

2本のハイドロフォンで計測されたクリック音の 到達時間差によるマッコウクジラの自動識別

Automatic Classification of Diving Sperm Whales by Analysis of Click Time Delay using Two Hydrophones

浦 環*・パール ラジェンダール**・中 谷 武 志***・鈴 木 英 之***

Tamaki URA, Rajendar BAHL, Takeshi NAKATANI and Hideyuki SUZUKI

1. は じ め に

近年、生物の多種多様性の重要性が認識され、希少野生動物の保護が進められている。水中生物では乱獲により個体数を減らしていた鯨類がその保護の対象となっている。保護を進めていくには個体数の把握が非常に重要となるが、水中生物である鯨類は陸上生物よりもその把握が難しい。実際には、船上からの目視観測によって対象海域の一部を調査し、その観測値から対象海域の個体数を推定する方法が取られている。しかしながら、目視観測は観測者の熟練度の違いや見落としによる精度の問題があるだけでなく、マッコウクジラのように潜水を繰り返す種には不向きな観測方法である。そこで、高い精度で観測海域のクジラの頭数を推定できる観測方法の開発が求められている。開発の重要なポイントは、精度が高いこと、クジラに影響を与えないこと、簡易なシステムで調査費用が低く抑えられることの3点である。簡易なシステムであることにより、多くの機関で調査することができ、観測の頻度をあげることができる。

そこで本研究は、2本のハイドロフォンを用いた個体識別および位置検出手法を示す。

2. 2本のハイドロフォンによる観測システム

マッコウクジラは、潜水時にクリック音と呼ばれる主に15 kHzまでの周波数帯域を持つパルス状の音（ただし、5 kHz以下の低周波が支配的）を0.5～2秒間隔で絶えず出して、アクティブソナーのように周辺環境を観測することが知られている¹⁾。そこで、2隻のボートより投じた2本のハイドロフォンによりクリック音を録音し、その音響データを解析することによって、クジラに影響を与えることなく、個体識別および位置検出を行う。ただし、ここで言う個体識別とは、水中音中の複数のクジラからのクリック音を区別することである。

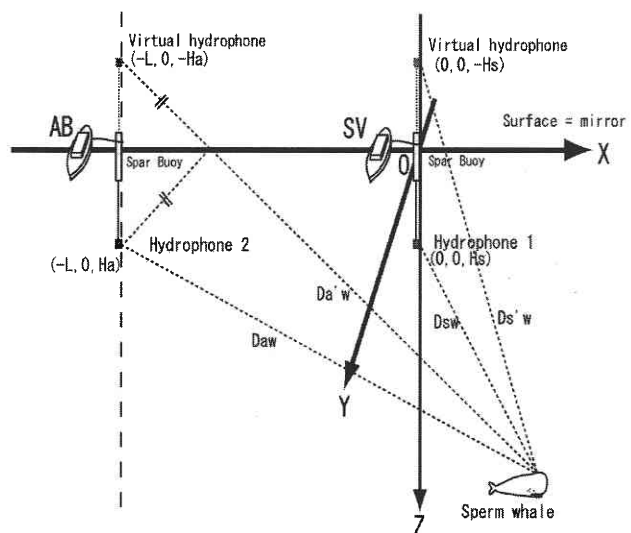


Fig. 1 Diagrammatic illustration of the system

2.1. 音響データの取得

音響データ取得のために行う観測の概略図を Fig. 1 に示す。観測には観測船2隻 (SV: Support Vessel, AB: Assistant Boat と呼ぶ) を用い、各船から投じたスパーブイに吊り下げられたハイドロフォンにより録音する。図中において D はクジラとハイドロフォンの間の距離、L は2船間の距離、H はハイドロフォンの深さを表す。

また、解析時に2本のハイドロフォンで得られた音響データの同期を取るため、各船に取り付けられた GPS の PPS 信号を録音と同時に記録する。

2.2. 到達時間差

Fig. 2 に示すように音声データにはクリック音の直接波だけでなく、海面反射波が録音される。海面反射波は、Fig. 1 に示すように海面を鏡面とした“ハイドロフォンの鏡像”への波に対応する。以下、SV, AB でのこの直接波と海面反射波の到達時間差をそれぞれ T_s , T_a と書く。

GPS の PPS 信号によって2本のハイドロフォンで得られた音響データは同期が取られているので、ハイドロフォ

*東京大学生産技術研究所 海中工学研究センター

**Center for Applied Research in Electronics, Indian Institute of Technology, Delhi

***東京大学大学院工学系研究科

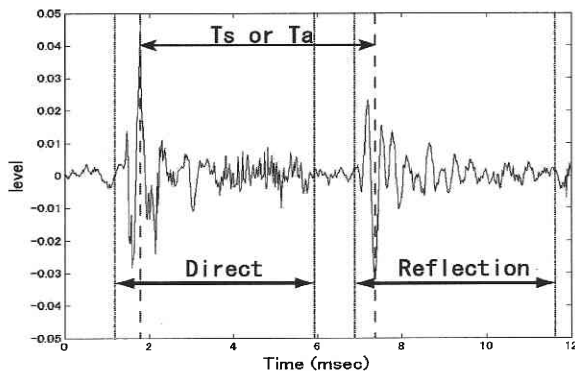


Fig. 2 Typical click recorded by a single hydrophone (after using 5 kHz lowpass filter)

ン間でのクリック音の対応を特定することにより、各船へのクリック音の到達時間差 T_b ($=$ [AB での観測時刻] - [SV での観測時刻]) を求めることができる。

ここで、 T_s , T_a , T_b はそれぞれ D_s ($=D_s'w - D_{sw}$), D_a ($=D_a'w - D_{aw}$), D_b ($=D_{aw} - D_{sw}$) に対応し (Fig. 1), 音源すなわちクジラの位置によって異なる。マッコウクジラは普段群れで行動しているが、潜水中は数 100 m 四方の海域に散らばって行動するため、この 3 つの到達時間差によって個々のクジラを識別できる。

2.3. 個体識別の解析の流れ

まず、各船の録音データをクリックの特徴から適切と考えられる 5 msec ごとの区間に区切り²⁾, Fig. 3 の左側のフローチャートで示された手順でクリック音を検出して、直接波の到達時刻、および T_s (または T_a) を算出する。

次に、両船で検出されたクリック音の対応を調べるために、SV のクリック音の波形データと、その到達時刻を基準として (船間距離/音速) 秒前から (船間距離/音速) 秒後の間に AB で観測されたクリック音の波形データとの相互相関係数を求めて、対応するクリック音を特定し (Fig. 3 の右側のフローチャート), T_b を求める。複数のクジラが観測領域で鳴いていても、異なるクジラのクリック音の相関は低いいため、適切な閾値を設定することで正しく特定できる。

最後に、 T_s , T_a , T_b の値を基にクリック音をクラスに分け、鳴いているクジラの頭数を決定する。クラス分けは、1 つ目のクリック音をクラス No.1 とし、2 つ目以降のクリック音を観測時刻順に、以下に示す基準を満たすクラスに分類して行く。基準を満たすクラスがない場合は新たにクラスを作る。ただし、1 分以上クラスに追加されるものがなければ、そのクラスを閉じ、以降クリック音をそのクラスに分類しない。

クラス分けの際に用いる各クラスの T_s , T_a , T_b の代表値は、クラス内で最新のクリック音 5 つの平均値を用いる。ただし、5 つたまるまではそれまでのクリック音の平

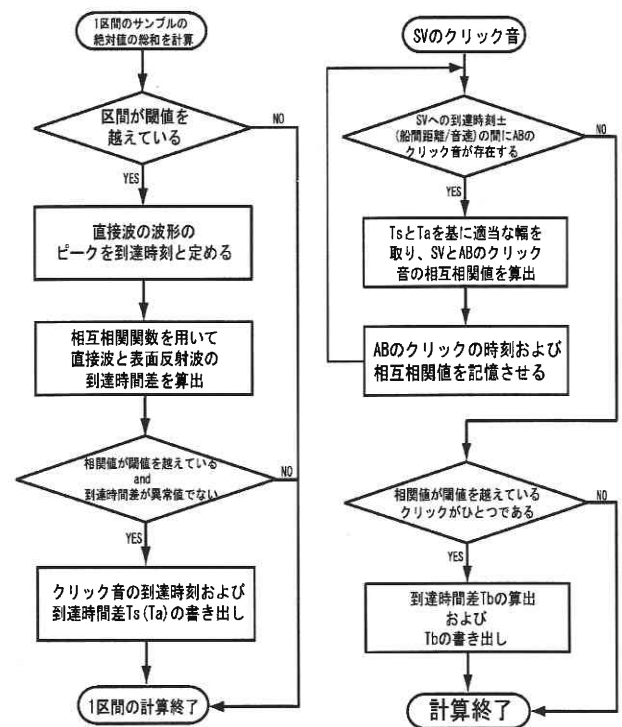


Fig. 3 Flow charts for finding clicks on each boat and for matching clicks detected on two boats

均値を用いる。

クラス分けの基準は、ハイドロフォンの水深および 2 船間の距離によって適切に決定する必要がある。次章で示す観測実験ではハイドロフォンの水深を約 6 m, 2 船間の距離を約 450 m としたので、波による影響などを考慮して「 T_s , T_a が代表値 ± 1.0 msec 以内、かつ T_b が代表値 ± 10 msec 以内」を満たすクラスにクリック音を分類した。

2.4. 位置検出

T_s はハイドロフォンと鏡像のハイドロフォンでの到達時間差 (Fig. 1) であるから、クジラはハイドロフォンと鏡像のハイドロフォンを焦点とした双曲面上に存在することになる (Fig. 4)。 T_a , T_b から同様の曲面が得られ、2 船間の距離とハイドロフォンの深さが既知であると、これらの曲面の交点は 2 点に求まる。つまり、到達時間差から、頭数の割り出しだけでなく、Y 方向には土の不確かさが残るが個々のクジラの位置を推定することができる。

水深 Z は 2 船間の距離に関係なく次式で求まる。

$$Z = D_s(2D_b - D_s + D_a) / \{4H_a(D_s/D_a - H_s/H_a)\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$$D_s = \sqrt{X^2 + Y^2 + (Z + H_s)^2} - \sqrt{X^2 + Y^2 + (Z - H_s)^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$D_a = \sqrt{(X + L)^2 + Y^2 + (Z + H_a)^2} - \sqrt{(X + L)^2 + Y^2 + (Z - H_a)^2} \dots\dots\dots (3)$$

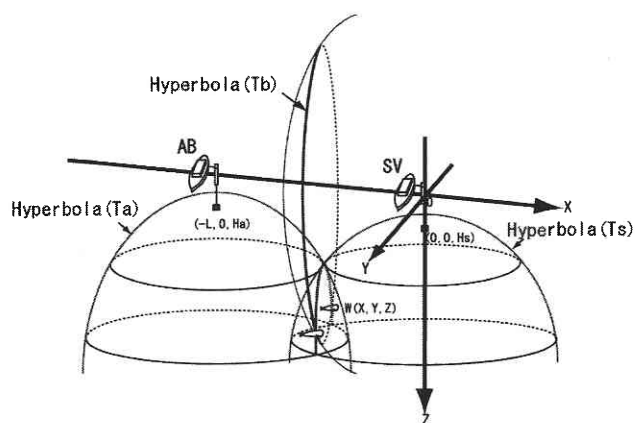


Fig. 4 Location of sperm whale determined by Ts, Ta, and Tb hyperbolas

Table 1 The classes of sperm whales' clicks

Class No.	Time of last click(sec)	Average of last 5 clicks Ts (msec)	Average of last 5 clicks Ta (msec)	Average of last 5 clicks Tb (msec)	The number of clicks	Whale No. (Fig.5)	Symbol (Fig.5)
1	611.22	6.59	7.28	31.57	461	①	●
2	335.63	3.29	2.96	152.37	73	⑥	○
3	462.13	6.73	5.80	103.71	189	②	●
4	1249.23	4.94	4.56	150.01	303	③	×
5	920.92	5.02	4.08	-269.28	30	Matching error	—
6	1504.94	3.00	3.26	103.52	514	②	■
7	1114.95	4.97	4.42	205.44	108	⑥	□
8	1068.65	5.22	4.61	183.21	201	④	◆
9	1038.82	5.14	4.24	-253.64	31	Matching error	—
10	1465.69	3.47	3.67	8.71	155	①	■
11	1368.97	3.99	3.30	180.43	23	④	▲
12	1306.10	4.96	4.09	213.54	25	⑥	◇
13	1482.05	3.74	3.56	137.67	20	③	+
14	1748.65	3.49	3.07	221.66	34	⑤	*
15	1793.07	2.25	2.34	99.45	50	②	◆

$$Db = \sqrt{(X+L)^2 + Y^2 + (Z-Ha)^2} - \sqrt{X^2 + Y^2 + (Z-Hs)^2} \dots (4)$$

である。

また, X, Y 座標は

$$X = \frac{Db(4ZHs - Ds^2)/Ds + Db^2 - L^2 - (Ha - Hs)(Ha + Hs - 2Z)}{2L} \dots (5)$$

$$Y = \pm \sqrt{\{4ZHs - Ds^2\}^2 / (2Ds)^2 - (Z - Hs)^2 - X^2} \dots (6)$$

で求められる。座標の精度はクジラの位置による。音源がハイドロフォン間の中央にある場合は, Ds/Da の値が Hs/Ha の値に近づき, (1) 式において分母が 0 に近づくため, 座標の精度が下がる。

3. 観測実験と観測結果

2003 年 8 月 17 日～23 日の内の 5 日間, 東京都小笠原村の父島周辺海域で観測船 2 隻を用いてマッコウクジラの観測を行い, 音響データを得た。

ハイドロフォンの受波感度は $-185 \text{ dB ref } 1 \text{ V}/\mu\text{Pa at } 1 \text{ m}$ とし, A/D 変換前に 40 dB のプリアンプを使用した。ハイドロフォンの水深を約 6 m になるように吊り下げ, 録音の

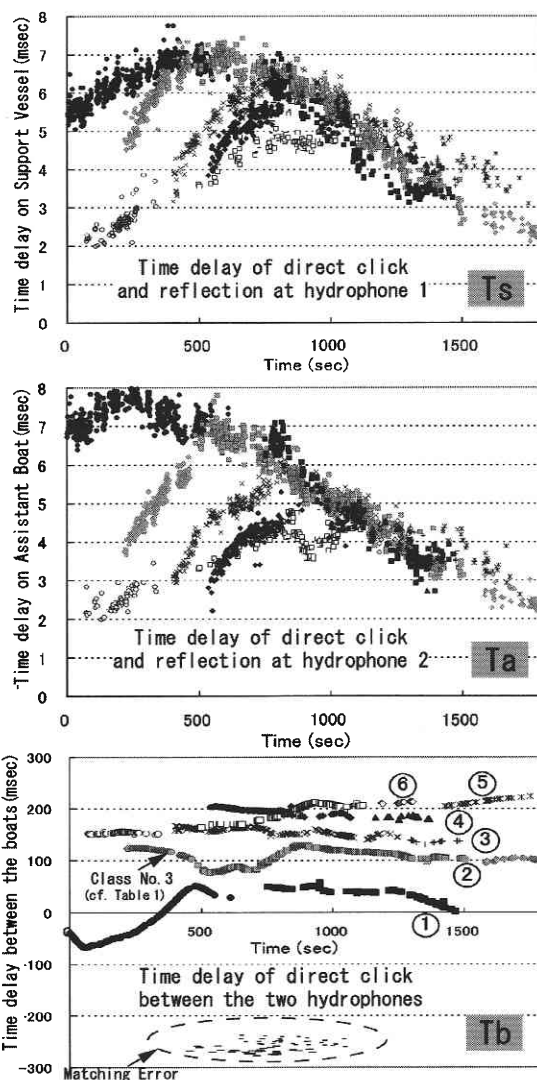


Fig. 5 Ts, Ta, and Tb after classification

サンプリングレートを 50 kHz に設定した。また, 観測の間, 2 隻の正確な位置は AB を基地局, SV を移動局とした RTK-GPS で測量した。

以下の解析には, 2003 年 8 月 21 日 14:24～14:54 に水深約 $1,000 \text{ m}$ の海域において約 450 m 離れた 2 本のハイドロフォンによって録音された音響データを用いた。ただし, 高周波ノイズを取り除くために, 解析時に 5 kHz のローパスフィルターを用いている。

3.1. 到達時間差によるマッコウクジラの自動識別結果

2.3 で示した方法で Ts, Ta, Tb の算出およびクラス分けを行った結果, 20 以上のクリック音が分類されたクラスが 15 存在した。各クラスの最終クリック音到達時刻, 各到達時間差の代表値, および分類されたクリック数を Table 1 に示す。

このクラス分けに基づいて各到達時間差を示したのが Fig. 5 である。Ts, Ta にばらつきが生じているのは, 波に

研 究 速 報

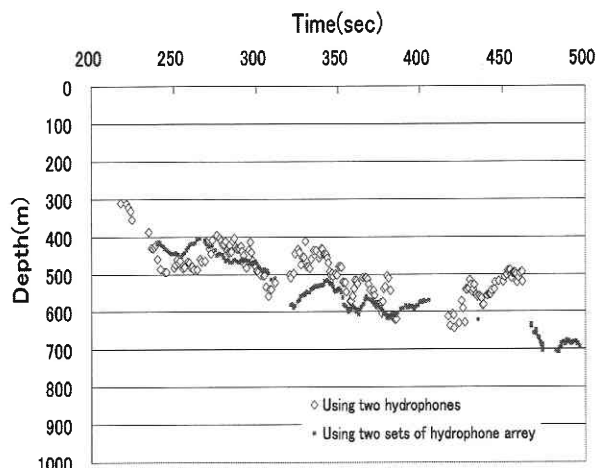


Fig. 6 The depth of whale Class No.3

よってハイドロフォンの水深が約4秒周期で変動していたためである。

それに対し、 T_b は滑らかな曲線群を構成している。これはベースラインが長いことと、直接波のみを用いるので海面の影響をほとんど受けないことによる。

クリック音の間隔が狭いために (SVでの到達時刻-船間距離/音速) ~ (SVでの到達時刻+船間距離/音速) の間にABで同一クジラのクリック音が複数個録音されることがあった。そのため、クリック音の間隔が再び長くなるまで両船間でのクリック音の特定が行えず、クラスが複数に分かれたり、両船間でのクイック音が間違えて特定されてクラスNo. 5およびNo. 9のようにクリック音の特定エラーによるクラスが発生したりした。これらの問題は、2船間の距離を短くすれば解決できると考えられる。本実験では、このような問題が発生したため、クラス分けと T_b の曲線の連続性から、観測領域で鳴いていたマッコウクジラの頭数を推定し、Fig. 5で示すように6頭と推定した。この値は目視情報による浮上してきたマッコウクジラの頭数とほぼ一致する。

3.2. 位置検出の結果

今回の実験では各時刻のハイドロフォンの水深 H_s 、 H_a を計測していなかったため、次に示す仮定および近似を用いた。

- 波の影響による上下動の誤差を取り除くため、 T_s 、 T_a は前後あわせて10個のクリック (波の約2周期分に相当) の中央値を用いる。
- H_s を6.0 mと仮定する。
- $T_b=0$ すなわちマッコウクジラが両船から等距離にいる時の T_s/T_a の値から H_s/H_a を0.93と仮定する。
- 音速は1,530 m/sで一定であると近似した。本論文では、X、Y座標に比べてこれらの仮定および近似による誤差の影響を受けにくいZ座標の結果のみを示す。

式 (1) および上記の仮定と近似を用いて求めた、Table 1のクラスNo. 3 (Fig. 5参照) のクジラの水深はFig. 6で示される。本実験と同時に進行されていた4本2組のハイドロフォンアレイによるマッコウクジラの追跡観測³⁾の結果と比べると、最大20%程度の差があるが、全体的な形状を捉えられていることがわかる。差が生じた理由としては、水深計が入っていなかったために様々な仮定や近似を用いたこと、ハイドロフォンの水深が浅かったために海面の形状の影響を受けやすかったことなどが考えられる。

4. お わ り に

本論文では、高い精度で観測海域のマッコウクジラの頭数を推定できる観測システムを目指して、2つのハイドロフォンで計測されたクリック音の到達時間差によるマッコウクジラの自動識別法を提案した。到達時間差は、2章で述べたように3次元座標に変換可能であるが、到達時間差のままを用いた方が頭数の割り出しが容易であるため、自動識別には到達時間差を用いている。

2003年8月に小笠原で得た音響データを用いて、従来の目視観測よりも精度、労力の面で優れた頭数の割り出しができることを確認した。また、精度の検証は今後の課題であるが、簡単なシステムで潜水中のマッコウクジラの深度を求められることを示した。

今後は、リアルタイムでの観測海域の頭数の割り出しや、海面または海底に固定した2本のハイドフォンによるマッコウクジラの長期観測システムの開発に向けて研究を進める予定である。また、位置検出については、ハイドロフォンの水深を深くするなどの改良を加え、水面が比較的穏やかである湖や川での、クリック音を発する川イルカなどの生態調査への応用を考えている。

5. 謝 辞

本研究は文部科学省科学研究費によって行われている。観測実験は参考文献3) のプロジェクトによるものであり、関係各位に深く感謝する次第である。

(2004年9月7日受理)

参 考 文 献

- 1) Bahl, R., Ura, T., and Fukuchi, T. (2002). "Towards Identification of Sperm Whales from Their Vocalizations," Seisan-Kenkyu Bimonthly Journal of IIS, University of Tokyo, Vol. 54, No. 6, 51-55.
- 2) Bahl, R., Ura, T., (2002). "Automatic Real-time Segregation and Classification of Multiple Vocalizing Sperm Whales," Seisan-Kenkyu Bimonthly Journal of IIS, University of Tokyo, Vol. 55, No. 3, 61-64.
- 3) 浦環, Rajendar Bahl, 坂田雅雄, 能勢義昭, 福地鐵雄, 小島淳一, 浦純也, 杉松治美, 中谷武志 (2004). "2組のハイドロフォンアレイを用いたマッコウクジラの追跡観測実験" 生産研究, Vol. 56, No. 2, 157-160.