

# 自律型海中ロボットによる鯨観測の研究

## —その1 観測装置—

Observation of Whale by Autonomous Underwater Vehicle -1 st Report: Equipment

岩 上 寛\*・浦 環\*・藤 井 輝 夫\*・浅 川 賢 一\*  
能 勢 義 昭\*・Rajendar BAHL\*\*・福 地 鐵 雄\*\*\*

Hiroshi IWAKAMI, Tamaki URA, Teruo FUJII, Kenichi ASAKAWA, Yoshiaki NOSE, Rajendar BAHL and Tetsuo FUKUCHI

### 1. は じ め に

人間の飽くなき探求心によって、生命誕生の地である海洋の未知の部分も少しずつ解明されてきている。その結果、研究対象は人間にとってより危険で忍耐と労力を要するものに絞られつつある。そこで近年では、コンピュータの著しい発展に伴って、人間が現場へ行き直接調査する従来の方法に変わり、人間の直接的な操作や指示を必要としない自律型海中ロボット (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) が徐々に実用化されている<sup>1)</sup>。著者らは新しいAUVの利用方法として鯨類調査を検討している。鯨類に限らず水棲生物を水中で探索、追跡することはどのような手法にあっても多くの困難をとまなう。現在、組織的に実施されている鯨類調査においては、小型鯨類を除き水中での生態の研究がほとんどなされておらず、海中ロボットを用いることで多くの知見が得られることが期待される。鯨類は鳴音と呼ばれる音を出す。特にザトウクジラはソングと呼ばれる特徴的な鳴音を発する。これに注目し、本研究では鳴音を頼りに鯨の位置を割り出し、クジラを追跡して観測する手法を検討実施する。本報告「その1」では、小型AUVに装備するために開発した観測装置を紹介する。

### 2. 観測装置の目的

本装置は水中で鯨を発見し追跡して水中での生態を観測するための音響装置である。

具体的には、ザトウクジラの鳴音を良質に録音し、位置を割り出し、鯨の移動方向や速度などの行動を記録することを可能とするものである。

\*東京大学生産技術研究所 海中工学研究センター  
\*\* Indian Institute of Technology, Delhi  
\*\*\* システム技研有限会社

### 3. 位置推定の原理

#### 3.1 ザトウクジラの鳴音の特徴

ザトウクジラは、繁殖・育児のため小笠原・沖縄周辺海域に主に冬期に回遊してくる。繁殖期には、雄がソングと呼ばれる鳴音を発する。ソングは方言のように海域や年によって多少の違いはあるものの、基本的にどの雄クジラも同じソングを歌うといわれている。ソングを構成する基本的な鳴音はユニットと呼ばれ、長さ0.2-2秒程で、約10-20種類ほどに分類される。このユニットの組み合わせでフレーズが、さらにテーマが構成され、このテーマを繰り返すことでソングとなる。ソングは短いもので10分、長いものでは20時間にも及ぶ。図1はオーストラリア沖で録音されたザトウクジラのソングの一部である。鳴音の周波数は40-4000 Hzで、そのほとんどは1000 Hz以下である。鳴音の音源レベルは160-190 dBと推測される。

#### 3.2 鳴音の認識方法

まず、準備の段階でこれまでに得られている日本近海のザトウクジラの鳴音のユニットを比較し、出現頻度の高い

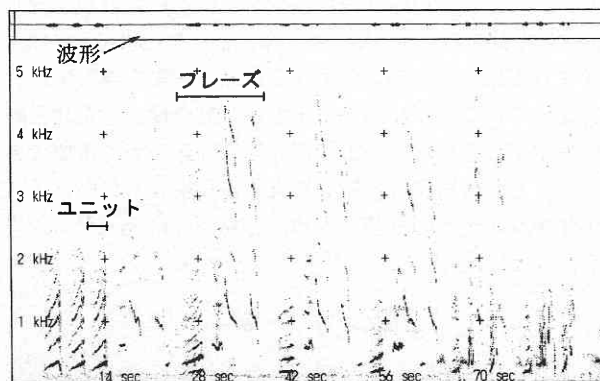


図1 ザトウクジラの鳴声のスペクトログラム

ものおよびお互いに相互相関値の低いもの(特徴的なもの)を中心に, 8種類ほど選出する。ユニットの長さはそれぞれ異なるので, 選出したものの最長のものに合わせ短いものには空白のデータを付け足して長さをそろえる。長いほうが正確性は増すが, 計算量も増えるので, バランスが重要である。今のところ2秒程度が適当と考えている。これらをFFT(Fast Fourier Transform)したものを鳴音認識用参照ユニットとして観測用コンピュータに保存しておく。

観測時には, 図2のように4本のハイドロフォンからの入力のうちの一つ(2秒)と, 上述の各鳴音認識用参照ユニットとの相互相関を取り, いずれかがあるレベルのしきい値を超えたときに入力信号にザトウクジラの鳴音が含まれていると判断する。

具体的には, 保存してある参照ユニット(FFT済み)を $X[k]$ , 入力をFFTしたものを $Y[k]$ とすると, 相互相関関数 $r_{xy}[m]$ は

$$r_{xy}[m] = \frac{1}{N} IDFT [X[k]^* \cdot Y[k]]$$

として表せる。なお,  $X[k]^*$ は $X[k]$ の複素共役である<sup>2),3)</sup>。

このようにして鳴音を検知したあと, 3.4章の位置推定に移る。

### 3.3 ザトウクジラの探知範囲

風浪階級3での海中雑音(100-4000 Hz)NLは約100 dB(re 1 μPa)である<sup>4)</sup>。ハイドロフォンの帯域幅 $w$ は4 kHz, 信号長さ $t$ は1秒である。鳴音の音源レベルSLを180 dB, 検出指標 $d$ を16とすれば, 検出閾値DTは以下のようになる。

$$DT = \begin{cases} 5 \log(dw/t) = 5 \log(16 \times 4000/1) = 24 \text{ dB} & (\text{未知信号}) \\ 10 \log(d/2t) = 10 \log(16/2) = 9 \text{ dB} & (\text{既知信号}) \end{cases}$$

ソナー方程式は次のようになり,

$$SL - TL = NL - DI + DT$$

$$180 - TL = 100 - 0 + 24 \text{ (or 9)}$$

伝播損失TLは

$$TL = \begin{cases} 56 \text{ dB} & (\text{未知信号}) \\ 71 \text{ dB} & (\text{既知信号}) \end{cases}$$

となる。これより, 推定最大探知距離Rは

$$20 \log R = TL$$

より

$$R = \begin{cases} 630 \text{ m} & (\text{未知信号}) \\ 3550 \text{ m} & (\text{既知信号}) \end{cases}$$

と計算できる。

### 3.4 位置推定の原理

まず, 前後左右4chのハイドロフォンからのデータの相互相関を取り, そのピークの時間ずれより各チャンネルの位相差(時間差)を求める。後に述べるAUVへの取り付けを考え, 図3のように前翼の中心(正確には4つのハイドロフォンの中心)を原点, 進行方向をx軸, 進行方向右方向をy軸, 鉛直方向をz軸とすると, 各ハイドロフォンの座標は以下ようになる。A, B, Cは原点からの各ハイドロフォンまでのx軸方向, y軸方向, z軸方向の距離である。4.2に示す装置では, A=0.175 m, B=0.53 m, C=0.175 mとなる。

- ① 前右ハイドロフォン (x, y, z) = (A, B, -C)
- ② 前左ハイドロフォン = (A, -B, -C)
- ③ 後右ハイドロフォン = (-A, B, -C)
- ④ 後左ハイドロフォン = (-A, -B, -C)

音源をP(x, y, z)とすると, 各ハイドロフォンから音源までの距離 $\overline{P①}, \overline{P②}, \overline{P③}, \overline{P④}$ は $V_s$ を音速としハイドロフォン①-②, ①-③, ①-④の時間差 $t_{12}, t_{13}, t_{14}$ を用いて,

$$\begin{aligned} \overline{P①} &\equiv d_1 & \overline{P③} &= d_1 + V_s \times t_{13} \\ \overline{P②} &= d_1 + V_s \times t_{12} & \overline{P④} &= d_1 + V_s \times t_{14} \end{aligned}$$

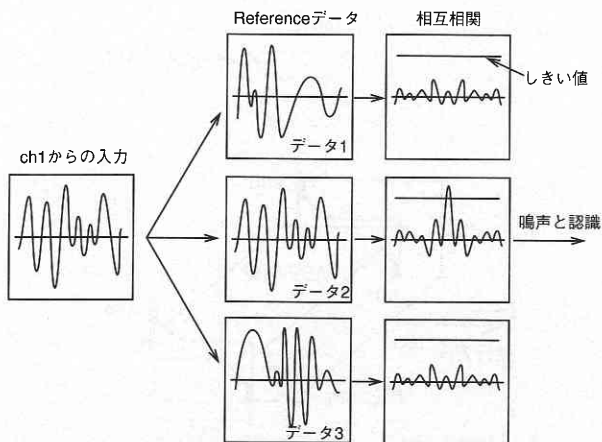


図2 鳴音の認識手順

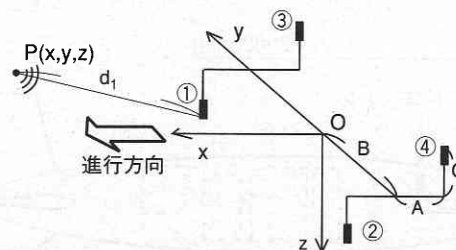


図3 4本のハイドロフォンと座標系

研 究 速 報

と表せる。

この4式より  $d_1, x, y, z$  を求めると、

$$d_1 = \frac{-l_{12}^2 - l_{13}^2 + l_{14}^2}{2(l_{12} + l_{13} - l_{14})}$$

$$x = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$y = \frac{(2d_1 + l_{12}) \cdot l_{12}}{4B}$$

$$z = -\frac{A}{C}x + \frac{(2d_1 + l_{13}) \cdot l_{13}}{4C}$$

となり、音源の座標を計算できる。ただし

$$l_{1k} = V_s \times t_{1k}$$

$$a = A^2 + C^2$$

$$b = \frac{-A \times l_{13} \cdot (2d_1 + l_{13})}{2}$$

$$c = C^2 \left( A^2 + (y - B)^2 - d_1^2 \right) + \left( \frac{(2d_1 + l_{13}) \cdot l_{13}}{4} - C^2 \right)^2$$

である。

4. 観 測 装 置

4.1 システムを搭載する AUV

開発期間の制限などから、観測装置を搭載する AUV は (株) KDD 研究所が所有する Aqua Explorer 2 (以降 AE 2<sup>5)</sup>) とした。AE 2 の概要は表 1 のとおりである。現在 AE 2 は海底ケーブル敷設前の海底状況調査と非埋設・埋設ケーブ

ルの敷設状況調査で活躍している。直接母船から音響リンクを用いて遠隔操縦できるほか、事前のプログラミングにより磁気センサからのデータに基づいて母船からの制御無しに海底ケーブル上をトラッキングしながら各種調査が可能である。

4.2 観測装置の概要

AE 2 に搭載した観測装置は、ハイドロフォンと耐压容器内の制御装置類の 2 つに分けられる。詳細は表 2 に示した。ハイドロフォンは、ザトウクジラの低周波 (100-4000 Hz) の鳴音を受波する必要があるため、システム技研社製 SH 5050 を使用した。

鳴音の中心周波数を 1 kHz と想定すると、海水中の波長は約 1.5 m となる。図 5 のように各ハイドロフォンの間隔が中心波長の 3/4 以下になるよう、AE 2 の前翼の形状に

表 1 AE2 の概要

外形寸法	3.0 m(L), 1.3 m(W), 0.9 m(H)
空中重量	260 kg
最大潜水深度	500 m
最大走行速度	3.2 knot
最大運用時間	10 時間 @1 knot 6.5 時間 @2 knot (リチウム 2 時電池使用時)
コンピュータ	CPU: MC 68060 OS: VxWorks
主な搭載機器	水中デジタルスチルカメラ, ストロポライト, 水温センサ, 交流磁気センサ, ドップラーソナー, 深度計
電源	充電式リチウム電池 129 V 30 AH
基本用途	スチルカメラ・TV カメラによる記録 ケーブルトラッキングおよび埋設深度の測定 ソナーによる海底地形調査

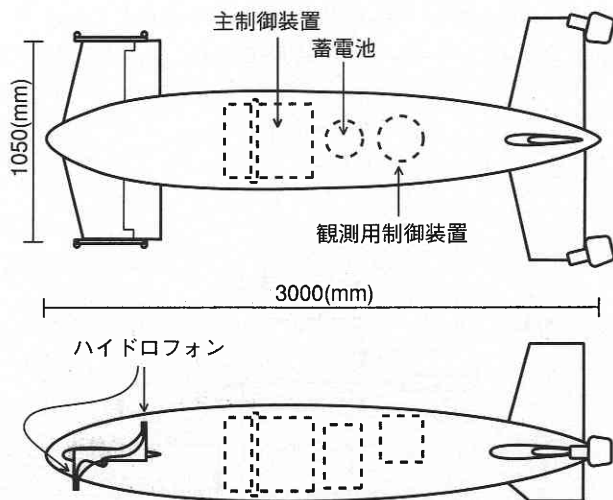


図 4 AE 2 の概観と観測装置の設置

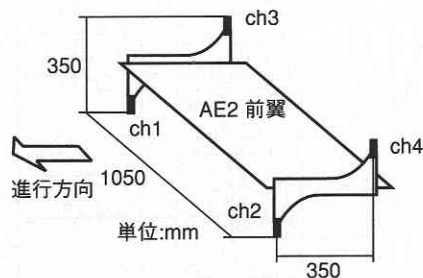


図 5 ハイドロフォン配置

表2 観測装置の概要

ハイドロフォン	システム技研社製 SH 5050 感度: $-190$ dB (vs1 V/ $\mu$ Pa), 最大受波周波数 50 kHz
耐圧容器	180 mm ( $\phi$ ) x230 (L) 材質: AL (7075 系) 重量 6360 g (積載機器含む), 水中重量約 300 g
コンピュータ	DOS/V 133 MHz, OS: Win95 6360 g (積載機器含む)
DSP	Hunt Engineering 社製 HEPC 2104 (TI 社製 TMS 320 C 44 60 MHz 搭載)
AD 変換ボード	Hunt Engineering 社製 HEGD 2 16 bit, 4 ch 最大標準化周波 数 100 ksample/sec
アンプ・フィルターボード	4 ch, 利得 60 dB, 4 kHz ロー パス

合わせて配置した。

耐圧容器は AE 2 の潜水性能に合わせ、最大耐圧深度 500 m で設計した。搭載スペースにあわせ円筒形状とし、利便性を考え円筒形の耐圧容器の両側に鏡板を配置する形をとった。片側を AE 2 との固定に使用し、もう片方に水中コネクタを配置した。水中コネクタは電源 1, イーサネット 1, ハイドロフォン 4 の合計 6 個である。

搭載機器は、制御用のボードコンピュータ、音声データの高速解析に用いる DSP、ハイドロフォンからの入力を増幅し鳴音の周波数帯のみを取り出すアンプ・フィルターボード、それを DSP に受け渡す AD 変換ボードからなる。AD 変換ボードは、SN 比を上げるため 16 bit のものを使用した。

#### 4.3 システム構成

AE 2 のメインコンピュータと観測用制御装置はイーサネットにつながっており、TCP/IP フォーマットで通信する。また、母船と AE 2 の主制御装置は AE 2 が潜水中も原則的に音響リンクにつながっており、コマンドやロボット

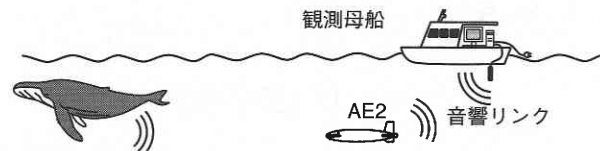


図6 実験の様子

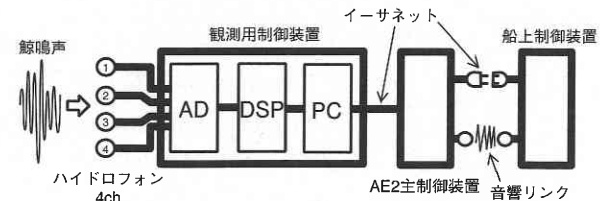


図7 観測機器の接続状況

のステータスなどを通信する。

観測用制御装置が AE 2 を通じて母船からのコマンドを受けると、AE 2 前翼の 4 本のハイドロフォンで鯨の鳴音を受波し、観測用ホスト PC のハードディスクに wav フォーマット (ステレオのファイルが 2 つ) で記録する。また、自動航行時には、前述の方法によりザトウクジラの鳴音を感知すると録音を開始し、その音源に接近する。その際、スラスタから出る雑音などのないのデータを得るためにときどき停止して録音を行う。録音したデータの吸い上げは、AE 2 の浮上後母船の制御装置と直接イーサネット で接続して行う。

(2000 年 5 月 22 日受理)

#### 5. 参考文献

- 1) 日本造船学会海中システム部会：“海中技術一般(改訂版)”，成山堂，1999。
- 2) 三上直樹：“デジタル信号処理の基礎”，CQ 出版，1998。
- 3) 南茂夫：“科学計測のための波形データ処理”，CQ 出版，1986。
- 4) R.J.ユーリック：“水中音響の原理”，共立出版，1978。
- 5) 浅川賢一：“海底ケーブル調査用自律型水中ロボット AQUA EXPLORER 2”，生産研究，55(7)-212(2000)。