

学 位 論 文 題 名

音響手法を用いた *Neocalanus* 属カイアシ類の
計量方法に関する研究

学位論文内容の要旨

北太平洋亜寒帯域とその縁辺海域周辺に生息している *Neocalanus* 属カイアシ類は大型の植食性カイアシ類で、植物プランクトンに対する重要な捕食者である。また表層性浮魚類をはじめ海鳥や鯨類の重要な餌生物であり、低次から高次栄養段階を繋ぐ重要な生物として位置づけられていることから、これらの量を正確に把握する手法の確立が求められている。そこで、本研究では計量魚群探知機を用いた音響手法により *Neocalanus* 属カイアシ類の量推定を行う方法の確立を目的とした。

音響手法による量推定を行うため、スケールファクターである *Neocalanus* 属カイアシ類のターゲットストレングス (TS) を音響散乱モデルで推定した。推定には海水と生物体内の密度比および海水と体内の伝搬音速比が必要であり、カイアシ類等音響散乱の弱い生物の場合、これらは重要な要素となる。TSは周波数、体長、密度比、音速比、姿勢角等によって決まるためこれらの要素について検討した。また、計量魚群探知機によるカイアシ類の探知範囲を検討し、調査時に得られた音響データから推定した個体数密度とプランクトンネットによる直接採集から推定した個体数密度の比較を行った。

N. cristatus および *N. plumchrus* の密度比および音速比の測定を行った。密度比はどちらも0.998~1.003の範囲にあり海水の密度に近かった。カイアシ類は体内に大量の脂質を有し、特に脂質成分中のワックスエステルは温度による体積変化が大きい。そこで測定時の水温 (15℃) における密度比を各採集深度および水温に対して補正を行い、*N. cristatus* および *N. plumchrus* の密度比は1.000~1.003となった。一方、音速比は常に1以上の値を示し、温度の上昇に対して減少する温度依存性がみられた。*N. cristatus* の音速比は1.006~1.040、*N. plumchrus* の音速比は1.006~1.052の範囲にあった。音速比も各採集深度に対して補正を行い、それぞれ *N. cristatus* では1.019~1.031、*N. plumchrus* では1.019~1.051となった。

音響散乱モデルは実測が困難な対象、周波数、体長等でTSの特性を予想することができる。本研究では音響散乱が微弱で、幅広い遊泳姿勢角にも適用できる変形円筒モデルを用いて、38、120および200kHzにおけるTSの姿勢角特性を推定した。38kHzでのTSは *N. cristatus* も *N. plumchrus* もほぼ一定であったが、120および200kHzでは姿勢角によって前者で15~20dB、後者で3~10dBの変化があった。姿勢角によるTSの変化は大きく、平均遊泳姿勢角によって平均化する必要があったため、小型の水槽で自由に遊泳する *N. cristatus* の

遊泳姿勢角測定を行った。遊泳する*N. cristatus*をデジタルカメラで撮影し、その画像から平均遊泳姿勢角 7.1° 、標準偏差 49.2° を得た。TSの姿勢角特性と遊泳姿勢角の確率密度関数を掛け合わせた平均TSと、前体部長（PL）の関係から求めた回帰式はPLの測定範囲内で（ $p < 0.05$ ）のとき $\pm 0.4\text{dB}$ を示した。

平均TSに対する密度比、音速比の影響を検証するため、前体部長（PL）が 7.40mm の個体と 4.09mm の個体をそれぞれ*N. cristatus*および*N. plumchrus*の代表として補正した密度比、音速比の測定範囲内で平均TSを推定した。平均TSの最大値と最小値の差は 5.5dB および 8.1dB あり、両比の影響の強さが示された。また、両比を採集した深度と水温で補正したことにより平均TSは*N. cristatus*で最大 6.4dB 、*N. plumchrus*で最大 2.4dB 増加した。

カイアシ類の単体エコーでは散乱強度が弱く、十分な信号対雑音比（SN比）が得難く探知は難しいが、パッチ上の群集団を形成することから、単体ではなくある個体数密度を超えた群体エコーならば、探知可能なSN比を満たすこととなる。そこで、音響調査によく用いられている計量魚群探知機としてEK500、EK60、KFC-3000の仕様とカイアシ類の散乱強度から探知範囲の関係を明らかにした。120kHzでの単体エコーの場合、上記3機種によるPL約 7mm の*N. cristatus*の最大探知深度はそれぞれ36, 40, 22mでありPL約 4mm の*N. plumchrus*ではそれぞれ24, 27, 14mであった。一方、過去に報告されている群集団の個体数密度で形成される群体エコーの場合、最大探知深度は*N. cristatus* (93ind./m^3) でそれぞれ204, 218, 143m, *N. plumchrus* (745ind./m^3) ではそれぞれ286, 303, 209mであった。

最後に、プランクトンネットの鉛直曳網を行った深度範囲で、*N. cristatus*および*N. plumchrus*のネットから推定した個体数密度と、その深度範囲の平均体積後方散乱強度および平均TSから推定した個体数密度の比較を行った。その結果、音響手法による推定個体数密度はネットによる推定値の $0.0\sim 1.1$ 倍となった。この結果にはカイアシ類のTS変動、ネットの選択性による偏り、カイアシ類とは音響散乱が異なる生物の影響で過小評価の可能性があった。エコーグラムで確認しながらより効果的な曳網を行い、採集結果に対し散乱強度をより適切に配分することで、精度の向上を目指すことができると判断された。

以上より、今後プランクトンネットによる直接採集に加え、本研究で示した音響手法を併用することで、*Neocalanus*属カイアシ類の量推定を広域に亘り迅速かつ連続して行うことができると期待される。

学位論文審査の要旨

主査	准教授	宮下和士
副査	教授	山羽悦郎
副査	教授	本村泰三
副査	准教授	向井 徹 (大学院水産科学研究院)
副査	助教	山本 潤

学位論文題名

音響手法を用いた *Neocalanus* 属カイアシ類の 計量方法に関する研究

北太平洋亜寒帯域に生息する *Neocalanus* 属カイアシ類は植食性カイアシ類であり、表層性浮魚類をはじめ海鳥や鯨類に捕食されることから栄養段階を繋ぐ重要な生物である。生物ポンプとして物質輸送にも携わっていることから、これらの量を正確に把握する手法の確立が求められている。そこで、本研究では計量魚群探知機を用いた音響手法により *Neocalanus* 属カイアシ類の量推定を行う方法の確立を目的とした。

音響手法による量推定を行うため、スケールファクタである *Neocalanus* 属カイアシ類のターゲットストレングス (TS) を理論モデルで推定した。TS推定に重要な要素となる海水と生物体内の密度比、海水と体内の伝搬音速比、は周波数、体長、姿勢角を測定、検証した。また、計量魚群探知機による探知範囲を検証し、調査時に得られた音響データから推定した個体数密度と採集具による直接採集から推定した個体数密度の比較を行った。

N. cristatus および *N. plumchrus* の密度比はどちらも0.998~1.003の範囲にあり海水の密度に近かった。カイアシ類は体内に大量の脂質を有し、温度による体積変化が大きい。そこで各採集深度および水温に対し補正を行い、*N. cristatus* および *N. plumchrus* の密度比は1.000~1.005となった。音速比は、水温上昇に対し減少傾向があり、*N. cristatus* の音速比は1.006~1.040、*N. plumchrus* は1.006~1.052の範囲にあった。音速比も各採集深度に対して補正し、*N. cristatus* で1.019~1.031、*N. plumchrus* で1.019~1.051となった。

理論モデルを用いてTSを推定した。周波数38, 120および200kHzにおけるTSの姿勢角特性は、38kHzで *N. cristatus* も *N. plumchrus* もほぼ一定であったが、

120および200kHzでは姿勢角によって前者で15~20dB, 後者で3~10dBの変化があった。姿勢角によるTSの平均化のため, 水槽で自由遊泳する*N. cristatus*の遊泳姿勢角測定を行った。遊泳する*N. cristatus*をデジタルカメラで撮影し, その画像から平均遊泳姿勢角 7.1° , 標準偏差 49.2° を得た。TSの姿勢角特性と遊泳姿勢角の確率密度関数を掛け合わせた平均TSを推定し, 平均TSに対する密度比, 音速比の影響を検証した。前体部長(PL)が7.40mmの個体と4.09mmの個体をそれぞれ*N. cristatus*および*N. plumchrus*の代表として補正した密度比, 音速比の範囲内で平均TSを推定した。平均TSの最大値と最小値の差は5.5dBおよび8.9dBあり, 両比の影響の強さが示された。

カイアシ類の単体エコーでは散乱強度が弱く, 十分な信号対雑音比(SN比)が得難く探知は難しいが, パッチ状の群集団を形成することから, 一定の個体数密度を超えた群体エコーならば, 探知可能なSN比を満たすこととなる。そこで, 音響調査によく用いられる計量魚群探知機EK500, EK60, KFC-3000の仕様とカイアシ類のTSから探知範囲を明らかにした。120kHzでの単体エコーの場合, 上記3機種によるPL約7mmの*N. cristatus*の最大探知深度はそれぞれ36, 40, 22mでありPL約4mmの*N. plumchrus*ではそれぞれ24, 27, 14mであった。一方, 過去に報告されている個体数密度で形成される群体エコーの場合, 最大探知深度は*N. cristatus* (93ind./m³) でそれぞれ204, 218, 143m, *N. plumchrus* (745ind./m³) ではそれぞれ286, 303, 209mであった。

最後に, *N. cristatus*および*N. plumchrus*の採集具と音響情報から推定した個体数密度の比較を行った。その結果, 音響手法による推定個体数密度はネットによる推定値の0.0~1.1倍となった。これはカイアシ類のTS変動, 採集具の選択性による偏り, 生物組成の影響で過小評価の可能性が高かった。そこで推定精度の向上のため, 調査条件に応じて周波数200kHzの使用や, マイクロネクトン用採集具の利用といった量推定の精度向上に繋がる提案を行った。これまでの採集具による直接採集に加え本研究で示した音響手法の併用で, *Neocalanus*属カイアシ類の量推定を広域に亘り迅速かつ連続して行うことができると期待される。

以上により, 申請者は, *Neocalanus*属カイアシ類の計量方法についての新知見を得たものであり, 海洋生態系全体に対する理解に貢献するところ大なるものがある。

よって, 申請者は博士(環境科学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。