

学位論文題名

マルチビームエコー積分法を用いた

計量スキャニングソナーの開発と魚量計測手法に関する研究

学位論文内容の要旨

音響を用いた水産資源調査においては、下向きの魚群探知機に定量化機能を持たせた計量魚群探知機が1980年代より普及し始め、国内ではスケソウダラなどの中層性魚種の水産資源調査に活用されてきた。しかし計量魚群探知機は下向きの鋭いビームを使用するため、表層魚群や遊泳速度の速い魚に対しての計測が難しい。また、表層魚群の中には調査船の航走雑音に対し、逃避行動を示すものが多いため、資源量計測の信頼性が低下するという課題があった。我が国の重要な水産資源である、イワシ、サバ、アジ、マグロ、カツオ、サンマ、等は、何れも表層性魚種であり、計量魚群探知機を用いた音響資源調査では常に魚群の逃避行動の影響が議論されてきた。これに対し、近年発達の著しいスキャニングソナーは、音響ビームを水面下の全範囲に走査するため、探査範囲が飛躍的に拡大し、魚群の逃避行動の影響を受けない、魚群の探査が可能である。

しかしながら、従来のスキャニングソナーは漁業効率の向上を主目的として発達してきたため、ダイナミックレンジが狭く、しかも定量的なデータを出力することができなかった。しかし、近年の電子技術の発達により、高い解像度でダイナミックレンジの広いスキャニングソナーが実現可能となり、スキャニングソナーの長所を活かした水産資源調査への応用が期待されている。

スキャニングソナーを利用した資源量計測手法の一つに、定量化されたエコー強度の情報を用いるエコー積分法があり、現在最も有望視されている。しかしながら、計量魚群探知機に比べて、音響ビーム数が格段に多く、多ビームによるエコー積分理論は未だ確立し

ていない。しかも魚への音響入射角度が不特定であるために、魚のターゲットストレングスの不確実性が増し、その実現には様々な難題を抱えている。

そこで本研究では、エコー積分法に基づく計量ソナーの実用化のために、以下の主要課題の解決を目的とした。すなわち、1) 定量化と較正が可能な計量ソナーシステムの開発、2) 魚の三次元平均ターゲットストレングスの推定、3) マルチビームエコー積分理論の確立とフィールドにおける検証、である。本研究で得られた結果は以下のように要約される。

## 1. 定量化と較正が可能な計量ソナーシステムの開発

球形トランスデューサを用いた漁業用マルチビーム型低周波スキャニングソナーFSV30をベースとして、広ダイナミックレンジを有するエコー生データの収録機能、および較正機能を有する計量ソナーシステムの開発を行った。さらにソナーシステムにフィールドにおける較正機能を組み込み較正精度の評価を実施した。水槽測定では近距離音場における測定誤差が問題となるが、近距離／遠距離音場の関係を理論的に求めて、測定誤差を低減し、正確な較正が可能であることを明らかにした。水槽測定結果から得られた感度、ビーム幅の較正值を用いて、フィールドにおいてターゲットストレングスが既知の標準球のエコーレベルを評価する事により、較正後の感度の精度を検証し、 $\pm 1.5\text{dB}$  以内の精度を確認した。さらにフィールドにおいて容易に感度やビーム幅を較正する手法を開発し、計量ソナーシステムに組み込んだ。

## 2. 魚の三次元平均ターゲットストレングスの推定

ソナーの定量化されたエコー強度の積分量から魚量を算出するためには、一尾当りの平均ターゲットストレングス (TS) を知る事が必要となる。ソナーを用いて魚群を計測する場合、魚に対して音響ビームはさまざまな方向から入射する。そのため、ソナービームの入射方向を勘案し、三次元の魚の TS パターンに対して、魚の姿勢分布による平均化処理により求められる平均ターゲットストレングすつまり、三次元の平均 TS が必要となる。しか

しながら、ソナー計測で用いることのできる三次元平均 TS に関する知見は少ない。そこで、本研究では、まず Foote (1980) と Furusawa (1990, 1999) の方法を参考にして、一般的なソナー用の三次元平均 TS の式を導いた。その上で、魚の姿勢変化による三次元平均 TS の変化特性を理論的に検討した。次に、回転楕円体モデルを用いて魚単体の TS の三次元パターンの  $L/\lambda$  特性を分析し、異なる姿勢分布による三次元平均 TS の基本特性を分析した。本研究により、姿勢分布やソナービームの入射方向をパラメータとして三次元平均 TS を求める手法を確立することができた。更に本手法を用いたシミュレーションにより、ソナーの水平或いは水平に近い方向での探知においては魚のピッチ角の影響は無視できるほど小さく、魚のヨー角特性の影響を最も強く受けること、逆に垂直断面モードを含む俯角の大きいソナー探知では、魚群探知機と同様にピッチ角の影響が強くなることを定量的に示した。

### 3. マルチビームエコー積分法による魚量算出理論の確立とフィールドにおける検証

計量魚群探知機におけるエコー積分理論は確立されているが、ソナーのエコー強度データの積分方法への理論的なアプローチは、これまで十分なされていない。ソナーによる魚量算出は、ソナーにより求められた魚群体積と平均体積散乱強度  $S_v$  を乗じた魚群ターゲットストレングスとして算出可能であるが、ソナーのビーム幅に比べて魚群が十分大きい場合でないと、体積や平均  $S_v$  は正確に求める事が出来ないため、本手法が使える条件は限られる。計量ソナーを広範囲の資源調査に応用するためには、体積や平均  $S_v$  の計測精度に依存しない魚量算出アルゴリズムの確立が求められる。そこで、本研究では、魚群密度分布を理論的に与え、音響ビーム走査により得られる二次元、三次元像を光学分野における写像理論を用いて解析し、ソナーデータの積分量と魚群密度分布の関係式として厳密に求めた。さらに、その関係式より、魚量算出アルゴリズムの導出を行い、水槽実験および漁獲試験を行なって検証した。その結果、計量ソナーによる三次元あるいは二次元の定量化手法が魚量推定に有効であることが分かった。本手法は、原理的にソナーの分解能による精度低下が生じないという大きな特徴を有しており、中、遠距離から広範囲に魚量計量を行う際に有効な方法といえる。このマルチビームエコー積分法と、ソナー用三次元 TS 推定法

を組み合わせる事で、魚群中の尾数を算出する事が可能となった。

最後に、本研究で開発した計量ソナーを用いて、ノルウェーや国内の漁場においてフィールド評価を行い、計量ソナーによる推定魚量とソナー士による見積りや、漁獲データとの比較により、本手法の妥当性を確認した。

# 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 教 授 古 澤 昌 彦  
副 査 准教授 向 井 徹

学 位 論 文 題 名

## マルチビームエコー積分法を用いた

## 計量スキャニングソナーの開発と魚量計測手法に関する研究

音響を用いた水産資源調査において、計量魚群探知機は下向きの鋭いビームを使用するため、探査範囲が狭く、また逃避行動を示す表層魚群の魚量計測には適していない。これに対し、近年発達した著しいスキャニングソナーは、音響ビームを水面下の全範囲に走査するため、探査範囲が飛躍的に拡大し、魚群の逃避行動の影響を受けない。しかしながら、従来のスキャニングソナーは漁業効率の向上を主目的として発達してきたため、ダイナミックレンジが狭く、しかも定量的なデータを出力することができない。しかし、近年の電子技術の発達により、高い解像度でダイナミックレンジの広いスキャニングソナーが実現可能となり、スキャニングソナーの長所を活かした水産資源調査への応用が期待されている。

スキャニングソナーを利用した魚量計測手法として、魚群エコー強度を積分して定量化する、エコー積分法が有望視されているが、計量魚群探知機に比べて、ビーム数が格段に多く、その処理が複雑なため、多ビームによるエコー積分理論は確立されていない。しかも魚への音響入射が横方向となるので、ターゲットストレングス (TS) の不現実性が增大する。

そこで、本研究ではまず、定量化したソナーデータを取得するために、広ダイナミックレンジを有し、エコー生データの収録および較正が可能な低周波型マルチビーム式計量ソナーシステムの開発を行った。本システムをフィールドおよび水槽において標準球を用いて較正したところ、 $\pm 1.5$  dB 以内の精度を確認することができた。

一方、計量魚群探知機におけるエコー積分理論は確立されているが、ソナーのエコー強度データの積分方法への理論的なアプローチは、これまで十分なされていない。計量ソナーを広範囲の資源調査に応用するためには、体積や平均 Sv の計測精度に依存しない魚量算出アルゴリズムの確立が求められる。そこで、理論的に与えた魚群密度分布から音響ビーム走査によって得られる二次元、三次元像を、光学分野における写像理論を用いて解析し、ソナーデータの積分量と魚群密度分布の関係式として厳密に求め、魚量算出アルゴリズムの導出を行った。この中で、本手法が、原理的にソナーの分解能による精度低下が生じな

いという特徴を有しており、中、遠距離から魚量計量を行う際に特に有効であることを示した。

つぎに、ソナーの定量化されたエコー強度の積分量から魚量を算出するためには、一尾当りの平均ターゲットストレングス (TS) を知る事が必要となる。ソナーを用いて魚群を計測する場合、魚に対して音響ビームはさまざまな方向から入射する。そのため、ソナービームの入射方向を勘案し、三次元の魚の TS パターンに対して、魚の姿勢分布による平均化処理により求められる三次元の平均 TS が必要となる。そこで、回転楕円体モデルを用いて魚単体の TS の三次元パターンの  $L/\lambda$  特性を分析し、異なる姿勢分布による三次元平均 TS の基本特性を分析した。本研究により、姿勢分布やソナービームの入射方向をパラメータとして三次元平均 TS を求める手法を確立した。

最後に、本研究で開発した計量ソナーを用いて、ノルウェーや国内の漁場においてフィールド評価試験を行い、計量ソナーによる推定魚量とソナー士推定値や漁獲量との間に線形比例関係を認め、本手法の有効性を明らかにした。

審査員らが特に評価した点は以下である。

1. 漁業用ソナーを発展させて、高精度、広ダイナミックレンジの性能を有する、定量化と較正が可能な全方向探知型の低周波計量ソナーを開発したこと。
2. 測定の困難な魚の三次元 TS を、回転楕円体モデルを用いて理論的に解析し、計量ソナーによる魚量推定に必要な、魚の三次元平均 TS を推定する方法を与えたこと。
3. 空間に配置した多数のビーム走査により得られた、魚群エコー信号を積分処理することにより、ビームの分解能に依存せずに魚量情報を取得することができるマルチビームエコー積分法 (3DMBEI) による魚量算出理論を導いたこと。
4. 3DMBEI 理論に基づき、水平スキャンモードによるソナーデータから、単体魚群の魚量を推定する実用的な方法 (2DMBEI) を考案し、計量ソナーに実装して漁獲試験を行い、その有効性を示したこと。

これらの成果は、計量ソナーの普及と表層魚種の資源調査や選択型漁業の実現に大きく貢献するものであり、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。