■ 論文

エチゼンクラゲ (*Nemopilema nomurai*) の 音響散乱の遊泳姿勢角特性

広瀬美由紀 (前 韓国全南大学校)*¹, 向井 徹 (北海道大学)*²

E-mail: miyukihirose-fujino@frontier.hokudai.ac.jp

(2013 年 6 月 18 日原稿受付)

Abstract:

Acoustic techniques are commonly used to study the distributions and abundances of fish and zooplankton, because these techniques can survey large areas relatively quickly. Recently, acoustic-scattering techniques such as echosounders have been applied to jellyfish monitoring. Several studies have examined the acoustic-scattering characteristics of *Nemopilema nomurai*, but the influence of changes in the swimming (swimming angle) of this jellyfish on target strength (TS) has yet to be determined. This information has important implications for estimations of the abundance of jellyfish. In this study, the TS of live jellyfish in a seawater tank was measured to clarify the relationship between TS and swimming angle. Both measured and modeled scattering patterns depended on the swimming angle, revealing that the TS was largest for the head-aspect (incident on the bell of the jellyfish: 0 degree) swimming angle, and 10 dB lower for the intermediate-aspect swimming angle. The reduced target strength (RTS) in the side-aspect angle (range, 20–160°) varied between –60 and –50 dB; there was good agreement between the estimated and measured TS values.

Classification: 水産音響・バイオアコースティックス

Keyword: エチゼンクラゲ, ターゲットストレングス, 遊泳姿勢角

1. はじめに

2002 年以降 2009 年まで, 日本沿岸および韓国沿岸では, エチゼンクラゲ (*Nemopilema nomurai*) が毎年大量に出現し大きな社会問題となり, これに対する対策が求められている^{1)–7)}. しかしながら, エチゼンクラゲの生態, 分布, 現存量などに

ついては未だに不明な点が多く, 産業被害や漁業被害への対策が難しい. エチゼンクラゲの生態を明らかにし, 各種被害への対策法を提言するには, その分布特性や現存量を定量的に測定する方法を開発し, それをもとにエチゼンクラゲの大量発生を予測する必要がある.

Acoustic Characteristics of *Nemopilema nomurai* Depending on the Swimming Angle

* 1 Miyuki HIROSE (Former Lecturer, Chonnam National University, Korea)

* 2 Tohru MUKAI (Hokkaido University)

一方、北太平洋や世界の縁海域においても、クラゲ類などのゼラチン状の組織を持つ動物プランクトンの増加と異常発生が報告されており^{8)–10)}、それらのモニタリング方法の一つとして音響手法が利用され、その成果が報告されている^{11)–16)}。

著者らも音響手法を用いたエチゼンクラゲのモニタリング手法の開発を目指し、計量魚群探知機(以後、計量魚探機とする)の活用の可能性を模索してきた。計量魚探機を用いた音響手法による生物量推定法は、計量魚探機で対象生物の群からのエコー強度を積分し、単体のエコー強度であるターゲットストレングス(以後、TSとする)で割って生物密度を算出し、ある海域の生物量を推定する。この手法により精度良く生物密度を推定するためには、生物一頭あたりのTSが重要な鍵となる。TSは、対象とする生物種や体サイズにより変化し、同一個体であっても周波数の違いによりTSの特性が顕著に異なる場合がある。このような特性の違いを利用して生物の判別を行い、特定生物の分布を調べる手法は、動物プランクトンを対象として実施されている¹⁷⁾。これらのことから、TSは計量魚探機を用いた調査において重要なパラメータであり、対象生物の音響散乱特性(周波数特性、種特性、遊泳姿勢角特性など)を的確に把握することが大切である。そこで著者らは、現在までにエチゼンクラゲの超音波散乱強度の測定¹⁸⁾、音響散乱モデルに必要なエチゼンクラゲ体内の音速および密度の測定¹⁹⁾、種の異なるクラゲの超音波散乱強度の測定²⁰⁾等を行い、周波数や種による特性を調べてきた。しかし、エチゼンクラゲの遊泳行動に伴う姿勢変化がもたらすTSの変化、すなわち、TSの遊泳姿勢角特性(以後、姿勢角特性とする)が明らかになっておらず、エチゼンクラゲの音響調査の実用化には至っていない。そこで今回、エチゼンクラゲの姿勢角特性を明らかにすることで、音響手法を用いたエチゼンクラゲの分布や現存量推定を可能にすべく実験を行った。

2. 方法

実験は、2009年8月に韓国全南大学校附属増殖研究センター内に設置された海水音響実験水槽(5m×5m×5m)で行った。TS測定に用いたサンプル4個体は、海中を浮遊していた個体をスキューバダイビングにより採集したものである。採集時は、エチゼンクラゲを周囲の海水とともに海中で袋詰めにし、空気に触れて体に気泡が付着しないよう細心の注意を払った。そして、サンプルを飼育水槽(直径1m×深さ1m)に入れ数時間から1日、フィルターでろ過した海水をオーバーフローさせた円形水槽で蓄養した。この時、水槽内でもサンプルの体に気泡が付着しないよう、また、オーバーフローさせた海水とともに水槽からサンプルが流出しないよう水面下5cmのところに一面ネットを張った。これらのエチゼンクラゲはTS測定直前に、飼育水槽内において再び海水ごと水中でビニール袋に詰め、実験水槽に移してTS測定を行った。

TS測定に使用した計量魚探機は、周波数38kHzのスプリットビームタイプ(SIMRAD; EK500)である。TS測定の様子をFig. 1に示す。トランスデューサ(ES38B)は水面下約50cmの位置に下向きに設置した。この時、パルス幅を0.3ms、パルスレートを0.5秒とした。一方、エチゼンクラゲはその上傘の中心部にテグスを貫通させ、このテグスに枝糸を取り付けエチゼンクラゲが上下または左右に移動しないようにした。エチゼンクラゲは、Fig. 1の右a～cに示したように、大別して3種類の姿勢で懸垂し、TS測定を行った。超音波がほぼ傘上面から照射するときをHead-aspect (Fig. 1a)とし、その測定時は、Fig. 1左の水槽図のようにエチゼンクラゲを懸垂した。また、超音波が傘の斜め上から照射される時をIntermediate-aspect (Fig. 1b)、真横から照射される時をSide-aspect (Fig. 1c)とそれぞれ定義し、これらの測定時は水槽の縁に2本のテグスを下ろし、Fig. 1b, Fig. 1cのように懸垂した。さらにTS測定中のエチゼンクラゲの動きや姿勢をモニ

Fig. 1 Diagram of the acoustic tank used to measure the target strength (TS) of *Nemopilema nomurai* using an echosounder system (Simrad EK500, 38 kHz). The behavior of each jellyfish was observed with an underwater video camera. The jellyfish were tethered and demonstrated three different swimming angles, namely a) head-aspect, b) intermediate-aspect, and c) side-aspect angles, as shown in the right inset of the figure.

ターするため、水槽壁面に横向きに水中カメラを設置し、その映像を録画した。

各個体の TS 測定前後には、水温塩分計 (YSI; YSI30M-50FT) を用いて水槽内の海水の水温および塩分を測定した。また TS 測定の初日と最終日には、直径 60mm の銅球によるキャリブレーションを行うとともに、各エチゼンクラゲの TS 測定前後にはこの較正球を用いたゲインチェックを実施し、システムの安定を確認した。

計量魚探機で得られた TS データは Echoview (Miryax) の Export 機能を用いてエクセルファイル化し TS の解析を行った。TS 測定が終了した個体については、水中では拍動により傘直径の計測が困難であるため、エチゼンクラゲを机上に広げた状態での空中傘直径¹⁸⁾ (以後、傘直径とする) を測定した。

3. 音響散乱モデルによる TS 推定

音響散乱モデルによる TS 推定において、対象生物と海水との音速比 h および密度比 g が必要である。本研究では、生物が中性浮力を示す溶液を作り、その溶液の密度を生物の生体密度とする中性浮力法を用いて、エチゼンクラゲの生体密度の測定を行った。TS 測定後も元気に遊泳して

いる個体について測定を試みたが、本実験ではエチゼンクラゲ 1 個体のみの生体密度しか計測できなかった。そこで広瀬ら¹⁹⁾によって測定されたエチゼンクラゲと海水との音速比 h および密度比 g を用いて、周波数 38 kHz におけるエチゼンクラゲの TS を音響散乱モデルにより推定した。用いたモデルは、散乱体の形状を半径が徐々に変化する円筒薄片の繋がりとして考える次式による Distorted Wave Born Approximation (以後、DWBA とする) 変形円筒モデルである^{20)–25)}。

$$f_{bs} = \frac{k_1}{4} \int_{\vec{r}_{pos}} a(\gamma_k - \gamma_\rho) \exp(2i\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_{pos}) \times \frac{J_1(2k_2 a \cos \beta_{tilt})}{\cos \beta_{tilt}} |d\vec{r}_{pos}| \quad (1)$$

$$\sigma_{bs} = |f_{bs}|^2 \quad (2)$$

$$TS = 10 \log \sigma_{bs} \quad (3)$$

ここで、 $\vec{r}_{pos}$ は薄片の軸に沿った点の位置ベクトル、 k は波数で、添え字の 1 は海水中を示し、2 はエチゼンクラゲ内部を示す。 a は円筒薄片の半径[m]、 β_{tilt} は入射波と体軸との角度、 J_1 は第 1 種第 1 次ベッセル関数である。 γ_k, γ_ρ は音速比 h 、密度比 g で決まる値であり次式で表現される。

Fig. 2 Fundamental shape of the jellyfish used to estimate the TS, using the distorted-wave Born approximation (DWBA) model.

$$\gamma_k = \frac{1}{gh^2} - 1 \quad (4)$$

$$\gamma_\rho = 1 - \frac{1}{g} \quad (5)$$

Eq.(1)~Eq.(3)による TS 推定にあたり, McGehee *et al.*²³⁾ による MATLAB (Cybernet System) コードを参考に Eq.(1) を計算した. $\vec{r}_{\text{pos}}$ を求めるために必要なエチゼンクラゲの形状は, 飼育水槽内を遊泳するエチゼンクラゲの形状(**Fig. 2**)を用いた. ここで, 傘および口腕(傘下部から伸びる 8 本の足のような物)については内部に隙間のない塊と考え, 傘と口腕付け根および口腕間にある隙間は考慮しなかった. これはエチゼンクラゲの形状が魚などと比較して複雑であり, できるだけ簡略化するためである. さらに形状は軸対称とし, これを Stanton and Chu²⁴⁾ に従い, 測定周波数における波長 λ を 20 で除した値以下の幅の円筒薄片のつながりとし, 音速比 h および密度比 g はエチゼンクラゲの部位に関係なく等しいと仮定して TS を推定した.

4. 結果

4.1 水槽実験

TS 実験に用いたエチゼンクラゲ 4 個体の傘直径は 29~36.5 cm であった. このうち生体密度の測定ができた個体は傘直径 34.5 cm の個体であり, 海水との密度比 g は 1.001 であった. 水槽実験で得られた TS の測定結果を **Fig. 3** に示す. 横軸は

遊泳姿勢角(以後, 姿勢角とする), 縦軸は TS である. Fig. 1 同様, 音波がエチゼンクラゲ傘上面から入射した時が姿勢角 0° である. Fig. 3 より, 全ての個体において同じ姿勢角でも TS は大きく異なり, また傘直径 34.5 cm の個体以外は, 姿勢角 0° の時に TS が大きくなる傾向が見られた.

そこで姿勢角と TS の関係を調べる目的で, 傘直径 32 cm の個体の姿勢角と TS の頻度分布図を調べ, **Fig. 4** に示した. 上図はエチゼンクラゲの姿勢角, 下図は TS の頻度分布を示す. クラゲは活発に遊泳していたため姿勢角にはばらつきがみられた. そのため Fig. 4 上図のように姿勢角 $0^\circ \sim 15^\circ$ (音波がエチゼンクラゲ傘上面方向から入射したとき), 姿勢角 $30^\circ \sim 65^\circ$ (音波がエチゼンクラゲ傘上面斜め方向から入射したとき), 姿勢角 $65^\circ \sim 135^\circ$ (音波がエチゼンクラゲ側面部に入射したとき)と大きく 3 パターンに分類したときの TS の頻度分布を調べた.

Fig. 4 下図の TS ヒストグラムより, 姿勢角 $0^\circ \sim 15^\circ$ における TS 分布のモードは -64 dB となり, 他のグループ(姿勢角 $30^\circ \sim 65^\circ$ および $65^\circ \sim 135^\circ$) のそれらより約 10 dB 大きかった. また, 姿勢角 $30^\circ \sim 65^\circ$ の TS 分布の傾向は, 姿勢角が $65^\circ \sim 135^\circ$ のときとあまり違いは見られなかった. これらの結果より, エチゼンクラゲの TS は傘上面から音波が入射した時に最大となり, 音波がエチゼンクラゲに斜めに入射すると TS は小さくなることがわかった.

Fig. 3 Relationship between the swimming angle and the measured TS of the jellyfish at 38 kHz.

Fig. 4 Histograms of swimming angle and TS at 38 kHz. The diameter of this jellyfish is 32 cm. The upper figures show the observed frequency of each swimming angle. The lower figures show the frequencies of the TS at 38 kHz. From left to right, results are shown for the head-aspect, intermediate-aspect, and side-aspect angles, respectively.

4.2 音響散乱モデルにより推定したエチゼンクラゲの TS の姿勢角特性

次に、Fig. 2 より得られたエチゼンクラゲの形状座標を用いて DWBA 変形円筒モデルにより推定した TS の姿勢角特性を Fig. 5 に示す。ここで、Fig. 5 の横軸はエチゼンクラゲの姿勢角であり、縦軸は傘面積[m²]で規準化した TS (Reduced Target Strength; 以後、RTS とする) である。RTS は、以下の式を用いて求めた¹¹⁾。

$$RTS = 10 \log_{10} \frac{\sigma_{bs}}{\pi \left(\frac{D}{2} \right)^2} \quad (6)$$

ここで、 D は傘直径[m] である。姿勢角 0° は、音波がエチゼンクラゲ傘上面から入射した場合であり、90° は超音波がエチゼンクラゲ側面部に入射した場合の RTS を表す。図中実線は、音速比 h を 1.001¹⁹⁾、密度比 g を 1.013¹⁹⁾ として DWBA 変形円筒モデルにより推定した RTS である。また、水槽で測定した 4 個体(傘直径 29 ~ 36.5 cm) の実測 TS から求めた各姿勢における RTS を個体にかかわらずすべて○で示した。このとき、実測値については、実験および解析時の姿勢角測定

の精度を考慮し、サンプルごとに姿勢角 5° 刻みでの最大値を各角度範囲における実測 RTS としてプロットした。ここで最大値としたのは、Fig. 3 に示したように、同じ姿勢角でも TS には大きなばらつきが見られ、この要因のひとつに、拍動に伴いエチゼンクラゲの体の大部分がビームから外れた場合などは TS が過小評価されている可能性があると考えたためである。Fig. 5 より、姿勢角が 0°, 180° 付近の時に推定 RTS は最大となり、姿勢角が数度変化すると推定 RTS の値は大きく減少した。また、姿勢角 0° および 180° 付近では実測 RTS と比較して推定 RTS は約 15 dB 大きく、一方、姿勢角 90° および 135° 付近では実測 RTS が推定 RTS より約 5 dB 大きくなっていったが、その他の角度では、実測 RTS と推定 RTS は近い値を示した。DWBA 変形円筒モデルは散乱体の形状を半径が徐々に変化する円筒薄片の繋がりとして考えるモデルである。そこで、円筒薄片の幅を、測定周波数における波長 λ を 20 で除した値以下で変化させ検討を行ったが、姿勢角 0° および 180° 付近において推定値がピークを示す傾向は変わらなかった。

5. 考察

水槽における 4 個体分の測定結果(Fig. 3) および DWBA 変形円筒モデルによる推定結果(Fig. 5) より、エチゼンクラゲの姿勢角特性は、音波が傘上面に入射したときに最大となり、音波がエチゼンクラゲに斜めに入射すると TS は小さくなることがわかった。そこで、この特性が何に起因するかを調べる目的で、エチゼンクラゲの体を部位によって大きく二つに分け、傘と口腕の姿勢角特性をそれぞれ DWBA 変形円筒モデルにより推定した。その結果を Fig. 6 に示す。横軸は姿勢角、縦軸は RTS である。Fig. 6a および Fig. 6b の○はエチゼンクラゲ全体を計測したときの実測値であり、実線はおのおの黒で塗りつぶした部位(傘のみ(Fig. 6a)、口腕のみ(Fig. 6b))のみで推定したときの姿勢角特性である。Fig. 6 より、エチゼ

Fig. 5 Relationship between the swimming angle and the measured and estimated reduced target strength (RTS) of the jellyfish. The maximum value of the measured RTS was plotted in 5° intervals. The estimated RTS was calculated using the DWBA model. The speed of sound and the density contrast used in the model computation were 1.001 and 1.013, respectively.

Fig. 6 Relationship between the swimming angle and measured RTS of jellyfish and estimated RTS of the bell (Fig. 6a) and oral arm (Fig. 6b). Each part is shown on the left in the figure.

エチゼンクラゲの傘および口腕の推定 RTS は実測 RTS と近い値を示した。しかし、その特性は異なり、傘のみ (Fig. 6a) の姿勢角特性は姿勢角 0° および 180° 付近では実測 RTS と比較して推定 RTS は大きく、さらに、姿勢角 $80^\circ \sim 90^\circ$ 付近では実測 RTS が推定 RTS より大きくなり、Fig. 5 で示したエチゼンクラゲ全体の姿勢角特性と近い特性が見られた。一方、Fig. 6b より、姿勢角 $80^\circ \sim 90^\circ$ 付近では、エチゼンクラゲ全体 (Fig. 5) や傘のみ (Fig. 6a) の推定 RTS と比べて、口腕のみの推定 RTS は実測 RTS と近い値を示した。

そこで、エチゼンクラゲの実測 RTS はどの部位の推定値と近いかを調べるため、エチゼンクラゲ全体を計測した時の実測 RTS と各部位 (エチゼンクラゲ全体、傘のみ、口腕のみ) で求めた推定 RTS を比較した結果を Fig. 7 に示した。横軸は実測 RTS、縦軸は推定 RTS であり、エチゼンクラゲ全体を実測した RTS に対して、●はエチゼンクラゲ全体、×は傘のみ、△は口腕のみで求め

Fig. 7 Relationship between the measured and estimated RTS values of jellyfish, and the bell and oral arm of the jellyfish, respectively. (●: Jellyfish, ×: Bell, △: Oral arm). Root Mean Square Error (RMSE) (—: Jellyfish, - - -: Bell, —: Oral arm).

た推定 RTS である。ここで、実測 RTS と比較するため、推定 RTS も姿勢角 5° 刻みのときの最大値を用いた。リニアスケールにした時の両者の二乗平均平方根誤差 (RMSE) も図中 (太線: エチゼンクラゲ全体, 破線: 傘のみ, 細線: 口腕のみ) に示した。Fig. 7 より、エチゼンクラゲ全体および傘のみの推定 RTS は実測 RTS と近い値を示し、一方、口腕のみの推定 RTS と実測 RTS は大きく異なったことから、エチゼンクラゲの姿勢角特性は傘に大きく影響を受けるという事がわかった。

そこでモデル形状に汎用性を持たせるために、エチゼンクラゲの姿勢角特性と良く似た特性を示した傘部分を扁平回転楕円体 (以降、楕円体とする) に近似させ、その音響散乱特性を DWBA 変形円筒モデルで調べた。この時、楕円体はエチゼンクラゲの形状を分割したときと同じ間隔で分割した円筒薄片のつながりとし、音速比 h および密度比 g は、エチゼンクラゲの TS 推定に用いた値である 1.001 と 1.013 を使用した。楕円体の形状を Fig. 8、推定結果を Fig. 9 に示す。Fig. 8 の黒の実線がエチゼンクラゲの傘部分の形状であり、破線が近似した楕円体である。楕円体は傘

Fig. 8 Shape of the bell of a jellyfish and the approximated elliptical shape used to estimate the TS with the DWBA model.

Fig. 9 Relationship between the swimming angle and measured RTS of jellyfish and estimated RTS of an ellipsoid.

の形状とほぼ等しく、長径は24.54cm、短径は16.48cm、アスペクト比(短径/長径)は0.6716である。また、Fig. 9の破線は楕円体の推定RTSであり、白丸はクラゲ全体を計測した実測RTSである。Fig. 9より、楕円体の推定RTSは実測RTSと近い値を示し、姿勢角 0° および 180° ではピークを示さず、実測RTSと近い値となった。これより、Fig. 8で示したエチゼンクラゲの傘下部(Fig. 8における横軸 $x < 5$)の形状が推定値に影響し、姿勢角 0° および 180° でエチゼンクラゲの推定RTS(Fig. 5)は実測RTSより大きく

なったと考えられる。この点については、今後さらに検討する予定であるが、姿勢角 0° 、および 180° 付近以外では、実測値と推定値はよく一致していたことから、姿勢角が約 $20^\circ \sim 160^\circ$ におけるエチゼンクラゲのRTSは $-60 \sim -50$ dBとなり、複雑な形状を用いなくても、傘を楕円体で近似してエチゼンクラゲの姿勢角特性の推定が可能であることがわかった。

一方、エチゼンクラゲは傘と口腕では見た目の色等が異なるため、エチゼンクラゲの部位により音速比や密度比が異なり、それが推定値に影響していた可能性も考えられる。そこで傘と口腕の各部位のパラメータを異なる値とし、Fig. 2のクラゲの形状を用いてDWBA変形円筒モデルでエチゼンクラゲのTS推定を行った。エチゼンクラゲの傘および口腕などの各部位ごとの密度および音速を計測した報告例はないため、今回は、クラゲ全体の生体密度を計測した値を用いてTS推定を行った。ここでFig. 6より、エチゼンクラゲの姿勢角特性は傘に大きく影響を受けることから、今回は傘と口腕の音速比 h および口腕の密度比 g をそれぞれ h は1.001、 g は1.013と一定の値とし、傘の密度比 g については、今回測定された1.001、ならびに、過去の測定結果^{19), 27)}を考慮して、1.005、1.010の3種類の g を用いてTSを推定した。結果をFig. 10に示す。図は上から、傘の密度比 g を1.001(Fig. 10a)、1.005(Fig. 10b)、1.010(Fig. 10c)としたときの推定RTSである。図より、傘の密度比 g が1.001の推定RTS(Fig. 10a)は、姿勢角 0° のとき、実測RTSと近い値を示したが、他の角度では、推定RTSより実測RTSの方がやや大きくなった。一方、密度比 g が1.005(Fig. 10b)および1.010(Fig. 10c)のとき、姿勢角 0° では実測RTSより推定RTSは大きくなったが、他の角度では推定RTSと実測RTSは近い値を示した。また、密度比 g が1.001(Fig. 10a)と1.010(Fig. 10c)のときのRMSEは、それぞれ 1.3×10^{-4} 、 1.2×10^{-4} となり、密度比 g が1.005のとき(Fig. 10b)のRMSEより小さくなった。これらの結果より、

Fig. 10 Relationship between the swimming angle and measured and estimated RTS values of jellyfish. The sound-speed contrast and density contrast of the arm were 1.001 and 1.013, respectively. The density contrast of the bell was variable: 1.001, 1.005, and 1.010. The sound-speed contrast of the bell was 1.001.

エチゼンクラゲの部位により音速比や密度比が異なり、それが推定値に影響していた可能性があると考えられた。今後、各部位の音速および密度の計測を行い、それらの影響について調べる必要がある。

本研究から、姿勢角が 0° および 180° 付近以外の角度では、実測 RTS と推定 RTS はよく一致したことから、姿勢角が約 $20^\circ \sim 160^\circ$ におけるエチゼンクラゲの RTS は約 $-60 \sim -50$ dB であることがわかった。また、姿勢角 0° および 180° 付近では実測 RTS と推定 RTS の値に大きな差が生じたが、実測値、推定値ともに他の角度よりも大

きくなる傾向が見られた。これより、エチゼンクラゲの TS の姿勢角特性は、傘上面あるいは下面から音波が入射したときに TS は最大となり、音波が約 10° 以上斜めからエチゼンクラゲに入射すると、TS はピーク値よりも小さくなる傾向があることがわかった。さらに、エチゼンクラゲの TS の姿勢角特性は傘に大きく影響を受けることから、実海域での音響調査で得られる *in situ* TS から海中で遊泳するエチゼンクラゲの傘直径を推定することが可能であると考えられる。

また Fig. 9 より、複雑な形状を用いなくとも傘を楕円体で近似してエチゼンクラゲの姿勢角特性の推定が可能であるため、対象海域のエチゼンクラゲの傘直径からその海域にいるエチゼンクラゲの姿勢角特性を現場で推測できることがわかった。

今後は、実海域におけるエチゼンクラゲの遊泳行動および遊泳姿勢分布を明らかにするとともに、姿勢角 0° および 180° 付近の RTS を明らかにすることで、より精度の高い音響調査が可能になると考える。

謝辞

本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会と韓国科学財団による日韓拠点大学交流事業 (FiSCUP) ならびに二国間交流事業 (共同研究) による支援を得た。また韓国全南大学校 黄 斗湊教授には、現場における TS 測定において多大なるご協力を頂いた。記して感謝する。最後に、本論文を注意深くお読み頂き適切な助言を頂いた匿名査読者および編集委員に深く感謝する。

参考文献

- 1) 柿沼好子, "大型クラゲの環境生物学—クラゲの大発生が問いかけるもの—", 西海ブロック漁海況調査研究報告, **9**, 1-16 (2001).
- 2) 安田 徹, 海の UFO クラゲ 発生・生態・対策 (恒星社厚生閣, 東京, 2003), p. 116-122, p. 139-142.
- 3) 本多直人, "エチゼンクラゲの輸送に関わる

- 生態特性(シンポジウム;海洋生物の漂流—沿岸からの輸送と生態),"沿岸海洋研究, **46**(2), 101-108 (2009) .
- 4) 飯泉 仁, 秋山秀樹, "東アジアにおける大型クラゲ(*Nemopilema nomurai*; エチゼンクラゲ)大量出現の現状と国際的な取り組み(総特集 生態系アプローチと水産資源の持続的利用)," 海洋, **41**(9), 496-507 (2009) .
 - 5) 本多直人, "大型クラゲによる漁業被害と防止対策の現状," 海洋水産エンジニアリング, **36**, 57-63 (2004) .
 - 6) 漁具改良マニュアル—大型クラゲ対策のために—第3版(独立行政法人水産総合研究センター, 2006) .
 - 7) "大型クラゲ(*Nemopilema nomurai*)による漁業被害の防除技術開発の現状," 平成17年度水産工学関係試験研究推進特別部会漁業技術シンポジウム報告書(2006) .
 - 8) E. Mutlu, F. Bingel, A. C. Gücü, V. V. Melnikov, U. Niermann U, N. A. Ostr and V. E. Zaika, "Distribution of the new invader *Mnemiopsis* sp. and the resident *Aurelia aurita* and *Pleurobrachia pileus* populations in the Black Sea in the years 1991-1993," ICES J. Mar. Sci., **51**, 407-421 (1994) .
 - 9) R. D. Brodeur, C. E. Mills, J. E. Overland, G. E. Walters and J. D. Schumacher, "Evidence for a substantial increase in gelatinous zooplankton in the Bering Sea, with possible links to climate change," Fish. Oceanogr., **8**, 296-306 (1999) .
 - 10) R. D. Brodeur, H. Sugisaki and G. L. J. Hunt, "Increases in jellyfish biomass in the Bering Sea: implications for the ecosystem," Mar. Ecol. Prog. Ser., **233**, 89-103 (2002) .
 - 11) B. C. Monger, S. Chinniah-Chandy, E. Meir, S. Billings, C. H. Greene and P. H. Wiebe, "Sound scattering by the gelatinous zooplankters *Aequorea Victoria* and *Pleurobrachia bachei*," Deep-Sea Res. II, **45**, 1255-1271 (1998) .
 - 12) U. Båmstedt, S. Kaartvedt and M. Youngbluth, "An evaluation of acoustic and video methods to estimate the abundance and vertical distribution of jellyfish," J. Plankton Res., **25**, 1307-1318 (2003) .
 - 13) G. A. Colombo, H. Mianzan and A. Madirolas, "Acoustic characterization of gelatinous-plankton aggregations: four case studies from the Argentine continental shelf," ICES J. Mar. Sci., **60**, 650-657 (2003) .
 - 14) A. S. Brierley, D. C. Boyer, B. E. Axelsen, C. P. Lynam, C. A. J. Sparks, H. J. Boyer and M. J. Gibbons, "Towards the acoustic estimation of jellyfish abundance," Mar. Ecol. Prog. Ser., **295**, 105-111 (2004) .
 - 15) G. A. Colombo, A. Benović, A. Malej, D. Lučić, T. Makovec, V. Onofri, M. Acha, A. Madirolas and H. Mianzan, "Acoustic survey of a jellyfish-dominated ecosystem (Mljet Island, Croatia)," Hydrobiologia, **616**, 99-111 (2009) .
 - 16) T. A. Klevjer, S. Kaartvedt and U. Båmstedt, "In situ behaviour and acoustic properties of the deep living jellyfish *Periphylla periphylla*," J. Plankton Res., **31**(8), 793-803 (2009) .
 - 17) R. B. Mitson, Y. Simard and C. Goss, "Use of a two-frequency algorithm to determine size and abundance of plankton in three widely spaced locations," ICES J. Mar. Sci., **53**, 209-215 (1996) .
 - 18) 広瀬美由紀, 向井 徹, 黄 斗湊, 飯田浩二, "懸垂法によるエチゼンクラゲ *Nemopilema nomurai* のターゲットストレングス測定," 日本水産学会誌, **71**, 571-577 (2005) .
 - 19) 広瀬美由紀, 向井 徹, 志村 健, 山本 潤, 飯田浩二, "理論モデルによるエチゼンクラゲ *Nemopilema nomurai* のターゲットストレングス推定に必要な生体密度および生体内音速の測定," 海洋音響学会誌, **34**(2), 37-46 (2007) .

- 20) M. Hirose, T. Mukai, D. Hwang and K. Iida, "The acoustic characteristics of three jellyfish species: *Nemopilema nomurai*, *Cyanea nozakii*, and *Aurelia aurita*," ICES J. Mar. Sci., **66**, 1233-1237 (2009).
- 21) T. K. Stanton, D. Chu and P. H. Wiebe, "Sound scattering by several zooplankton groups. II. Scattering models," J. Acoust. Soc. Am., **103**, 236-253 (1998).
- 22) L. V. M. Traykovski, R. L. O'Driscoll and D. E. McGehee, "Effect of orientation on broadband acoustic scattering of Antarctic krill *Euphausia superba*: Implications for inverting zooplankton spectral acoustic signatures for angle of orientation," J. Acoust. Soc. Am., **104**, 2121-2135 (1998).
- 23) D. E. McGehee, R. L. O'Driscoll and L. V. M. Traykovski, "Effects of orientation on acoustic scattering from Antarctic krill at 120 kHz," Deep-Sea Res. II, **45**, 1273-1294 (1998).
- 24) T. K. Stanton and D. Chu, "Review and recommendations for the modelling of acoustic scattering by fluid-like elongated zooplankton: euphausiids and copepods," ICES J. Mar. Sci., **57**, 793-807 (2000).
- 25) K. Amakasu and M. Furusawa, "The target strength of Antarctic krill (*Euphausia superba*) measured by the split-beam method in a small tank at 70 kHz," ICES J. Mar. Sci., **63**, 36-45 (2006).
- 26) B. A. Jones, A. C. Lavery and T. K. Stanton, "Use of the distorted wave Born approximation to predict scattering by inhomogeneous objects: Application to squid," J. Acoust. Soc. Am., **125**(1), 73-88 (2009).
- 27) 広瀬美由紀, 向井 徹, 尹 銀娥, 黄 斗湊, "エチゼンクラゲ(*Nemopilema nomurai*)の超音波散乱特性の研究 2003-2010," Proc. the 10th Japan-Korea Joint Seminar on Fisheries Sciences, 55-59 (2010).