

# 音で海の生き物を観る

赤松 友成<sup>†1</sup>

海洋生物の新しい遠隔探査技術が急速に発展している。たとえばイルカでは、鳴き声からその個体数まで計測できるようになった。この技術は現在クジラや魚やエビに展開されようとしている。また、イルカの生物ソナーを模倣した広帯域スプリットビーム技術により、鳴かない生物についてもその反射音の特徴から体長や種を推定する試みが進行中である。音響工学と海洋生物学を融合すると、衛星から写した雲の写真のように海洋生物の種ごとの地図化ができる可能性が見えてきた。海洋生物の音響リモートセンシングを目指して、いま行われている研究の最前線を紹介する。

## Acoustic remote sensing of marine organisms

TOMONARI AKAMATSU<sup>†1</sup>

Acoustic remote sensing of marine organisms is a quickly developing technology. For example, counting number of existing dolphins are now possible by just receiving their vocalizations. This technology is ready to apply other creatures such as fish and shrimps. A newly developed broadband split beam sonar called dolphin mimetic sonar has been applied for estimation of body size and species of fish, which do not produce sounds. Inter-disciplinary subject combining acoustic engineering and marine biology will enable mapping of marine biological resources, which is similar to the satellite image of the earth from the space. Updated acoustic remote sensing technologies are introduced.

### 1. はじめに

音響学と海洋探査は、切っても切り離せない関係がある。電磁波が届かない海中では探査のため音波を発し、この反射音を受信して海底深度や資源が調べられている[1]。積極的に音波を発するこうしたアクティブソナー技術だけでなく、潜水艦や地震の探知にみられるパッシブ技術の進歩もめざましい[2]。いつやってくるかわからない対象の音波にじっと耳をすませ、その特徴をとらえて対象判別を行う手法である。

近年、こうした音響技術が海洋生物の観察のために使われ始めた[3]。大型のヒゲクジラの音声を受信する新しい生態調査手法がその先導役を果たしている。これからの10年程度で、海洋のいたるところに音響センサーを配置し、これから得られる情報を用いて海の生き物の動態が可視化できる可能性がある。個々の海域の種の音を知り、音から種を判別する技術、すなわち音響リモートセンシングの基礎技術ができれば、海域や生態系における海洋保護区の設定・多様性の計測・水産資源管理・海洋生物モデル同化など様々なテーマに応用できる。

いま重点的に進めなければならないのは、種判別精度の向上である。これには音響工学者の持つ技術が極めて役立つと考えられる。時系列で大量に取得される音響情報から雑音を取り除き、目的とする信号を取り出す必要がある。音源定位やトラッキングによる個体の発声行動の把握、膨大なデータの地図情報への統合も期待される。

ここで述べた種や個体を人間の個人に置き換えると、SF映画によく出てくる場面が想像される。大使館の地下にある秘密の情報センターから、監視カメラや携帯通話あるいはネット上を飛び交う情報にアクセスし、その内容を理解して分類し、個人と位置を特定して、特殊工作員に指示が出されるあの場面である。映画ほどではないにしろ、陸上ではこうした技術はすでに現実のものになっているが、水中ではこうした技術が発展しているのは潜水艦探知くらいであろう。

これまでのところ、海洋生物の発する音声や、音を当てたときの反射音は、ごく一部の種でしか同定されていない[4]。個々の生物種の音声データベースはいまだ不完全である。衛星を用いたリモートセンシングによる都市や農地などの利用状況の可視化には、地道な現場観測が不可欠であるように、種ごとの丁寧な観察と基礎的知見の蓄積が必要である。また、陸上と異なり海中には既存の音響センサーは極めて限られた数しかない。

ところが、海洋の資源開発が盛んになるにつれ、海中の音響観測網が急速に広がってきた。また、安価な水中録音機材も利用できるようになってきた。SF映画の海洋生物版が実現される要素技術が整ってきた。ここで紹介するのは、比較的短かつ狭い時空間スケールでの、音波による水中生物の可視化事例である。

### 2. 声でイルカを数える音響技術

「ホーホケキョ」と声がすれば、姿が見えずともウグイスがいることはわかる。では、春の野山を一時間歩いて聞こえた「ホーホケキョ」の数から、ウグイスの数を推定す

<sup>†1</sup>国立研究開発法人水産総合研究センター  
Fisheries Research Agency

ることは可能だろうか。一見すると難しそうだ。たまたま鳴かなかったウグイスは数えられない。あるいは一羽が二回鳴いたことと、二羽が一回ずつ鳴いたことが区別できない。

慎重に調査設計をすれば、これらの問題が解決できることがイルカ類で示された[5]。小型のハクジラ類であるイルカは、哺乳類であるため浮上して呼吸しなければならない。イルカは、水中の探査のために有名なエコーロケーションという超音波探査能力を使う。これらが独立した観察の手がかりを与えることが重要である。イルカは数分に一回必ず浮上しなければならないし、ある程度頻りに声を発しなければならない。すなわち、視覚的あるいは音響的な存在の手がかりが、不完全ではあるが利用できるということだ。

まず、一頭が二回観察されることと二頭が一回観察されることを区別する問題を解決する。そのためには、観察者がイルカより十分に速く移動すればよい。浮上を目で見たり、発声を水中マイクロホンで確認したりしたときに、その方位も計測しておく。音源方位はステレオマイクへの音の到達時差から計測できる。続けて計測された浮上や発声方位が、前回の計測方位より前にあれば新しい個体として採用し、後ろであれば同一個体の疑いがあるため採用しない。観察者の移動速度が、イルカの遊泳速度より速ければ二重カウントを避けることができる。イルカは毎秒 1m から 2m で泳ぐので時速 10km で航行すれば十分だ。

しかしこれでは鳴かない個体はわからない。もう少し正確に言えば、見逃し率の算定が難しい。これを解決するための簡便な方法が水産学から提供されている。水産資源の計測方法の一つに標識再捕というものがある。これは、捕獲していない魚の数を推定する強力な手法である。まず、捕獲した魚にプラスチックでできたリボンを取り付け、海に放す。しばらくして十分に野外の個体と混じったところで、もう一度その種を捕獲する。再捕である。このとき、リボン付きの魚の割合が少なければ少ないほど、資源の量が大きいことが推定される。母集団としての資源量が多ければ多いほど、標識された個体数は薄まってしまい、再捕され難くなるためだ。

近年は、音響的手法のみによる標識再捕法も開発され[6]、定点型の音響観測装置から周辺の生息密度も推定できるようになった[7]。イルカ類の自動計数は手法としてはほぼ確立したと言える。

魚なら、捕まえてタグを付けることはできないことはないが、野外で泳ぐイルカを捕まえて標識をとりつけることは相当難しい。そのかわりに、独立した2つの手がかりを用いることにする。浮上が見えた個体は、仮想的にその時刻に標識されたと考える。その後、船の後ろで曳航している水中マイクロホンに一定の時間以内にイルカの音声を受信された場合、再捕されたと考える。音響と目視の手がかりはそれぞれ秒単位で検出時刻を計測できるため、一定の

時間窓を設定することで仮想的な再捕を定義することができる。再捕率が低ければ見逃し率は高く、再捕率が高ければ見逃し率が低いという原理を使ってイルカの見逃し率を算定し、実測の検出数を見逃し率で割ってやれば、観察範囲内で鳴かなかったあるいは浮上しなかったイルカも含めた全数の推定が可能になる(図1)。実際のモデル式は群れ構成個体数のバイアスを取り除くため、単独検出と複数検出を分離して検出確率を計算する。

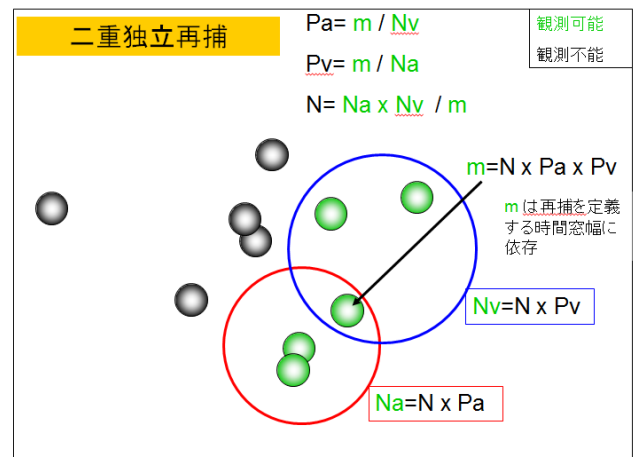


図 1 二重独立再捕の模式図

Figure 1 Independent mark-recapture method.

### 3. 声で魚の種を見分ける音響技術

イルカやクジラだけでなく、多くの魚が鳴くことは意外に知られていない。たとえば、フグはグーと鳴く。イセエビもギギッという音を発する[8]。スケトウダラ[9]やホウボウは、専用の発音器官を持っており、数百ヘルツの低周波でウキブクロを振動させる。グーとかググッと聞こえ、周波数帯域幅は比較的狭い。一方、ニベ(通称イシモチともいわれる)の仲間はパルス列からなる鳴音を発する。こうした特徴のため、周波数や帯域幅やパルス間隔といった簡単なパラメータだけでも、種あるいは属の分類ができることがある。魚類やイルカ類は発音メカニズムが人間とは異なるが、現在利用可能な音声認識技術を改変することで、その音声認識を行うことは十分に可能であると思われる。

もし、魚の音声による種の認識ができると、水産資源計測にまったく新しい技術が提供できるかもしれない。分析の流れはイルカと同じである。たとえば水中マイクロホンをトラフグの産卵海域で曳航することで、見逃し率を算定し、その海域で産卵に加入しているフグの数を、まったく捕獲せず、つまり資源に影響を与えずに計測できるかもしれない。おいしいフグを末永く食べるために音響学が活躍できたら素晴らしい。

魚やエビが鳴くといってもにわかには理解しがたいかもしれない。そこで水中生物音図鑑というものを作成した。

下記の URL あるいは「水中生物音図鑑」で検索すると、いろいろな海の生き物の声が聞こえるページが表示される。

<http://cse.fra.affrc.go.jp/akamatsu/SoundDatabase/Index.html>



図 2 水中生物音図鑑

Figure 2 Underwater bioacoustics database.

#### 4. 反射音で魚の体長と種を判別する音響技術

マグロ類は我が国の最重要水産資源の一つである。全世界からマグロ類の漁獲物が我が国に集められ消費されている。その適切な資源管理が重要であることは、海域ごとに設定された多くの国際機関の勧告を見ても明らかである。

資源管理の基本は、種別の漁獲可能量の設定とそれに基づいた適正な漁獲の堅持である。ところが、これまでのマグロ漁業は巻き網を用いることが多く、とってみなければ種がわからないことが多かった。

この問題に挑戦できる音響技術が、広帯域スプリットビームシステムである[10]。その一つとして開発されたイルカ型ソナーは 70kHz から 130kHz の広帯域音波を送受信でき、パルス圧縮を用いた 5cm 以下の空間分解能により魚一尾ずつの反射音を分離できる。この特性を用いて、ウキブクロを有するメバチと有さないカツオの区別を野外で行うことに成功した。巻き網を投入する前に探索船が出動し、これに装備したイルカ型ソナーが魚種を判別する。捕りたい種類たとえばカツオの割合によって漁獲するか否かの判断に役立つ。マグロの魚群は一群れに複数の種が混在していることが多いので、漁獲の際により分けることが難しい。このため、群れ内での種構成

割合を漁獲前に知ることが有用である。

イルカ型ソナーのメリットは高い空間分解と広帯域反射を得ることができる 2 点にある。魚の個体からの反射スペクトルを音の入射角度で整理すると、種に独特のパターンが現れる。魚の内部にある様々な反射体、たとえばウキブクロや骨格や表皮の大きさや形状や配置によって、この反射特性が異なるためである。

こうした音響的特徴を用いることで、見えない魚の個体数と体長と種を同時に判別する試みが進められている。体長に関しては比較的精度が高く計測できるが、課題は種判別精度を上げることにある。そのためには、個々の種の魚の広帯域反射特性のデータベースを整備するとともに、音響的な判別技術も向上させなければならない。おいしいマグロやカツオを末永く食べるためにも、音響技術が貢献できそうだ。

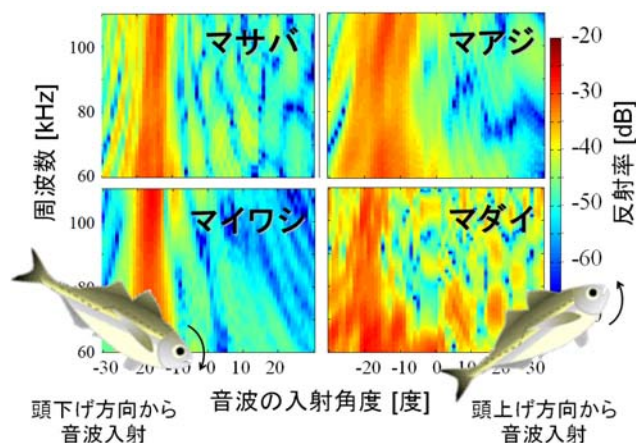


図 3 魚の種類ごとの広帯域反射音特性

Figure 3 Broadband response of each fish species.

#### 5. 海底ケーブルでクジラを見つける音響技術

東日本大震災以後、我が国周辺海域の海底ケーブル観測網の展開が著しい。国立研究開発法人海洋研究開発機構が熊野灘や四国の沖に展開した DONET1&2\*と呼ばれる大規模ケーブルネットワークだけでなく、防災科学技術研究所を中心に日本海溝海底地震津波観測網 (S-NET) の構築が行われている。これらのシステムでは、ヒゲクジラ類の低周波鳴音を受信することができる。つまり地震や津波の観測網でクジラが見えるのだ。

\* <https://www.jamstec.go.jp/donet/j/donet/>

地震計ネットワークを用いた生物鳴音モニタリングの大きな利点は、すでにある巨大な観測網を用いることができる点にある。しかもそのデータは数年にわたって蓄積されているので、過去にさかのぼって生物の存在を確認することができる。海洋研究開発機構が 1990 年代から記録を続けている相模湾の初島沖ケーブルデータ

から生物鳴音抽出を行った。過去のデータを「発掘」することにより、年単位で当該海域に出現するマッコウクジラの動態を明らかにした[11]。

海底ケーブルの主目的は地殻や海洋の観測であるが、その副産物として海洋生物モニタリングにも応用できることが実証された。この成果は、アジア水域では初めてであり、米国側の東太平洋のモニタリングシステムと照合することで、マッコウクジラやナガスクジラなどの高次捕食者の出現動態が北太平洋全域で明らかになる日も遠くないだろう。期待される成果は、海洋生態系モデルの構築や予測精度の向上にも貢献すると考えられる。また、大型鯨類の非致命的調査が望まれている国際情勢下で、対象生物にまったく影響を与えずに長期間の観察ができる本技術が役立つと考えられる。

## 6. 日本の貿易を支える音響技術

近年大きな問題となりつつある海中騒音の海洋生物への影響についてここで触れたい。この問題は、今後の我が国の今後の経済発展を左右しかねない。たとえばEU諸国ではすでに騒音レベルの高い船舶の入港制限が検討されはじめており、国際生物多様性条約会議においても船舶騒音対策のため国土交通省が対応を迫られている。温暖化に伴う北極海航路の開通期間の延長により、これまで静穏であった同海域に生息するホッキョククジラへの影響が議論されている。国際標準化機構においては深い水域における船舶騒音の物理計測基準の策定が終了した(ISO/DIS16554)。海運に強制力を持つ国際海事機構(IMO)もこの問題を認識している。このような情勢のもと、我が国の生命線である海運を維持し海洋資源を確保していくためには、海洋生物への騒音影響評価が避けて通れない。

これから構築されようとしている水中生物音の大規模モニタリングネットワークは、そのための基礎情報を提供することにも活用できる。遠隔的種判別技術は、騒音の同定にも原理的には応用可能であり、そのまま海洋音響の生物影響評価チームとなることができる。対象を海洋生物から船舶や海洋構造物に拡大するだけで、開発技術がそのまま使えることも強みである。船舶の静穏化技術は我が国が進んでいる分野でもあり、むしろこの国際問題は我が国の海運造船業にはチャンスと考えられる。

**謝辞** 本研究成果は、独立行政法人科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(CREST)「海洋生物の遠隔的種判別技術の開発」、科研費基盤研究(B)海外「音響バイオロギングによる大型ヒゲクジラの摂餌行動の研究」、生物系特定産業技術研究支援センター異分野融合研究支援事業「イルカ型対象識別ソナーの開発」、科研費基盤研究(B)海外「ヨウスコウカワイルカ保全のための揚子江全域音響調査」、生

物系特定産業技術研究支援センター新技術・新分野創出のための基礎研究推進事業(若手研究者支援型)の援助を得て実施された。

ここに紹介した成果は、多くの方々のご協力なしには実現できなかった。限られた紙幅のため、ここに挙げるができない皆様と機関および予算源に感謝する。

## 参考文献

- 1 海洋音響学会: 海洋音響の基礎と応用, ISBN 978-4-425-53071-7, (2004).
- 2 Nishimura, C.E. and Conlon, D.M.: IUSS dual use: monitoring whales and earthquakes using SOSUS, Marine Technology Society Journal, Vol.27, No 4, pp.13-21 (1994).
- 3 David, K. Mellinger, Kathleen, M. Stafford, Sue, E. Moore, Robert, P. Dziak, and Haru, Matsumoto: An Overview of Fixed Passive Acoustic Observation Methods for Cetaceans, Oceanography, Vol. 20, No 4, pp. 36-45 (2007).
- 4 Fish, M.P. and Mowbray, W.H.: Sounds of Western North Atlantic fishes. The Johns Hopkins Press, Baltimore, (1970).
- 5 Akamatsu, T., Wang, D., Wang, K., Li, S., Dong, S., Zhao, X., Barlow, J., Stewart, B.S., Richlen, M.: Estimation of the detection probability for Yangtze finless porpoises (*Neophocaena phocaenoides asiaorientalis*) with a passive acoustic method, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 123, No. 6, pp. 4403-4411 (2008).
- 6 Kimura, S., Akamatsu, T., Dong, L., Wang, K., Wang, D., Shibata, Y. and Arai, N.: Acoustic capture-recapture method for towed acoustic surveys of echolocating porpoises, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 135, pp. 3364-3370 (2014).
- 7 Kimura, S., Akamatsu, T., Li, S., Dong, S., Dong, L., Wang, K., Wang, D., and Arai, N.: Density estimation of Yangtze finless porpoises using passive acoustic sensors and automated click train detection, J. Acoust. Soc. Am. Vol 128, pp.1435-1445(2010).
- 8 Kikuchi, M., Akamatsu, T., Takase, T.: The stridulating sounds in Japanese spiny lobster monitored by passive acoustic observation. Fisheries Science, published online (2014).
- 9 朴容石, 桜井泰憲, 飯田浩二, 向井徹: スケトウダラの発音機構, 日本水産学会誌, Vol. 61, No. 2, pp. 243-244(1995)
- 10 Imaizumi, T., Furusawa, M., Akamatsu, T., and Nishimori, Y. Measurement of target strength spectrum of fish using sonar signals of dolphin, J. Acoust. Soc. Am. Vol. 124, No. 6, pp. 3440-3449.
- 11 Iwase R.: Fin whale vocalizations observed with ocean bottom seismometers of cabled observatories off east Japan Pacific Ocean, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 54, No. 7S, accepted (2008).