

学 位 論 文 題 名

ツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* の広帯域音響散乱特性に関する研究

学位論文内容の要旨

目的

オキアミ類は、動物プランクトンの中でも大型で資源量も多く生態系の鍵種である。また、日本沿岸に多く生息するツノナシオキアミは、漁業資源としても利用されることから、その生物量を把握することは重要である。

海洋生物の生物量を知る方法として、音響調査法がある。これは、計量魚群探知機により得られた魚群の体積後方散乱係数を、生物 1 個体当たりの後方散乱断面積で除することで生物量を推定するものである。後方散乱断面積のデシベル表記はターゲットストレングス(TS)と呼ばれ、音響水産資源調査の精度を決定する重要な値である。

音響手法を用いてツノナシオキアミの生物量を推定するためには、正確な TS の値が必要である。オキアミ類をはじめとする動物プランクトンは、サイズが小型であり、多くの場合魚類の鰭のような主要散乱因子を持たないためその TS は小さく、正確な値を得ることが難しい。しかし、近年の測定技術の向上によりそれらの測定が可能になってきた。

さらに、最近では、広帯域超音波を用いて対象生物の音響散乱の周波数特性を得ることにより、生物種や体長分布を推定する試みがなされている。魚類については現場海域において魚種判別を行った研究が報告されており、この技術を用いることにより、動物プランクトンの種や体長の情報が得られる可能性がある。

そこで本論文では、ツノナシオキアミの生物量推定を目的として、まず、①狭帯域周波数を用いた TS の精密測定を行ってモデル推定値との比較を行った。次に、②広帯域周波数を用いた TS の精密測定を行い、ツノナシオキアミの TS の周波数特性を明らかにした。最後に、③現場海域においてツノナシオキアミの音響調査を実施し、TS の変化が資源量推定に与える影響について考察した。

方法

1. 音響散乱モデルに用いる音速比、密度比、形状の測定

ツノナシオキアミの TS 推定には Distorted-Wave Born Approximation 変形円筒モデル(DWBA モデル)を用いた。この計算には生物の音速比、密度比、形状の 3 つのパラメータが必要である。音速比は T チューブを用いた time-of-flight 法、密度比は density-bottle 法により測定した。形状は、ツノナシオキアミをデジタルカメラで撮影し、その画像から DWBA モデルに用いる座標を抽出した。

2. ツノナシオキアミの TS 測定

狭帯域周波数によるツノナシオキアミの TS 測定は、水産総合研究センター水産工学研究所の小型海水水槽にて行った。周波数は 120 kHz と 200 kHz を用いて、ツノナシオキアミの左側面に音波が入射するときを 0° としそれぞれ ±30° と ±52° の範囲で、側面方向 TS の測定を行った。

一方、広帯域周波数によるツノナシオキアミの TS 測定は、2012 年に行った。同じ水槽において、周波数 300~700 kHz のチャープ信号を用いた広帯域送受信システムを用いて入射角が $\pm 45^\circ$ の範囲で側面方向 TS の周波数スペクトルの測定を行った。

測定した TS の周波数スペクトルは、個別に測定した音速比、密度比、形状のデータを用いた DWBA モデルによる推定 TS と比較した。

3. 道東海域におけるツノナシオキアミの現存量推定

調査は、北海道釧路沖において行った。水産庁国際資源評価等推進事業における補助事業により水産総合研究センターが実施した北光丸を用いた調査に同乗し計量魚探データを収集した。また、MOHT、MOCNESS を用いて生物採集を行った。得られた 38, 120 kHz の音響データと生物採集により得られたツノナシオキアミの体長分布を用いて、2 周波差分法によるツノナシオキアミの識別と現存量推定を行った。

4. シミュレーションによるツノナシオキアミのサイズ、生物量推定方法の検討

現場海域における広帯域超音波を用いたツノナシオキアミの音響調査の実施を想定して、シミュレーションを行った。DWBA モデルにより推定したツノナシオキアミの TS の周波数スペクトルに TL(全長)分布と個体数密度を与え、現場海域で得られる SV の周波数スペクトルを算出した。次に、算出した SV の周波数スペクトルに一致するように TL と個体数密度を推定し、はじめに与えた TL 分布と個体数密度との比較を行った。

結果と考察

1. 北海道釧路沖において推定されたツノナシオキアミの音速比 h と密度比 g の値は、 $h = 1.043$ (95 %CI : 1.038 - 1.048), $g = 1.048$ (95 %CI : 1.039 - 1.058)であった。また、Lawson *et al.* (2006) の遊泳姿勢角分布を用いて周波数 120 kHz について DWBA モデルを用いて計算した平均 TS は、音速比、密度比の変化により ± 1.3 dB の範囲で変動した。また、ツノナシオキアミ 13 個体の形状を用いて平均 TS を計算した結果、形状の違いによる平均 TS の変動幅は最大で 3.5 dB であった。

2. 周波数 120, 200 kHz の狭帯域周波数を用いて測定したツノナシオキアミの側面方向 TS パターンは、DWBA モデルにより計算したモデル推定値とメインローブ付近でよく一致した。また、測定を行った 44 個体の TS パターンの実測値とモデル推定値との相関係数は 0.77~0.99 であった。

同様に、周波数 300~700 kHz の広帯域周波数を用いて測定したツノナシオキアミの側面方向 TS パターンも、メインローブ付近でモデル推定値とよく一致した。また、DWBA モデルにより側面方向全周平均 TS スペクトルを計算した結果、 TL/λ が 4 付近で極大値、6 付近で極小値を示した(λ は波長)。極大値はツノナシオキアミの周波数共振に伴うものであり、極小値はツノナシオキアミ生体内部のエコー干渉が原因と考えられた。

3. 北海道釧路沖において、周波数 38, 120 kHz の計量魚探機を用いてオキアミ類の生物量推定を行った。その結果、オキアミ類の生物量は、調査海域 10,059 km² 中において、 $1.203 \times 10^6 \sim 2.163 \times 10^6$ トンと見積もられた。この時、TS の推定に用いたツノナシオキアミの音速比と密度比に最大値を用いた場合と最小値を用いた場合の変動幅は 0.76 倍~1.36 倍、形状の違いによる変動幅は 0.60 倍~1.32 倍、遊泳姿勢角分布の違いによる変動幅は 1.00 倍~1.70 倍であった。

4. 広帯域超音波を用いて TL と個体数密度を推定するシミュレーション実験を行った結果、実海域に存在するツノナシオキアミの TL 分布の標準偏差が小さいほど、TL と個体数密度を正しく推定でき

ることがわかった。また、双峰形の TL 分布を与えた場合、推定個体数密度は過小評価された。このことから、体長組成が単純であるほど、高い精度で体長や生物量を推定できることが示唆された。また、広帯域システムによるツノナシオキアミの TL と個体数密度の推定には、周波数 120～800 kHz 程度の帯域幅が必要であることがわかった。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 藤 森 康 澄
副 査 教 授 飯 田 浩 二
副 査 准教授 向 井 徹
副 査 教 授 宮 下 和 士 (北方生物圏フィールド科学センター)

学 位 論 文 題 名

ツノナシオキアミ *Euphausia pacifica* の広帯域音響散乱 特性に関する研究

オキアミ類は海洋生態系の鍵種であるとともに、日本沿岸に多く分布し、漁業資源としても利用されることから、その生物量を把握することは重要である。音響手法を用いて動物プランクトンの生物量を推定するためには、正確な TS の値が必要である。しかし動物プランクトンは、小型で鰭も無いことから、その TS は小さく、正確な値を得ることが難しい。近年、測定技術の進歩により、微小生物の TS パターンの測定と TS の広帯域周波数特性の測定が可能となり、生物種や体長推定への応用が期待されている。そこで本論文では、①ツノナシオキアミの TS を精密測定するとともに、②狭帯域および広帯域 TS の特性を明らかにし、③現場におけるツノナシオキアミの音響調査を実施して、TS の変化が資源量推定に与える影響について考察した。実験は以下のように進めた。

1. 音響散乱モデルに必要なツノナシオキアミの音速比、密度比、形状の測定

理論モデルによる TS 推定には Distorted-Wave Born Approximation (DWBA) 変形円筒モデルを用いた。この計算には生物の音速比、密度比、形状の 3 つのパラメータが必要であり、音速比は T チューブを用いた time-of-flight 法、密度比は density-bottle 法により測定した。形状は、ツノナシオキアミをデジタルカメラで撮影し、その画像から外形座標を測定した。

2. 水槽におけるツノナシオキアミ生体の TS 測定

狭帯域周波数による TS 測定は、120 kHz と 200 kHz の 2 周波数を用いて、ツノナシオキアミの左側面に音波が入射するときを 0° とし、それぞれ ±30° と ±52° の範囲で測定した。一方、広帯域周波数による TS 測定は、周波数 300~700 kHz のチャープ信号を用いた広帯域送受信システムを用いて入射角が ±45° の範囲で側面方向 TS の周波数スペクトルを測定し、別途測定した音速比、密度比、形状のデータを用いて DWBA モデルで推定した理論 TS と比較した。

3. 道東海域におけるツノナシオキアミの現存量推定

北海道釧路沖において水産総合研究センターが実施した北光丸による調査に乗船し、計量魚探データを収集した。38, 120 kHz の音響データと MOHT, MOCNESS を用いた生物採集により得られたツノナシオキアミの体長分布を用いて、2 周波差分法によるツノナシオキアミの識別と現存量推定を行った。

4. シミュレーションによるツノナシオキアミのサイズ、生物量推定方法の検討

現場海域における広帯域超音波を用いたツノナシオキアミの音響調査の実施を想定して、シミュレーション実験を行った。DWBA モデルにより推定したツノナシオキアミの TS の周波数スペクトルに TL(全長)分布と個体数密度を与え、現場海域で得られる SV の周波数スペクトルを算出した。次に、算出した SV の周波数スペクトルに一致するように TL と個体数密度を推定し、はじめに与えた

TL 分布と個体数密度との比較を行った。

その結果、本研究で得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 北海道釧路沖においてツノナシオキアミの音速比 h と密度比 g を測定し、 $h = 1.043$ (95 %CI: 1.038 - 1.048), $g = 1.048$ (95 %CI: 1.039 - 1.058) を得た。これを用いて DWBA モデルで求めた 120kHz の平均 TS は、 h , g の変化により ± 1.3 dB 変動した。また、形状の違いによる平均 TS の変動幅は最大で 3.5 dB であった。
- 2) 周波数 120, 200 kHz におけるツノナシオキアミの TS パターンは、DWBA モデルによる推定値とよく一致した。また、周波数 300~700 kHz の広帯域周波数を用いて測定した TS パターンも、モデル推定値とよく一致した。平均 TS スペクトルを計算した結果、 TL/λ が 4 付近で極大値、6 付近で極小値を示し、それぞれ、生体の音響共振と生体内部のエコー干渉が原因と考えられた。
- 3) 北海道釧路沖において、周波数 38, 120 kHz の計量魚探機を用いてオキアミ類の生物量推定を行った。オキアミ類の生物量は、調査海域 (10,059 km²) において、 $1.203 \times 10^6 \sim 2.163 \times 10^6$ トンと見積もられた。ツノナシオキアミの音速比と密度比による変動幅は 0.76~1.36 倍、形状による変動幅は 0.60~1.32 倍、遊泳姿勢角分布の違いによる変動幅は 1.00~1.70 倍であった。
- 4) 広帯域超音波を用いて TL と個体数密度を推定するシミュレーション実験を行った結果、TL 分布の標準偏差が小さいほど、TL と個体数密度を正しく推定できることがわかった。また、広帯域システムでは、周波数 120~800 kHz 程度の帯域幅が必要であることがわかった。

以上の研究成果は音響手法を用いた動物プランクトンの種判別、体長推定、生物量推定の精度の向上に重要な知見を与えるものと判断された。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。