

## 2組のハイドロフォンアレイを使ったマッコウクジラの 潜水行動の推定

Estimation of Diving Behavior of Multiple Sperm Whales by a Pair of Hydrophone Arrays

浦 環\*・パール ラジェンダール\*\*・坂 田 雅 雄\*・小 島 淳 一\*\*\*

Tamaki URA, Rajendar Bahl, Masao SAKATA and Jun'ichi KOJIMA

### 1. は じ め に

2,000 m 以上もの水深に潜り、捕食活動を行っていると言われるマッコウクジラは、環境保護の観点からも多くの研究者の注目を集めている。しかし、観測手法の不足からもその生態についてあまり詳しいことは分かっていない。本研究では、このような状況を踏まえ、AUV (Autonomous Underwater Vehicle) と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観測システムを考案した。2003年8月、AUVは使わず、代わりに2隻の船を用意し、実海域でのシステムの機能試験を行った<sup>1)</sup>。本稿では、この実験で得られたデータの解析結果について報告する。

### 2. 解 析 方 法

観測システムは、鯨のいる方向を推定するためのSBL (Short Baseline) システムと、2つのSBLシステムからクジラの位置を三角測量するLBL (Long Baseline) システムの2つからなる。以降は、この2つのシステムにおける解析について述べる。

#### 2.1. 方向推定 (SBL) システム

方向推定は、4つのハイドロフォンにマッコウクジラのクリック音が到達するときの時間差 (以降 TDE : Time Delay) を計測することで行う。ハイドロフォンは、図1のように30 cm 四方の立方体形状をしたフレームの角に配置されている。クリック音がハイドロフォン間の距離に対して、十分遠方から来るとき、図2のように音波は平面拡散し、音線は平行になるとみなせる。ハイドロフォン  $i, j$  間の時間差を  $TDE_{ij}$ 、音の到来方向とハイドロフォンの組を結んだ軸がなす角度  $w_{ij}$ 、ハイドロフォン間距離を  $d_{ij}$ 、水中での音速を  $v_s$  とすると、

$$w_{ij} = \arccos \left( \frac{TDE_{ij} v_s}{d_{ij}} \right) \dots \dots \dots (1)$$

となる。これによって、少なくとも3つの独立した TDE

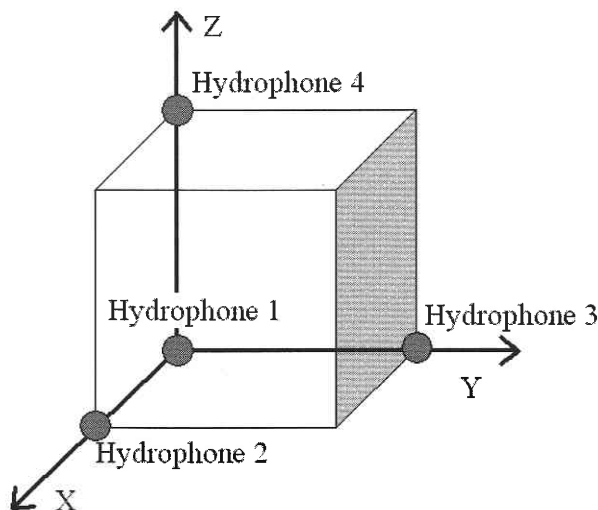


図1 ハイドロフォンアレイと座標系

※図の場合、TDEは正 音の到来方向

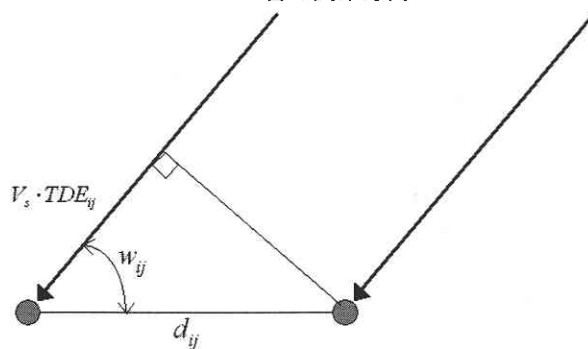


図2 音の到来方向と到達時間差

を計測すれば、3次元でのクジラのいる方向を推定可能である。しかし、今回は TDE の計測誤差の影響をより小さくするために、全てのハイドロフォンの組み合わせから、合計6つの TDE を計測し、それをもとに非線形最小二乗法によって、方向の推定を行った。

\*東京大学生産技術研究所 海中工学研究センター

\*\*インド工科大学

\*\*\*KDDI 研究所

## 研究速報

非線形最小二乗法として、Marquardt-Levenberg法<sup>2)</sup>を用いた。非線形最小二乗法では、パラメータに初期値を与え、観測値とモデルによる計算値との残差が小さくなるように、パラメータを逐次修正する行列計算を繰り返し、残差が最小になるようなパラメータを探す。

最適化するパラメータは、クジラのいる方向を表す俯角 $\theta$ と方位角 $\phi$ である。 $\theta$ と $\phi$ の初期値は、以下の式で計算した。

$$\theta_{ini} = \arcsin \left( \frac{TDE_{14} v_s}{d_{14}} \right) \dots \dots \dots (2)$$

$$\phi_{ini} = \arctan \left( \frac{TDE_{12} v_s}{d_{12}} \frac{d_{13}}{TDE_{13} v_s} \right) \dots \dots \dots (3)$$

観測値ベクトル $v_{obs}$ は、角度 $w_{ij}$ を使って以下の式で定義する。

$$v_{obs} = (w_{12} w_{13} w_{14} w_{23} w_{24} w_{34})^T \dots \dots \dots (4)$$

モデル関数による計算値として、パラメータ $\theta$ 、 $\phi$ から求められるクジラの鳴音の到来方向ベクトル $\vec{r}_w$ と、ハイドロフォン $i, j$ を結んだ方向ベクトル $\vec{H}_{ij}$ とがなす角度を用いる。これをベクトル $\vec{r}_{cal}$ の内積で表したものをまとめてベクトルとすると、以下の式で表される。

$$r_w = (\cos \theta \sin \phi \quad \cos \theta \cos \phi \quad -\sin \theta)^T \dots \dots \dots (5)$$

$$\vec{H}_{12} = (1 \ 0 \ 0)^T, \vec{H}_{13} = (0 \ 1 \ 0)^T,$$

$$\vec{H}_{14} = (0 \ 0 \ 1)^T, \vec{H}_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}}(-1 \ 1 \ 0)^T,$$

$$\vec{H}_{24} = \frac{1}{\sqrt{2}}(-1 \ 1 \ 0)^T, \vec{H}_{34} = \frac{1}{\sqrt{2}}(0 \ -1 \ 1)^T \dots \dots \dots (6)$$

$$\vec{r}_{cal} = \begin{pmatrix} \arccos(\vec{r}_w \cdot \vec{H}_{12}) \\ \arccos(\vec{r}_w \cdot \vec{H}_{13}) \\ \arccos(\vec{r}_w \cdot \vec{H}_{14}) \\ \arccos(\vec{r}_w \cdot \vec{H}_{23}) \\ \arccos(\vec{r}_w \cdot \vec{H}_{24}) \\ \arccos(\vec{r}_w \cdot \vec{H}_{34}) \end{pmatrix} \dots \dots \dots (7)$$

このベクトルと観測値ベクトルの各要素との差の二乗和 $|\vec{v}_{obs} - \vec{r}_{cal}|^2$ を最小化の対象とした。また、計算過程で必要になるヤコビアンは、 $\vec{r}_{cal}$ から差分法で求めており、残差ベクトルは $\vec{v}_{obs} - \vec{r}_{cal}$ である。

なお、この計算結果から得られた方向は、アレイに取り付けられている方位計、傾斜計の計測値から、地球座標系上での方向に補正される。この時、方位角は北を $0^\circ$ 、時計回りを正とし、俯角は水平方向を $0^\circ$ 、鉛直下向きを $90^\circ$ としている。

## 2.2. 位置観測システム (LBL) システム

クジラの位置は、三角測量の原理から、2箇所から推定した方向の交点として求まる。ただし、推定された方向は誤差を含み、求めた方向が振れの位置となりうることから、最小二乗法を用いて計算した。クジラのいる方向ベクトルを、

$$\vec{v}_1 = (v_{1x} \ v_{1y} \ v_{1z})^T, \vec{v}_2 = (v_{2x} \ v_{2y} \ v_{2z})^T \dots \dots \dots (8)$$

ハイドロフォンアレイの地球座標系上での位置ベクトルを、

$$\vec{r}_1 = (r_{1x} \ r_{1y} \ r_{1z}), \vec{r}_2 = (r_{2x} \ r_{2y} \ r_{2z}) \dots \dots \dots (9)$$

マッコウクジラの真の位置ベクトルを、

$$\vec{P} = (x \ y \ z)^T \dots \dots \dots (10)$$

とすると、位置の計測誤差 $E_1, E_2$ は以下の式で表される。

$$E_1 = \vec{P} - (\vec{r}_1 - k_1 \vec{v}_1), E_2 = \vec{P} - (\vec{r}_2 - k_2 \vec{v}_2) \dots \dots \dots (11)$$

さらに、最小二乗誤差を求めるためのベクトルを $E$ とすると、 $E$ は以下のように求まる。

$$E = E_1^2 + E_2^2 \dots \dots \dots (12)$$

$E$ の誤差が最小になるようにそれぞれの変数 $k_1, k_2, x, y, z$ で微分を取り、解が0となるように連立方程式を解く。連立方程式は以下ようになる

$$A\vec{x} = \vec{b} \dots \dots \dots (13)$$

$$A = \begin{pmatrix} v_{1x}^2 + v_{1y}^2 + v_{1z}^2 & 0 & -v_{1x} & -v_{1y} & -v_{1z} \\ 0 & v_{2x}^2 + v_{2y}^2 + v_{2z}^2 & -v_{2x} & -v_{2y} & -v_{2z} \\ v_{1x} & v_{2x} & -2 & 0 & 0 \\ v_{1y} & v_{2y} & 0 & -2 & 0 \\ v_{1z} & v_{2z} & 0 & 0 & -2 \end{pmatrix} \dots \dots (14)$$

$$\vec{x} = (k_1 \ k_2 \ x \ y \ z) \dots \dots \dots (15)$$

$$\vec{b} = \begin{pmatrix} v_{1x}r_{1x} + v_{1y}r_{1y} + v_{1z}r_{1z} \\ v_{2x}r_{2x} + v_{2y}r_{2y} + v_{2z}r_{2z} \\ r_{1x} + r_{2x} \\ r_{1y} + r_{2y} \\ r_{1z} + r_{2z} \end{pmatrix} \dots \dots \dots (16)$$

ここで得られた連立方程式をLU分解法によって解き、 $\vec{x}$ を求めれば、クジラの位置が求まる。

### 3. 解析結果

#### 3.1. 観測条件

実験は小笠原諸島父島周辺海域にて、2隻の船（SV: Support Vessel と AB: Assistant Boat と呼ぶ）から2組のハイドロフォンアレイを海中に沈めて行った。実際にマッコウクジラに遭遇した位置は、図3に示す箇所であり、クジラと遭遇できた海域は、おおむね海底が1,000 m 付近となっている。以下に示す結果は、2003年8月21日に行った観測実験中に録音された音響データを解析したもので、録音時間はトータルで約40分間に及ぶ。

#### 3.2. 方向推定システム

図4のa), b) は、SV における SBL システム（ハイドロフォンアレイ）により推定されたクジラのいる方向角を、時間経過と共に表した図である。40分間にわたる観測の結果から、5～6頭のクジラが鳴きながら船の周りを移動した様子を知ることが出来る。まず、最初に鳴き始めたクジラが船の南側からダイビングを始め、さらに船の東側を通過して船の北側に抜けたことが分かる。さらにその後、ほはいっせいに他の5頭のクジラが、同じく船の南側で潜り始め、船の西側を抜け北側に泳いでいった様子もはっきりと分かる。

図4のb) は AB の SBL システムによる観測結果について、同様の図を描いたものである。両者の結果から、やはり5～6頭のクジラがいたことが直ちに確認できる。AB は常に SV の南東側におり、マッコウクジラが船の周りを動いている様子は、ハイドロフォンアレイの位置が異なることを反映している。

また、図4のc), d) はクジラのいる方向を俯角で表したものである。この図からも、5～6頭のクジラがいたこ

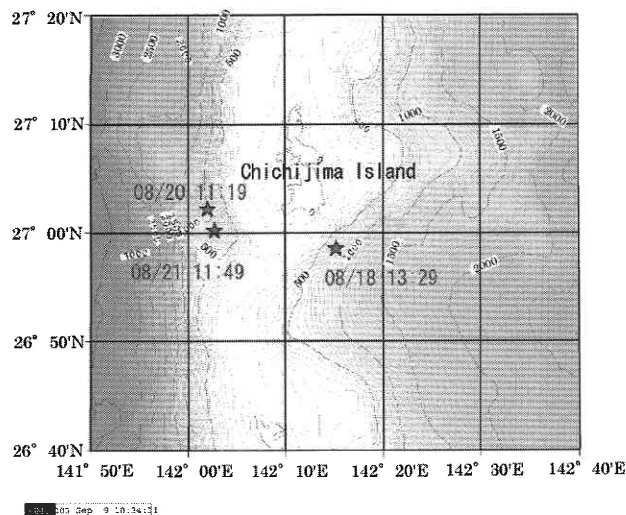


図3 マッコウクジラとの遭遇地点（星印）

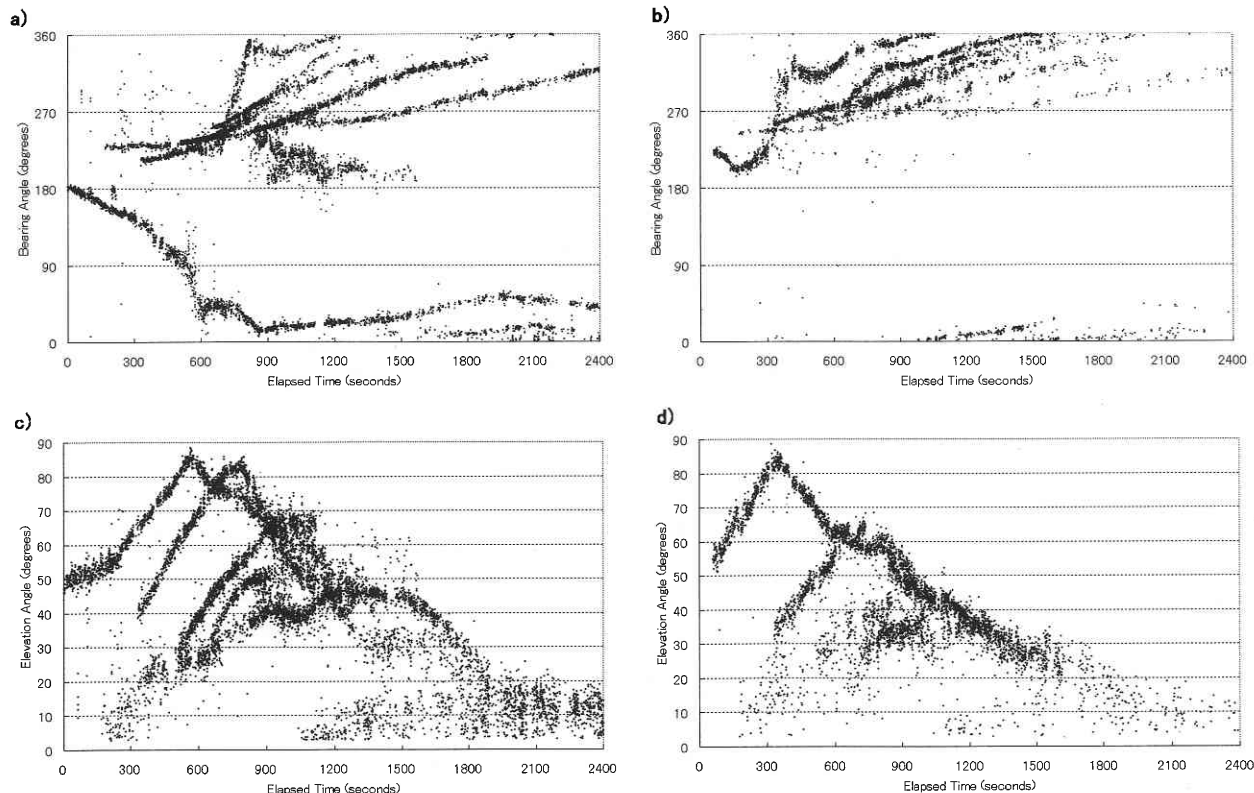


図4 SBL システムによるマッコウクジラの方角推定結果。a) SV から見たクジラの方角, b) AB から見たクジラの方角, c) SV から見たクジラ俯角, d) AB から見たクジラの俯角。方位角は北を0°とし、時計回りを正としている。俯角は水平方向を0°, ハイドロフォンアレイ直下を90°としている。

## 研 究 速 報

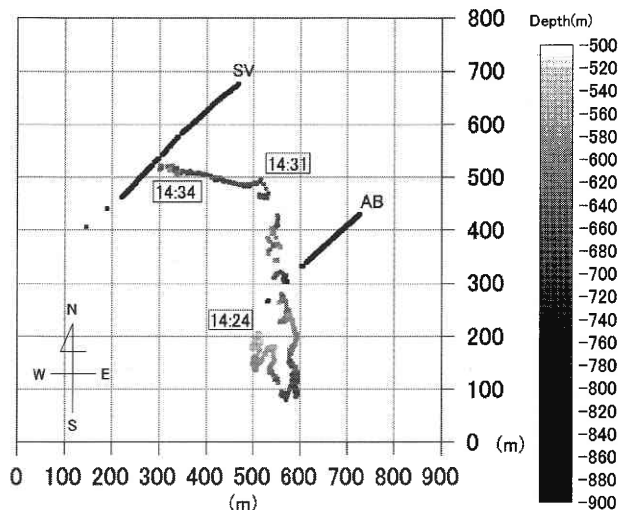


図5 1頭のマッコウクジラの潜水中の軌跡

とが分かる。SV, AB両者とも、俯角が90°近くになっている箇所があり、方位角の推定結果と合わせて考えると、クジラが船の南から北に抜けるときに、船の真下近くを通ったと推測できる。

これらの結果は、実験中に船上から海上に現れたマッコウクジラを視覚的に観測した結果と、さらにマッコウクジラの初期探知用に用意した指向性ハイドロフォンを使った、専門家によるクジラの観測の結果とも一致した。このことは、結果が妥当なものであることを示しており、SBLシステムがそれぞれ正しく機能していたことが確かめられたといえる。

### 3.3. 位置観測システム

前述の方向推定結果を元に、クジラの位置を三角測量した結果を示す。図5は、観測システムによって観測された1頭のマッコウクジラの潜水の様子を表した図である。図中の2つの直線は、2隻の観測船の航跡で、中央付近に見えるのがマッコウクジラの軌跡である。このクジラの鳴き声が観測された時間は約10分間であり、このマッコウクジラが船の南のほうでダイビングをした後、深度を700 m ~ 800 m 付近で一定に保ちながら北の方へ泳いでいき、さらに西に向きを変えて泳いでいった様子が分かる。

図6は録音開始時間14時24分からの経過時間と共に、同じクジラの潜水深度の変化を描いたものである。図3から、この観測が行われた海域の水深は約1,000 m 前後であり、このクジラは海底付近にいると思われる餌をクリック

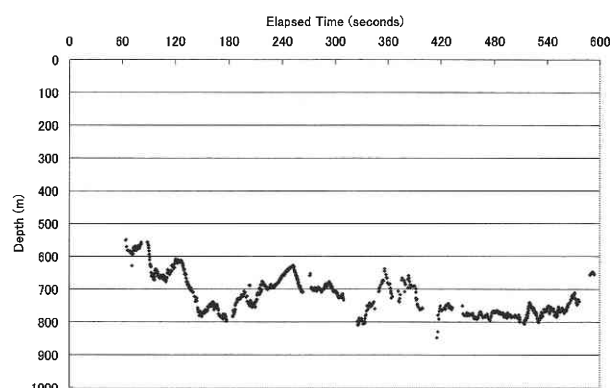


図6 1頭のマッコウクジラの潜水深度

音を出しながら探していたと考えられる。また、図6に示す結果から、マッコウクジラの観測中全体を通しての平均的な遊泳スピードを見積もると、約1.8 m/sec 程度となり、一般的に考えられているマッコウクジラの遊泳スピードに近い結果となった<sup>3)</sup>。

### 4. お わ り に

マッコウクジラの生態を明らかにすることを目的として、小型のセンサーと記録装置を搭載したタグを鯨類に装着するといった試みもいくつかなされている。そうした中、本研究では、まったくパッシブにマッコウクジラの潜水行動の推定を行うという観点から、その鳴き声を聞くことだけによって観測を行うシステムを考案した。そして、その有効性を実海域における実験によって確かめることが出来た。この実験を含め、本研究によってAUVをプラットフォームとしたマッコウクジラの観測手法が確立されること、および、海深く潜ったマッコウクジラの活動についてより多くの知見が得られることが期待される。

(2004年9月8日受理)

### 参 考 文 献

- 1) 浦環, ほか: “2組のハイドロフォンアレイを用いたまっこうクジラの追跡観測実験”, 生産研究, Vol 56, No. 2, 27-30 (2004)
- 2) 中川徹・小柳義夫: “最小二乗法による実験データ解析プログラム SALS”, 東京大学出版会, p. 95-110.
- 3) Masao Amano, Motoi Yoshioka, : “Sperm whale diving behavior monitored using a suction-cup-attached TDR tag”, Marine ecology progress series, Vol. 258, 291-295 (2003).