

海中垂下されたホッケ *Pleurogrammus azonus* のターゲット・ストレングス

高嶋 孝寛*

Target strength of live arabesque greenling *Pleurogrammus azonus* suspended in the sea.

Takahiro TAKASHIMA*

Target Strength (TS) of live arabesque greenling *Pleurogrammus azonus*, a kind of bladderless fish, were investigated at two frequencies (38kHz and 120kHz) to know how they relate to frequency or to fish size. Live greenlings (26.4 ~ 30.9cm, BL) were captured by angling at the Senposhi bank off northwestern Hokkaido. For measurement of TS using a quantitative echo sounder EK500 equipped on the research vessel, each sample fish was suspended below the bottom of the ship. Rayleigh probability density function (PDF), which were selected with AIC from two types of PDF, were fitted to distributions of back scattering amplitude at both frequencies to estimate averaged TS (TS_{avg}). TS_{avg} were estimated from -62.1 to -49.8dB at 38kHz, and from -57.9 to -47.2dB at 120kHz. TS_{avg} at 120kHz were larger than them at 38kHz for 3.3dB (mean). Although TS_{avg} increased with body length at both frequencies, regression model was fitted better at 120kHz than at 38kHz. These results yield two conclusions that arabesque greenling also has scattering characteristics of bladderless lives, and that 120kHz is more appropriate frequency than 38kHz for acoustic survey for this species.

キーワード：ホッケ，ターゲット・ストレングス，計量魚群探知機，確率密度関数，周波数特性

まえがき

ホッケ (*Pleurogrammus azonus* Jordan and Metz) は北海道における漁業生産物として、きわめて重要な位置を占める魚種の一つである。1998年の北海道周辺における総漁獲量は、約20万トンに達した¹⁾。漁業の種類は、5トン未満の小型船舶による刺し網漁業から、100トン以上の大型船による沖合底曳き網漁業まで様々である。これらの経営体の多くが、的確な資源量推定と漁況予測を要望しており、計量魚群探知機（以下、計量魚探）による現存量の直接推定に対する期待も大きい。

一方、現場海域で得られた音響データから対象魚種の生物量を推定するためには、少なくともその魚種のターゲット・ストレングス（以下TS）が分かっている必要がある。TSは1個体の対象生物が音波を反射する割合をいい、通常は対数値で表現される。貞安²⁾によると、TSの推定法は、対象魚について実際にTSを測定する実験的な方法と、魚体あるいは鰾の形状を物理的なモデルとして散

乱の大きさを求める理論的な方法とに大別される。さらに実験的な方法は、自然遊泳状態の魚について測定する自然法と、1尾または複数尾の供試魚を実験的条件下において測定する制御法とに分けることができる。これらのどの方法にもそれぞれに問題点が存在するため、どの生物種においてもTSは複数の方法により測定および検討されることが望ましい。

しかし、ホッケのTSについては、今までに38kHzを用いた自然法による観察が1例³⁾あるのみで、詳しく調べられていない。また、本種はTS研究例が少ない無鰾魚でもあるため、単体ごとのTSを測定し、周波数や魚体サイズとの関係を調べることの意義は大きい。そこで、本研究では調査船に装備されたトランスデューサ下に活ホッケを垂下する制御法によりTS測定を行い、それらと魚体サイズや周波数との関係を調べた。

報文番号 A396 (2006年1月30日受理)

* 北海道立中央水産試験場 (Hokkaido Central Fisheries Experimental Station, Yoichi, Hokkaido 046-8555, Japan)

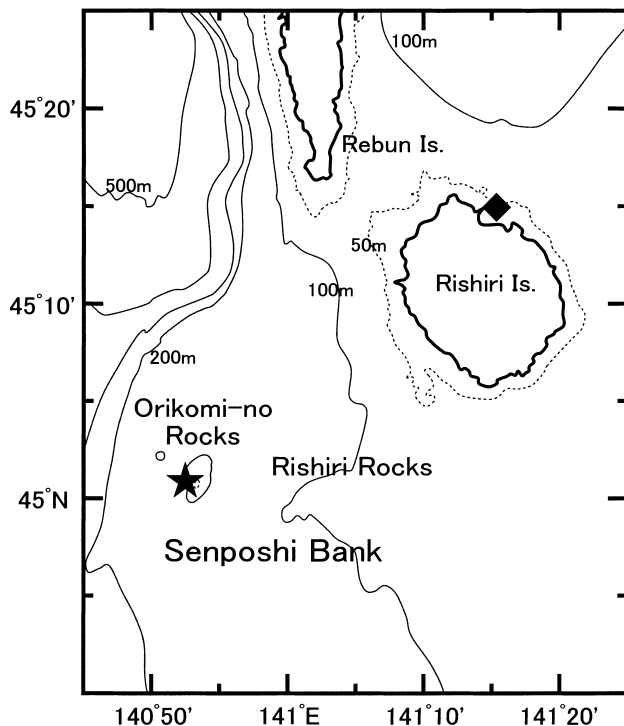


Fig.1 Sampling station of arabesque greenling (○) and location of TS measurement site (◇).

材料と方法

1. 供試魚の採集および詳細

供試魚は、2002年5月21日に仙法志堆折込根付近海域（北緯45度01分，東経140度53分およびその周辺）において、北海道立稚内水産試験場所属の試験調査船「北洋丸」（237トン）船上から釣獲により採集された。釣獲後、ただちにこれらを船上に用意された水槽に収容し、実験地点に移動した（Fig.1）。

Table 1 Details of sample fish.

No.	Body length (cm)	Total length (cm)	Weight (g)
Fish 1	26.4	30.6	227
Fish 2	27.2	31.2	240
Fish 3	28.1	32.6	315
Fish 4	28.6	33.6	372
Fish 5	30.6	35.2	380
Fish 6	30.9	35.4	367

TS測定には、6尾の供試魚を用いた（Table 1）供試魚の体長範囲は、26.4～30.9cmであった。これらの供試魚は、TS測定終了後に船上に引き上げられた時点でもすべて生存しており、水槽内で活発に遊泳していた。

2. TSデータの収集

実験地点へ移動後、北洋丸に搭載されたSimrad社製スプリットビーム式計量魚探EK500により、TS測定を行った。このEK500には、ES38B（38kHz）およびES120・7（120kHz）の2つのトランスデューサ（送受波器）が組み合わされている。

利尻島鵜泊沖水深40m地点（北緯45度15分，東経141度14分）に船を錨泊させた上で、船底に装備したトランスデューサの真下に位置するよう、ナイロンテグスにより供試魚を制御した（Fig.2）。テグスの太さを、スイベル以浅では0.78mm（22号），以深では0.57mm（12号）とした。テグスとホッケの固定には釣り針（サケ用大大号：延長約80mm，平均針径約1.6mm，空中重量約1.2g）を使用した。テグスの最下端には、供試魚がトランスデューサの下に常に位置するように、錘をつり下げた。この方法では供試魚に対し自発的な遊泳を許しているが、制限も与えているため、供試魚の状態は完全な自然状態とは異なる。

TS測定では供試魚に気泡が付着することで大きな誤差が生じる⁴⁾ので、次の手順により垂下作業を行った。まず、水槽内の水中で供試魚の吻に釣り針をかけ、水が保たれるように目張りした手網を用いて、水槽から海中へ移した。次にナイロンテグスを操作することにより、供試魚をトランスデューサ真下、水深25m付近に設置した。原則として1尾につき約20分間垂下し、その間に38kHzおよび120kHzの両周波数を用いてTSを測定した。これらの実験操作を6尾の供試魚に対して行った。

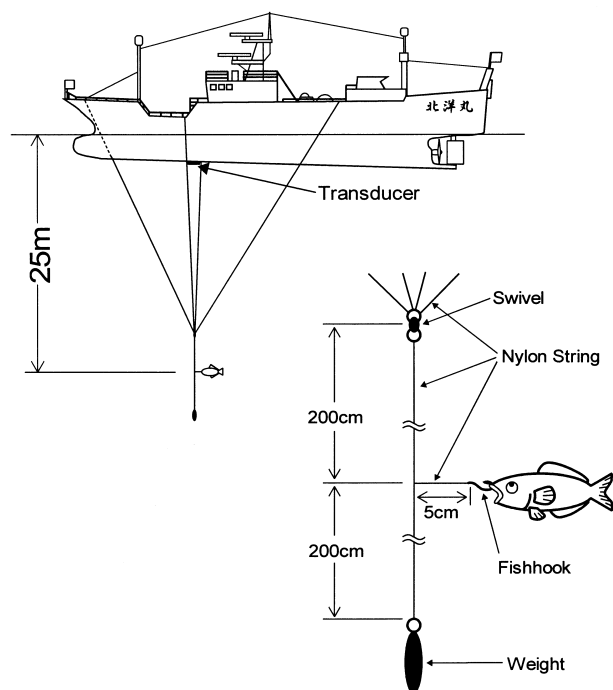


Fig.2 Configuration of TS measurement.

TS測定後の供試魚を個体識別して冷凍保存し、後日、陸上の実験室において、北水試魚介類測定・海洋観測マニュアルにしたがって、体長・体重・性別等の生物測定を施した。

EK500のテレグラムデータは、イーサネット経由でEP500により受信・記録された。

なお、EK500の較正は、2002年4月22日に銅製基準球(直径60.0mm(38kHz)および30.05mm(120kHz))を用いて実施された。

3. データ解析

38kHz, 120kHzそれぞれの周波数により記録されたエコーグラム上で吊下されたホッケを確認しながら、単体検出されたエコーからTSを抽出した。

自然状態下の魚は、時刻を追って遊泳姿勢を変化させるため、同一個体であってもTSは常に一定ではない。そのため、計量魚探による音響データを対象生物の分布密度に変換するためには、姿勢変化に対し平均化されたTS(TS_{avg})が必要になる。単体活魚のTSについては、後方散乱振幅の分布形に確率密度関数(PDF)であるRayleigh分布やRice分布を近似させて平均化した例^{5,7)}があるので、本研究でもこれらにならってTS_{avg}の推定を試みた。

まず、次式を用いてEP500により記録されたすべてのTSを後方散乱断面積σ_{bs}に変換した。

$$TS = 10 \log_{10} \sigma_{bs} \dots\dots\dots(1)$$

さらに次式を用いてσ_{bs}を後方散乱振幅sに変換した。

$$\sigma_{bs} = s^2 \dots\dots\dots(2)$$

こうして得られた供試魚ごと、周波数ごとのsの頻度組成に対し、最小二乗法により、Rayleigh分布あるいはRice分布をあてはめ、平均後方散乱断面積σ_{bs}を推定した。Rayleigh分布およびRice分布はそれぞれ(3)(4)式で表される。

$$P_{Rayleigh}(s) = \frac{2s}{\langle \sigma_{bs} \rangle} \exp \left\{ -\frac{s^2}{\langle \sigma_{bs} \rangle} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

$$P_{Rice}(s) = (1+\gamma) \frac{2s}{\langle \sigma_{bs} \rangle} \exp \left\{ -(1+\gamma) \frac{s^2}{\langle \sigma_{bs} \rangle} - \gamma \right\} I_1(x) \dots\dots(4)$$

ただし、

$$x = 2 \sqrt{\gamma(1+\gamma) \frac{s^2}{\langle \sigma_{bs} \rangle}} \dots\dots\dots(5)$$

ここでI₁(x)は第1種0次の変形ベッセル関数であり、はRice分布の型を決めるパラメータである。s²の集合平均が平均後方散乱断面積σ_{bs}となる。推定するパラメータは、Rayleigh分布ではσ_{bs}、Rice分布ではσ_{bs}およびγとなる。γが大きくなるほど分布のピークが鋭くなり、逆にγ=0のとき、Rice分布はRayleigh分布と同一になる。個体ごと、測定周波数ごとに推定されたσ_{bs}をそれぞれ(1)式により対数値に変換し、TS_{avg}を得た。

供試魚および使用した周波数ごとに、音波長により規準化した体長(L)を求めた。音波長λは水中音速を周波数で除して計算された。水中音速については、Mackenzieの計算式⁸⁾に供試魚の設置水深、および実験地点における水温・塩分(25m, 8.8 ‰, 34.0psu; CTDにより測定)を代入して計算し、1,485m毎秒とした。

体長とTS_{avg}との周波数ごとの散布図に対し、以下の2種類の関係式をあてはめた。

$$TS_{avg} = 20 \log_{10}(L) + b_{20} \dots\dots\dots(6)$$

$$TS_{avg} = m \log_{10}(L) + b \dots\dots\dots(7)$$

ここで、b₂₀およびb、mは定数である。Lは魚体長をあらわし、ホッケの体長(BL)とした。(6)式は、σ_{bs}がLの2乗にほぼ比例するとする一般則⁹⁾から、(7)式におけるmを20に固定したものである。b₂₀は魚体長1cmあたりのTS(本研究ではTS_{avg})を表すため、規準化TSとも呼ばれる⁹⁾。また、(7)式は、log₁₀(L)を説明変数、TS_{avg}を目的変数とした回帰式である。

TSと魚体長の関係を論じる場合、魚体長の規準として全長TLあるいは尾叉長FLが利用されることが多い^{10, 11)}。

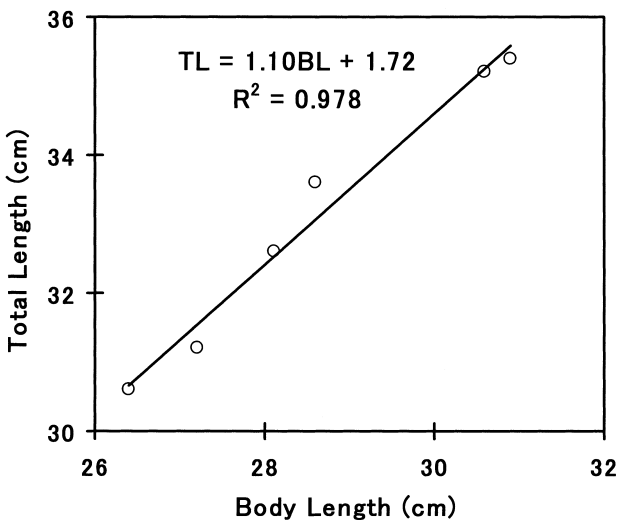


Fig.3 Relationship between body length (BL) and total length (TL) of arabesque greenling.

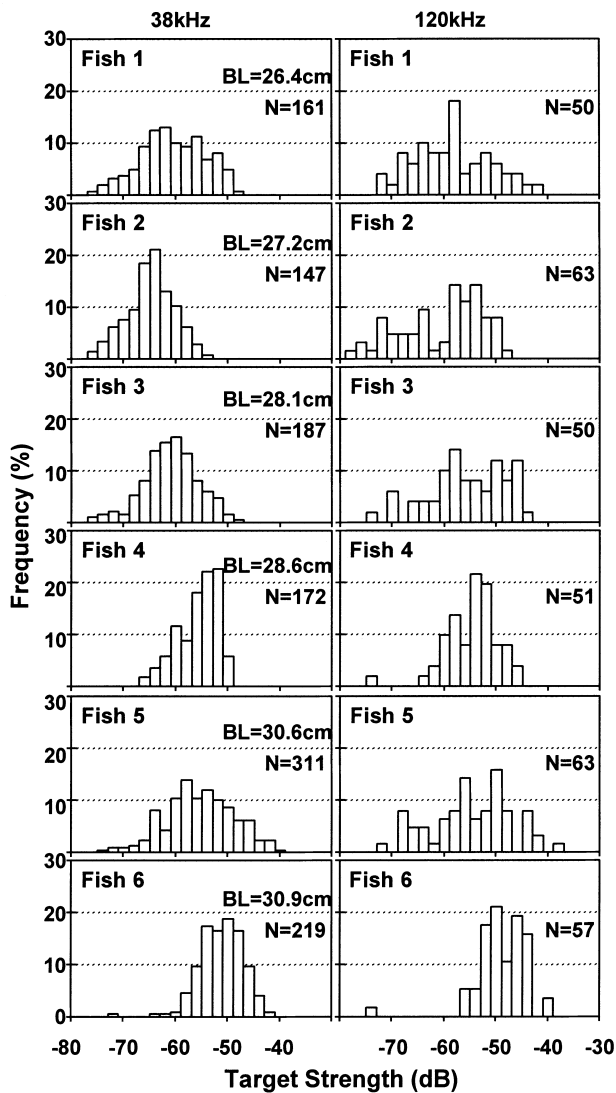


Fig.4 Distributions of TS of live arabesque greenling at 38kHz (left side) and 120kHz (right side). BL: body length, N: number of pings.

しかし、TLやFLでは尾鰭鰭条が変形したり損傷したりしやすく、安定性を欠くことから、ホッケでは魚体長をBLにより表現することが多い¹²⁻¹⁴⁾ので、本研究においてもBLを魚体長Lとして扱った。ホッケのBLは吻前端から尾鰭の構造上の基部までの距離を指し、尾鰭鰭条を含まない。

ホッケのBLはTLの約90%の長さとなるので (Fig.3), 本研究で示した魚体長あたりのTSあるいは TS_{avg} は、TLやFLを用いた場合より大きめの数値となる。

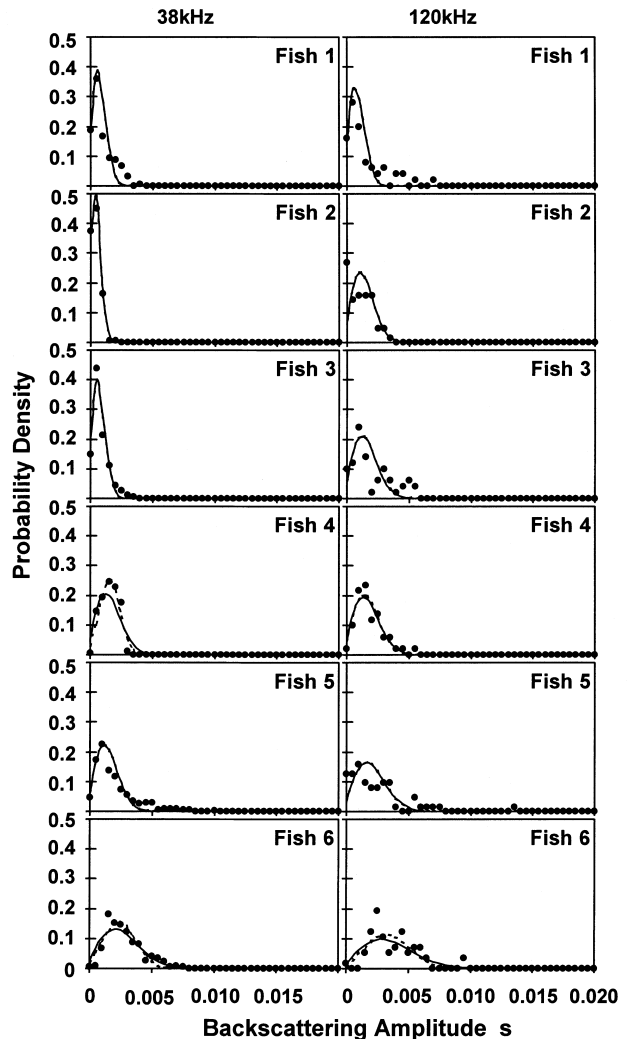


Fig.5 PDF of backscattering amplitude of live arabesque greenling at 38kHz (left side) and 120kHz (right side). Dots are experimental data, solid lines are fitted Rayleigh PDF, and dotted lines are fitted Rice PDF.

結果

1. 測定されたTS

測定した6個体のTSの頻度組成を、Fig4に示す。どちらの周波数においても、いくつかの例外を除き、体長が大きいホッケほど、TSのモードは大きかった。また、38kHzよりも120kHzでTS分布の裾野が広がった。

2. TS_{avg} の推定

各供試魚について、Rayleigh分布ならびにRice分布のあてはめに関するパラメータの推定結果およびAIC⁽⁵⁾を、Table2に示した。また、各供試魚におけるsの頻度分布をRayleigh分布、Rice分布の曲線と合わせてFig.5に示した。どちらの周波数においても、供試魚1~3および

Table 2 Estimated parameters and AIC by fitting of Rayleigh PDF and Rice PDF.

No.	38kHz								120kHz							
	Rayleigh				Rice				Rayleigh				Rice			
	$\langle\sigma_{bs}\rangle$ ($\times 10^{-6}$)	TS _{avg}	AIC	$\langle\sigma_{bs}\rangle$ ($\times 10^{-6}$)	γ	TS _{avg}	AIC	$\langle\sigma_{bs}\rangle$ ($\times 10^{-6}$)	TS _{avg}	AIC	$\langle\sigma_{bs}\rangle$ ($\times 10^{-6}$)	γ	TS _{avg}	AIC		
Fish 1	1.23	-59.1	152.73	1.23	0.0	-59.1	154.73	1.61	-57.9	152.73	1.61	0.0	-57.9	154.73		
Fish 2	0.61	-62.1	152.71	0.61	0.0	-62.1	154.71	3.38	-54.7	152.76	3.38	0.0	-54.7	154.76		
Fish 3	1.15	-59.4	152.72	1.15	0.0	-59.4	154.72	4.20	-53.8	152.74	4.20	0.0	-53.8	154.74		
Fish 4	4.37	-53.6	152.72	4.05	1.9	-53.9	154.71	4.90	-53.1	152.71	4.65	0.5	-53.3	154.71		
Fish 5	3.79	-54.2	152.72	3.79	0.0	-54.2	154.72	6.89	-51.6	152.73	6.89	0.0	-51.6	154.73		
Fish 6	10.53	-49.8	152.72	8.97	1.3	-50.5	154.71	18.93	-47.2	152.73	16.88	1.2	-47.7	154.73		

5で $\gamma = 0$ となり、Rice分布はRayleigh分布と一致した。AICを比較すると、すべての供試魚において、どちらの周波数でもRayleigh分布で低い値となったので、TS_{avg}の推定値としてRayleigh分布による値を選択した。Rayleigh分布のあてはめにより、TS_{avg}は38kHzでは-62.1 ~ -49.8dB、120kHzでは-57.9 ~ -47.2dBと推定された。

3. 体長および周波数とTS_{avg}との関係

音波長により規準化した体長 (L/λ) とTS_{avg}との関係をFig.6に示した。 L/λ は対数目盛りで表示した。38kHzにおける L/λ は6.8~7.9、120kHzでは21.3~25.0の範囲にあったので、38kHzにおけるTS_{avg}は図の左側に、120kHzにおけるそれらは右側に位置した。推定されたTS_{avg}を2周波数間で比較したところ、120kHzのほうが38kHzより平均3.3dB大きく、危険率5%で有意差がみられた (Wilcoxon test, $p=0.028$)。

体長 (BL) と推定されたTS_{avg}との関係をFig.7に、(6)あるいは(7)式のあてはめに関するパラメータの推定結果をTable3に示した。Fig.7には、(7)式をあてはめた場合の95%信頼限界も表示した。

(6)式をあてはめた結果、 b_{20} は38kHzにおいて-85.5、120kHzにおいては-82.2となり、38kHzよりも120kHzにおいて大きかった。あてはめ結果をTS_{avg}の推定式としてあつかった場合、38kHz、120kHzとも体長が小さい側でTS_{avg}が過大推定され、逆に体長が大きい側で過小推定される偏りが生じた。

(7)式をあてはめた結果、 m と b は38kHzにおいてそれぞれ141.5、-262.5、120kHzにおいてはそれぞれ120.3、-228.3と推定された。回帰の標準誤差 (SE) は、38kHz

Table 3 Estimated Parameters by fitting $20\log_{10}L$ model (equation (6)) or $m\log_{10}L$ model (equation (7)) at 2 frequencies. SE: standard error of the regression, p: observed significance level of the test, R²: coefficient of determination.

Frequency	$20\log_{10}L$ model		$m\log_{10}L$ model				
	b_{20}		m	b	SE	p	R ²
38kHz	-85.5		141.5	-262.5	2.8	0.036	0.71
120kHz	-82.2		120.3	-228.3	1.5	0.008	0.86

で2.8dB、120kHzでは1.5dBであった。 m は両周波数において有意だった (38kHz: $p<0.05$, 120kHz: $p<0.01$)。また、決定係数R²は38kHz (0.71) よりも120kHz (0.86) において大きかった。これらのことから、(7)式は38kHzより120kHzにおいてよくあてはまると判断された。

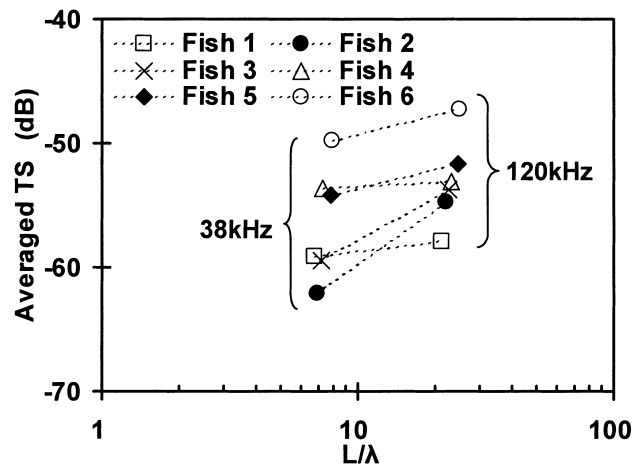


Fig.6 Relationship between body length normalized by wavelength and averaged TS.

考 察

1. 測定されたTS

一般に、魚体姿勢に対するTSの指向性は、低周波よりも高周波で鋭い^{9,10,16}。したがって、同等に姿勢変化を許してランダムにTSを測定した場合、測定に使用する周波数が高いほど、得られるTSは大きくばらつく。本研究で得られた周波数・個体ごとのTS頻度分布は、どの供試魚においても38kHzより120kHzにおいて裾野が広い分布を示した (Fig.4)。この理由は、周波数が高い120kHzでTSの指向性がより強く現れたためと推察される。

しかし、ホッケの姿勢変化とTSの大小との詳しい関係については、今回は言及できない。今後はこの関係について懸垂法^{2,9,10}などにより精密に調べ、検討したい。

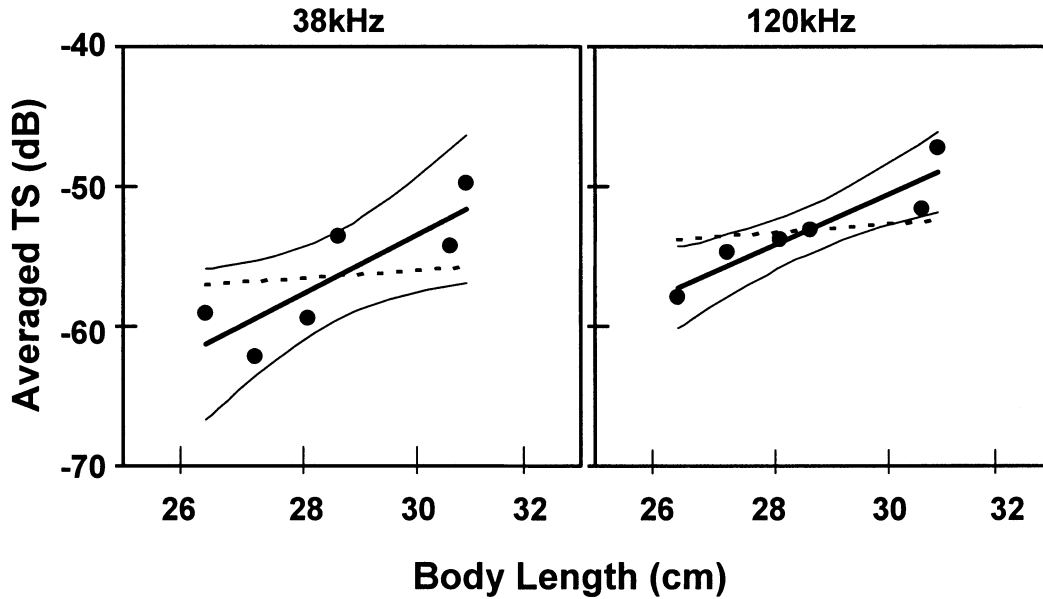


Fig.7 Relationships between body length and averaged TS at 38kHz (left) and 120kHz (right).

Dotted lines are fitted $20\log_{10}L$ models (equation (6)), bold lines are fitted $m\log_{10}L$ models (equation (7)), and thin curves denote 95% confidential limits of $m\log_{10}L$ models.

2. PDFの適合

本研究では、AICの比較により、供試魚の TS_{avg} を推定するモデルとしてRayleigh分布を選択したが、ホッケに対するRayleigh分布あるいはRice分布の適合性については、議論が必要である。Rice分布のあてはめにおいて > 0 となる場合にRayleigh分布よりRice分布の適合がよい、と定義すると、本研究では、どちらの周波数においても供試魚4および6においてRice分布がよく適合したといえる（Table 2）。Rice分布は、 L/λ が20未満の場合、および魚の動きが活発でない場合に、Rayleigh分布より適合しやすくなるとされている^{6,7)}。また、鰾は魚の音響反射を安定させ、Rice分布の σ を増大させる方向に作用する⁶⁾。

ホッケは無鰾魚であるため、 σ が小さくなりやすい、言い換えればRice分布がRayleigh分布に近づく特徴をはじめから有している。さらに、供試魚の L/λ は38kHzではすべて20未満、120kHzではすべて20以上であったにもかかわらず、PDFの適合と L/λ の大小との間に規則性がみられなかったことから、 σ は供試魚4および6にRice分布があてはまった要因ではないと判断される。

一方、供試魚は、TS測定終了時点で活発に遊泳していたが、測定中における運動の程度は、供試魚間で様ではなかった可能性がある。個体ごとの運動量に関する証拠を示すことができないが、供試魚4あるいは6の運動量が他の標本魚より少なかったと仮定すれば、どちらの周波数でもこれら2尾のみでRice分布があてはまったこ

とが説明できる。すなわち、前述の要因のうち、今回の試験結果を説明できるのは、 σ の要因のみである。

以上の議論により、少なくとも今回の供試魚の体長範囲においては、ホッケは無鰾魚であるために本来はRice分布よりRayleigh分布が適合しやすいが、何らかの理由により自発的運動が減少した場合、 σ が増大してRice分布があてはまりやすくなることもあると結論された。今後は、本研究で対象にできなかった18~26cmの体長範囲についてもRayleigh分布のあてはめが適当かどうかについて検討したい。

3. 周波数と TS_{avg} との関係

120kHzにおける TS_{avg} が38kHzにおけるそれらより平均で3.3dBだけ大きかった（Fig.6）ことは、ホッケも無鰾生物の一種であることを示している。一般に無鰾生物は L/λ が1以下でレイリー散乱特性を示し、TSが急激に小さくなるが、約10以上ではTSがサイズのみに依存する幾何的な散乱特性を示す。また、 L/λ が1~10の範囲は、散乱特性がレイリー散乱から幾何的な散乱へと移行する領域と考えられている⁹⁾。平均体長16.5mmのオキアミでは、38kHzと120kHzとのTS差は10dB以上に達する¹⁷⁾が、これは38kHz($L/\lambda = 0.4$)のみならず、120kHz($L/\lambda = 1.3$)においてもレイリー散乱の影響を受けるためである。これに対して、本研究の供試魚（ホッケ）では、120kHzにおける L/λ （21.3~25.0）が幾何散乱領域に位置する一方で、38kHzにおけるそれら（6.8~7.9）は移行領域に位

置する。そのため、2周波数間におけるTSの差は必然的にオキアミより小さくなるはずであり、本研究の結果はこのことに矛盾しない。すなわち、本研究で得られた平均3.3dBの差は、無鰾生物としての散乱特性と供試魚のL/ の位置との関係により生じたと解釈される。

これらの TS_{avg} の周波数特性については、現場調査において、次のような応用が理論的に可能である。ひとつは、ホッケの分布密度計算に120kHzによるデータを用いることで、 TS_{avg} の増減が体長のみ依存する領域(幾何散乱領域)に置き、個体数計算を単純化することである。次に、周波数による散乱強度差を利用することで、エコーグラム上でホッケ魚群とオキアミ類をはじめとしたプランクトンとを分離することである。実際に、ホッケ漁場にはプランクトン類が同時に分布することが多い¹⁸⁾ので、分離技術の必要性は高い。しかしながら、120kHzは38kHzと比べて吸収減衰が大きいので、大深度の観測には不向きである⁹⁾ことや、対象海域にホッケに匹敵するサイズの無鰾魚類が存在する場合に、これらとホッケとの分離が不能になる制限も生じる。今後は現存量調査の対象海域について、ホッケの生息水深や全体の生物層を考慮しながら、上述した周波数特性の応用が可能な海域や季節を明らかにしていく必要がある。

4. 体長と TS_{avg} との関係

供試魚の魚体長と TS_{avg} との関係に(6)式をあてはめたところ、どちらの周波数においても体長が小さい側では TS_{avg} が過大に、大きい側では過小に推定される偏りがみられた(Fig.7)。一方(7)式のあてはめにおいては、傾き m はどちらの周波数でも20より大きかったものの、有意であった(Fig.7, Table 3)。これら2種類のモデルによるあてはめ結果は、本研究で対象とした体長範囲(26.4~30.9cm)においては、傾きを固定した(6)式による関係式よりも、傾きも同時に推定した(7)式によるそれらが、体長と TS_{avg} との関係式として妥当であることを示している。

(6)式のあてはまりがよくなかったことは、魚体長の2乗によるTSの規準化が妥当でないことを示している。McClatchie *et al.*^{19,20)}は、多くの有鰾魚種においてこのことを示し、その理由を、魚体長と鰾長との比が魚種や成長段階により異なるためと考察した。しかし、ホッケは無鰾魚種であるため、同じ理由では今回の結果を説明できない。この問題を明らかにするためには、ホッケの魚体構造や体内の各器官がTSに及ぼす影響について、詳しく検討する必要がある。

回帰式である(7)式のあてはめ結果が有意だったことは、供試魚の体長範囲に限られるが、ホッケの TS_{avg} が体

長に対して単調増加関係であることに統計的な裏付けがなされたことを意味する。このことから、計量魚探による現存量調査では、体長組成が分かれば、これらの関係式を用いて個体数を計算することができる。さらに、あてはまりの良さ(Fig.7, Table 3)と前述した周波数特性とを考慮すれば、ホッケの分布密度の推定には120kHzによる音響データを用いることで、高い精度を得ることができるだろう。しかしながら、ホッケの漁獲対象サイズは、ほぼ体長18cm以上²¹⁾なので、本研究で網羅しきれなかった18~26cmの体長範囲についてもTSを測定し、体長との関係を確かめなければならない。

本研究では、ホッケの TS_{avg} における周波数特性および体長との関係を調べ、計量魚探による現存量調査の可能性を見いだすことができた。今回は実験方法や条件の制約から一部の知見を得るにとどまったが、今後は対象とする体長範囲を広げる、標本数を増やす、あるいは実験水槽における精密測定を行うなどして、ホッケのTSについてさらに詳しく調べていきたい。

要 約

2002年5月21日に仙法志堆折込根で採集された体長26.4~30.9cmの活ホッケについて、試験調査船北洋丸に搭載された計量魚探EK500(38kHzおよび120kHz)を用いてターゲット・ストレングス(TS)を測定し、以下の結果を得た。

- 1) 得られたTSの頻度分布から、38kHzより120kHzにおいて、ホッケの姿勢に対するTSの指向性が鋭く現れた様子が観察された。
- 2) 平均TS(TS_{avg})を推定するための確率密度関数として、Rayleigh分布並びにRice分布からAICの比較によりRayleigh分布を選択した。
- 3) TS_{avg} は38kHzでは-62.1~-49.8dB、120kHzでは-57.9~-47.2dBと推定され、120kHzの場合が38kHzより平均3.3dB大きかった。
- 4) 両方の周波数において、対数変換された体長と TS_{avg} との間に単調増加関係が確認されたが、回帰式は120kHzでよくあてはまった。

謝 辞

本研究をすすめるにあたり、多くの有益な助言を筆者に与えてくださった独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所安部幸樹博士、北海道立中央水産試験場三宅博哉主任研究員、板谷和彦博士、ならびに本研究に取り組み機会を筆者に与えてくださった北海道立中央水

産試験場中田淳主任研究員（故人）に感謝致します。また、塚田重船長以下、北海道立稚内水産試験場試験調査船北洋丸の乗組員諸氏に、心より御礼申し上げます。

文 献

- 1) 高嶋孝寛：ホッケの産卵生態・育てる漁業．No.323，3-8（2000）
- 2) 貞安一廣：魚類のターゲットストレングスの精密推定に関する研究．学位論文，北海道大学．北海道，2005，290pp．
- 3) Kaneta, T., Miyake, H., Mizuno, M. and Yoshida, H.: In situ target strength of walleye pollock, *Theragra chalcogramma* (Pallas) and arabesque greenling, *Pleurogrammus azonus* (Jordan and Metz). International Workshop on Acoustic Surveys of North Pacific Fisheries Resources (Abstracts). 32-33 (1997)
- 4) Iida, K., Mukai, T. and Hwang, D.: Acoustic backscattering of swimbladdered juvenile fish derived from cage experiments. *Fisheries Science*. 64, 929-934 (1998)
- 5) Haug, K. and Clay, C. S.: Backscattering cross sections of live fish: PDF and aspect. *J. Acoust. Soc. Am.* 67, 795-802 (1980)
- 6) Clay, C. S. and Heist, B. G.: Acoustic scattering by fish - Acoustic models and a two-parameter fit. *J. Acoust. Soc. Am.* 75, 1077-1083 (1984)
- 7) 向井徹，佐野典達，飯田浩二，佐々木成二：東シナ海で漁獲された活ガザミの背方向ターゲットストレングスの測定．日水誌．60，223-227（1994）
- 8) Mackenzie, K. V.: Nine-term equation for sound speed in the oceans. *J. Acoust. Soc. Am.* 70, 807-812 (1981)
- 9) 古澤昌彦：水産資源推定のための超音波による魚群探知に関する研究．水工研報告．11，173-249（1990）
- 10) 向井徹，佐野典達，飯田浩二，佐々木成二：東シナ海で漁獲された主要10魚種のターゲットストレングスの測定．日水誌．59，1515-1525（1993）
- 11) Foote, K. G. and Traynor, J. J.: Comparison of walleye pollock target strength estimates determined from in situ measurements and calculations based on swimbladder form. *J. Acoust. Soc. Am.* 83, 9-17 (1988)
- 12) 久新健一郎：体長分布よりみたホッケ *Pleurogrammus azonus* JORDAN et METZ の成長．北大水産彙報．8(3)，190-194（1957）
- 13) 夏目雅史：死後硬直による魚体長収縮．北水試研報．47，1-6（1995）
- 14) 八吹圭三：ホッケの耳石染色法による年齢査定と根室海峡における成長．漁業資源研究会議 北日本底魚部会報．27，39-48（1994）
- 15) 赤嶺達郎：最小二乗法とAIC．日本海区水産試験研究連絡ニュース．339，9-11（1987）
- 16) 宮野鼻洋一：魚の音響散乱．海洋音響学会誌．22，94-101（1995）
- 17) Miyashita, K., Aoki, I., Seno, K., Taki, K. and Ogishima, T.: Acoustic identification of isada krill, *Euphausia pacifica* Hansen, off Sanriku coast, north-eastern Japan. *Fisheries Oceanography*. 4(4), 266-271 (1997)
- 18) 元田茂・佐藤重勝：ホッケ (*Pleurogrammus azonus*) の食餌並びに漁場プランクトンの観察．日水誌．15，343-353（1949）
- 19) McClatchie, S., Alsop, J. and Coombs, R. F.: A re-evaluation of relationships between fish size, acoustic frequency, and target strength. *ICES Journal of Marine Science*. 53, 780-791 (1996)
- 20) McClatchie, S., Macaulay, G. J. and Coombs, R. F.: A requiem for the use of $20\log_{10}$ Length for acoustic target strength with special reference to deep-sea fishes. *ICES Journal of Marine Science*. 60, 419-428 (2003)
- 21) 高嶋孝寛：ホッケ．平成15年度北海道立稚内水産試験場事業報告書．2004，80-96．