

## ISSUE 2

# イルカのソナーに学ぶ 新しい魚群探知技術

イルカの有するソナーは高い空間分解能と高度な対象判別能力をもっている。これまでの魚群探知機がモノクロテレビであったとしたら、イルカ型ソナーはハイビジョンテレビと言えるだろう。イルカのような広帯域ソナーを漁業資源探査に応用すべく、その基礎的な仕組みを理解し、工学的応用を試みた。その結果、イルカのソナーの自動焦点機能や探索モードの切り替えなどが明らかになった。現在、イルカソナーシミュレーターを構築し、実証機開発に向けた準備が進んでいる。

赤松 友成 Tomonari Akamatsu

独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所  
水産情報工学部 主任研究員

## 1 | 未来の魚群探知

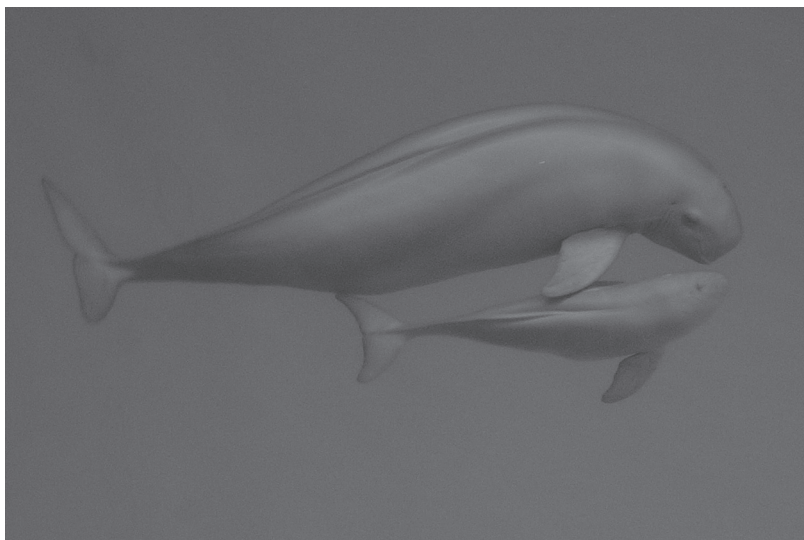
イルカは**超音波\***を送受信して水中を探る優秀な**ソナー\***をもつことが知られている(図1)。米海軍は機雷掃海などのためにイルカの探知能力を研究し、イルカがそのソナー能力を用いてターゲットの大きさだけでなく、その厚みや材質や形までも区別できることを示した<sup>1)</sup>。しかし、もともとイルカは餌となる魚を探知するためにソナー

を進化させてきたわけで、人間の軍事的な応用のためではない。イルカのソナーは、魚を見るために最適化されているはずだ。イルカのソナーがなぜこれまで真剣に魚群探知機に応用されてこなかったのか、考えてみると不思議である。

もしイルカのような魚群探知機が実現したとしたら、どんなことができるだろうか。イルカのソナーは対象弁別が得意である。魚の尾数や種類や脂の

り具合まで、獲る前に漁船のブリッジでわかっただけで、とても便利に違いない。必要な魚だけを必要な量だけ獲ることができれば、資源の枯渇を防いで漁業を末永く続けることができるだろう。獲ってみなければわからない時代が終わり、効果的な資源管理ができるようになる。

獲る前に資源の「質」がわかると、まるでスーパーのレジのPOSシステム(point of sales systems, 販売時点管



中国初の銅育下で誕生したスナメリ\*の赤ちゃん。イルカはソナーを使ってどんな水中イメージを得ているのだろうか。(提供：中国科学院水生生物研究所)

図1 イルカ(スナメリの親子)

### 【超音波】

人間の耳に聞こえないほど高い周波数の音波。音として特別なものではないが、周波数が高くなればなるほど直進性や解像度が増す。

### 【ソナー】

水中音波を用いて海中の物体に関する情報を得るための技術または機器。sound navigation and rangingの頭文字(『海洋音響用語辞典』海洋音響学会より)

### 【スナメリ】

アジアの沿岸域に生息する小型のイルカ。日本では仙台湾から房総沿岸、伊勢湾三河湾、瀬戸内海、有明海などにみられる。浅いところを好み、陸からも観察できることがある。地味だが私たちに最も身近なイルカである。揚子江にも淡水に生息する個体群が存在する。

理システム)のような離れ技も可能である。たとえば、イルカ型魚群探知機に映った魚群の映像をマウスで選択すると、魚の種類別の尾数とトン数だけでなく総水揚げ価格が表示される。漁師さんはそれを獲るべきか、値段が安いので次の魚群を探すべきか参考にできる。ネットワークと結ばばその魚をどこに水揚げしたら一番利益が上がるかもわかるようになるし、現場でのリアルタイムな漁獲調整で価格暴落を防ぐことができるかもしれない。漁業資源が、値札が付いて海の中に陳列されている商品のようなものになるわけだ。市場の需要や在庫、さらには次の年度の資源加入量予測と比較して、その商品を獲るべきかどうかをアドバイスできる利口な魚群探知機ができればおもしろい。

イルカ型魚群探知機ではあらかじめ狙っていた以外の資源を見つけることもありえる。未成熟資源や未利用資源の情報を自動的に記録して、漁業協同組合のデータセンターに集めれば、現在の資源だけでなく未来の資源予測にも役立つだろう。資源の状況が、あらかじめ調査をせずとも通常の作業中に計測され、時々刻々とモニタできるようになればすばらしい。

対象弁別能力のある音響探知機は、密猟防止やテロ対策にも役立つと考えられる。アワビの密漁現場を水中で探知したら大きな音で驚かし、浮上したところを写真に撮れば、証拠を押さえられた密猟者には相当のプレッシャーである。あるいはタンカーなどの船底にへばりついて主要な港湾に侵入してくる作業員を発見できれば、警備チームに早期に知らせることができるだろう。実際、魚の種類を見分けることに比べれば、魚と人間を区別することは

ずっと簡単なはずである。

イルカ型ソナーは人命救助にも使えるかもしれない。海難事故が起こったときにはまず救助すべき人を発見することが大切である。どこにいるかがわかれば救助隊が助けに行けるが、初動の捜索には航空機や船舶からの目視といった地道な方法しかない。各船の魚群探知機に人命救助モードがあって、僚船の遭難のときに仲間の漁師をいち早く見つけることはできないだろうか。

海中のターゲットを探知して区別することは、これからの漁業やセキュリティ、資源量予測にとって鍵になる技術だと考えられる。その秘密の鍵をはるか昔からもっているのがイルカだ。

## 2 | イルカのソナーの特徴

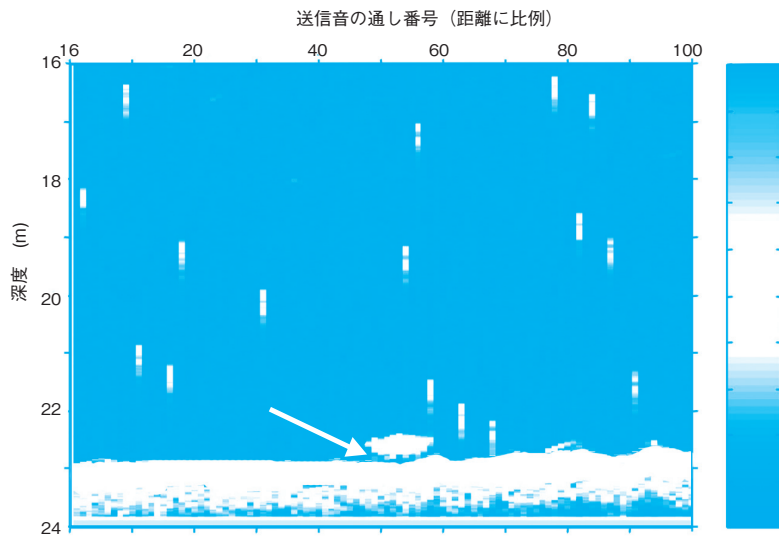
イルカのソナーと魚群探知機<sup>2)</sup>は、使っている音の周波数(1秒間の振動数)が似ている。ともに数万ヘルツから二十万ヘルツ程度である。このような高い周波数の超音波は、魚のとくにウキブクロから効率よくはね返ってくる。これより低い音は魚のような小さいターゲットを素通りしてしまうし、これより高いと何十mも離れた魚群まで音が届かない。たとえば妊婦さんの検査によく使われる超音波画像診断装置では、魚群探知機よりずっと高い数百万ヘルツの音で、胎児のペニスのような非常に小さいターゲットを見て男か女か判断するわけだが、脂肪の厚い人はおなかの中が見えにくいそうだ。そのくらい到達距離が短い。広い海での魚の探知には、ある程度遠くまで届き、魚が見えるくらいの精度をも

つイルカのソナーの周波数帯域が最も適している。人間は遅ればせながらこうした事実を学び、漁業資源の探査にイルカと同じ周波数を使用するようになった。

しかし、イルカのソナーと人間の魚群探知機では違うところが多くある。一番の違いは、イルカのソナー音が2万分の1秒というとても短い時間しか続かないパルス音であるのに対し、魚群探知機の音波は千分の1秒もの時間、継続する。水中で音波は1秒間に1500m進むから、魚群探知機では1回の発信音が1m以上の長さをもっていることになる。大きな魚群全体を見るには都合がよいが、1尾1尾を仔細に調べるのは難しい。一方イルカのソナー音は水中でも8cmの長さしかない。2尾の魚が8cm以上離れていれば、それぞれの魚からの反射音を分離できる。

実際私たちの研究グループでは、イルカソナーシミュレーターを開発して、イルカが使うような広帯域極短パルスの超音波を高出力で送受信し、1尾1尾の魚からの反射波を別々に計測した<sup>3)</sup>(図2)。さらに館山湾で海底にへばりついている魚群を海底と分離して観察することにも成功した。これまでは、魚群探知機の映像で海底から立ち上がっているものは海草なのか根なのか魚群なのかのかわかりにくかったが、海底から浮いていることが見えれば魚であることがわかる。

イルカのソナーのもう1つの大きな特徴は、広帯域音を用いていることだ。広帯域音というのは平たく言えば濁った音で、いろいろな高さの音が混じっている。イルカのソナーは数万ヘルツと述べたが、実際は複数の音が混じっており、机をコンコンと叩いたときに



白矢印で示したように、海底との間に隙間がある。海藻や根ではなく魚であることがわかる。ところどころに見える縦長の点は従来型魚群探知機の音の混信である。このような混信を防ぐためにもイルカのソナーの使い方が参考になる。

図2 館山湾の海底に見られた魚群

聞こえるような濁った短い音である。人間の使う魚群探知機の音はそうではない。口笛のようなピーという音で、1つの周波数成分しか含んでいない。

周波数が1つしかないと不便なことがある。情報がモノクロになってしまうことだ。たとえばドライブしているときに、オレンジ色のナトリウムランプに照らされたトンネルに入ると、手元の道路地図の色が消えてしまう。赤も青も黄色もなく、ナトリウムランプのオレンジ色の濃淡しかわからない。単一周波数で魚からの反射波を聞くということは、本来さまざまな音色がついているはずの各種魚からの反射音

※ 魚群探知技術は現在も進歩しており、従来型でも魚の大きさを弁別するために2周波数あるいはそれ以上の周波数を同時に使うものもある。また空間分解能についても改善が見られる。ただしイルカのような広帯域極短パルスを用いているものはない。広帯域化と高精度化は、これからの水中音響探知技術の大きな流れと考えられる。魚群探知機が「イルカ化」していくのは、必然的な方向なのであろうか。

を、1つの音色(周波数)だけで調べていることになる。現在の魚群探知機は、音響的にはモノクロの情報しか得てないものが大部分である\*。

一方、イルカのソナー音はいろいろな周波数を含んでいるから、反射音に音色がついている。机や皿や壁をコンコンと叩くと材質によって音色が違うように、短い音で叩くことはいろいろな周波数の応答を同時に聞いているということになる。慣れてくれば、目を閉じていても何を叩いているかわかるようになる。イルカの発する短い超音波パルス音がまさにこれである。もし音の強弱だけしかわからなかったら、叩いている物の材質を音だけで判断するのはほぼ不可能だ。

従来の魚群探知機は、はね返ってきた音の強さを色で表しただけで、原理的には白黒テレビだ。一方イルカのソナーは、細かいところまで見えて色が付いているハイビジョンテレビと言える。

ならば、どうして人間は最初からイ

ルカのような広帯域短パルス音を魚群探知機に使わなかったのだろうか。それは雑音に弱いことと、混信を防ぎにくいという2つの壁があったからである。イルカのソナー音はいろいろな周波数を含んでいる性質上、ほかから入ってくるどんな周波数の音も雑音になる。たとえば、船のスクリューの泡から発せられる騒音や、テッポウエビなどの生物由来の雑音が計測の邪魔をする。1つの周波数しか使わないのであれば帯域通過フィルタという特定の周波数だけを通す回路を使えば、雑音のかなりの部分を削除することができる。しかしイルカのソナー音はもともとたくさんの周波数を含んでいるので帯域通過フィルタが使えない。

さらに、イルカのソナーのようにとても短いパルス音だと長い音に比べて総エネルギーが小さいことも問題である。瞬間的には大きな音圧であっても、総エネルギーが小さいとやはり雑音に埋もれやすくなってしまふ。

もう1つの困難は、混信である。たくさんの漁船が同じ海域で魚群探知機を使うとする。あるいは超音波を出す測深器や流速計などを併用することもありえる。このとき互いに周波数が異なれば、先述の帯域通過フィルタで混信しないようにするのは簡単だ。テレビのチャンネルを変えるように周波数を変えるのが混信回避の基本である。しかし、イルカ型ソナーではもともとたくさんの周波数が短いパルス音の中に一緒に詰まっているので、チャンネルを変えることができない。

ところが、イルカはこれらの2つの問題、雑音抑制と混信回避をすでに解決しているようだ。沿岸域に棲んでいるイルカは、テッポウエビや甲殻類の発する大きなレベルの広帯域雑音に常

にさらされている。しかも浅いところでは海底や海面からの自分自身の音の反射があり、これも雑音になる。さらにイルカは群れで泳いでいることが多い。ときに数十頭から数百頭もの群れを形成する。こんな状況にもかかわらず、かれらは上手にソナーを使って餌となる魚を狩っている。

### 3 | イルカのソナーの秘密

そこで私たちは、まずイルカがどのような声を出しているのかを調べることにした。イルカに録音器を付けて野外に放ち、単独だけでなく群れで行動しているときのソナーの使い方を時々刻々観察することにした。

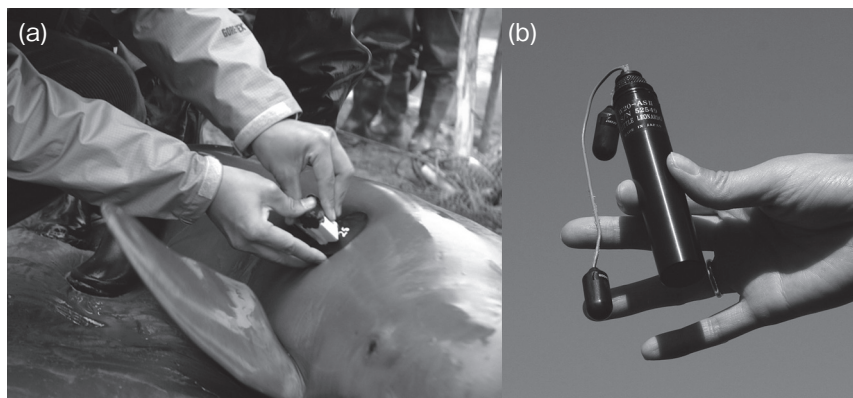
このプロジェクトが開始された2002年当時、そんな観察ができる装置は存在しなかった。予算の2次選考会で、私は太めのボールペンほどに丸めた黒い紙の筒を選考委員の先生方に見せ、今は紙だがこの資金で動物装着型の録音器を開発してイルカのソナーの使い方を解き明かしたいと述べた。厳しい競争のある予算だったが、幸いなことに採択された。その後の開発での紆余曲折を経て<sup>4)</sup>、A-tag と名付けた録音器が完成した。紙の筒が本物になったわけである。米国のウッズホール海洋研究所のグループのもつ D-tag という動物装着型録音器<sup>5)</sup>に比べ、A-tag は記録時間が最大60時間と1桁長く、重さは75gと1桁軽くなっている。このため、米国の装置は大型のクジラにしか取り付けられないが、日本の A-tag は小型のイルカであるスナメリにも装着可能だ(図3)。A-tag は、中国での現場試験で改良され、現在ではデンマークやアイスランドとの

共同研究で活躍している。

中国科学院水生生物研究所と一緒に行った現場試験で明らかになったことは、イルカが予想通り注意深いということであった<sup>6)</sup>。平均で1分間に5回程度ソナーを使っていた。また、1回の使用で数十から数百個のパルス音を発していた。音の発射間隔から、イルカがソナーで探索している距離は77mに達していると見積もられた。もちろんソナーを使わないまま泳いでいることもあったが、それはせいぜい20mであった。別の装置でイルカの泳ぐ速度を記録したので、イルカがソナーを使わず「不注意」なまま泳いだ距離もこのように計算できた。A-tag は、これまでまったく計測する方法がな

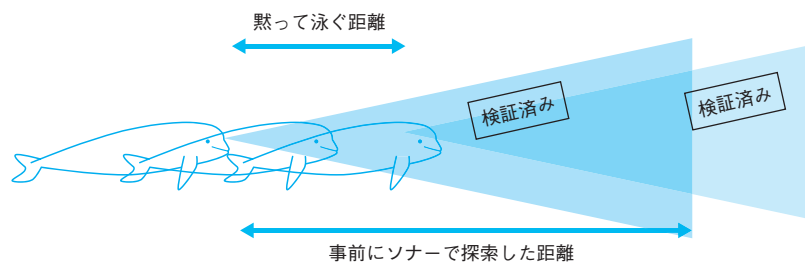
かった野外の動物の「注意力」も数字にして示してくれた。

この観測でわかったことは、自由に泳ぐ小型のイルカであるスナメリは、黙って泳ぐ前に、その前方をソナーで十分に確認していたことである(図4)。確認距離は数十メートルに及んでおり、かれらが実際に危険や餌などの報酬に出会う前に十分な「安全余地」を確保していた。私たちが音楽を聴きながらドライブしているとき、新しいCDに入れ換える前には前方確認をしなければならない。でなければ、すぐ事故になる。動線上の物体を確認しておくことは、動く生物にとって基本的な認知機能で、イルカにもそれが当てはまることがわかった。



(a) 中国の揚子江の三日月湖でイルカ(スナメリ)に A-tag を取り付けている。動物への装着は吸盤で行う。  
(b) A-tag は2本の水中マイクロホンを装備し、音源の方向も記録することができる。

図3 A-tag の装着

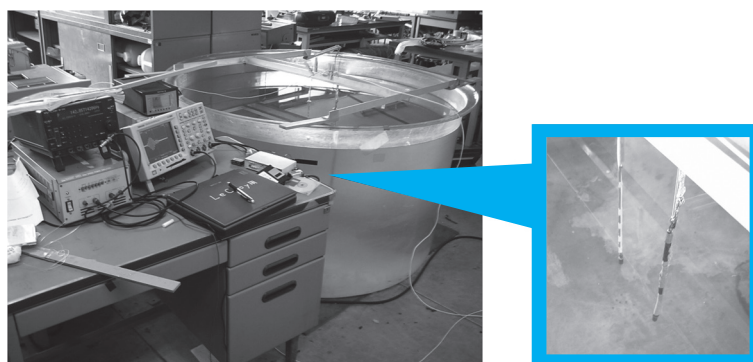


イルカは注意深い。まず遠方までを探索し、そのあとソナーを使わずに泳ぐも、検査済みの領域から出る前に次のソナーを使う。

図4 イルカのソナーによる探索

次に明らかになったことは、イルカが餌らしきものを確認すると、接近中もソナーの焦点をその標的に合わせる行動をとっていたことだ。イルカは、ターゲットに近づいた分だけソナーの探索距離を縮めていた。たとえば、イルカは音でできた伸縮自在の杖をもっている。その先をターゲットにあて、接近中は杖の長さをどんどん短くしていき、杖の先がいつもターゲットに触れているように調節する。イルカのソナーは伸縮自在の杖のようで、音感覚というより触覚に近いのかもしれない。このようなソナーの調節はコウモリではすでに知られていたが、野外のイルカで明らかにしたのはこのプロジェクトが初めてだった。イルカのソナーは、日頃は前方の広い範囲を注意深く探索し、いざとなると自動焦点カメラのようにターゲットを捉え続けることがわかった。このようなソナーのモードの使い分けが雑音抑制や混信回避に役立つのではないかと考え、研究をさらに進めている。

さらに私たちの研究グループでは、イルカのソナーの送受信を実験室で模倣できるイルカソナーシミュレーターを東京海洋大学と古野電気(株)と共同で構築した。このイルカソナーシミュレーターを使ってアジやマダイなどの異なる魚にイルカのソナー音を照射し、いろいろな周波数が混じっている反射音を解析した。すると、反射波の音色が種類毎に異なることがわかった。イルカソナーシミュレーターを使った実験は、最初は直径1.5mの小さな水槽で始められた(図5)。ふつう魚群探知機の送受信実験をこんな小さな水槽で行うのはばかげている。音の長さが1m以上になるので直接送信した音波と反射波の区別ができなく



実験は東京海洋大学古澤研究室博士課程在籍中の今泉智人によって行われた。このような小型水槽でもイルカのソナー信号は送受信実験が可能である。机の上には、波形発生器やアンプ、モニタ用のオシロスコープとデータ収集用のパソコンがある。右は、送受信器。初期型のため出力は弱いですが、イルカ型の広帯域ソナー音をシミュレートできる。

図5 初期のイルカソナーシミュレーター

なってしまうからだ。しかし、音波が8cmの長さしかないイルカ型ソナーでは、小さい水槽につり下げた魚を、その前のモニタ用の水中マイクロホンや水槽の壁などと明瞭に区別することができた。高度な空間分解能は、実験を行う上でも大いに役立った。

イルカソナーシミュレーターはできたばかりである。これから十分にその弁別能力などの優れた機能を試験していかねばならない。冒頭に述べた未来の魚群探知技術は、このプロジェクトを始める前に比べずいぶん現実味を増してきた。今後の改良で現場の使用に耐えられる実証機開発を目指していきたい。

謝辞 本稿のもとになったプロジェクト「イルカ型ソナーをモデルとした次世代魚群探知技術の研究」は、独立行政法人農業・生物系特定産業技術研究機構生物系特定産業技術研究支援センターの新技术・新分野創出のための基礎研究推進事業の援助で実施された。中国科学院水生生物研究所、東京海洋大学、古野電気、東北学院大学、デンマーク環境研究所、南デンマーク大ほか多くの機関が共同研究に参加した。

最近の成果は下記ホームページでも公開している。このページでは、イルカの声も聞くことができる。

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

[引用文献]

- 1) W.W.L. Au: The Sonar of Dolphins, Springer-Verlag, NY, p277 (1993).
- 2) 古澤昌彦: 水産工学研究所研究報告, 11, 173 (1990).
- 3) 今泉 智人, 古澤 昌彦, 赤松 友成: 海洋音響学会誌, 33, 143(2006).
- 4) 赤松友成: 海洋音響学会誌, 31, 99 (2004).
- 5) M.P. Johnson and P.L. Tyack: *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 28, 3 (2003).
- 6) T. Akamatsu, D. Wang, K. Wang and Y. Naito: *Proc. R. Soc. Lond.*, B, 272, 797 (2005).



赤松 友成 Tomonari Akamatsu

独立行政法人 水産総合研究センター 水産工学研究所 水産情報工学部  
行動生態情報工学研究室 主任研究員

略 歴: 1989年東北大学大学院理学研究科物理学科修了、現在に至る。博士(農学)。  
専 門: 水中生物音響学(とくにイルカのソナー)、海産哺乳動物の音響的観測技術、魚の聴覚と行動制御

受賞歴: 「超音波 TECHNO」'95テクノ教養賞(1996年)、海洋音響学会論文賞(2001年)  
著 書: 『イルカはなぜ鳴くのか』(文一総合出版)