

学 位 論 文 題 名

魚体の超音波反射指向性パターンおよび
反射波形の変動に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

【 目 的 】

音響による資源調査の分野では、社会的要請の強まる資源保護の立場から魚体長推定や魚種判別など個体推定の重要性が増すことが予測される。これらの信頼性が向上すれば未成熟魚体や目的外魚種の混獲防止に貢献し、持続生産を目的とする資源管理に資するものとなる。

TSとソーナー方程式による積分方式は様々な角度から高度化され、資源量推定の手段として強力なものとなっている。しかしソーナー方程式は基本的に音響強度に関する線形方程式であり、搬送波の位相や波形の情報を直接扱っていない。そのため反射信号の干渉に起因する変動は誤差として推定精度に影響する。干渉による変動は低密度魚群あるいは単体魚において著しい。単体魚では魚体を構成する各部の反射が干渉し、入射角度によって反射信号は大きく変動する。この影響を除くため確率分布の仮定や統計処理などによって平均化する方法が検討されているが、いずれも間接的な処理であり誤差を伴う。

本研究の目的は従来重要視されなかった単体魚の反射指向性パターンと波形の変動について、魚体の個体推定に関する新たな情報源として利用の可能性を検討することにある。そのために単体魚の超音波反射における反射指向性パターンと反射波形の変動を、魚体内部に想定される複数の反射音源の干渉、という観点から検討した。

【 実験方法および概要 】

実験は懸垂法を用いた水槽実験を主体に行った。反射指向性パターンおよび波形の変動と、魚体構造の関連を考察するには、基礎段階として精密に入射角度を制御した測定が不可欠である。そのために入射角度制御の高精度化と搬送波周波数帯の信号処理を目的とする自動測定システムを製作した。実験は水槽における基礎実験（1次）、フィールドにおける補足実験（2次）、2球体の精密実験（3次）、単体魚の精密実験（4次）と段階的に進めた。

1次実験はターゲットに球体・単体魚・魚体模型を用い、反射指向性パターンと波形の変動に関する諸現象の確認を目的とした。ここでは変動の観察と波形合成のコンピュータシミュレーションによって現象論的な解釈を行った。2次実験は1次実験で見られた現象を伝搬距離の長いフィールドで確認することを目的として、北海道倶多楽湖において行った。ここでは懸垂法による球体および単体魚の記録像、自然遊泳状態の単体魚の記録像について検討した。

この段階で基礎的な連続波の合成の理論を整理し、反射指向性パターンの周期性のある変動を説明した。またパルス波形の合成と反射波形の変動について検討し、反射波の搬送波周期が干渉の状態によって変化することを明らかにした上で、以降の実験を進めた。

3次実験では2球体の反射指向性パターンの変動周期を自己相関によって求め、球体間隔を計算した。また反射波形の変動については搬送波周期の微小な変動の計測を試みた。4次実験は3次実験で用いた手法を発展させ、様々な体型の魚体に応用した。ここでは変動の解析に時系列解析やスペクトル解析の応用を試み、反射指向性パターンの変動周期から計算した魚体内の仮想的な音源間隔と魚体長の関係、反射波の搬送波周期の微小な変動について検討した。

【 結果 】

観察実験およびシミュレーション

- 1) 1球体の反射波形は送信波形に比較して、立ち上がり・立ち下がりのなだらかな“なまり”のある波形であるが、変動が少なく安定しており位相差や搬送波周期の測定に使用できることを確認した。
- 2) 個体魚および2球体の反射指向性パターンの極大値付近では単一球体の反射波形に近似する安定した波形であった。一方、極小値近傍では波形は大きく変化する、特徴的な垂鈴型の波形が観察された。これを2波形の合成と考え、シミュレーションを試みた結果、パターン変動の周期性および極小点近傍の歪んだ波形を再現でき、搬送波を含む波形の単純な重ね合わせで現象論的に説明できた。
- 3) 魚体模型は、極大値の波形が基本波形と異なった形状を示す傾向があり、極小値の波形も2球体の場合と比較してより複雑な変動を示した。魚体模型は内部構造が均質であるため、その反射波形は連続した無数の仮想的音源からの反射が合成した波形とみなす必要があり、離散的な少数の波形の合成とは異なる傾向を持つことが推察された。魚体の反射波形の変動は、球体の反射の合成に近い傾向を示した。このことから魚体の反射波形の変動は単純な干渉モデルで近似可能であることが推察された。
- 4) 2球体の反射指向性パターンが示す変動の周期性は2球体間の間隔を反映しており、魚体の場合に見られる周期性も干渉を起こす主要な成分間の間隔に関する情報を保有していると推定された。
- 5) 実際のフィールドに近い条件である湖での制御法による実験および自然遊泳状態の単体魚のエコー記録においても基本的な干渉の現象は認められた。したがって干渉による変動は、伝搬距離が短く空間的に限定された水槽実験に特有の現象ではないことが確認された。

2 球体および魚体についての精密実験

- 1) 2球体の反射指向性パターンは伝搬距離差によって一定の周期を持つ規則的な変動(振動)をする。そこで入射角度の変化を伝搬距離差の変化に座標変換し、自己相関を利用して正確な振動数を求め球体間隔を計算した。
- 2) 2球体の干渉による波形の変動では搬送波周期の微小な変動を測定した結果、干渉によって反射信号電圧が低下するとき搬送波周期も変動し、干渉の状態を知るために利用できる可能性を確認した。
- 3) 魚体の反射指向性パターンを伝搬距離差座標に変換し、フーリエ変換によるスペクトル解析を試みた。その結果音響エネルギーとしては小さいが反射指向性パターンに大きく影響する成分を分離できた。また自己共分散係数を利用して各魚体を代表する仮想的な音源の間隔を計算した。その結果自己共分散係数曲線には魚種による相違が認められ、音源間隔の計算値も魚種による相違が認められた。
- 4) 魚体全体の反射に対する鱗・骨格の寄与を評価した結果魚種による差が認められた。
- 5) 魚体の反射波形の変動も2球体の場合と同様、反射信号が低下するときに搬送波周期が変動する傾向があり、干渉の影響の評価に利用できることが推察された。

以上の結果、反射指向性パターンの変動を離散的な確率過程としてとらえるのではなく、連続的な仮想音源間隔の変化系列としてとらえることによって魚体の構造推定に資する知見が得られた。また、搬送波を含む反射波形は単に音響エネルギーという数値以上の情報を持ち得ることを明らかにすることができた。

学位論文審査の要旨

主査 教授 佐野 典 達
副査 教授 五十嵐 脩 蔵
副査 教授 天下井 清
副査 助教授 飯 田 浩 二

学位論文題名

魚体の超音波反射指向性パターンおよび反射波形の変動に関する基礎的研究

近年、計量魚群探知機を用いた資源現存量を推定する研究が普及してきている。

計量魚探は、魚群エコーの音響エネルギーを積分する方式と個体魚のエコーを計数する計数方式に大別されるが、何れも未だその精度に多くの問題点がある。いづれにしても音響による資源調査の分野では、魚体長推定や魚種識別など個体魚に関する情報の重要性が要求されているが、音響の反射エネルギーから魚種識別を十分な精度で実施することは未解決である。魚種識別が可能になれば、資源現存量推定の精度は向上し、目的外魚種の混獲防止に貢献し、持続的生産を目的とする管理型漁業に資するものとなる。

本論文は本文65頁、図52、表1で構成されている。論文の内容は、従来あまり重要視されなかった個体魚の反射指向性パターンと反射波形の変動を解析し、その結果が魚種識別における新たな情報源として利用できる可能性を検討した。すなわち個体魚の超音波反射における反射指向性パターンと反射波形の変動を、魚体内部に想定した複数の反射音源からの反射波の干渉という観点から実験・シミュレーションおよび解析を試みたものである。

実験は懸垂法を用いた水槽実験を主体に行った。反射指向性パターンおよび反射波形の変動と魚体構造との関連を考察するには、基礎段階として精度よく入射角度を制御できる測定システムが不可欠である。そのために入射角度制御の高精度化と搬送周波数帯の信号処理を目的とした自動測定システムを製作した。実験は水槽における基礎実験、フィールドにおける補足実験、2鉄球体の精密実験、個体魚の精密実験と段階的に実施した。

この結果を以下の諸点にまとめた。

1) 個体魚および2球体の反射指向性パターンの極大値付近では、単一球体の反射波形に近似する安定した波形であった。一方、極小値近傍では波形は大きく変化し、特徴的な亜鈴型の波形が観察された。これを2波形の合成と考え、シミュレーションを試みた結果、パターン変動の周期性および極小点近傍の歪んだ波形を再現でき、搬

送波を含む反射波形の単純な重ね合わせで現象論的に説明できた。

2) 魚体の反射波形の変動は、球体の反射の合成に近い傾向を示した。このことから魚体の反射波形の変動は単純な干渉モデルで近似可能であることが推察された。

3) 2球体の反射指向性パターンが示す変動の周期性は2球体の間隔の変化を反映しており、魚体に見られる周期性も干渉を起こす主要な要因の間隔の変化を反映した情報を保有していると推察された。

4) 実際のフィールドに近い条件である湖での制御法による実験および自然遊泳状態の個体魚のエコー記録においても基礎的な干渉の現象は認められた。したがって、干渉による変動は、伝搬距離が短く空間的に限定された水槽実験に特有の現象ではないことが確認された。

5) 2球体の干渉による反射波形の変動で搬送波波形と周期の微小な変動を精密に測定した結果、干渉による反射信号電圧が低下するとき搬送波周期も変動し、干渉現象の状態を知る情報として利用できる可能性を確認した。

6) 魚体の反射指向性パターンを伝搬距離差座標に変換し、フーリエ変換によるスペクトル解析を試みた。その結果音響エネルギーは小さいが反射指向性パターンに大きく影響する要因を分離できた。また自己共分散係数を利用して各魚体を代表する仮想的な音源の間隔を計算した。それによると自己共分散係数曲線には魚種による相違が認められ、音源間隔の計算値も魚種による違いが認められた。

7) 魚体の反射波形の変動も2球体の場合と同様、反射信号電圧が低下するときに搬送波周期も変動する傾向があり、干渉の影響の評価に利用できることが示唆された。

以上の諸点は、反射指向性パターンの変動を離散的な確率過程としてとらえるのではなく、連続的な仮想音源間隔の変化系列としてとらえることによって魚体の構造推定に資する知見が得られたこと。また、搬送波を含む反射波形は単に音響エネルギーという数値以上の情報を持ち得ることを明らかにできたことなどであり、このことは魚群探知機における魚種識別という重要な基礎的資料となるばかりでなく、計量魚探技術の発展に大きく寄与するものである。

よって審査員一同は同時に提出された参考論文16編に対する評価と合わせ、本論文が博士（水産学）の学位論文として価値あるものと認定しました。