図5 ビデオカメラを装着したアデリーペンギン(左)とオキアミ(右上)と魚(右下)を捕食した瞬間の映像。

7. おわりに

本稿では、海洋動物を中心にバイオリギングの成果を紹介してきた。しかし、現在では、陸上で生活する動物にもこの手法が活用されつつある⁴⁾。加速度や映像のデータは陸上での研究にも有効で、連続した個体の直接観察は陸上でも難しいからである。バイオリギングが、野外における動物の行動・環境計測の基盤技術として活用され、動物行動・生態学、また生物保全の進展に貢献することを期待している。

参考文献

- 1) 日本バイオリギング研究会(2009)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.
- 2) 内藤靖彦・佐藤克文・高橋晃周・渡辺佑基(2012)バイオリギング—「ペンギン目線」の動物行動学. 成山堂書店.
- 3) Naito Y. et al. (2013) *Funct. Ecol.* 27:710-717.
- 4) 高橋晃周・依田憲(2010) *日本鳥学会誌* 59:3-19.
- 5) Egevang et al. (2010) *PNAS* 107: 2078-2081.
- 6) Yamamoto T. et al. (2010) *Auk* 127: 871-881.
- 7) Watanabe Y. & Takahashi A. (2013) *PNAS* 110: 2199-2204.