

学位論文題名

エチゼンクラゲの音響散乱特性に関する研究

学位論文内容の要旨

目的

近年、日本周辺海域において、エチゼンクラゲの大量出現が高頻度で生じている。2006 年も本種が日本海側沿岸へ大量に漂着し、定置網漁業などの漁業活動に大きな被害をもたらした。そのため、これら被害に対する早急の対策が求められている。しかし、エチゼンクラゲの生態は不明な点が多く、現状では出現予測が困難である。沿岸への大量漂着を予測するためには、その広域な分布や密度の情報が不可欠である。エチゼンクラゲを音響的にモニタリングできれば、その三次元分布を短時間・広範囲に明らかにすることができる。

エチゼンクラゲの早期来遊予測を行うべく、本種の分布を計量魚群探知機（以下計量魚探機）を用いた音響手法で調査するためには、エチゼンクラゲの音響散乱特性を明らかにする必要がある。しかし、クラゲの音響散乱特性に関する研究例は少なく、さらにエチゼンクラゲに関する研究例はない。

そこで本論文では、音響手法を用いたエチゼンクラゲの分布調査の実用化を目的に、エチゼンクラゲの音響散乱特性を明らかにした。

方法

エチゼンクラゲの音響散乱特性を明らかにするために、水槽での測定による実験的方法、音響散乱モデルを用いた理論的方法、計量魚探機を用いた実海域における音響探知の 3 つの方法を用いた。

1. 懸垂法によるエチゼンクラゲのターゲットストレンジス測定

実験は 2003 年から 2006 年までの 4 年間、毎年 8 月に、韓国全南大学校

の海水音響実験水槽で行った。サンプルは、測定直前にスキューバダイビングにより生きたまま採集した。クラゲのターゲットストレンジス（以下 TS）は、周波数 38, 120, 200kHz を用いて、懸垂法により測定した。

## 2. 音響散乱モデルを用いたエチゼンクラゲのターゲットストレンジス推定

音響散乱モデルによる TS 推定に必要なクラゲ体内の音速や密度の測定および遊泳形状の観察を行った。

実験は、2004 年から 2006 年の 3 年間、合計 5 回、韓国全南大学校実験所および鳥取県水産試験場において行った。

クラゲの生体内音速は伝搬時間計測法により、また生体密度は Dual-density 法または排水法により求めた。

さらに、水槽内を遊泳しているエチゼンクラゲの遊泳形状の観察を基にこれをモデル化し、DWBA (Distorted Wave Born Approximation) モデルを用いてエチゼンクラゲの TS を理論推定した。

## 3. フィールドにおけるエチゼンクラゲの音響探知

計量魚探機を用いたフィールド調査は 2004 年～2006 の 3 年間にわたり、東シナ海および日本海で行った。東シナ海で用いた周波数は 38kHz と 120kHz である。またエコーグラム上に見られた反応の構成生物を確認するために、Framed Midwater Trawl (以下 FMT) ネットを用いてサンプリングを行った。

一方、日本海で用いた周波数は 38kHz, 120kHz, 200kHz の 3 周波数である。生物確認のために FMT ネットによる生物採集および ROV を用いた水中観察を行った。

## 結果

懸垂法を用いて大きさの異なるエチゼンクラゲおよびユウレイクラゲのターゲットストレンジスを測定した結果、

- 1) エチゼンクラゲの TS は、クラゲの傘面積に比例して大きくなり傘面積で規準化した最大ターゲットストレンジス(RTS)は、周波数 38kHz で -51.57 dB/m<sup>2</sup>, 120kHz で -43.15 dB/m<sup>2</sup>, 200kHz で -50.71 dB/m<sup>2</sup> であった。

2) エチゼンクラゲの RTS は、ユウレイクラゲの RTS より小さく、その差は周波数 38kHz で 24.5dB, 120kHz で 13.49dB, 200kHz で 11.7dB であった。旗口クラゲ目のユウレイクラゲが、根口クラゲ目のエチゼンクラゲよりも筋組織が発達していることがその理由と考えられた。

次に、エチゼンクラゲのターゲットストレンジスを理論推定するのに必要なエチゼンクラゲの生体内音速と生体密度を測定した結果、

- 3) エチゼンクラゲの生体内音速は、体長や生死の状態に関わらず、1500 m/s ~ 1550 m/s の範囲にあり、その平均音速は 1524 m/s であった。また、海水音速との比  $h$  は 0.984 ~ 1.013 となり、全個体の平均音速比  $h$  は 1.002 であった。
- 4) エチゼンクラゲの生体密度は  $0.93 \text{ g/cm}^3 \sim 1.18 \text{ g/cm}^3$  であり、死亡個体は重くなる傾向が見られた。計量魚探機で探知可能な深度層におけるエチゼンクラゲの生体密度は海水よりやや重く、海水密度との平均密度比  $g$  は 1.013 であった。
- 5) エチゼンクラゲとユウレイクラゲの音速比を比較したところ、エチゼンクラゲの音速比  $h$  は、ユウレイクラゲより最大で 0.054 小さかった。さらにエチゼンクラゲの密度比  $g$  はユウレイクラゲより 0.06 小さかった。このことが、エチゼンクラゲの RTS がユウレイクラゲの RTS より小さくなった理由と考えられた。

これらの結果をもとに、DWBA モデルを用いてエチゼンクラゲの理論 TS を推定した結果、

- 6) エチゼンクラゲの RTS は傘直径対波長比  $D/\lambda$  とともに増加するが、 $D/\lambda$  が約 25 ~ 30 で極小を示した。また、TS の指向性は鋭く、特に高周波数になるほど鋭くなった。

最後に、日本海および東シナ海において計量魚探機を用いてエチゼンクラゲの音響探知を試みたところ、

7) 周波数 38kHz, 120kHz, 200kHz のエコーグラム上におけるエチゼンクラゲの反応は、斑点状に表示され、その SV (体積後方散乱強度) にも周波数差が見られた。

### 考察

本研究において、エチゼンクラゲのターゲットストレングスは魚類などに比べて格段に小さく、しかも遊泳姿勢や形状変化に大きく影響されることがわかった。また、3周波数による測定および音響モデルを用いた理論推定から、エチゼンクラゲの TS の周波数特性は、周波数 120kHz で最大であり、次いで 200kHz が大きく、38kHz は最小となることがわかった。従って、この TS の周波数特性とフィールド調査から判明したエチゼンクラゲのエコーグラムの特徴をあわせて考えると、魚類や小形の動物プランクトンとエチゼンクラゲを判別することは可能と考えられた。

本研究で得られたこれらの知見から、今後計量魚探機を用いて、次のような応用が期待される。

- 1) エチゼンクラゲの水平・鉛直分布や日周行動について、広範囲の海域を短期間に調査することができる。
- 2) エコーグラム上でエチゼンクラゲの層と判断した音響散乱層の SV や SA を計測し、本研究で得られたエチゼンクラゲの TS を用いて個体数密度を算出し、現存量を推定することができる。
- 3) エチゼンクラゲの TS は傘直径に比例して大きくなるので、エチゼンクラゲの *in situ* TS データをもとに、エチゼンクラゲの体長組成を推定することができる。

エチゼンクラゲの大量発生を予測するためには、広範囲でかつ連続的な観測が必要であり、観測が容易である計量魚探機はエチゼンクラゲの分布および現存量調査に大きく貢献するであろう。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 飯 田 浩 二  
副 査 教 授 齊 藤 誠 一  
副 査 助 教 授 向 井 徹  
副 査 助 教 授 藤 森 康 澄

## 学位論文題名

### エチゼンクラゲの音響散乱特性に関する研究

近年、日本周辺海域において、エチゼンクラゲの大量出現が高頻度で生じている。2006年にも本種が日本海側沿岸へ大量に漂着し、定置網漁業などの漁業活動に大きな被害をもたらした。そのため、これら被害に対する早急の対策が求められている。しかし、エチゼンクラゲの生態は不明な点が多く、現状では出現予測が困難である。沿岸への大量漂着を予測するためには、その広域な分布や密度の情報が不可欠である。エチゼンクラゲを音響的にモニタリングできれば、その三次元分布を短時間・広範囲に明らかにすることができる。

エチゼンクラゲの早期来遊予測を行うべく、本種の分布を計量魚群探知機（以下計量魚探機）を用いた音響手法で調査するためには、エチゼンクラゲの音響散乱特性を明らかにする必要がある。しかし、クラゲの音響散乱特性に関する研究例は少なく、さらにエチゼンクラゲに関する研究例はない。

そこで本論文では、音響手法を用いたエチゼンクラゲの分布調査の実用化を目的に、エチゼンクラゲの音響散乱特性を明らかにした。

エチゼンクラゲの音響散乱特性を明らかにするために、水槽での測定による実験的方法、音響散乱モデルを用いた理論的方法、計量魚探機を用いた実海域における音響探知の3つの方法を用いた。

#### 1. 懸垂法によるエチゼンクラゲのターゲットストレングス測定

実験は2003年から2006年までの4年間、毎年8月に、韓国全南大学校の海水音響実験水槽で行った。サンプルは、測定直前にスキューバダイビングにより生きたまま採集した。クラゲのターゲットストレングス（以下TS）は、周波数38, 120, 200kHzを用いて、懸垂法により測定した。

#### 2. 音響散乱モデルを用いたエチゼンクラゲのターゲットストレングス推定

音響散乱モデルによるTS推定に必要なクラゲ体内の音速や密度の測定および遊泳形状の観察を行った。実験は、2004年から2006年の3年間、合計5回、韓国全南大学校実験所および鳥取県水産試験場において行った。クラゲの生体内音速は伝搬時間計測法により、また生体密度はDual-density法または排水法により求めた。さらに、水槽内を遊泳しているエチゼンクラゲの遊泳形状の観察を基にこれをモデル化し、DWBA (Distorted Wave Born Approximation) モデルを用いてエチゼンクラゲのTSを理論推定した。

#### 3. フィールドにおけるエチゼンクラゲの音響探知

計量魚探機を用いたフィールド調査は2004年～2006年の3年間にわたり、東シナ海および日本海で

行った。東シナ海で用いた周波数は 38kHz と 120kHz である。またエコーグラム上に見られた反応の構成生物を確認するために、Framed Midwater Trawl (以下 FMT) ネットを用いてサンプリングを行った。

一方、日本海で用いた周波数は 38kHz, 120kHz, 200kHz の 3 周波数である。生物確認のために FMT ネットによる生物採集および ROV を用いた水中観察を行った。

エチゼンクラゲの音響散乱特性について、水槽における測定、音響散乱モデルによる理論推定、および計量魚探機を用いた実海域における音響探知実験の結果、以下の知見を得た。

- 1) エチゼンクラゲの TS は、クラゲの傘面積に比例して大きくなり傘面積で規準化した最大ターゲットストレングス (RTS) は、周波数 38kHz で  $-51.57 \text{ dB/m}^2$ , 120kHz で  $-43.15 \text{ dB/m}^2$ , 200kHz で  $-50.71 \text{ dB/m}^2$  であった。
- 2) エチゼンクラゲの RTS は、ユウレイクラゲの RTS より小さく、その差は周波数 38kHz で 24.5dB, 120kHz で 13.49dB, 200kHz で 11.7dB であった。旗口クラゲ目のユウレイクラゲが、根口クラゲ目のエチゼンクラゲよりも筋組織が発達していることがその理由と考えられた。
- 3) エチゼンクラゲの生体内音速は、体長や生死の状態に関わらず、1500 m/s ~ 1550 m/s の範囲にあり、その平均音速は 1524 m/s であった。また、海水音速との比  $h$  は 0.984 ~ 1.013 となり、全個体の平均音速比  $h$  は 1.002 であった。
- 4) エチゼンクラゲの生体密度は  $0.93 \text{ g/cm}^3 \sim 1.18 \text{ g/cm}^3$  であり、死亡個体は重くなる傾向が見られた。計量魚探機で探知可能な深度層におけるエチゼンクラゲの生体密度は海水よりやや重く、海水密度との平均密度比  $g$  は 1.013 であった。
- 5) エチゼンクラゲとユウレイクラゲの音速比を比較したところ、エチゼンクラゲの音速比  $h$  は、ユウレイクラゲより最大で 0.054 小さかった。さらにエチゼンクラゲの密度比  $g$  はユウレイクラゲより 0.06 小さかった。このことが、エチゼンクラゲの RTS がユウレイクラゲの RTS より小さくなった理由と考えられた。
- 6) エチゼンクラゲの RTS は傘直径対波長比  $D/\lambda$  とともに増加するが、 $D/\lambda$  が約 25 ~ 30 で極小を示した。また、TS の指向性は鋭く、特に高周波数になるほど鋭くなった。
- 7) 周波数 38kHz, 120kHz, 200kHz のエコーグラム上におけるエチゼンクラゲの反応は、斑点状に表示され、その SV (体積後方散乱強度) にも周波数差が見られた。

これらの結果は、魚群探知機を用いて、エチゼンクラゲの大量発生や早期来遊予測を行なうための重要な知見であり、高く評価される。よって審査員一同は申請者が博士 (水産科学) の学位を授与される資格のあるものと判定した。