

## 学位論文題名

魚体の超音波反射特性におよぼす鰾と  
姿勢の影響に関する基礎的研究

## 学位論文内容の要旨

## 【目的】

現在行なわれている計量魚群探知機による資源量推定法は、魚群エコー強度を積分する積分方式と、単体エコーを計数する計数方式とに大別される。積分方式で得られる情報は、魚体のターゲットストレンジスと魚の密度との積である体積後方散乱強度である。従って、魚体のターゲットストレンジスは体積後方散乱強度から魚の密度を推定するためのスケールファクターとなる。一方、計数方式では、単体エコーを計数し、これを探知体積で割って密度を求める。探知体積はターゲットストレンジスに依存するため、ターゲットストレンジスは密度推定の精度を左右する。ところが魚体のターゲットストレンジスは魚種や魚体の大きさ(体長・体重)、魚体構造(肉質・骨格・鰾等)、魚体の運動や方位姿勢等の要因で複雑に変化するため、その重要性が認識され、1970年頃から多くの研究がされてきた。

特に近年、魚体の音響散乱に重要な影響を与える鰾が注目されている。鰾の中には酸素、窒素、二酸化炭素等様々なガスが存在している。一般に音響散乱は媒質中の不連続によっておこり、その不連続性が高いほどよく反射する。従って、水中における気体(鰾内ガス)による反射は大きいと考えられる。

また、鰾が魚体の超音波反射の主なる要因とすれば、鰾の大きさが変化すれば魚体のターゲットストレンジスも変化することを意味する。一般に魚の遊泳行動には日周性がみられ、遊泳姿勢や遊泳深度が一昼夜で変化することによって、ターゲットストレンジスも日周期的に変化することが充分予想される。

本研究は、魚体の超音波反射の主たる要因のうち、鰾と遊泳姿勢に関して研究を行なったものである。

## 【方法】

実験は、北海道大学水産学部に設置された大型無響実験水槽および北海道倶多楽湖で行なった。

まず、魚体の体型、鰾の有無や大きさ、姿勢の変化等でターゲットストレングスがどのように変化するかを調べるため、東シナ海において漁獲された10魚種および北海道倶多楽湖で漁獲したヒメマスの保存個体を用いて、ターゲットストレングスの精密測定を行なうと同時にX線による鰾の観察も行なった。

次に魚体の鰾に着目し、活魚の鰾内ガスを注射器で除去することによって鰾がターゲットストレングスにおよぼす影響を調べた。さらに、北海道倶多楽湖においてヒメマス活魚の深度を急激に変化させ、その鰾の大きさの変化によってターゲットストレングスがどの様に変動するかを考察した。

一方、魚の日周行動による遊泳深度や姿勢の変化がターゲットストレングスにどの様に影響するかを、ケージ法を用いて魚群エコーを様々な時間帯で測定することによって調べた。また、遊泳姿勢をパラメータとして反射特性のシミュレーションを行ない、実測データとの比較によって、魚の姿勢分布の推定を試みた。

最後に、北海道倶多楽湖において自然遊泳しているヒメマスのターゲットストレングスをデュアルビーム法を用いて測定し、測定時間帯の違いによりターゲットストレングスがどう変動するかを調べ、その変動が遊泳姿勢のどの様な変化に起因するのかをコンピュータシミュレーションを行なって検証した。

## 【結果】

1. 姿勢変化によるターゲットストレングスの変動は大きく、高周波になるほどその変動が複雑であり、体長に比べて体高の低い魚種ほどターゲットストレングスの分布に顕著なピークが生じていた。また、ターゲットストレングスの最大値が出現する角度は、ほとんどの魚種でやや下向きの時に生じていた。
2. ターゲットストレングス( $TS$ )の指向性関数から、その最大値 $TS_{max}$ と平均値 $TS_{avg}$ を求め、 $TS = A + 20 \log L$  ( $L$ は体長(cm))で回帰させたところ $A$ の値は次の様になった。

	$A_{max}$			$A_{avg}$		
	25kHz	50kHz	100kHz	25kHz	50kHz	100kHz
マアジ	: -59.4		-62.3	-64.1		-68.2
マサバ	: -59.7		-59.0	-64.1		-65.5
ホンニベ	: -58.7		-63.9	-64.5		-70.0
コニベ	: -61.4		-62.0	-65.3		-68.7
カンダリ	: -62.8		-62.0	-66.4		-67.2
ウマヅラハギ	: -61.1		-64.1	-65.8		-69.6
キダイ	: -61.9		-63.5	-66.0		-69.7
イボダイ	: -61.0		-63.7	-64.7		-69.3
カイワリ	: -63.2		-65.6	-68.2		-71.8
マナガツオ	: -67.0		-70.6	-72.7		-77.5
ヒメマス	:	-60.1			-66.0	

これら  $A$  の値で魚種間の比較を行なったところ、体長に比べ体高の高い魚種ほど、 $A_{max}$ 、 $A_{avg}$  が小さくなっていく傾向があった。

一方、無鰾魚であるマナガツオに関しては他魚種に比べて  $A_{max}$  の値が 25kHz で 4 ~ 8dB、100kHz で 5 ~ 11dB、 $A_{avg}$  の値では 25kHz で 5 ~ 9dB、100kHz で 6 ~ 12dB 小さかった。

- 測定に用いた 11 魚種の  $A_{max}$ 、 $A_{avg}$  を周波数で比較すると  $A_{max}$  の値は 25kHz で -59.8dB、50kHz で -60.6dB、100kHz で -62.3dB となり、周波数により 0.8 ~ 1.7dB の差があった。また、 $A_{avg}$  の値は 25kHz で -64.9dB、50kHz で -66.0dB、100kHz で -68.5dB であり、周波数による差は 1.1 ~ 2.5dB となり低周波ほどターゲットストレングスが大きくなることがわかった。
- 軟 X 線撮影により魚体中の鰾の形状を調べたところ、鰾の傾き ( $\theta_{SB}$ ) はマアジで  $8^{\circ} \sim 13^{\circ}$  (平均  $9.8^{\circ}$ 、標準偏差  $1.9^{\circ}$ 、以降同様)、マサバ  $3^{\circ} \sim 28^{\circ}$  ( $14.3^{\circ}$ 、 $8.0^{\circ}$ )、ホンニベ  $14^{\circ} \sim 17^{\circ}$  ( $15.5^{\circ}$ 、 $2.1^{\circ}$ )、コニベ  $13^{\circ} \sim 27^{\circ}$  ( $20.1^{\circ}$ 、 $4.2^{\circ}$ )、カンダリ  $16^{\circ} \sim 17^{\circ}$  ( $16.5^{\circ}$ 、 $0.7^{\circ}$ )、ウマヅラハギ  $14^{\circ} \sim 26^{\circ}$  ( $19.8^{\circ}$ 、 $4.9^{\circ}$ )、キダイ  $25^{\circ} \sim 37^{\circ}$  ( $29.3^{\circ}$ 、 $4.8^{\circ}$ )、カイワリ  $26^{\circ} \sim 38^{\circ}$  ( $31.6^{\circ}$ 、 $4.4^{\circ}$ )、ヒメマス  $1^{\circ} \sim 20^{\circ}$  ( $9.9^{\circ}$ 、 $3.5^{\circ}$ ) であり、体高/体長が大きくなるにつれて傾き ( $\theta_{SB}$ ) が大きくなる傾向があった。
- 鰾の傾きとターゲットストレングスの姿勢角特性を比較すると鰾の長径方向と垂直な角度付近にターゲットストレングスの極大が生じていた。
- 比較的体型が相似している、キダイ、カイワリ、マナガツオの 3 種のターゲットストレングスを比較したところ、無鰾魚であるマナガツオは他の 2 魚種に比べて、 $TS_{max}$  に関して 25kHz で 10 ~ 11dB、100kHz で 11 ~

13dB、 $TS_{avg}$ では25kHzで11～13dB、100kHzで12～14dB小さかった。

7. 北海道倶多楽湖においてヒメマス活魚を用いて同一個体で、鰾内ガス除去前後のターゲットストレンジスを比較したところ、除去後において $TS_{max}$ で2～7dB、 $TS_{avg}$ で3～11dB小さくなった。
8. ヒメマス活魚の深度を5、10、20、40mと変化させた時のターゲットストレンジスの減少率は、鰾の容積がボイルの法則に従って深度の増加とともに小さくなるという気球モデルでよく説明することができた。
9. ケージ法により、様々な時間帯で魚群エコーを測定したところ、日没時をはさんで魚群エコーのエネルギー分布に変化が生じていた。これは、ケージ内の魚の行動の変化により魚体姿勢が変化したためと考えられた。さらに、魚群エコーから1個体あたりのターゲットストレンジスを算出しその頻度分布を見たところ、分布型が時間帯によって異なり、モードの位置も-55dBから-37dBの間で変化した。
10. ターゲットストレンジスの分布から、ケージ内の魚の遊泳姿勢の分布を推定したところ、昼間、日没時、日没30分後、夜間、日出30分前のデータに関しては、実測データと推定値がよく一致した。
11. デュアルビーム魚探で観測した自然状態のヒメマスのターゲットストレンジスの分布に日変化が認められた。特に、夕まずめから夜にかけてターゲットストレンジスのモードが大きくなり、かつその分散は小さくなっていく。これは、夜間ヒメマスが活動を休止し、その姿勢をほぼ水平に保持しているためと思われた。
12. ターゲットストレンジスの分布の変化は魚の遊泳姿勢の変化によるものと考えられ、シリンダモデルで推定した魚体のターゲットストレンジスの姿勢角特性を用いてコンピュータシミュレーションを行なったところ、切断正規分布で与えた魚の姿勢の平均ピッチ角とその標準偏差がターゲットストレンジスの分布型やモードに影響をおよぼすことがわかった。従って、観測されたターゲットストレンジスの分布から、魚の遊泳姿勢の分布を推定するためには、魚体のターゲットストレンジスの姿勢角特性の正確な測定とそのモデル化が必要であり、今後の課題としたい。

# 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 助 教 授 飯 田 浩 二

学 位 論 文 題 名

## 魚体の超音波反射特性におよぼす鰾と 姿勢の影響に関する基礎的研究

現在行なわれている計量魚群探知機を用いた資源量推定法は、魚群エコー強度を積分する積分方式と、単体エコーを計数する計数方式とに大別される。積分方式で得られる情報は、魚体の音響後方散乱断面積( $\sigma_{bs}$ )と魚の密度との積である体積後方散乱強度(SV)である。ターゲットストレングス(TS)は $10 \log \sigma_{bs}$ で表わされることから、魚体のTSはSVから魚の密度を推定するためのスケールファクターとなる。

一方、計数方式では、単体エコーを計数し、これを探知体積で割って密度を求める。探知体積はTSに依存するため、TSは密度推定の精度を左右する。しかし、魚体のTSは魚種や魚体の大きさ(体長・体重)、魚体構造(肉質・骨格・鰾等)、魚体の運動や方位姿勢等の要因で複雑に変化するため、その重要性が認識され、1970年頃から多くの研究がされてきた。

特に近年、魚体の音響反射に重要な影響を与える鰾が注目されている。鰾の中には酸素、窒素、二酸化炭素等様々なガスが存在している。一般に音響反射は媒質中の音響インピーダンスの不連続によっておこり、その不連続性が高いほどよく反射する。従って、水中における気体(鰾内ガス)による反射は大きいと考えられる。

また、鰾が魚体の超音波反射の主要な要因とすれば、鰾の大きさや形状の変化により魚体のTSも変化する。一般に魚の遊泳行動には日周性がみられ、遊泳姿勢や遊泳深度が一昼夜で変化することによって、TSも日周期的に変化すると考えられる。

本論文は、本文61頁、図56、表6から構成されている。

論文の内容は、魚体の音響反射に重要な影響を与える鰾に注目し、大型無響水槽(12m×3m×3m)および北海道倶多楽湖で実験を行なったもので、まず、大型無響水槽において東シナ海産10魚種と北海道倶多楽湖で漁獲したヒメマスの冷凍保存した標本を用い、

魚体の姿勢角をコンピュータで制御された回転装置を用いて変化させ、周波数 28.5, 50, 96.2kHz で TS のピッチ角特性を精密測定した。また、同時に軟 X 線装置による鰾の大きさや形状の観察も行なった。一方、北海道倶多楽湖におけるヒメマス活魚を用いた実験では、試作した魚体自動懸垂回転装置を使ってヒメマスのピッチ角や深度を変化させ、注射器を用いた鰾内ガスの除去による鰾の有無や深度変化による鰾の大きさの変化により TS がどのように変動するかを考察した。また、魚の日周行動による魚体姿勢の変化で TS がどう変化するかを、ケージ(直径 1.1m, 高さ 1m)に入れた複数の活魚の魚群エコーや、デュアルビーム魚探を用いて自然遊泳状態のヒメマスの TS を昼夜間連続で測定することにより考察した。さらにその変化から魚体遊泳姿勢をコンピュータシミュレーションにより逆推定した。この研究結果を以下の諸点にまとめた。

1) 鰾の形態について、魚には無鰾魚と有鰾魚が存在し、有鰾魚では鰾が魚体の正中線に対して後方に傾斜している。

2) TS の指向性の主軸は鰾と垂直な方向にあり、紡錘形の魚ほど顕著な反射指向性を有する。また、高周波ほど多数の極を有し平均 TS も小さい。

3) 無鰾魚であるマナガツオの TS は、類似体型をした有鰾魚であるキダイ・カイワリより約 10dB 小さかった。ヒメマス活魚の鰾内ガスを注射器を用いて除去したところ、最大 TS で 2 ~ 7dB, 平均 TS で 3 ~ 11dB 減少した。また、ヒメマスの深度を急激に増加させた時の TS の減少率は、鰾の容積がボイルの法則に従って深度の増加と共に小さくなると仮定した気球モデルによく適合した。

4) ケージの中に入れた魚群のエコーエネルギーは、日出没をはさんで変化した。さらに、魚群エコーから 1 個体当たりの TS を算出しその頻度分布をみたところ、分布型が時間帯によって異なり、モードの位置も変化した。魚の姿勢の頻度分布が正規分布になると仮定して、TS の頻度分布から魚の姿勢分布を推定したところ、昼間  $N(-3,30)$ , 日没時  $N(-12,30)$ , 日没 30 分後  $N(0,30)$ , 日出 30 分前  $N(30,30)$  となった。

5) デュアルビーム魚探で観測した自然遊泳状態におけるヒメマスの TS の頻度分布に日変化が認められた。特に、夕まずめから夜にかけて TS のモードが大きくなり、かつその分散は小さくなる傾向が測定された。これは、夜間ヒメマスが活動を休止し、その姿勢をほぼ水平に保持しているためと考えられた。

6) 自然遊泳魚の TS の頻度分布におけるこれらの特徴は、理論モデルで推定した TS の姿勢角特性と、正規分布で与えた魚の遊泳姿勢の分布を用いたコンピュータシミュレーションで再現でき、またその結果から魚体遊泳姿勢の逆推定の可能性が示唆された。

以上の諸点は、音響による資源調査の分野で、漁業資源現存量推定における精度を左右する重要な基礎資料を得たとして評価できる。よって、審査員一同は、本論文が博士(水産学)の学位論文として十分な内容であると認定した。