

# 海産哺乳動物研究における海底ケーブルの利用

赤松友成（水産工学研究所）・宮崎信之（東京大学海洋研究所）・  
許正憲（海洋科学技術センター）・新家富雄（(株) システムインテック）

大型のヒゲクジラの仲間は、海中での遠距離通信手段として数十 Hz の低周波の声を発することが知られている。この声を海底ケーブルに設置したハイドロホンで受信し、その位置を計測することが可能である。これまで、海底のケーブルネットワークによる鯨類のモニタリングは、潜水艦探知システムの民間開放などでしか実現できなかった。太平洋を横断する光海底ケーブルや我が国の ARENA 計画が実現されれば、継続的な鯨類モニタリングを行える可能性がある。しかもその構築には、人的資源以外にほとんど追加投資を必要とせず、成果の社会還元効果が期待できる。

この原稿は、月刊地球 299, 301-306 に掲載されたものを元に、加筆修正しました。

## 海洋環境指標生物としての鯨類

クジラもイルカも鯨類に含まれる。正確には、歯を持っている鯨類をハクジラと呼び、なかでも小型の種類をイルカと称するにすぎない。一方、ヒゲクジラには、下顎から胸にあるジャバラのようにのびる「うね」に、オキアミなどの動物プランクトンの集団をまるごと含み込み、海水を吐き出しながら上顎から数百枚たれさがるひげ板で餌を濾しとって、プランクトンだけを食べる。このひげが、ヒゲクジラの名前の由来である。地球史上最大の生物であるシロナガスクジラ、歌を歌うことで有名なザトウクジラ、日本の沿岸にもよくあらわれるミンククジラ（図 1）などがこの仲間だ。

その食性からも明らかなように、ヒゲクジラは大量消費者でもある。マッコウクジラやシャチなどのハクジラの捕食量も、ばかにならない。鯨類は、海洋の基礎生産から小型魚まで連なる食物連鎖の最上位に位置している。広域な回遊を行い、膨大な餌生物を消費し、分布域と漁場との相関も高い。海洋生態系の微妙なバランスの上に生存している鯨類は、その異変に敏感に反応するはずである。鯨類の分布や回遊の変化は、私たちが直接見たりさわったりすることができない海洋生態系の、早期警戒指標として使えるだろう。

これまで、我が国の鯨類のモニタリングは、現存量を把握することに主眼がおかれてきた。このため、年単位の資源量の変動はわかっても、特定の海域に

おける短期間の変動は未知であった。ところが、環境指標生物のモニタリングでは、数ヶ月あるいは数週間という短い期間での観測が重要である。人工衛星による海表面温度やクロロフィル濃度などの観測頻度に比べれば、指標生物としての鯨類個体群の観測頻度は、きわめて少ないといわざるを得ない。これはひとえに、資源量把握のための観測手段が船舶による目視調査に限られ、膨大な手間と時間と資金が必要なことによる。

### ヒゲクジラの鳴音

日本周辺に来遊する多くのヒゲクジラは、夏に北太平洋で摂餌し、冬には小笠原諸島沖や沖縄列島沖を含む低緯度地域で繁殖すると考えられている。その間の回遊経路は数千 km に及ぶ。夏季でも、餌を食べる海域のなかで広い範囲を移動する。北太平洋は、栄養塩類が豊富で海の基礎生産力が高く、海中は植物プランクトンに満ちている。これが大量のオキアミを発生させ、ヒゲクジラたちの食事になっている。このような環境の水は濁りがちで、水中で遠くを見渡すことはできない。冬に滞在する暖かい繁殖海域も広大である。その中でクジラの雄雌は、出会ってお互いの繁殖能力を値踏みし、交接しなければならない。クジラはかなり遠方から、相手に自分の存在を知らせる必要があるだろう。また、繁殖期には積極的に摂餌を行わないと考えられているので、大出力の鳴音を最小のエネルギーで行う工夫が必要となるだろう。生活史に根ざしたこうした通信需要のために、ヒゲクジラは、海中での伝搬損失が小さい、低い周波数の声を効率的に利用していると考えられている。

### クジラの声を知る技術

カリフォルニア沖のシロナガスクジラは高低の2つの声を繰り返し発する。2音節であるため、ABコールとも呼ばれている。Aが約90Hz、Bのもっとも低い成分は17Hzである。米国東海岸のオレゴン州沖で、SOSUS (Sound Surveillance System)<sup>1)</sup>を用いて確認されたシロナガスクジラ的位置は、航空機からの目視発見位置から12kmしか離れていなかった<sup>2)</sup>。対潜哨戒機P-3Cから投下されたソノブイによる、2.2kmの測位誤差に比べれば劣るが、数千kmにおよぶ大回遊を行うクジラ的位置確認精度として、十分に使用に耐えるデータであった。シロナガスクジラは、2音節ないし3音節をもつ特徴的な鳴音を発することがすでに知られており<sup>3)</sup>、目視による種の判別をせずとも、その声のパターンから存在確認が可能であった。

米国のNOAAは、海底地震をとらえるハイドロホンを東部太平洋の赤道の南北に設置した。このシステムは、シロナガスクジラの声も明瞭に捉えていた<sup>4,5)</sup>。鳴音の受信頻度は、南北で正反対の季節的な違いがあった。北では12月から

5月、南では3月から9月に多くのシロナガスクジラの声が聞こえた。赤道の南北では季節が逆転するので、どちらも冬である。音響的な観測結果は、この季節に低緯度地域で繁殖を行うヒゲクジラの生態とよく一致している。また、McDonald ら<sup>6)</sup>の研究によればシロナガスクジラの鳴音タイプは9つに分類され、それぞれの海域によって特徴が異なることを示している(図2参照)。ただし、全海洋についてみれば未だ観測の空白域は大きく、特に日本の沿岸域は解明しなければならない重要な空白域のひとつといえる。一方、同じ北太平洋でも北米大陸沿岸では地球物理・海洋物理観測網が充実しており、その二次利用としてこれらのシステムが鯨類研究に応用されている。SOSUS データなどの他、ATOC (Acoustic Thermometry of Ocean Climate) プロジェクト<sup>7)</sup>(後の North Pacific Acoustic Laboratory / NPAL プロジェクト) によって収録された音響データも非常に有効である。特に新しい成果としては南カリフォルニアからバンクーバー島に至る海域でのシロナガスクジラの行動パターンを音響学的に把握し、水温やクロロフィルなど衛星データとの相関から 1997/98 年のエル・ニーニョ現象による行動の変化を考察している<sup>8)</sup>。

最近では音を使ってマッコウクジラの存在確認を行うところも増えてきた。マッコウクジラはイルカのようなソナー音を発する。ニュージーランドのカイコウラ沖で、雄のマッコウクジラの声を観察した例<sup>9)</sup>や、ハワイ沖で米海軍の PMRF (Pacific Missile Range Facility) 海底ハイドロホンアレイを使って2頭のマッコウクジラを約3マイルにわたって追尾した例<sup>10)</sup>がある。ニュージーランドのマッコウクジラは、潜水直後は約1秒に一回程度のゆっくりとした間隔で鳴くのだが、潜水中は20ms から30ms の短い間隔で音波を発していた。マッコウクジラの声は、人間の耳でも聞こえる周波数帯で金属を叩くような声であり、最初に聞いたときには生物音とは思えない。マッコウクジラの音声は、数千kHz 以上でヒゲクジラの音声に比べると高いが、受信帯域が広いハイドロホンならば、これを捉えることは可能である。

### 我が国での鯨類モニタリングネットワークの意義

鯨類は、太平洋の環境モニタリングを行う上で、重要な指標生物である。その動態を把握するために、かれらが発する鳴音を利用した、広域的な音響モニタリングが有力な方法として挙げられる。海洋生態系の早期警戒指標の移動と分布を、リアルタイムで確認できるからだ。

これまでの大型鯨類の調査は、船舶や航空機からの目視による生息頭数調査、写真撮影による個体識別調査、捕獲による調査、組織片を用いた遺伝的差違の調査が主であった。目視調査は、ある時点でのある海域の頭数を提供し、後2者は離れた海域で同一個体や系統群を確認することに使われている。つまり、

ある時点のスナップショットと、極めて離れた2点間での個体の移動が主な知見で、その中間、すなわち数日単位での移動や、季節単位での回遊などの情報が欠落している。衛星標識などによる調査手法も近年試されているが、装着個体数と稼働時間が限られるため、広域的な回遊経路調査は難しい。このような情報は、環境指標生物のモニタリングを行う上で極めて重要であり、ヒゲクジラにおいても、この欠落した時間スケールにおける個体群動態に関して、新しい調査手法が必要とされている。

### 鯨類の鳴音モニタリングには人的資源の確保が必要

海底ケーブルネットワークに設置されるハイドロホンを利用した、大型鯨類の鳴音モニタリングは、現実的な応用である。この手法は、先述の欠落した時間スケールにおける個体群動態に関して、一定のデータを供給するものと期待される。またハイドロホンだけでなく、広帯域地震計も、その周波数特性からみて十分有効であると考えられ<sup>11)</sup>、実際にマリアナ海域で起きた海底火山活動の音を房総沖の地震計で連続的に観測した例もある<sup>12)</sup>。

ヒゲクジラの鳴音を受信し、その分布の変動と回遊のモニタリングを行うことは、技術的には十分に可能である。海底ケーブルを利用し、陸上で居ながらにして、太平洋の環境指標生物が確認できるようになれば、すばらしい。しかもセンサは、地震計またはハイドロホンがあればよいので、地震観測のためにはじめから設置されており、新規の機器開発は基本的には不要である。

17Hz から 20Hz 程度の鳴音を発するナガスクジラやシロナガスクジラは、よい対象生物である。また、ハイドロホンの受信帯域を広げれば、数百 Hz の声を持つミンククジラやザトウクジラ、数 kHz 以上の声を持つマッコウクジラなどの鳴音も受信可能だ。海底ケーブルに設置された低周波音のモニタリングシステムは、海洋で大量に餌生物を消費する大型鯨類の多くを、観測対象とすることができる。

海底ケーブルを利用した鯨類モニタリングでは、大量のデータが連続的に蓄積される。得られたデータを、成果に結びつけるために最も重要なことは、人的資源の確保である。ハードウェアへの追加投資はほとんど不要なので、研究拠点を維持するためのソフトマネーが少しだけあればよい。費用対効果に優れたテーマであると言えるだろう。必要な人材は、音響工学、生態学、教育の3分野である。

### 音響工学者による鯨類鳴音の抽出

第一に必要なのは、得られる膨大なデータの中から、目的とする鳴音を取り出すための人材である。鯨類は、水深数百m以内の比較的浅いところに滞在す

る。ここで発せられた声は、音速の鉛直プロファイルに従って、大部分は下方に曲げられるため、観測範囲が限定される。こうした伝搬シミュレーションを行い、音響的に“見ている”体積を推定できる人材が必要だ。得られたデータの解釈にあたって、観測範囲を明確にすることが第一歩である。

つぎに、多点から得られた膨大な時系列データの中から、目的とする鯨種の鳴音を同定することが必要だ。これには、地震研究で培われたソフトウェア群が役に立つかもしれない。鯨類の鳴音とそれ以外の信号の判別を行うだけでなく、種ごとに違う鳴音の特徴を抽出し、種判定ができると理想的である。現実のデータは、ほとんどが雑音であり、信号対雑音比も悪く、対象とする声の特性にも揺らぎがある。しかし、海洋音響学者や音声認識学者は、こうした困難に立ち向かい、問題を解決してきた。我が国には、海底ケーブルから得られた鯨類鳴音の抽出と解析を行うのに十分な人的資源が蓄積されている。また、米国での先行研究も、十分に参照・利用したい。例えば、NOAA 援助で、鯨類鳴音の検出のためいくつかのフィルタを有した無料のソフトウェアも公開されている(<http://cet.us.pmel.noaa.gov/cgi-bin/MobySoft.pl>)。

後述の広報と関連して、インターネットでリアルタイムに、受信したクジラの声配信することも必要になる。位置精度や種同定精度についてのランク付けを計算機で行い、鳴音と一緒に提供することが望ましい。多くの方が自由に利用することで、思いもよらないデータの利用方法が提案されるかもしれない。

### 生態学者による太平洋での鯨類のモニタリング

第二に必要なのは、種判別が済んだ鳴いた個体の推定位置データから、短期的な鯨類の分布の変化や回遊を明らかにする人材である。これまで我が国の沖合に生息する生物については、水産研究者を中心として多様な調査研究が行われてきた。鯨類の餌生物である動物プランクトン、その捕食者である魚類の初期生態と、資源量について、限定的な種類のみではあるが明らかになってきている。また、鯨類の目視調査データにおいても、我が国が蓄積しているデータの質と量は、世界的に見てトップレベルである。これらの既往の生態学的な知見と、海底ケーブルによって明らかになると思われる数日から季節単位での鯨類の分布の変動を組み合わせ、海洋環境や餌生物環境などとの相関を明らかにすることが必要だ。

海洋生態系の早期警戒指標としての利用を可能にするためには、海底ケーブルから得られた定点観測データの解釈について、それを補強する観測やシミュレーションが求められるだろう。音響工学者と生態学者の緊密な連携が望ましい。このためにも、継続的なソフトマネーの供給で、各分野数名の若手研究者を維持し、研究拠点を形成することが有効であると思われる。海底ケーブルシ

システムの構築に比べれば、こうしたソフトマネーは2桁から3桁安く、費用対効果に優れている。また、取得された音響データには、どこからでもネットワーク経由で利用できるのも、研究拠点は地理的にはどこでもかまわない。

### 教育者による一般への広報

第三に必要なのは、得られた知見を、社会に広く還元する人材である。国費を投じたプロジェクトの成果は、納税者に説明する責務がある。幸い、鯨類は一般の人々の関心が高いため、こなれた資料を用意すれば、広報効果は高い。さらに、鯨類を入り口として、海底ケーブル観測から得られた他の分野での様々な知見を紹介することができる。

まず、音響工学者や生態学者から提供される科学的な素材をわかりやすく加工し、提供することが必要である。これにプロの教育者を充てることはできないだろうか。専門的な内容を、その質を落とさずにひとに伝えることに、教育者はもっとも適切だと思う。子供たちに、プロジェクトの概要と成果を知らせるためにも、有効だ。先述のインターネットでの情報提供システムができあがれば、そのコンテンツの更新も教育者が担うだろう。

教育者は、研究成果の読み手でもあり、その伝え手でもある。プロジェクトが巨大になればなるほど、個々の研究者が説明できる範囲は相対的に狭まり、取材に対して適切に回答することが難しくなる。かみくだいた概要説明は教育者が行い、取材者がより専門的で詳しい内容を知りたいときに、適切なインターネット上の資源や研究者本人を紹介できれば、効果的な広報を行うことができる。テレビや新聞などのマスメディアや、学校教材で用いることができる、色々な媒体での資料を作成することも、非常に重要な教育者の役割となるだろう。

### あとがき

本稿に示したのは、海底ケーブルを利用した鯨類観測にあたって、私たちが良いと思う研究体制の構想である。実際に、海底ケーブルを鯨類のモニタリングに使い、成果を挙げるためには、乗り越えなければならない多くのハードルがある。そのハードルに取り組む前に、まずゴールを示したかった。本稿で、必要な人材として呼びかけた、多くの（とくに若い）専門家の方々は、音響工学や生態学に不案内であるかもしれない。しかし、これから待ち受ける多くのハードルは、いま日本にいる専門家の方々の参加により、ずっと低く、飛び越えやすくなるはずだ。得意分野を生かし、工学と生物学の境界領域で、鯨類を対象とした研究ができるチャンスは、とても魅力的であると思う。

## 参考文献

- 1) Nishimura, C.E. and Conlon, D.M., "IUSS dual use: monitoring whales and earthquakes using SOSUS", *Marine Technology Society Journal*, 27(4), 13-21, (1994).
- 2) Stafford, K.M., Fox, C.G. and Clark, D.S., "Long-range acoustic detection and localization of blue whale calls in the northeast Pacific Ocean", *J. Acoust. Soc. Am.*, 104 (6), 3616-3625, (1998).
- 3) Cummings, W.C. and Thompson, P.O., "Underwater sounds from the blue whale, *Balaenoptera musculus*", *J. Acoust. Soc. Am.*, 50(4), 1193-1198, (1971).
- 4) Stafford, K.M., Nieukirk, S.L., and Fox, C.G., "Low-frequency whale sounds recorded on hydrophones moored in the eastern tropical Pacific", *J. Acoust. Soc. Am.*, 106(6), 3687-3698, (1999).
- 5) Stafford, K.M., Nieukirk, S. L., and Fox, C.G., "Geographic and seasonal variation of blue whale calls in the North Pacific", *J. Cetacean Res. Manage.* 3, 65-76, (2001).
- 6) McDonald, M., Hildebrand, J. A., and Mesnick, S. L., "Biogeographic characterization of blue whale song worldwide: Using song to identify populations", International Whaling Commission 2003 meeting, Berlin, SC, 55, SH7, (2003).
- 7) Howe, B. M., Anderson, S. G., Baggeroer, A., Colosi, J. A., Hardy, K. R., Horwitt, D., Karig, F. W., Leach, S., Mercer, K., Olson, L. O., Peckham, D. A., Reddaway, D. A., Ryan, R. R., Stein, R. P., von der Heydt, K., Watson, J. D., Weslander, S.L., and Worcester, P. F., "Instrumentation for the Acoustic Thermometry of Ocean Climate (ATOC) prototype Pacific Ocean network", *Oceans'95 Proceedings*, 1483-1500, (1995).
- 8) Burtenshaw, J. C., Oleson, E. M., Hildebrand. J. A., McDonald, M., Andrew, R. K., Howe, B. M., and Mercer, J. A., "Acoustic and satellite remote sensing of blue whale seasonality and habitat in the northeast pacific", *Deep Sea Res.*, (in press).
- 9) Jaquet, N., Dawson, S. and Douglas, L., "Vocal behavior of male sperm whales: Why do they click?", *J. Acoust. Soc. Am.*, 109(5), 2254-2259, (2001).
- 10) Tieman, C. O. and Porter, M. B., "Automated Model-Based Localization of Sperm Whale Clicks", *Oceans 2003 proceedings*, 821-827, (2003).
- 11) Hirata, K., Sugioka, Y., Fujisawa, I., Katayama, T., Kaiho, Y., Hishiki, K., and Kashiwabara, S., "On characteristics of inherent sensor noise of ocean

bottom seismometers attached on the real-time seafloor geophysical observatory off Kushiro-Tokachi – A calibration test at the JMA matsuhiro seismological observatory– “, JAMSTEC J. Deep Sea Res., 18, 129-137, (2001).

12) Sugioka, H. Fukao. Y., Oakmoto. T., and Kanjo. K., “Detection of shallowest submarine seismicity by acoustic coupled shear waves”, J. Geophys. Res., 106, 13485-13499, (2001).

13) 赤松友成, “動物のおしゃべり解説学 声に出るクジラとイルカの生活様式”, 日経サイエンス, 364, 64-66, (2002).

14) 赤松友成, “海洋計測：(1) クジラとイルカを声で見る”, 海洋音響学会誌, 29(2), 61-66, (2002).



図1 室蘭沖にやってきたミンククジラ (撮影 笹森琴絵)。この海域では、最も観察される頻度が高いのは、6月を中心に5月から7月の間である。季節的な回遊を行っているようだが、その分布域の変動は不明である。

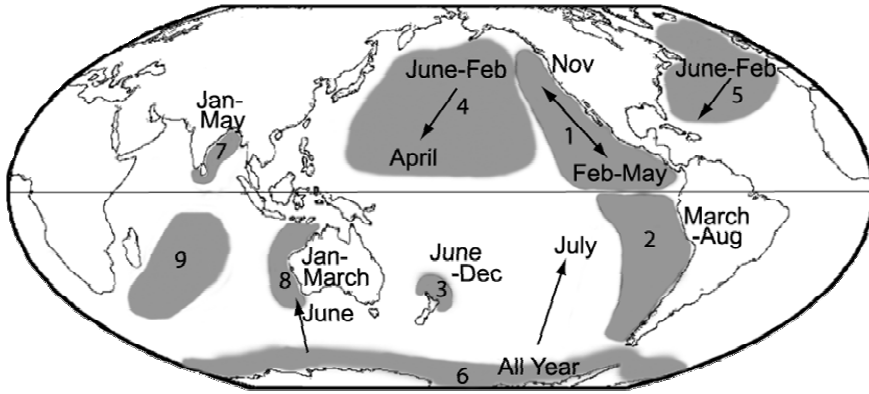


図2 シロナガスクジラの分布海域を鳴音タイプから分類した例<sup>6)</sup>。矢印は季節回遊の方向を示す。分布海域としては、1：北東太平洋、2：南東太平洋、3：南西太平洋、4：北太平洋、5：北大西洋、6：南極海、7：北インド洋、8：南東インド洋、9：南西インド洋、の9つに分類される。