海の動物を観る： 最新のテクノロジーを用いた 高次捕食動物の生物学

佐藤克文

はじめに

夜空を見上げると、美しい星が見える。大気汚染のなかった昔は、さぞ多くの星が見えたであろう。実際、紀元前から人々は星空を見続けてきた。占星術はやがて、天体の動きを物理現象として解釈する天文学へと発達した。17世紀に望遠鏡が発明されたことによって、より正確で細かい天体観測が可能となった。ロケットが発明され、20世紀になると人間が宇宙空間に行けるようになった。これらの技術革新が天文学の発達を後押ししたことは確かであるが、そもそも、肉眼で星を観ることができたからこそ、人々の知的好奇心は刺激され、「もっと知りたい」という思いがそれらの技術革新を押し進めてきた。

20世紀初頭に北極と南極の両極点に人類が到達し、最高峰エベレストも初登頂された。地球上にもはや未知の領域は無いと感じている人が多いかもしれない。しかし、海の中の様子を我々はまだ十分に観ることができずにいる。無人探査機が火星に飛び、地球に居ながらにして向こうの様子を観ることが可能になった時代にもなって、何かの冗談のようにも聞こえるが、我々が海の中を自由に観察できずにいるのは残念ながら事実である。

肉眼で何万光年も離れた星を観ることができ
る我々が、道具なしで観察できる水中の様子は、

ごく表層に限られている。1973年にノーベル賞を受賞したニコ・ティンバーゲンは、トゲウオという小型淡水魚の行動を水槽中で詳細に観察し、すばらしい発見をした。水圏のごく表層付近に生息する生物は十分科学の対象にされてきたといえよう。しかし、水平的に広だけでなく、鉛直的にも奥深い海には、3次元を広範囲に動き回る大型動物が数多く存在している。これらの海洋動物は科学の対象になり得るのだろうか？

陸上動物に比べると、水生動物の生物学は大きく遅れをとっていた。その理由は、海中における直接観察が困難なことにある。外洋を航海する船の甲板から、一瞬目撃できるクジラ・アザラシ・ペンギン・ウミガメといった海洋の大型動物は、いったん水に潜ってしまうと、もはや観察できない。いや、「できなかった」。

今我々は天文学分野における望遠鏡にも匹敵する新たな道具を得た。それは、データロガーと呼ばれる小型の記録計である。耐圧防水容器に入ったこの装置を動物に搭載することで、我々は彼らの行動や生理を、深度や温度の時系列データとして観ることができるようになったのである。そして、ごく最近開発された小型カメラにより、我々は文字通り彼らの世界を「観る」ことができるようになった。

初期の発見

動物搭載型のデータロガーを用いた野外調査は、南極に生息するアザラシを対象に1960年代に始まった。アメリカのジェラルド・クーイマン博士が、キッチンタイマーを改造した自作の深度記録計をウェッデルアザラシに取り付け、彼らが300m以上の深さまで潜る能力を持つことを明らかにした。

ウェッデルアザラシは南極の定着氷上で最も普通に見ることができる種類である。彼らはいつでも氷の上に腹を上に向けて寝そべっており、人を見てもさほど怖がらない。ホッキョクグマなど氷上の捕食者がいない南極では、彼らは非常にリラックスしている。この穏やかな性質が、記録計の装着と回収のための再捕獲を容易にしている。南極は気象条件が厳しく、行くだけでも大変な場所だが、そこに生息している動物はデータロガーを用いた調査に向いていたのである。

1980年代になり、世界で2番目にデータロガーを作成した日本人がいた。国立極地研究所の内藤靖彦博士である。内藤博士が最初に記録計を取り付けたのもまた南極昭和基地周辺のウェッデルアザラシであった。南極から帰国後、データロガーの改良を行い、3カ月間の連続記録が可能な深度記録計を完成させた。この記録計は、精密な歯車によりゆっくりと送られる記録用紙

PROFILE

佐藤 克文
(さとう かつふみ 1967年生)
東京大学海洋研究所助教授、日本
バイオリギング研究会幹事
専門：動物行動学、生理生態学、
海洋生物学

南極ワシントン岬にてキャンプ生活しながらエンペラーペンギン調査中の著者

に、ダイヤモンド針が細密な記録線を描いていくアナログタイプのものであった。アメリカ製記録計の記録時間が2週間であった時代、この日本製記録計の長期間記録は世界を驚かせた。その装置はアメリカのカリフォルニア沿岸で繁殖を行うキタゾウアザラシに用いられ、彼らが海で過ごす3カ月間、わずか2分間の水面滞在時間を挟んで、20分間の長さで深度500m前後の潜水を途切れること無く繰り返し行っていることが明らかになった。

その後、装置の電子化が進められ、世界中で進んだマイクロエレクトロニクス分野の技術革新の後押しもあり、細かいサンプリング間隔で、長期間にわたって記録が得られるデータロガーの開発が進んだ。アメリカやヨーロッパで相次いでデータロガーメーカーが生まれ、日本でも

内藤博士の主導のもとで、日本製メーカーによるデータロガーの開発・改良が進められた。筆者は1995年から2004にかけて内藤博士のもとでポスドク・助手として過ごし、データロガーの改良とそれを用いた野外調査に従事しつつ、このデータロガーの発達を当事者の一人として体験することができた。

陸上の常識が通用しない海の中

データロガーを用いて海洋動物の行動や生理が明らかになるにつれ、陸上動物の常識を覆すような発見が次々と生まれた。例えば、フランスの研究グループは、キングペンギンの背中に深度記録計を取り付けて潜水行動記録を得ると同時に、体内に埋め込んだ温度計で体芯部温度を測定した。そして、潜水を繰り返して行うキングペンギンの体温が10度以上も低下するとい

うことを発見した (Handrich et al. 1997)。言うまでもなくペンギンは鳥類であり、鳥は外部温度とは無関係に体温を一定に保つ定温動物とされている。しかし、息をこらえて長時間潜水するという潜水性鳥類の特殊事情は、潜水中の体温を下げてでも酸素消費速度を低く抑えるという生理的な進化を促したのである。

筆者自身は学位取得までの研究課題として、ウミガメ類の体温について調べてきた。ウミガメの胃の中に温度計を挿入し、海で泳ぎ回る間の体芯部温度を連続測定したところ、背中の上で記録する環境水温に比べて体芯部温度が数度高く、ある程度一定に保たれていた。例えば、ウミガメは時々数十メートルの潜水行動を行い、それによって環境水温は一時的に5度近く低下したが、体芯部温度は全く影響を受けることなく、一定に保たれていた (Sato et al. 1994)。陸生爬虫類であるトカゲやヘビは、太陽放射エネ

図 1

(A) キングペンギンでは、数百メートルの深度の潜水を繰り返す間、体芯部温度（実線）は大きく低下する。(B) アカウミガメでは、潜水に伴い外部水温（破線）は一時的に低下するが、体芯部温度（実線）は一定に保たれている。

ギーを吸収して体温を外部温度よりも高くすることが知られているが、ウミガメの背中に太陽光の強さを測定する照度データロガーを装着して調べた結果では、体温上昇に太陽放射エネルギーは貢献しておらず、ウミガメは体内で生み出した代謝熱を用いて体温を環境水温よりも高めているという結果となった (Sato et al. 1995)。

学位取得後に、国立極地研究所でポスドク期を過ごす間、縁あってフランス人とのペンギン調査に参加する機会を得た。1996年に亜南極の調査地に向かう船の中で彼らから、ペンギンの体温が潜水中に大きく変化するという上述の論文原稿を見せてもらった。それまで自分の行ってきた研究結果は、水生の大型爬虫類が内温性(定温性)を有するという内容であっただけに、それとは逆に、潜水性鳥類が変温性を持つという結果には強い衝撃を受けた。

陸上動物においては、爬虫類の体温は変わりやすく、鳥類の体温は一定であるというのが常識であるが、水生動物ではその常識がひっくり返ってしまう。その発見をもたらしたのが、データロガーなのである。

空気を吸い込んでから潜るペンギンと吐き出してから潜るアザラシ

フランス人達と共同で行った野外調査では、日本側主導で発見した面白い行動がある。そのとき、私は日本から加速度データロガーを持ち込んでいた。家庭用ビデオカメラの手ぶれ防止機能などに用いられている微小な加速度センサ

ーを搭載した世界初のデータロガーである。それまでの装置は、深度や遊泳速度しか記録できなかったが、加速度データロガーで潜水遊泳中のペンギンの体の振動を測定し、ペンギンがどれくらいの頻度・強度でフリッパーを振っているのかを測定しようという狙いであった。

キングペンギンにこの世界初の加速度データロガーを取り付け、数週間後に回収した装置をコンピュータに接続し、おそろおそろデータを見た。すると、不思議なことに気がついた。300m前後の潜水を繰り返し行うペンギンの、羽ばたき行動の記録が潜水開始と終了のタイミングに一致しないのだ。最初その記録を見たときは、二つのデータの時間軸がうまく合っていないのだろうと思った。しかし、潜水開始時刻で深度と加速度の時系列記録を同調させると、やはり毎回潜水終了時刻よりも数十秒早く羽ばたきが停止してしまうのであった。帰国後に装置をテストしてみるが、タイマーは正常に作動していた。翌年、今度は南極のフランス基地を訪れ、アデリーペンギンからデータをとった。アデリーペンギンでも潜水終了数十秒前に羽ばたきが停止するという結果を見て、ようやく私も確信することができた。ペンギンはフリッパーを動かさずに浮上していたのである。すなわち彼らは体内に空気をためた状態で潜水を行い、浮力を用いて受動的に浮上してくることができるのである。

プロペラを備えた速度データロガーで同時に測定した遊泳速度記録も用いて、ペンギンの保有空気量の推定を行ったところ、ペンギンたち

は浅い潜水を行う際には、保有空気量を少なく抑さえ、深い潜水を行う際には、肺の最大容量にほぼ等しい空気を吸い込んでいるという結果となった (Sato et al. 2002)。この結果は、同じ潜水動物であるアザラシの行動と比較するとさらに興味深い。ウェッデルアザラシは、深い潜水を行う際に、肺から空気を吐き出して潜ることが知られており、この行動が減圧症回避に役立っていると考えられている (Falke et al. 1985)。加速度データロガーをウェッデルアザラシに取り付けてみたところ、彼らはペンギンとは逆に潜降時にフリッパーの動きを停止し、浮上時に激しくフリッパーを動かしていた (Sato et al. 2003)。アザラシとペンギン、どちらも高い潜水能力を有するが、アザラシは空気を吐き出してから潜水を開始し、ペンギンは空気を大きく吸い込んだ状態で潜水をしていたのである。なぜ、哺乳類と鳥類が全く正反対のやり方を採用しているのか、その謎を解くための研究は今も継続中である。

想定外の発見

当初、温度や深度だけであった測定項目も、その後遊泳速度・加速度・心電・地磁気などと多様化した。そして、最近画像を記録できるデータロガーも登場した。画像データロガーを開発する際に我々が意図したのは、彼らの餌生物の種類や分布量を動物の視点から把握しようというものであった。

記念すべき第一号機は、これまで同様に南極

のウェッデルアザラシに取り付けられた。2000mの耐圧容器にカメラと光源がおさまられており、30秒間隔で静止画を自動撮影するように設定した。アザラシが海中で撮影してきた画像によると、予想に反して浅い深度には餌生物はほとんど映っておらず、深度250m以深で、急にプランクトンや魚などの餌生物が増えるということがわかった。そして、アザラシの潜水記録によると、彼らは餌生物の分布密度が多い250mから300mの深度帯に頻繁に潜水していた (Watanabe et al. 2003)。それまで、深度記録計しかなかった時代には、彼らの潜水記録から、その深度帯に多くの餌生物がいるのであろうという考察をしていたが、同じ個体に搭載した画像ロガーによって、その説を確かめることができたのである。

画像の持つ情報量が多い。画像ロガーを動物に搭載した結果、事前に想定していなかった発見もいくつか出てきた。画像データロガーを、ドイツ南極基地周辺のウェッデルアザラシに取り付けたところ、海底までの水深が400m以上ある場所で、アザラシが深度150mの潜水を頻繁に繰り返していた。画像記録によると、厚さ150m前後の棚氷の下面をアザラシは泳いでいた。そして、その棚氷の下面には固着性刺胞動物らしきものが濃密に分布していたのである (Watanabe et al. 2006)。アザラシがその刺胞動物を直接捕食しているとは考えがたく、おそらく刺胞動物の隙間に潜む魚類を捕らえているものと考えられる。南極棚氷の下面は、刺胞動物に固着する基質を提供しており、そこには未

図2

ウェッデルアザラシが撮影した南極棚氷の下面（深度150m）。刺胞動物がびっしりと覆っていた。左下に映るのは、アザラシの背中。

知の生態系が存在していたのだ。我々は、見えないものは無いものと思いがちであるが、それは明らかな間違いであることを思い知らされた発見であった。

最後に

データロガーを用いた海洋高次捕食動物研究は今後どのような方向に進んでいくのだろうか。地球の表面積の7割を占める海洋環境を、高次捕食動物の視点からモニタリングしていく環境学へと発展する可能性がある。あるいは、数々の生理センサーが開発され、室内でなされてきたような精密な生理実験が野外環境下で実現できるかもしれない。これまでのデータロガーは、データを得るために動物を再捕獲する必要があった。そのために、再捕獲を期待できない魚類にはあまり用いられてこなかった。しかし、近年自動切り離し装置が工夫され、再捕獲が難しい動物にもデータロガーは用いられつつある。今後は魚類にもデータロガーは使われていくことであろう。

私の目標は、陸上動物で既に達成されている研究レベルに追いつくことではない。「陸上動物ではとっくの昔にやられている実験が、技術の進歩により水中でも実現できました」という図

式では、陸上動物研究を通して培われた発想から抜け出すことは難しだろう。動物は陸域だけに生息しているのではない。動物界全体を理解するのに、地球表面の7割を占める海域に生息する動物を扱わないというのは、あまりに片手落ちであろう。陸上動物でまだ始まっていないような実験や測定を、水中動物相手に実施し、得られた成果を元に次のテーマを発想するというスタイルでしばらく進んでいきたい。その発想が具体的にどういったものなのかは私自身にもまだイメージできていない。今後30年くらいかけて見つけていきたいと密かに思っている。

参考文献

- Falke et al. (1985) Seal lung collapse during free diving: evidence from arterial nitrogen tensions. *Science* 229:556-558.
- Handrich et al. (1997) Hypothermia in foraging king penguins. *Nature* 338:64-67.
- Sato et al. (1994) Correlation between stomach temperatures and ambient water temperatures in free-ranging loggerhead turtles, *Caretta caretta*. *Mar Biol* 118:343-351.
- Sato et al. (1995) Body temperature independence of solar radiation in free-ranging loggerhead turtles, *Caretta caretta*, during internesting periods. *Mar Biol* 123:197-205.
- Sato et al. (2002) Buoyancy and maximal diving depth in penguins: do they control inhaling air volume? *J Exp Biol* 205:1189-1197.
- Sato et al. (2003) Factors affecting stroking patterns and body angle in diving Weddell seals under natural conditions. *J Exp Biol* 206:1461-1470.
- Watanabe et al. (2003) Dive depths of Weddell seals in relation to vertical prey distribution as estimated by image data. *Mar Ecol Prog Ser* 252:283-288.
- Watanabe et al. (2006) Seal-mounted cameras detect invertebrate fauna on the underside of an Antarctic ice shelf. *Mar Ecol Prog Ser* 309:297-300.