



Title	無鰐魚の音響散乱特性に関する研究
Author(s)	閻, 乃箏
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(水産科学)
Dissertation Number	甲第14183号
Issue Date	2020-09-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14183
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/96130
Type	doctoral thesis
File Information	Naizheng_Yan.pdf



無鰾魚の音響散乱特性に関する研究
(Study on the acoustic characteristics of bladderless fish)

北海道大学大学院水産科学院
海洋生物資源科学専攻
Graduate School of Fisheries Sciences
Division of Marine Bioresource and
Environmental Science

閻 乃箏
Naizheng Yan

2020 年

目次

第1章 序論

1.1 研究の背景	1
1.2 論文の構成	8

第2章 ターゲットストレングスの基礎理論と推定法

2.1 ターゲットストレングスの定義と重要性	9
2.2 ターゲットストレングスの推定法	12
2.2.1 制御法 (ex situ)	
2.2.2 自然法 (in situ)	
2.2.3 音響モデル法	
2.3 本研究で用いたターゲットストレングスの推定法について	15

第3章 自由遊泳している無鰾魚のターゲットストレングス と遊泳姿勢角の測定

3.1 緒言	16
3.2 方法	18
3.2.1 海水水槽における自由遊泳魚のターゲットストレングス測定	
3.2.2 ビデオカメラによる遊泳姿勢角の測定	
3.3 結果	29
3.3.1 ターゲットストレングスの頻度分布	
3.3.2 音響姿勢角とビデオカメラで測定した遊泳姿勢角の分布	
3.4 考察	35
3.4.1 無鰾魚の semi-in situ ターゲットストレングス	
3.4.2 無鰾魚の姿勢角分布	

第4章 懸垂法による無鰾魚のターゲットストレングス測定

4.1 緒言	40
4.2 方法	42
4.2.1 海水水槽におけるターゲットストレングスの精密測定	
4.2.2 姿勢平均ターゲットストレングスの算出	
4.3 結果	51
4.3.1 無鰾魚のターゲットストレングススペクトル	
4.3.2 無鰾魚のターゲットストレングスのピッチ角特性	
4.3.3 無鰾魚のターゲットストレングスの周波数特性と体長依存性	
4.3.4 魚肉除去前後におけるターゲットストレングスの変化について	
4.4 考察	73
4.4.1 無鰾魚の規準化ターゲットストレングス	
4.4.2 無鰾魚の魚肉および骨によるターゲットストレングスへの影響	
4.4.3 面積で規準化した無鰾魚のターゲットストレングス	
4.4.4 無鰾魚のターゲットストレングスの体長，周波数依存性	

第5章 音響モデルを用いた無鰾魚のターゲットストレングス推定

5.1 緒言	88
5.2 方法	90
5.2.1 Deformed Cylinder Model (DC モデル)	
5.2.2 Distorted-Wave Born Approximation Model (DWBA モデル)	
5.2.3 Kirchhoff-Ray Mode Model (KRM モデル)	
5.2.4 音響モデルの計算に用いた各種パラメータについて	
5.3 結果	98
5.3.1 音響モデルによる無鰾魚のターゲットストレングススペクトル	
5.3.2 音響モデルによる無鰾魚のターゲットストレングスの姿勢角特性	
5.3.3 音響モデルによる無鰾魚の規準化ターゲットストレングス	
5.3.4 KRM モデルによる無鰾魚の骨のターゲットストレングス特性	

5.4 考察	130
--------	-----

5.4.1 3つの音響モデルによる無鰾魚のターゲットストレングスの比較	
-------------------------------------	--

5.4.2 音響モデルによる無鰾魚のターゲットストレングス推定の検討	
------------------------------------	--

第6章 現場海域における無鰾魚の音響判別

6.1 緒言	136
--------	-----

6.2 方法	137
--------	-----

6.3 結果	142
--------	-----

6.3.1 生物採集結果	
--------------	--

6.3.2 エコーグラム上の特徴	
------------------	--

6.3.3 平均体積後方散乱強度の分布	
---------------------	--

6.3.4 音響判別	
------------	--

6.3.5 周波数特性により識別されたソウハチとスケトウダラ稚魚 の水平分布	
---	--

6.4 考察	159
--------	-----

6.4.1 ソウハチの周波数特性	
------------------	--

6.4.2 ソウハチの音響資源調査	
-------------------	--

第7章 総合考察

7.1 推定方法による無鰾魚のターゲットストレングスについて	163
--------------------------------	-----

7.2 無鰾魚の音響散乱特性	166
----------------	-----

7.2.1 無鰾魚のターゲットストレングスの周波数特性	
-----------------------------	--

7.2.2 背骨が無鰾魚のターゲットストレングスに与える影響	
--------------------------------	--

7.2.3 無鰾魚の遊泳姿勢角分布	
-------------------	--

7.2.4 無鰾魚のターゲットストレングスに及ぼす体型の影響	
--------------------------------	--

7.3 無鰾魚の音響調査	175
--------------	-----

第8章 結論	177
--------	-----

謝辭	179
----	-----

参考文献	181
------	-----

第1章 序論

1.1 研究の背景

近年、海洋生物の量や分布を調べるために、従来の魚群探知機で得られる情報を定量化できる計量魚群探知機（以降、計量魚探機とする）が使われている。この機器を使うと、比較的短時間に広範囲の水平・鉛直的な海中情報を知ることができ、効率的な資源調査が実施できる。

計量魚探機の原理は、超音波を水中にパルス波として発射し、対象とする生物に当たって戻ってくる音の総量を測定し、それを生物1個体あたりの超音波の反射量で除することで、生物の個体数密度を推定する。この生物1個体あたりの反射量をターゲットストレングスと言い、音響手法を用いて精確に資源量を求めるためには対象生物に応じて適切なターゲットストレングスを適用することが必須となる。しかしターゲットストレングスは、生物の大きさや体の構造（肉質、骨格、鰾など）、魚体の運動や姿勢、使用する超音波の周波数などで複雑に変化する。そのため、音響手法による資源量調査を実施するためには、対象生物のターゲットストレングスが様々な要因に対してどのように変化するかを調べ、その音響散乱特性を明らかにする必要がある。

生物が超音波をどれくらい跳ね返すかは、生物の体と周囲媒質の不連続の度合いによって決まり、この不連続の度合いは音響インピーダンスの差として表される。音響インピーダンスとは物体の密度と音速の積で表現され、この差が大きい媒質間で音の反射が大きくなる。一般的な魚で考えると、水中を伝搬してきた超音波が魚体に当たり、さらに鰾に当たる。この場合、水と魚体、魚体と鰾の音響インピーダンスの差を考えると、魚体と鰾間の差が非常に大きい。Foote (1980) は、鰾のある魚類（有鰾魚）である3種のタラ類 (*Gadus morhua*, *Pollachius*

virens, *Pollachius pollachius*) と鰾を持たない魚類（無鰾魚）である大西洋サバ *Scomber scombrus* のターゲットストレングスの実測値を比較し、有鰾魚の超音波の反射は 90%以上がこの鰾によるものであることを示した。また、Mukai and Iida (1996) は、湖に生息する生きたヒメマス *Oncorhynchus nerka* を用い、その深さを強制的に変化させて鰾の大きさを変えてターゲットストレングスを測定した。その結果、鰾の大きさが水圧変化に伴ってボイルの法則に従って変化すると導いたターゲットストレングスの変化とよく一致することを示した。この結果からも、有鰾魚のターゲットストレングスは鰾に大きく依存していることがわかっている。さらに Furusawa (1988) は、音響理論モデルのひとつである回転楕円体モデルで有鰾魚のターゲットストレングスの一般特性を調べた。その結果、有鰾魚のターゲットストレングスはほぼ鰾の反射のみで決まるため、鰾の大きさや形を考えればよいこと、水と鰾内ガスの音響インピーダンスの差が大きいためターゲットストレングスが大きいこと、鰾が比較的単純な形状であるため姿勢角の変化に伴うターゲットストレングスの変動が少ないこと、ターゲットストレングスは体長の 2 乗にほぼ比例する、周波数に対しては大きな特性がないことなどを見出した。有用魚種としてその資源量の推定を行いたいような魚はほとんどが有鰾魚であり、現在行われている音響資源調査はほぼ有鰾魚が対象となっている。

一方、鰾のない無鰾生物（動物プランクトン、頭足類、無鰾魚など）も存在し、その音響研究も行われている。無鰾生物の音響研究で最も多く行われているのは、動物プランクトンに対するものである。動物プランクトンは小型かつ鰾のような強散乱体がないためターゲットストレングスが小さく、実測することが難しい（向井, 2004）。そのため、音響理論モデル（以下、音響モデルとする）による推定がほとんどであった。最初は、プランクトンの形状を球形 (Anderson, 1950; Johnson, 1977)、有限長円筒 (Stanton, 1988) や湾曲円筒 (Stanton, 1989) などの

単純な形状に近似して音響反射を推定していた。さらに Stanton *et al.* (1988) が、プランクトンの形状を薄い円筒の集まりとして比較的忠実に形状近似できる変形ボルン近似・短円筒合成モデル（以降、DWBA モデルとする）の使用を提案した。そして、McGehee *et al.* (1998) が、ナンキョクオキアミ *Euphausia superba* のターゲットストレングスを小型の水槽で実測し、DWBA モデルによる理論値とのあてはまりが良いことを報告した。これは、動物プランクトンの体内構造が比較的単純であり、体全体の音響インピーダンスが均一であると仮定できるためであると考えられる。動物プランクトンの中でも、体内に油球を持つカイアシ類はモデルによる理論値と実測が合わないことが知られている（福田，2014）。また、頭足類であるイカ類についても、音響インピーダンスを均一と仮定したモデルでは当てはまりが悪いことが分かっている（工藤，2020）。一方、イカ類の体内の構造をより細かく考慮した理論計算を行い、実測に近い結果が得られた例もある（Lee *et al.*, 2012）。

無鰾魚については、動物プランクトン同様、鰾のような強散乱体がないため、ターゲットストレングスは有鰾魚に比べ小さく、魚肉、骨、内臓、鱗などが複合的に寄与してくるため取り扱いが難しく、音響研究がほとんど進んでいない。一方で、北海道周辺においては、ホッケ、イカナゴ、ソウハチ、キチジ、アブラコといった無鰾魚が生息しており、中でもホッケやイカナゴ、ソウハチは商業的価値も高く、音響調査の対象となりえる。今までに無鰾魚の音響研究で多く実施されているのは、北大西洋に広く分布している大西洋サバであり、続いてイカナゴなどの研究例がある。無鰾生物については、周波数特性があることが知られており、音響調査で使われる計量魚探機の周波数におけるターゲットストレングスの違いやその要因、サイズ依存性、魚体形状との関係などについて報告されている。

まず周波数特性については、Korneliussen (2010) は、大西洋サバ（平均体長

33.6 cm) について、周波数 200 kHz での反応の強さは周波数 38 kHz での反応の強さの 4 倍であることを報告した。さらに Scoulding *et al.* (2017) は、現場で大西洋サバのターゲットストレングスを測定し、大きい方から順に、200 kHz, 120 kHz, 38 kHz であったと報告している。また、Safruddin *et al.* (2013) は、理論モデルで推定したイカナゴの周波数 38 kHz でのターゲットストレングスは 120 kHz でのターゲットストレングスより大きいことを示した。また、Mosteiro *et al.* (2004) は現場でパッチを形成しているイカナゴを対象として周波数特性を調べ 120kHz と 38kHz とでは 120kHz の方が大きいと報告した。さらにホッケについても、高嶋 (2006) は、周波数 38 kHz および 120 kHz で海中に吊り下げた個体のターゲットストレングスを実測し、周波数 120 kHz の方が大きいことを報告している。また、Jech *et al.* (2017) はマナガツオについて、フィールド調査で体積後方散乱強度を測定するとともに、理論モデルを使用して周波数特性を調査し、高周波数になるほど反射が強くなることを報告している。以上のように概ね無鰾魚のターゲットストレングスは高周波ほど大きくなるという特性を示している。

一方、このような周波数特性が起きる理由として、骨の影響だとする研究例がはじまっている。Gorska *et al.* (2007) は、理論モデルで魚肉と背骨の影響を調べ、周波数 70 kHz 以上になると音響散乱は主に背骨によるものと報告している。また、Nesse *et al.* (2009) は周波数 65 kHz から 470 kHz で大西洋サバの頭や骨を取り除いた魚体のターゲットストレングスを測定し、背骨の影響は高周波数で強かったと報告している。Forland *et al.* (2014) は、実験水槽で周波数 100 kHz～280 kHz を用いてイカナゴやその背骨のターゲットストレングスを測定し、180 kHz 以上の周波数ではイカナゴの音響散乱は背骨が主導していることを報告している。以上、骨の影響について研究され始めたがまだ解決されておらず、引き続きの研究が必要である。

周波数による特性があるとそれを用いて、複数の周波数によるサイズ推定や種判別が可能である。このような研究の行う最初の取り組みは、1979 年に Greenlaw によって行われた。これは、2 周波数における単位体積当たりの音響散乱の違いは、2 周波数におけるターゲットストレングスの違いによると考え、理論モデルで推定したターゲットストレングスの比から生物のサイズを推定したものである。この研究以降、動物プランクトンの種判別（金, 2016）、魚類と動物プランクトンの判別（Miyashita *et al.*, 1998）などの研究がなされてきた。海洋には多くの生物種が生息するため、いかに正確に音響データから種の判別を行うかが、音響手法による資源量推定の精度を左右する。したがって、無鰾魚の音響散乱特性が解明でき、有鰾魚や同じ無鰾生物の動物プランクトンなどとその特性が異なれば、音響的に識別できる可能性がある。

また、無鰾魚の体長とターゲットストレングスの関係もよく調べられている。Gauthier and Horne (2004) はシシャモ、ニシン、スケトウダラの有鰾 3 種とホッケ、キュウリウオの無鰾 2 種のターゲットストレングスを、周波数 12 kHz から 200 kHz の 5 周波数で KRM モデルにより推定し、体長とターゲットストレングスの関係式を導いた。そして、無鰾 2 種の体長 1 cm あたりのターゲットストレングスが有鰾 3 種のそれより約 10 dB 以上小さいことを報告した。Thomas *et al.* (2002) はイカナゴのターゲットストレングスを周波数 120 kHz で測定し、体長との関係を調べた。Yasuma *et al.* (2009) は、イカナゴのターゲットストレングス推定に必要な音響インピーダンスを測定し、変形短円筒モデルで周波数 38 kHz と周波数 120 kHz における幼魚と成魚のターゲットストレングスー体長関係式を求めた。これらのターゲットストレングスの体長依存性を利用することで、対象生物のサイズ推定が可能となる。

以上の通り、無鰾魚の音響散乱の周波数特性が明らかになれば、それを利用して現場で無鰾魚の判別が可能となり、無鰾魚のターゲットストレングスの体長

依存性が導かれていれば、そこから対象生物の体長が推定できる。周波数特性については、近年、単一の周波数ではなく、広い周波数帯の超音波を利用できる計量魚探機（広帯域計量魚探機）の開発が進んでいる。広帯域計量魚探機は、距離分解能が高いため魚群内の魚を対象として数多くの魚のターゲットストレンジスを個体別に測定することが可能となる。また、連続した周波数の音響散乱特性を調べることができるため、一度の測定で広い周波数帯域のターゲットストレンジスを調べることができ、音響散乱特性解明の一助になる。

そこで本研究は、広帯域計量魚探機を用いて無鰾魚のターゲットストレンジスを測定し、その周波数特性や体長依存性などの音響散乱特性を明らかにするとともに、その要因を調べることを目的とした。さらに、その特性を利用した現場海域における他種との音響判別の可能性を調べた。

本研究の対象魚種としては、北海道周辺海域に生息する、ホッケ *Pleurogrammus azonus*、イカナゴ *Ammodytes personatus*、ソウハチ *Cleisthenes pinetorum* とした。その理由は次のようである。

北海道周辺海域には無鰾魚で重要な水産魚種が多く棲息している。ホッケ、イカナゴ、ソウハチ、キチジなどが重要な水産資源であり、正確な資源量の把握が必要となる。

ホッケは北海道周辺の沿岸から沖合にかけて多様な漁業によって漁獲され、その漁獲量は 1993～2009 年までは年間 10 万トンを超えたが、2010 年以降急激に減少し、2015～2017 年は 1.7 万トンの最低水準になった（北海道水産現勢）。そのため、ホッケの資源量を把握し適正に管理する必要がある。

また、イカナゴは、九州から北海道にかけての沿岸粗砂域に広く分布し、鯨類や海鳥等高次捕食者の餌生物として海洋生態系で重要な役割を果たしている。特に当歳魚は、瀬戸内海、伊勢湾、仙台湾等において春季の重要な漁業対象種となっており、漁業資源として持続的に利用するためにも、イカナゴの分布情報や

現存量の把握は重要である（松倉，2013）。

ソウハチはカレイの一種であり，底層魚であるが，餌を追って表・中層まで群れで泳ぐ習性を持っているため，音響探知が可能である。北海道道南海域におけるソウハチの漁獲量は，1998 年の 500 トンから 2016 年の 4700 トンに増加し，資源の有効利用のため資源量をモニタリングする必要がある（北海道立総合研究機構水産研究本部，2019）。

これらの魚種の音響特性がわかれば音響手法による資源量の把握が期待できる。また，ホッケは紡錘型（fusiform），イカナゴは延長型（attenuated form），ソウハチは平たい形をした強側扁型（truncated form）であるため，3 種の音響散乱特性を比較することで体形の違いによる比較が可能となる。

以上，これら無鰾魚の音響散乱特性が明らかになり，その特性が何に起因するか，また，有鰾魚や他の無鰾生物との特性に違いを見出すことが出来れば，音響手法を用いたこれらの無鰾魚の高効率の音響資源調査が可能となる。

1.2 論文の構成

本章では、音響資源調査とターゲットストレングス、無鰮魚の音響研究について述べ、第2章でターゲットストレングスの基礎理論と推定法を述べる。第3章では、大型水槽で自由に遊泳しているホッケとソウハチのターゲットストレングスを自由遊泳法 (*semi-in situ*) で測定するとともに、ビデオカメラを用いて両種の遊泳姿勢角を調べる。次に、第4章では、海水水槽において無鰮魚であるホッケ、イカナゴ、ソウハチのターゲットストレングスの姿勢角特性を広帯域計量魚探機で精密に測定する。第5章では、第4章で用いた個体の形状を使って、無鰮魚のターゲットストレングスを3種類の音響モデルで推定し、第4章の結果との比較を行い、無鰮魚の音響散乱特性について述べる。第6章は、無鰮魚であるソウハチと他魚種が混在する北海道噴火湾をモデルケースとして音響調査を行い、音響散乱特性を用いた種判別を試みる。第7章において、自由遊泳法、懸垂法、自然法で得られた結果を比較して無鰮魚の音響散乱特性をまとめ、その問題点や意義、また今後における応用や将来性について示す。

第2章 ターゲットストレングスの基礎理論と推定法

2.1 ターゲットストレングスの定義と重要性

水産音響におけるターゲットストレングスは、魚の音響散乱の度合いを示すものであり、魚に入射した超音波がどれくらい跳ね返されるかを表す指標である。いま、トランスデューサから超音波が発射され、魚に入射するときの強度を I_i 、魚体で反射されトランスデューサ方向へ単位距離 r_0 戻った位置における散乱波の強度を I_r とすると、後方散乱断面積 σ_{bs} は次式であらわされる。

$$\sigma_{bs} = r_0^2 \frac{I_r}{I_i} \quad (2.1)$$

(2.1) 式で基準距離を 1 m とすると、ターゲットストレングス TS は次の式で定義される。

$$TS = \frac{I_r}{I_i} \quad (2.2)$$

ターゲットストレングスは大きく変化するため、次式のように対数をとって 10 倍し、デシベル値として表すことが多い（飯田，1994）。

$$TS = 10 \log_{10} TS = 10 \log_{10} \frac{I_r}{I_i} \quad (2.3)$$

トランスデューサから発射された超音波は、海水中を伝搬し、ターゲットに当たり跳ね返され、またトランスデューサに戻ってくる。この過程を式にあらわしたものが水中音響方程式と呼ばれる。ターゲットが単体の場合、トランスデューサに戻ってくる音響強度 I_s は次式で表現できる。

$$I_s = I_0 \frac{10^{-0.2\alpha r}}{r^4} b^2(\theta) Ts \quad (2.4)$$

ここで、 I_0 は送波強度、 r はターゲットまでの距離、 α は吸収係数、 $b(\theta)$ は θ 方向の指向性関数値である。

ターゲットが群体となった場合、個体数密度 ρ の群体から戻ってくる音響強度 I_m は次式で表現される。

$$I_m = I_0 \frac{10^{-0.2\alpha r}}{r^2} \Psi \frac{c\tau}{2} \rho Ts \quad (2.5)$$

ここで、 Ψ は等価ビーム幅、 c は音速、 τ はパルス幅である。 ρTs は単位体積当たりの超音波の散乱量であり、体積後方散乱係数 Sv と呼ばれ、このデシベル表現が体積後方散乱強度 SV と呼ばれている。

$$Sv = \rho Ts \quad (2.6)$$

$$SV = 10 \log Sv \quad (2.7)$$

さらに体積後方散乱係数 S_v を深さ方向に積分し，単位面積当たりの超音波の散乱量として表したのが面積後方散乱係数 S_a と言われるものである。

現在，音響資源調査において用いられているエコー積分法は，(2.5) 式を基本として空間的に広域にわたる魚群からのエコー強度を積分し，平均体積後方散乱係数 (S_v) を求め，それをターゲット 1 個体あたりのターゲットストレングスで除することによって個体数密度を求める。従って，ターゲットストレングスの精度が個体数密度の精度，最終的には推定資源量の精度を左右する。

2.2 ターゲットストレングスの推定法

単体を対象とした (2.4) 式において、 T_s について解くとターゲットストレングスが求まるが、通常、音響ビーム内のターゲットの位置が不明なので指向性関数値 $b(\theta)$ がわからず、ターゲットストレングスを求めることが出来ない。そこで、これを克服しターゲットストレングスを知るための方法として、制御法や自然法がある。また、(2.4) 式によらず魚を物理的なモデルとして、その散乱振幅を計算することにより、ターゲットストレングスを求める音響モデル法もある。以下に各推定法について述べる。

2.2.1 制御法 (*ex situ*)

制御法は、懸垂法とケージ法などに分けられる。懸垂法は、魚を音軸上の一点に静止させ、回転装置を用いて様々な角度でターゲットストレングスを測定する。これにより、魚のターゲットストレングスの体長依存性、姿勢依存性を調べることができる。また、魚種の違いによるターゲットストレングスの違いを知ることができる。ケージ法は、漁網やテグスなどで作成した網かご内に複数の魚を入れて S_v を測定し、これを網かご内で泳いでいる魚の密度で除してターゲットストレングスを求める方法である。網かご内で比較的自由に遊泳している状態で測定するため、平均的なターゲットストレングスを知ることができる。また、同時に網かご内の写真や動画を撮ることで魚の遊泳状態も知ることができる。制御法によるターゲットストレングスの測定では、ターゲットを音軸上に制止させるためトランスデューサの指向性の影響を受けないので、魚種、体長、姿勢などについて精密な測定ができる。一方、魚に麻酔をかけたりテグスで吊るしたりするので、魚の状態が自然状態とは言えず、麻酔による組織の変化や網内の魚の異常行動などによる影響が残される。

2.2.2 自然法 (*in situ*)

自然法は、実際に現場で自然に遊泳している魚から得たエコー信号からターゲットストレングスを求める方法である。デュアルビーム法やスプリットビーム法など複数の音響ビームを用いることで魚の位置を把握し、(2.4) 式における指向性の影響を取り除く直接法と、多くのエコー信号を得てそこから統計的に $b(\theta)$ の影響を取り除いてターゲットストレングスを求める間接法、(2.4) 式において体積後方散乱係数を測定しそれを密度で割って平均ターゲットストレングスを求める SV 法などがある。直接法においては、現在、スプリットビーム法が主に使われている。これは主に 4 つのトランスデューサで受け取ったエコー信号の位相差から音波の到来方向、すなわち、トランスデューサから見た魚の方向を知り、指向性関数によりエコー強度を補正してターゲットストレングスを求めるものである。この方法では魚の 3 次元位置情報がわかるので、魚の遊泳行動に関する情報も得ることが出来る。間接法では、(2.4) 式で得られた音響強度 I_s は魚のターゲットストレングスの確率分布と指向性関数の確率分布の畳み込みであらわされることから、統計的手法を用いて逆演算を行ってターゲットストレングスの分布を推定する。したがって体長情報や遊泳姿勢角分布情報を含めた平均的なターゲットストレングスを求めるものである。SV 法は、広い海域のすべての単体および群体からの音響散乱を対象とし、そこから得られた平均体積後方散乱係数を、漁獲やカメラ情報などから求めた対象生物の分布密度で除して平均ターゲットストレングスを求める。自然法では、実際の自然状態での魚のターゲットストレングスを測定できるため、得られた値は魚の生理状態、遊泳行動や体長などの情報が含まれた平均的なものである。しかし、実際に測定している魚の種類や体長、状態などは未知であるため、あくまでも平均的な値としての利用になる (Soule *et al.*, 1995)。

2.2.3 音響モデル法

魚を対象とした音響モデルは、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方法である。澤田（2000）は、音響理論モデルのメリットを次のようにまとめた。

1. 測定の数減らすことができる
2. 体長、周波数や姿勢角に対する特性を予測することができる
3. 実験的方法で得られた体長とターゲットストレングスの関係式に理論的な根拠を与える
4. 周波数特性の予測および実測との比較により魚種判別に使用できる
5. 計量魚探機的设计時にターゲットストレングスの大まかな目安を与える

このように、音響理論モデルによるターゲットストレングス推定のメリットは多いが、モデルにより適用条件が異なり、計算の複雑さや当てはまり具合も変わる。そこで、使用目的に応じて、適切なモデルの選択が必要である（Horne and Clay, 1998 ; Jech *et al.*, 2015）。

2.3 本研究で用いたターゲットストレングス推定法について

本研究では、無鰾魚の音響散乱特性を調べるため、スプリットビーム式計量魚探機を用いて海水水槽で自由に遊泳している魚のターゲットストレングスを測定する自由遊泳法、テグスで魚を懸垂してターゲットストレングスのピッチ角特性を計測する懸垂法、魚体形状などをモデル化して物理モデルを使ってターゲットストレングスを推定する理論モデル法を用いて、無鰾魚の音響散乱特性を調べた。

第3章 自由遊泳している無鰾魚のターゲットストレングスと遊泳姿勢角の測定

3.1 緒言

自然法は、自然状態の魚のターゲットストレングスを直接測定できるため、得られたターゲットストレングスは魚の生理状態、遊泳行動や体長分布などの情報が含まれており、ターゲットストレングス推定に有効な手段である。この方法では、特にスプリットビーム式計量魚探機を使うことにより、音響ビーム内の魚の3次元位置を知ることができるので、得られたパルス毎の魚の位置情報をトレースすることにより、ターゲットストレングスだけでなく魚の遊泳方向や遊泳行動などの情報を得ることもできる。しかし、一般に探知した魚の種類や体長は分からず、また、複数魚による群体エコーを単体エコーとして誤認識する可能性もある。

そこで本章では、魚種や体長が既知の活魚を大型実験水槽で自由遊泳させ、スプリットビーム式計量魚探機を用いて無鰾魚のターゲットストレングスを測定した。さらに、同時にカメラで観察することにより確実に単体エコーであることを確認した。本研究では自然法と区別するため、「自由遊泳法」と呼ぶ。また、魚が自然に遊泳している状態で得られたターゲットストレングスを *in situ* ターゲットストレングスと呼ぶが、今回の実験では大型実験水槽で行っており、海的环境とは違うため、「*semi-in situ* ターゲットストレングス」と呼ぶことにする。

今回用いた無鰾魚は、ホッケとソウハチである。両種とも音響散乱特性がほとんど調べられておらず、遊泳姿勢に関する情報もない。魚のターゲットストレングスは、魚への音波の入射角により大きく変化するため、遊泳姿勢角の変動は魚のターゲットストレングスに大きく影響する。一般に魚の平均ターゲットスト

レンジを求める際には、魚の遊泳姿勢角分布を考慮する (Foote, 1980)。そのため、対象種の正確な遊泳姿勢を知る必要がある。そこで、本章は自由遊泳中のソウハチやホッケのターゲットストレンジを測定するとともに、スプリットビーム式計量魚探機およびビデオカメラにより両種の遊泳姿勢を調べた。

3.2 方法

3.2.1 海水水槽における自由遊泳魚のターゲットストレングス測定

実験は、2019 年 6 月 13 日から 18 日までの間、函館市国際水産・海洋総合研究センター（以降、海洋センターとする）の大型実験水槽（長さ 10 m、深さ 6 m、幅 5 m、容量約 300 トン）において行った。実験の概要図を Fig. 3.1 に示す。実験に用いた計量魚探機は Simrad 社製の EK80 で、パルス幅 2 ms、トランスデューサは広帯域対応の ES70-7C（Simrad 社製）を用い、周波数は 50～85 kHz（分解能 0.061 kHz），中心周波数 70 kHz の広帯域とした。このトランスデューサは Fig. 3.1 に示すように、水槽上部の足場に固定した木製の板に取り付け、単管パイプを用いてトランスデューサの振動面が深度約 50 cm で下向きになるよう設置した。そして、パルス繰り返し周波数 2.5 Hz で音響データを収集した。音響データはネットワークを介してノートパソコン内蔵の HDD に収録した。音響システムの較正は、直径 25 mm のタングステンカーバイド製の較正球をトランスデューサから距離 3.5 m のところに吊下して行った（Foote, 1987; Demer *et al.*, 2015）。使用した較正球は、測定周波数帯においてターゲットストレングスの理論値が安定しており、極端な落ち込みである Null 点などは見られない大きさを選択した（Fig. 3.2）。ターゲットストレングス測定前後には、水槽内の海水の水温と塩分の測定を行い、実験時の水温・塩分は概ね 15 °C，32.5 psu であった。

実験に用いたソウハチは、2019 年 4 月、5 月に噴火湾湾口部で竿釣りにより採集したものである。一方、ホッケは、2019 年 5 月 29 日に函館市古部沿岸の定置網で採集したものである。採集した個体は、海洋センターにある円筒形海水水槽（10 トン、深さ約 1 m、直径約 3.5 m；水温約 10 °C，塩分約 32 psu）において

実験直前まで飼育を行った。餌は一日一回、冷凍ナンキョクオキアミを解凍して、適量を与えた。

6月13日～6月17日はソウハチを、6月18日はホッケを実験対象とした。ソウハチの期間が長いのは、ソウハチは環境に慣れにくく、慣れないと遊泳しないため、馴致する時間が必要であったためである。実験にあたり、Table 3.1 に示す体長 27cm 前後のソウハチ 10 個体 ($\text{Mean} \pm \text{S.D.} = 26.9 \text{ cm} \pm 1.67 \text{ cm}$) を選んで大型実験水槽に移した。そして 5 日間、ソウハチを水槽内で自然遊泳させた。その後、網でソウハチを回収し、Table 3.2 に示すホッケ 4 個体 ($\text{Mean} \pm \text{S.D.} = 33.8 \text{ cm} \pm 1.95 \text{ cm}$) を入れた。実験中は、毎日午前 10 時に給餌し、給餌してから 1 時間のデータは除外した。

音響データの解析は、Echoview 10 ソフトウェア (Echoview) を使用して行った。Echoview の single target detection-wideband 機能と Fish tracking 機能を使用してエコートレース解析を行い、ターゲットストレングスや魚の三次元座標を算出した。ここでデータの解析は、トランスデューサのビーム幅、近距離音場 (澤田ら, 2003) , カメラの設置位置を総合的に考え、トランスデューサから距離 4 m 以遠のデータについて行った。

Echoview で解析に用いたパラメータを Table 3.3 に示す。エコートレース解析により抽出された魚の 3 次元座標をもとに、パルス間の位置の移動から求めた遊泳方向を、本研究では「音響姿勢角」とした。

魚のターゲットストレングスは体長により変化し、後方散乱断面積 σ_{bs} は魚の体長の 2 乗に比例する (飯田, 1988) 。魚の体長を L cm, 魚種ごとに変化する比例定数を a とすると、次の関係がある。

$$\sigma_{bs} = a L^2 \quad (3.1)$$

これをデシベル表示すると,

$$TS = 20 \log L + TS_{\text{cm}} \quad (3.2)$$

となる。ここで、 TS_{cm} は規準化ターゲットストレングスと呼ばれ、体長 1 cm あたりのターゲットストレングスを示す。一般的にはこの TS_{cm} で魚種間のターゲットストレングスを比較する。

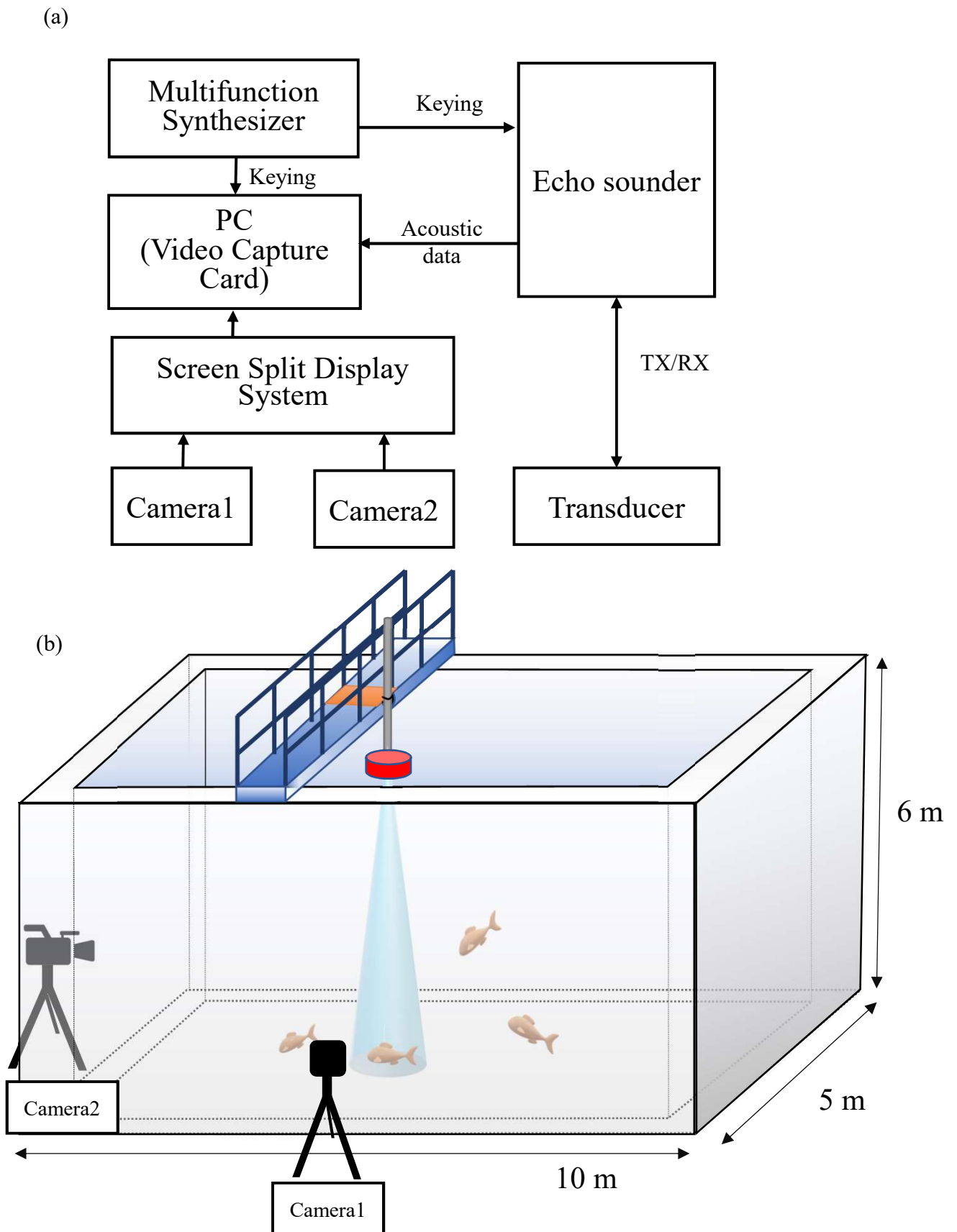


Fig. 3.1 自由遊泳法によるターゲットストレングス測定と遊泳姿勢観察の概要.
 (a) 測定システムのブロック図； (b) 実験水槽と機器配置

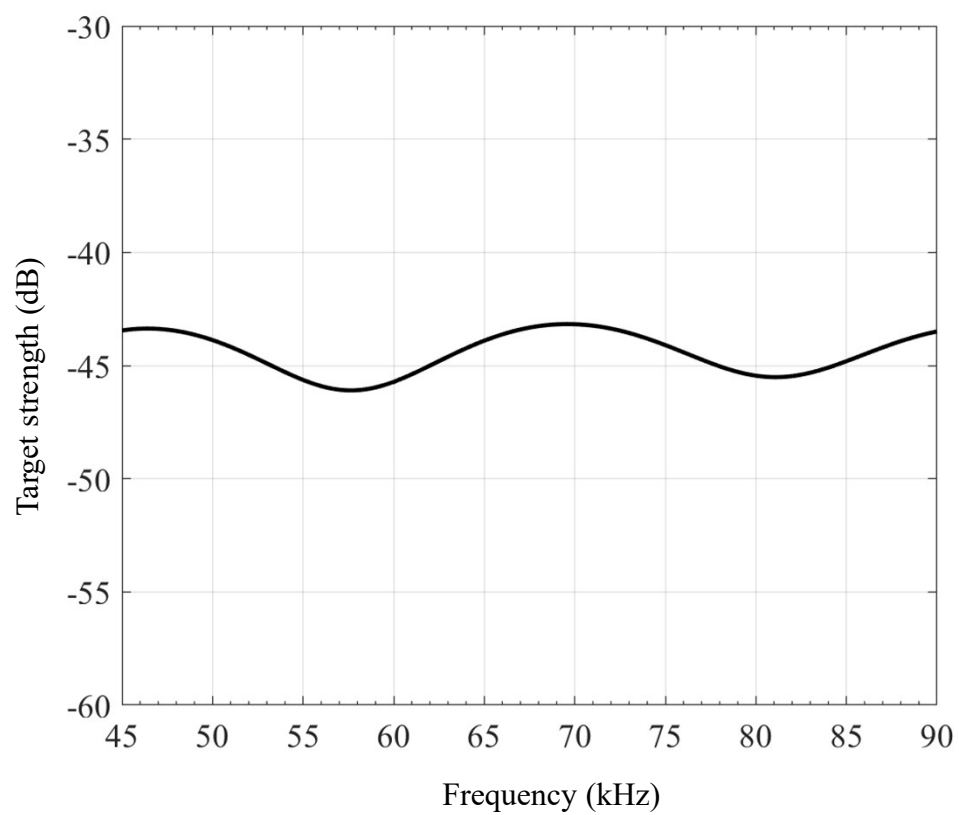


Fig. 3.2 直径25 mm のタングステンカーバイド製較正球のターゲット
ストレングスの周波数特性.

Table 3.1 自由遊泳法によるターゲット
ストレングス測定に用いたソウハチの
体長，体幅，体高.

No.	TL (cm)	Width (cm)	Height (cm)
1	27.8	14.2	1.9
2	24.8	13.0	1.6
3	26.9	14.1	1.7
4	29.9	15.5	1.9
5	27.9	14.6	2.1
6	27.2	14.7	1.9
7	28.2	14.2	1.9
8	24.7	12.8	1.5
9	25.4	13.0	1.8
10	25.9	13.0	1.6
Mean	26.9	13.9	1.8
S.D.	1.67	0.92	0.19

Table 3.2 自由遊泳法によるターゲット
ストレングス測定に用いたホッケの体
長，体幅，体高.

No.	TL (cm)	Width (cm)	Height (cm)
1	34.6	3.8	6.3
2	33.6	4.1	6.1
3	31.2	3.9	6.5
4	35.8	4.4	6.7
Mean	33.8	4.1	6.4
S.D.	1.95	0.26	0.26

Table 3.3 Echoviewによる単体検出ならびに広帯域データ処理に用いたパラメータ.

Parameter	Value
TS threshold	-70 dB
Pulse duration determination level	6.00 dB
Minimum normalized pulse length	0.50
Maximum normalized pulse length	1.50
Maximum beam compensation (Two-way)	12 dB(10°)
Maximum standard deviation of minor-axis angles	0.6 degrees
major-axis angles	0.6 degrees
Minimum number of single targets on a track	3
Minimum number of pings in track	3
Maximum gap between single targets(pings)	2

3.2.2 ビデオカメラによる遊泳姿勢角の測定

ターゲットストレングス測定時の魚の遊泳姿勢を観察するため、Fig. 3.1 に示すように水槽の正面と側面にビデオカメラ（Sony）を設置した。そして、これら2つのビデオカメラの画面を、画面分割器（Color Quad Processor, Artnix QS-241CX）で1つの画面としてノートパソコンにビデオキャプチャーカード（ImperX, VEC-Pro）を介して取り込んだ。この時、計量魚探機とビデオキャプチャーをマルチファンクションシンセサイザー（NF 回路設計ブロック, WF1946B）による外部トリガーで同期し、同じパルス繰り返し周波数（2.5 Hz）で音響データと画像の取り込みを行った。

ビデオカメラで収録した画像データは、ImageJ（National Institutes of Health）を用いて遊泳姿勢角の算出を行った。ここで、魚が水平状態の時に姿勢角 0° とし、魚が水平より頭を下げた状態をマイナス、頭を上げた状態をプラスの姿勢角とした。画像内の水平・垂直方向の確認は、壁面に沿って水面から吊下した錘付のロープで行った（Fig. 3.3）。

次に、遊泳姿勢角の求め方を述べる。Fig. 3.4 のように、水槽正面及び側面の二つのカメラを同期して捉えた画像から ImageJ を用いて魚の姿勢角 θ_1 と θ_2 を測定し、次式を用いて三次元姿勢角 θ を求めた。

$$\theta = \arctan \frac{\tan \theta_1 \tan \theta_2}{\sqrt{\tan^2 \theta_2 + \tan^2 \theta_1}} \quad (3.3)$$

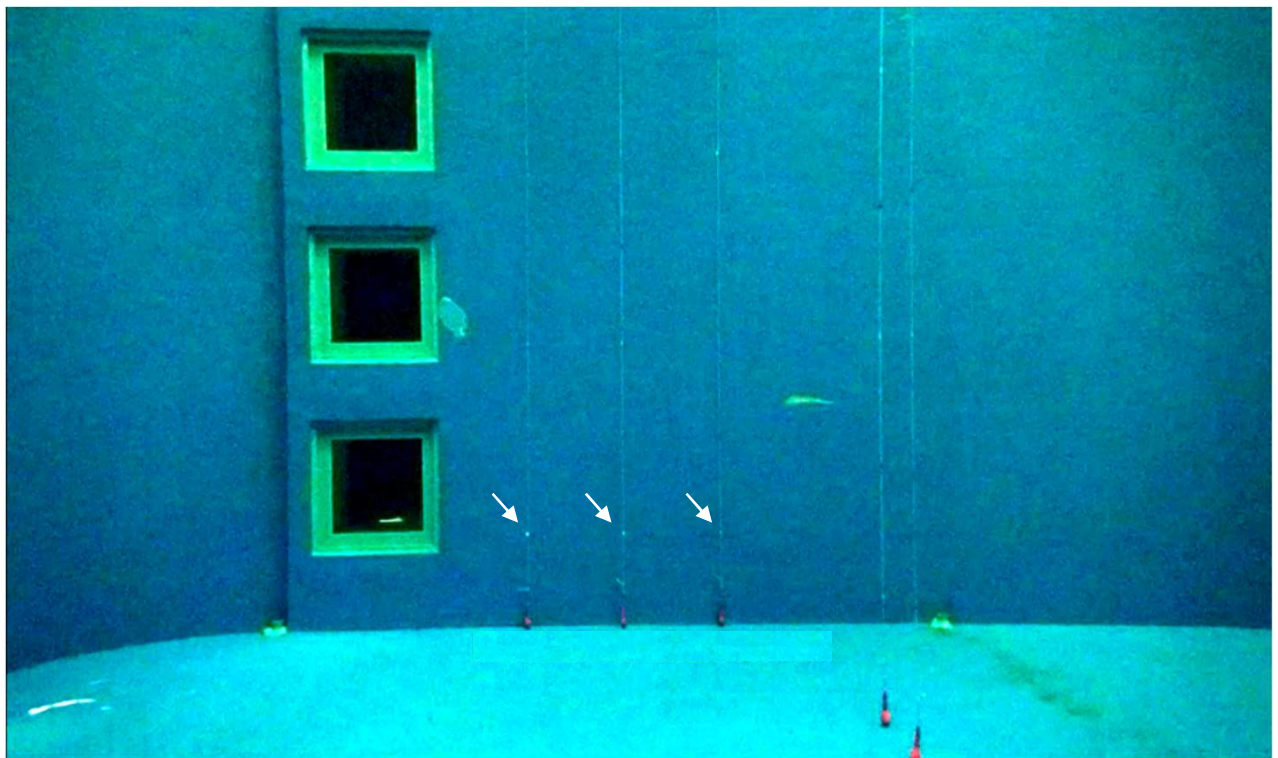


Fig. 3.3 水槽正面に設置したビデオ画像の例（ソウハチが個2体見える）。魚の遊泳姿勢を測定するために必要な水平垂直軸の較正は，水槽壁面と水槽中央に見える水面から垂下したロープで行った．水槽底面に見える赤い物体はそのロープの先についている錘である．

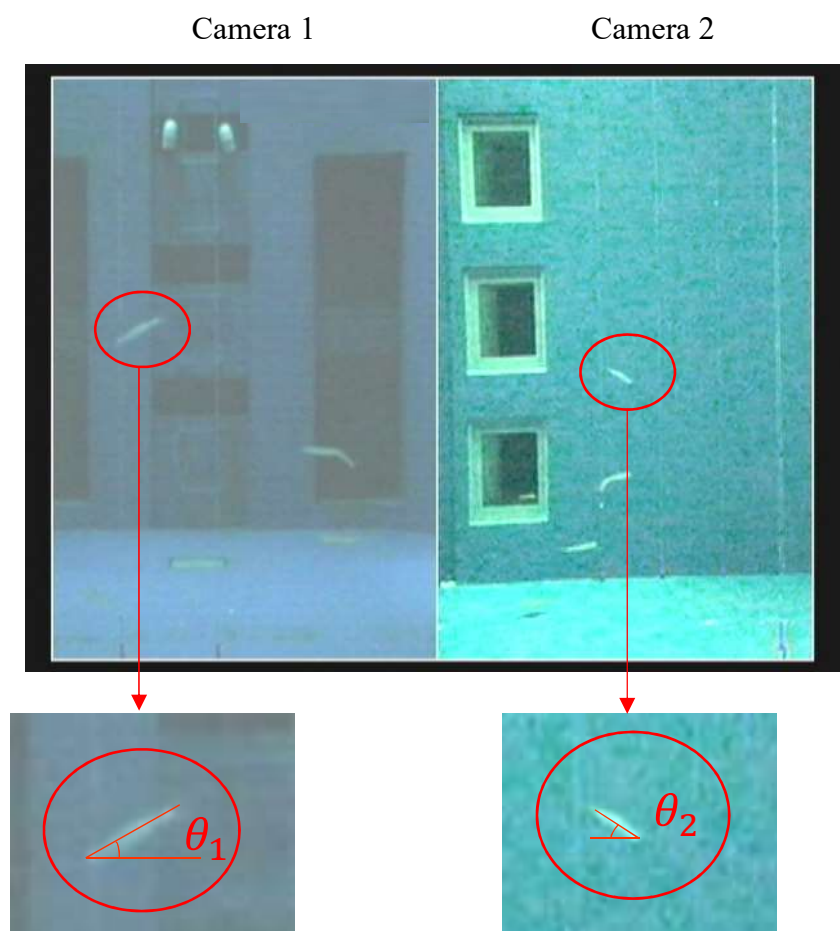


Fig. 3.4 大型実験水槽における魚の遊泳姿勢角の測定.

3.3 結果

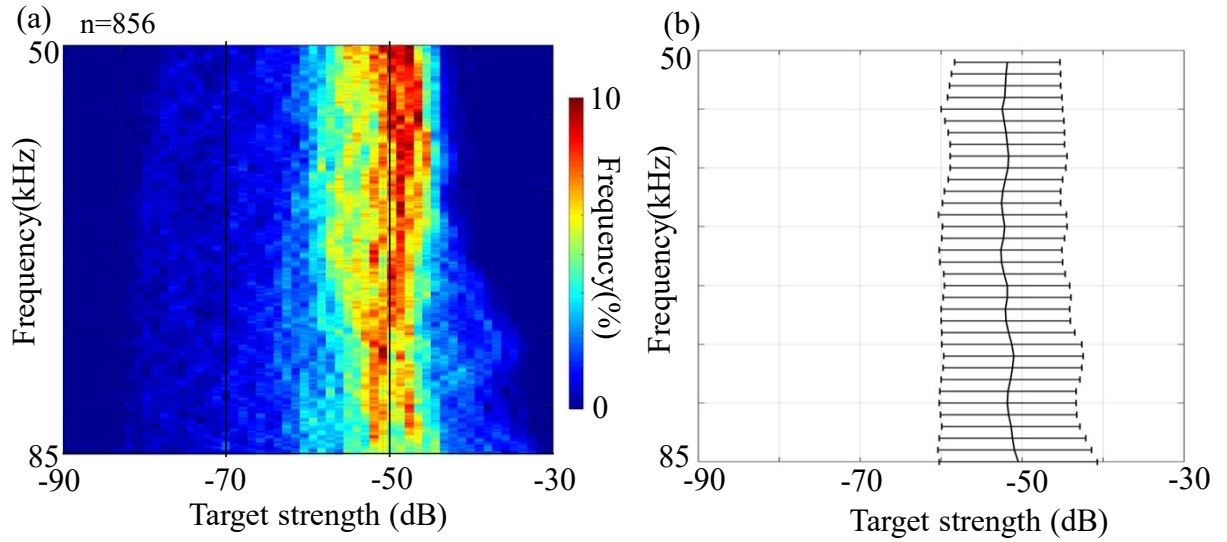
3.3.1 ターゲットストレングスの頻度分布

エコートレース解析により得られた全長 24.7 cm～29.9 cm のソウハチ 10 個体分のターゲットストレングスと全長 31.2 cm～35.8 cm のホッケ 4 個体分のターゲットストレングスの頻度分布を Fig. 3.5 に示す。上はソウハチ，下はホッケの結果であり，左右の図とも縦軸は周波数，横軸はターゲットストレングスを表している。左半分の図は，エコートレース解析で 1 個体と判断されたエコーの各周波数におけるターゲットストレングスの平均値の頻度を示している。右半分の図は，各周波数におけるターゲットストレングスをデシベルスケールで平均して求めた平均ターゲットストレングス（縦線）とその標準偏差（横線）を示している。全体的に見ると，両種とも高周波数になるほどターゲットストレングスの分布範囲が広がっていく傾向がみられた。また，ソウハチのターゲットストレングスは全体的に幅広く，50～85 kHz で標準偏差は 6.4 dB から 9.8 dB まで分布していた。一方，ホッケのターゲットストレングスの標準偏差は 4.2 から 9.0 dB まで分布していた。また，今回測定した周波数帯では，ソウハチについては約-50 dB 付近にモードが見られ，ホッケについては-60 dB にモードがあった。

次に両魚種のターゲットストレングスの周波数特性を見るために，Fig. 3.5 のデータについて，周波数毎に，ターゲットストレングスの最大値と後方散乱断面積で平均したターゲットストレングスの平均値を求めた。それらの変化を Fig. 3.6 に示す。左はソウハチ，右はホッケであり，横軸は周波数，縦軸はターゲットストレングス，赤線は最大ターゲットストレングス，黒線は平均ターゲットストレングスを表している。全体的に見ると，両種とも周波数が高くなるほどターゲットストレングスが大きくなる傾向がみられた。ソウハチについては 85 kHz

で最大ターゲットストレンジスが 50 kHz より 9 dB 大きく、平均ターゲットストレンジスが 7 dB 大きく、ホッケについて 85 kHz での最大ターゲットストレンジスが 50 kHz より 13 dB 大きく、平均ターゲットストレンジスが 11 dB 大きいことが分かった。従って、ターゲットストレンジスの変化の割合はホッケのほうが大きかった。また、ホッケの方が体長は大きいにもかかわらず、ソウハチのターゲットストレンジスより小さかった。最大ターゲットストレンジスと平均ターゲットストレンジスを比較すると、両種とも約 10 dB の差が見られた。

Pointhead flounder ($n=10$, $\overline{TL}=26.9$ cm)



Arabesque greenling ($n=4$, $\overline{TL}=33.8$ cm)

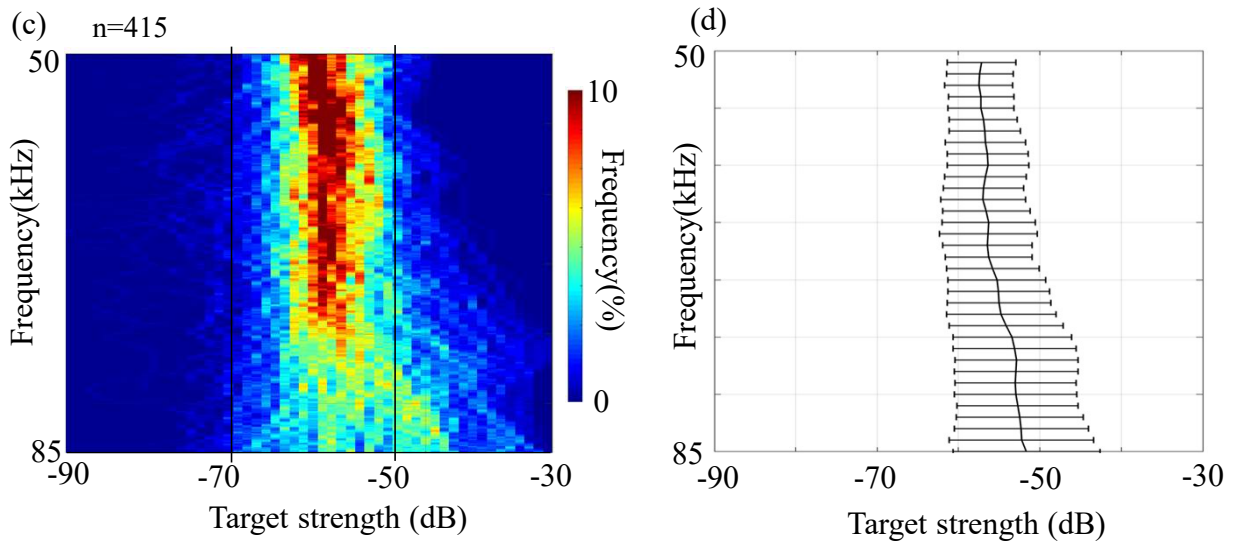


Fig. 3.5 自由遊泳法により測定されたソウハチ10個体（上）とホッケ4個体（下）のターゲットストレングスの頻度分布と周波数特性．右側の図は，各周波数におけるターゲットストレングスの平均値と標準偏差を表す．

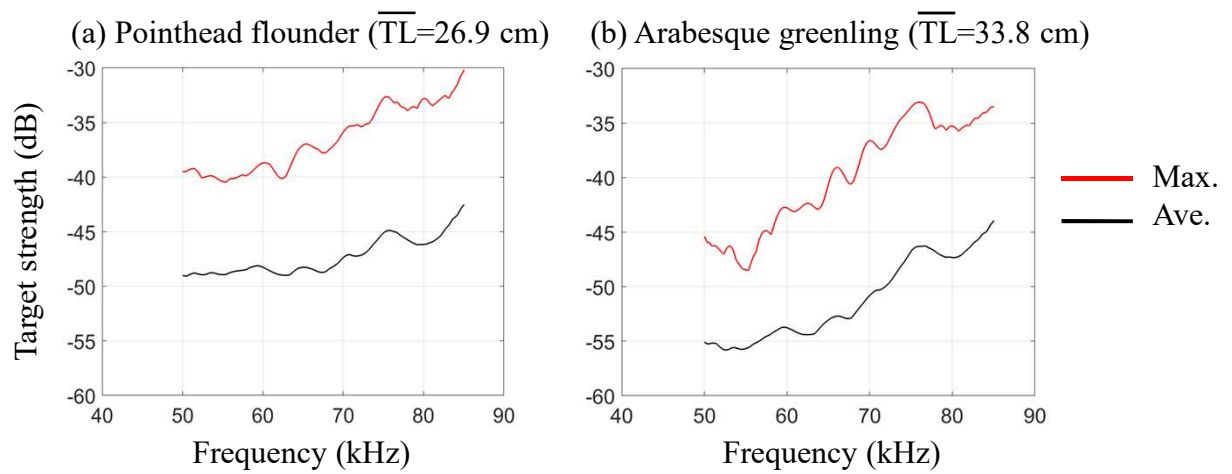


Fig. 3.6 ターゲットストレングスの周波数特性. 赤は最大ターゲットストレングス. 黒は平均ターゲットストレングス.
(a) ソウハチ, (b) ホッケ

3.3.2 音響姿勢角とビデオカメラで測定した遊泳姿勢角の分布

音響姿勢角の頻度分布を Fig. 3.7 に示す。左はソウハチ，右はホッケのデータを表し，横軸は角度，縦軸は頻度を表している。姿勢角分布を正規分布と仮定すると，ソウハチの音響姿勢角分布は平均 6.7° ，標準偏差 27.9° であり，ホッケの音響姿勢角分布は平均 5.8° ，標準偏差 22.7° であった。

一方，ビデオカメラによって観察された遊泳姿勢角分布を Fig. 3.8 に示す。左がソウハチ，右がホッケであり，同様に正規分布と仮定すると，ソウハチの姿勢角は平均 7.9° ，標準偏差 24.7° ，ホッケは平均 5.2° ，標準偏差 20.7° であった。どちらの方法，どちらの魚種においても，姿勢角の平均はプラス，つまり，頭を若干水平から持ち上げた状態であった。

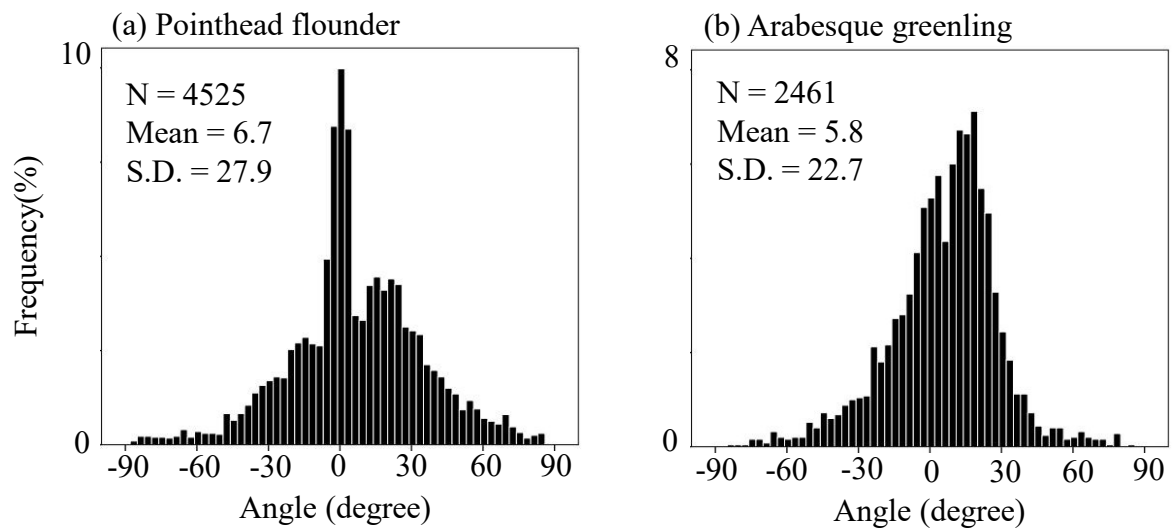


Fig. 3.7 エコートレース法で求めた遊泳方向（音響姿勢角）の頻度分布
(a)ソウハチ, (b)ホッケ.

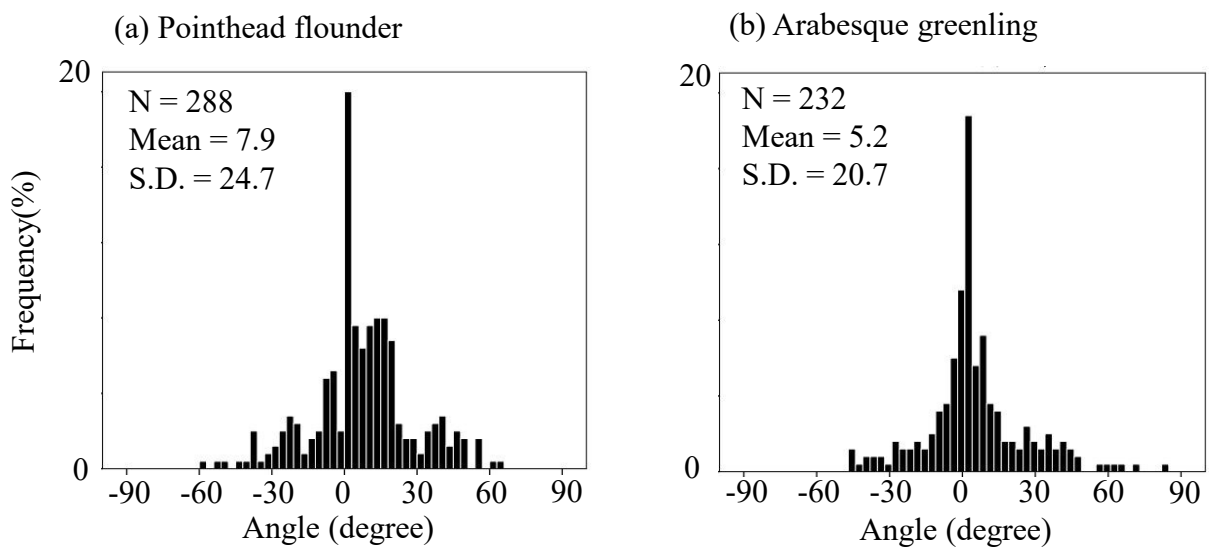


Fig. 3.8 2台のカメラで求めた遊泳姿勢角の頻度分布.
(a) ソウハチ, (b) ホッケ

3.4 考察

3.4.1 無鰐魚の *semi-in situ* ターゲットストレンジス

ソウハチとホッケのターゲットストレンジスの頻度分布を Fig. 3.5 で見ると、各周波数におけるソウハチのターゲットストレンジスの分布範囲は、周波数による変化はあまり見られなかった。一方、ホッケについては周波数が高くなるとターゲットストレンジスの分布範囲が広がっていた。これは指向性によるものと考ええる。

ソウハチとホッケのターゲットストレンジスの周波数特性を Fig. 3.6 で見ると、無鰐魚である両種の特性がほぼ同じであり、高周波数になるほどターゲットストレンジスが大きくなるという特徴がみられた。いままで調べられている無鰐魚の大西洋サバ (Korneliussen *et al.*, 2002; Scoulding *et al.*, 2017) , ホッケ (高嶋, 2006) , マナガツオ (Jech *et al.*, 2017) , カツオ (Boyra *et al.*, 2018) でも同じ周波数特性を示していた。この周波数特性について, Gorska *et al.* (2007) は、周波数 70, 120, 200 kHz において音響モデルで推定したターゲットストレンジスに同様の特性を見つけ、これは主に背骨に依存していると報告した。今回測定した周波数範囲に 70 kHz が含まれており、ソウハチとホッケの周波数特性の原因の 1 つとして、背骨の影響を調べる必要がある。

また、ホッケのターゲットストレンジスはソウハチのターゲットストレンジスに比べ、周波数増加に伴うターゲットストレンジスの増加率が大きかった。ここで、ホッケとソウハチの体長が異なるため、両者の比較を行うために体長の 2 乗で規準化した規準化ターゲットストレンジスを求め Fig. 3.9 に示した。横軸は L/λ , 縦軸は規準化ターゲットストレンジスを表している。この図から、同じ L/λ で、ソウハチ (赤線) のターゲットストレンジスは最大値、平均値ともにホッケ

(青線)より大きいことが分かった。この理由について、両種の体形状の違いと考えられる。ソウハチは強側扁型であり、同じ体長のホッケより音波が当たる断面積が広いと考えられる。一方、両種の周波数特性についてはほぼ一致していた。

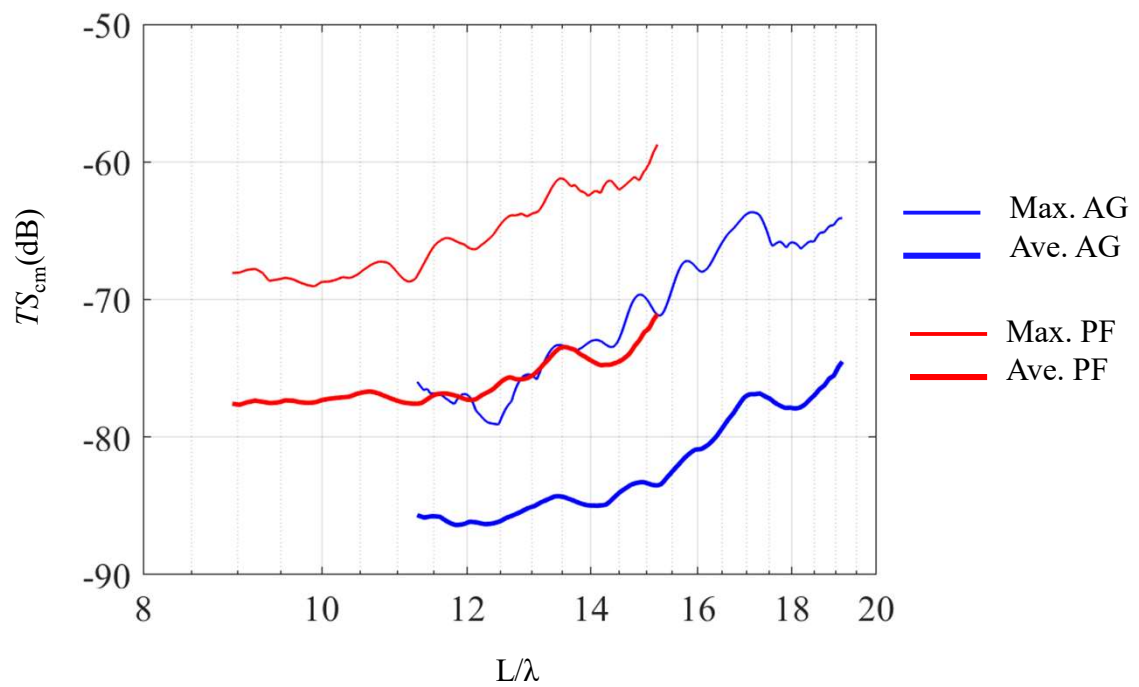


Fig. 3.9 波長で規準化した体長と体長の2乗で規準化したターゲットストレングスの関係. 赤はソウハチ, 青はホッケを示す. 太線は規準化平均ターゲットストレングス, 細線は規準化最大ターゲットストレングス.

3.4.2 無鰐魚の姿勢角分布

ソウハチの姿勢角分布について、エコートレース解析から求めたところ、平均、標準偏差はそれぞれ 6.7° 、 27.9° 、ビデオカメラで求めた結果は、それぞれ 7.9° 、 24.7° であった。平均姿勢角は 1.2° の差、標準偏差には 3.2° の差がみられた。これは姿勢角の計算方法が異なるためと考えられる。エコートレース解析では、パルス毎の魚の位置変動の軌跡から遊泳方向を求め、それを姿勢角としている。一方、ビデオカメラによる観察では、1パルス（枚）ずつの魚の実際の角度を求めている。これらの分布の違いをマン・ホイットニーのU検定で検定したところ、 $p>0.05$ となり有意な差がなかった。そのため、両方法で求めた遊泳姿勢角分布が違うと言えない。また、両方法で観察したソウハチの遊泳姿勢角分布はともに二峰性であり、 0° 付近と 15° 付近にモードが見られた。これについては、ソウハチは上向きに泳ぐとき、体を上下に波打つようにくねらせて泳ぐ様子が観察されており、水平方向または下方向に泳ぐときは滑空している様子がみられた。そのため、水平方向や下向き方向に泳ぐときの姿勢角分布のモードが 0° 付近に見られ、上向き方向に泳ぐときのモードが 15° 付近に見られたためと考えられる。これは体形が著しく側扁しているソウハチ独特の遊泳方法によるものと考えられた。また、二峰性であるため、姿勢角平均ターゲットストレングスを求めるときに、姿勢角分布を正規分布に仮定できないため、実際の姿勢角分布に従って平均ターゲットストレングスを計算することが適切だと考えられる。

一方、ホッケの姿勢角分布については、エコートレース解析から求めた結果は平均 5.8° 、標準偏差 22.7° 、ビデオカメラで求めた結果は平均 5.2° 、標準偏差 20.7° となり、平均姿勢角と標準偏差がともにほぼ一致していることが分かった。t検定で調べたところ、 $p>0.05$ となり、有意な差が認められなかった。従って、

ホッケについては両方法において求めた姿勢角分布が違うと言えないと結論付けられた。

以上のことから、エコートレースで計測したソウハチとホッケの音響姿勢角分布はビデオカメラで得られた遊泳姿勢角分布とほぼ一致した。この 2 魚種に対し、音響手法で測定した音響姿勢角が実際の遊泳姿勢角に近似できると考えられる。

第4章 懸垂法による無鰾魚のターゲットストレングス測定

4.1 緒言

魚のターゲットストレングスは、魚種、魚の体長、鰾の有無、遊泳姿勢角、音波の周波数など様々な要因で変動する。無鰾魚の音響散乱特性を解明するには、これらの変動要因を解明する必要がある。魚種によりターゲットストレングスが変化するのは、魚体の形状、魚体の重量密度や体内音速、鰾の有無および鰾の形状の違い、遊泳行動の違いなどに起因する。そのうち、鰾の影響が一番大きいことが知られている（Foote, 1980）が、魚体の形状の違いによる魚の音響散乱への影響も大きいと報告されている（斎藤, 1994）。無鰾魚は鰾のような強散乱体がなく、音響散乱のほとんどは魚体からと考えられ、体形の違いによる無鰾魚のターゲットストレングスへの影響を調べる必要がある。一方、Gorska *et al.* (2007) は、大西洋サバの高周波数（70, 120, 200 kHz）での音響散乱は主に背骨に依存すると報告した。これは他の無鰾魚でも適用できるのかを調べる必要がある。

前章において、自由遊泳法でホッケ、ソウハチの *semi-in situ* ターゲットストレングスを測定するとともに、姿勢角分布を調べた。ホッケの体は一般的な紡錘型であり、ソウハチは強側扁型かつ背方向において音波を反射する面積が他の魚よりも広い。さらにもう一種の商業魚イカナゴも鰾を持たず、体形は延長型である。

そこで本章は、3種の無鰾魚、ホッケ、イカナゴ、ソウハチのターゲットストレングスを懸垂法で精密に測定し、3種のターゲットストレングスのピッチ角特性、周波数特性、体長依存性を調べ、体形によるターゲットストレングスの差異

を考察した。さらに、魚肉を一部取り除いた状態でターゲットストレングスを測定し、骨による寄与を調べた。

4.2 方法

4.2.1 海水水槽におけるターゲットストレングスの精密測定

実験は、海洋センターの大型実験水槽（長さ 10 m、深さ 6 m、幅 5 m、容量約 300 トン；Fig. 4.1）において、2018 年 6 月、8 月と 2019 年の 6 月に行った。両年とも実験時の大型実験水槽の水温・塩分は概ね 15 °C、32.5 psu であった。音響システムは 3 種類用いた。まず 1 つ目は、古野電気製の FCV-295（Fig. 4.1b, 上）であり周波数 38kHz でターゲットストレングスを測定した。2 つ目は、Simrad 社製のスプリットビーム型広帯域計量魚探機 EK80（Fig. 4.1b, 中央）であり、ES70-7C 型トランスデューサ（Simrad）を用いて周波数 45～90 kHz の広帯域ターゲットストレングス測定を行った。そして 3 つ目は、古野電気製の FCV-2100（Fig. 4.1b, 下）であり周波数 80～120 kHz の広帯域ターゲットストレングス測定を行った。ここで周波数の分解能は、EK80 が 0.061 kHz, FCV-2100 が 1 kHz であった。

測定に使用した魚は、ホッケとイカナゴについては 5 月末に函館沿岸の定置網で漁獲し、ソウハチについては各年の 4 月と 5 月に北海道噴火湾で竿釣りにより捕獲した。これらの魚はターゲットストレングス測定まで、海洋センターにある円筒形海水水槽（10 トン、深さ約 1 m、直径約 3.5 m；水温約 10 °C、塩分は約 32 psu）で蓄養した。餌は一日一回、冷凍ナンキョクオキアミを解凍して、適量与えた。

ターゲットストレングス測定は、Fig. 4.1 に示すように、水槽内の深さ 3 m のところにトランスデューサ 3 個を水平方向に超音波を送受するように配置し、反対側の壁に水中カメラを設置して魚体とトランスデューサの位置を確認しながら行った。魚はターゲットストレングス測定前に、麻酔薬 FA100（10%オイゲ

ノール溶液)を使用して海水中で麻酔し、約 5 分後、魚の動きが完全に止まったことを確認した後、Fig. 4.1 のようにテグスを使って海水中に懸垂した。魚はトランスデューサから 6.8 m 離れた十分遠距離音場(澤田ら, 2003)のところに吊るし、魚の背中がトランスデューサに向くようにした。ここまでの作業は、魚が空気に全く触れないように、すべて水中で行った。そして、作業台にある懸垂回転装置により、超音波の到来方向に対して頭を 30°下げたピッチ角-30°(ヘッドダウン)から逆に 30°あげた+30°(ヘッドアップ)まで、FCV-295 については 2° 間隔、EK80 と FCV-2100 については 1° 間隔で魚体を回転させ、各角度におけるターゲットストレングスを測定した。音響システムの切り替えは、測定魚の深さを変えることで行い、3 種類のトランスデューサ各々の音軸上でターゲットストレングス測定を行った。測定データは PC に外付けした HDD に記録し、後日、解析を行った。音響システムの較正は、FCV-295 (38 kHz) に対しては直径 38.1 mm, EK80 (45~90 kHz) と FCV-2100 (80~120 kHz) は直径 25 mm のタングステンカーバイド製の較正球で毎日実験前におこなった (Foote, 1987; Demer *et al.*, 2015)。これら 2 種類の較正球のターゲットストレングスの周波数特性を Fig. 4.2 に示す。上が直径 38.1 mm の較正球の周波数 38 kHz 付近、下が直径 25 mm の較正球の周波数 45 kHz~120 kHz におけるターゲットストレングスを示しており、今回の測定周波数範囲ではターゲットストレングスの変化は平坦である。

ターゲットストレングス測定に用いた魚は、ホッケ 5 個体、イカナゴ 7 個体、ソウハチ 9 個体である。Table 4.1 に示すホッケは全長 27.2~38.0 cm, イカナゴは全長 13.4~20.0 cm, ソウハチは全長 15.8~31.5 cm であった。

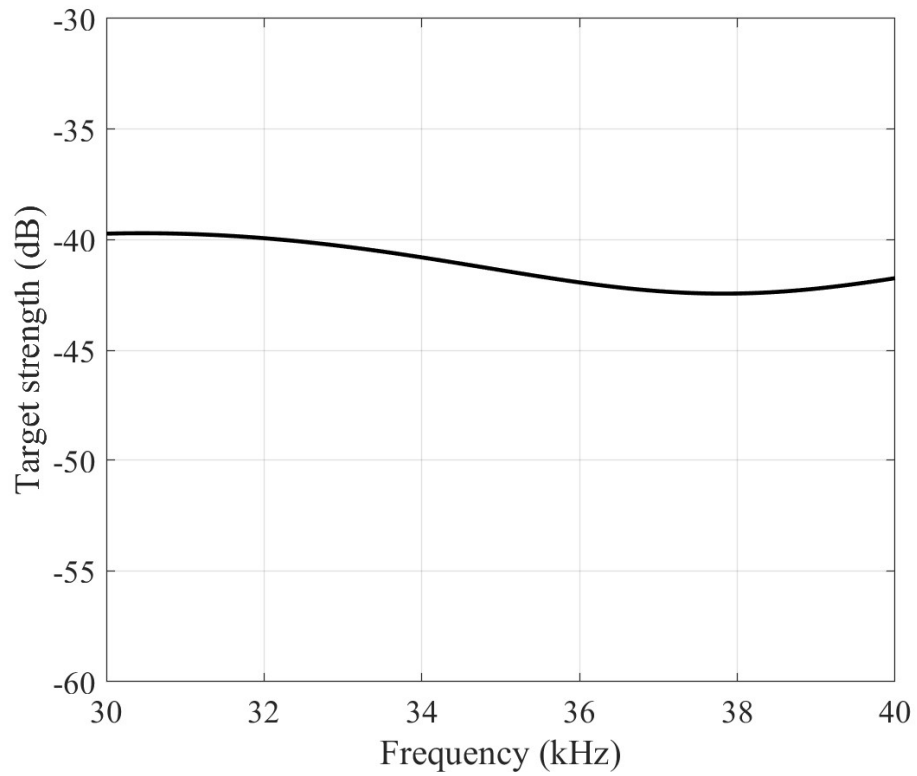
次に、骨の音響反射を調べるために、ホッケ 2 個体 (No. 902 と No. 903) とソウハチ 2 個体 (No. 901 と No. 903) について、できる限り魚肉をマキリで取り除き、背骨と頭と尾だけにした。本研究において、この状態の魚体を「魚肉なし」

と定義し、魚肉を取り除く前の状態を「魚肉あり」と定義する。魚肉ありと魚肉なしのホッケおよびソウハチの写真を Fig. 4.3 に示す。ホッケについて、No. 902 と No. 903 とともに体重の 66% の魚肉を取り除いた。ソウハチについては、No. 901 は体重の 49%、No. 903 は 47% の魚肉を取り除いた。ここで頭と尾は、魚を懸垂するために必要なので残した。これらの工程においても作業は水中で行ない、空気に全く触れないようにし、処理後、魚肉なしのターゲットストレンジスを同一の方法で測定した。

ターゲットストレンジスの測定後、各測定魚の体長、体幅、体高、体重を測定し、後日、サンプルの背方向と側面方向から軟 X 線写真を撮影した。

ターゲットストレンジスの解析は、周波数 38 kHz の FCV-295 システムに関しては置換法（向井，1994）を用いた。また、EK80 については Echoview 10 ソフトウェア（Echoview）を用い、Table 4.2 に示す Echoview の single target detection-wideband 機能を使用してターゲットストレンジスを求めた。さらに FCV-2100 については、FCV-2100 の再生用ソフトウェアを使用し、エコーグラム中から対象のエコー範囲を手動で選択し、再生用ソフトウェアに実装済みの機能を用いてターゲットストレンジスを得た。そして、機種・周波数ごとにピッチ角-30° から+30° までのターゲットストレンジスを用いて周波数スペクトルを得るとともに、周波数ごとのターゲットストレンジスの最大値と次に述べる姿勢平均値を求めた。

(a) WC38.1mm



(b) WC25mm

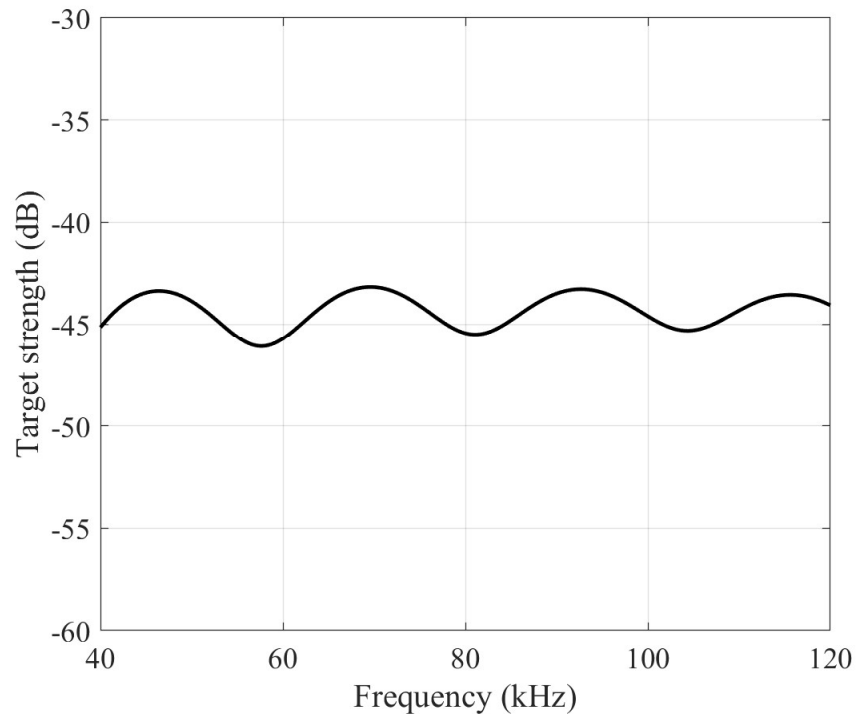


Fig.4.2 懸垂法によるターゲットストレングス測定に用いたタングステンカーバイド製較正球のターゲットストレングスの周波数特性. (a)は周波数38 kHzで置換法に用いた直径38.1 mm較正球, (b)は2台の広帯域システム (EK80, FCV-2100) の較正に用いた直径25 mm較正球のもの.



Fig.4.3 一部の魚肉を取り除いてターゲットストレングスの測定を行ったホッケ（上）とソウハチ（下）．写真は測定後に撮影．

Table 4.1 懸垂法でターゲットストレングスを測定したホッケ、イカナゴ、ソウハチの測定日，体長，体幅，体高，体重.

Species	No.	Measurement date	TL(cm)	Width(cm)	Height(cm)	Weight(g)
Arabesque greenling	801	2018.06.22	27.2	3.3	4.2	—
	802	2018.06.22	28.8	3.3	4.8	—
	901	2019.06.11	30.2	3.6	5.7	289
	902	2019.06.12	30.6	—	—	304
	903	2019.06.12	38.0	—	—	649
Sandeel	802	2018.06.22	20.0	1.5	1.9	—
	803	2018.06.22	13.4	0.8	1.0	—
	901	2019.06.08	15.4	0.9	1.3	12
	902	2019.06.08	14.2	0.8	1.2	9
	903	2019.06.09	16.4	1.0	1.3	15
	904	2016.06.09	16.1	1.1	1.5	14
	905	2019.06.09	14.3	0.9	1.1	9
Pointhead flounder	806	2018.06.23	31.5	16.1	3.2	—
	808	2018.06.23	19.9	9.7	1.5	—
	809	2018.06.23	26.3	13.2	2.2	—
	811	2018.08.02	26.6	13.4	2.4	—
	812	2018.08.02	23.2	11.2	2.0	—
	814	2018.08.02	25.2	13.2	1.2	—
	901	2019.06.10	27.0	14.2	—	192
	902	2019.06.10	15.8	7.2	0.9	29
	903	2019.06.12	27.6	14.8	—	197

Table 4.2 Echoviewによる単体検出に用いたパラメータ.

Parameter	Value
TS threshold	-90 dB
Pulse duration determination level	6.00 dB
Minimum normalized pulse length	0.40
Maximum normalized pulse length	1.80
Maximum beam compensation (Two-way)	6 dB
Maximum standard deviation of minor-axis angles	1.5 degrees
major-axis angles	1.5 degrees

4.2.2 姿勢平均ターゲットストレングスの算出

姿勢平均ターゲットストレングスの算出には、Foote（1980）の平均法を用いた。この方法は魚の遊泳姿勢角分布を確率密度関数で表し、ターゲットストレングスの姿勢角特性関数 $Ts(\theta)$ との積を積分して平均化を行うものであり、次式で計算する。

$$\overline{Ts} = \frac{\int_{\theta} Ts(\theta)f(\theta)d\theta}{\int_{\theta} f(\theta)d\theta} \quad (4.1)$$

$$f(\theta) = \frac{1}{S_{\theta}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\theta-\bar{\theta}}{S_{\theta}}\right)^2} \quad (4.2)$$

ここで、 $f(\theta)$ は魚の遊泳姿勢角を示す確率密度関数であり、平均値 $\bar{\theta}$ 、標準偏差 S_{θ} とする正規分布 $N(\bar{\theta}, S_{\theta})$ で仮定され、さらに、ある角度範囲で切断する切断正規分布とされることが多い。そこで、ホッケについては、第3章でカメラを用いて測定した姿勢角分布の $N(5.2^{\circ}, 20.7^{\circ})$ を、イカナゴについては、Safruddin *et al.*（2013）が測定した分布 $N(20.9^{\circ}, 18.5^{\circ})$ を使用した。また、ソウハチについては、Fig. 3.8(a)に示した実測の遊泳姿勢角分布を確率密度関数 $f(\theta)$ として、(4.1)式により平均ターゲットストレングスを算出した。以上の正規分布あるいは実測姿勢角分布を -30° から $+30^{\circ}$ の範囲で切断し、平均ターゲットストレングスの計算を行った。ただし、FCV-295で測定した周波数38 kHzでのデータは 0° から離れるほどSN比が悪くなる（ノイズが-65 dB前後）ため、周波数38 kHzでの平均ターゲットストレングスは以降の解析から除外した。

4.3 結果

4.3.1 無鰾魚のターゲットストレングススペクトル

ホッケのターゲットストレングススペクトル例を Fig. 4.4 に示す。左半分は全長 30.2 cm (No. 901) の個体，右半分は全長 38.0 cm (No. 903) の個体であり，横軸はピッチ角，縦軸は周波数，カラーでターゲットストレングスの大小を表している。上半分は周波数 45 kHz～90 kHz の EK80，下半分が周波数 80 kHz～120 kHz の FCV-2100 のものである。2つのスペクトルを比較すると，ホッケは体長の大きい個体の方が，ターゲットストレングスが全体的に大きく，指向性も鋭くなっていた。また，ホッケのターゲットストレングスの最大値は，ピッチ角がマイナスのとき（ヘッドダウン）に見られた。

次に，イカナゴのターゲットストレングススペクトル例を Fig. 4.5 に示す。左は体長 14.2 cm (No. 902) の個体，右は体長 16.4 cm (No. 903) の個体である。イカナゴについてはターゲットストレングスが小さく，周波数 80 kHz～120 kHz の FCV-2100 システムにおいては SN が悪かったため，EK80 の結果だけ示してある。2つのスペクトルを比較すると，イカナゴにおいても体長が大きくなるほど全体的にターゲットストレングスが大きくなり，指向性も鋭くなっていた。また，ターゲットストレングスの最大値はピッチ角が 0°付近のときに見られた。

Fig. 4.6 はソウハチのターゲットストレングススペクトルの例を表し，左は体長 15.8 cm (No. 902) の個体，右は体長 27.0 cm (No. 901) の個体である。この図より，ソウハチも体長が大きくなるほどターゲットストレングスは全体的に大きくなり，指向性も鋭くなる傾向がみられた。また，ソウハチのターゲットストレングスの最大値はピッチ角 0° 付近に現れていた。

Arabesque greenling

(a) TL:30.2 cm

(b) TL:38.0 cm

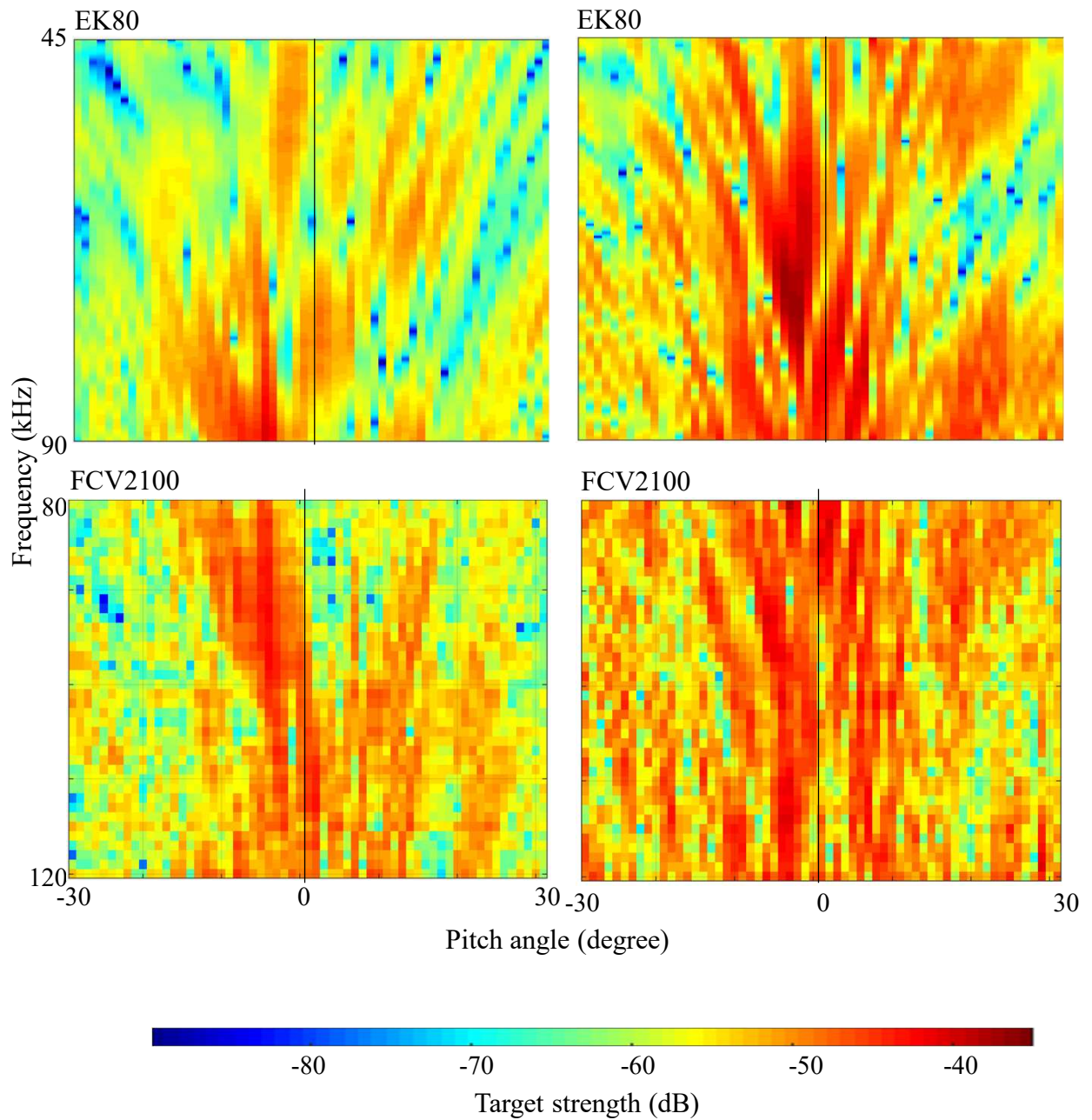


Fig. 4.4 ホッケのターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性.
(a) TL = 30.2 cm; (b) TL = 38.0 cm.

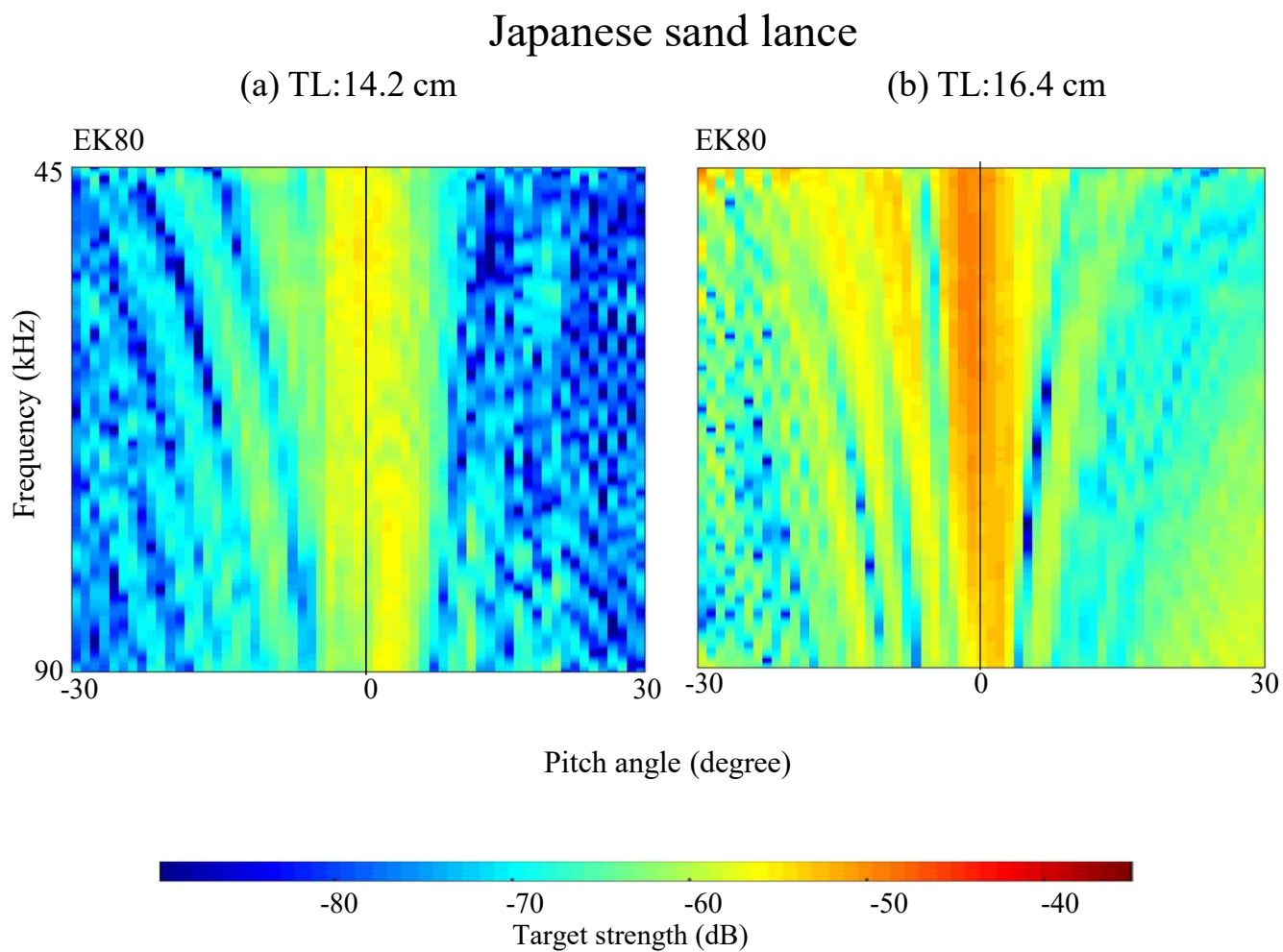


Fig. 4.5 イカナゴのターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性.
(a) TL = 14.2 cm; (b) TL = 16.4 cm.

Pointhead flounder

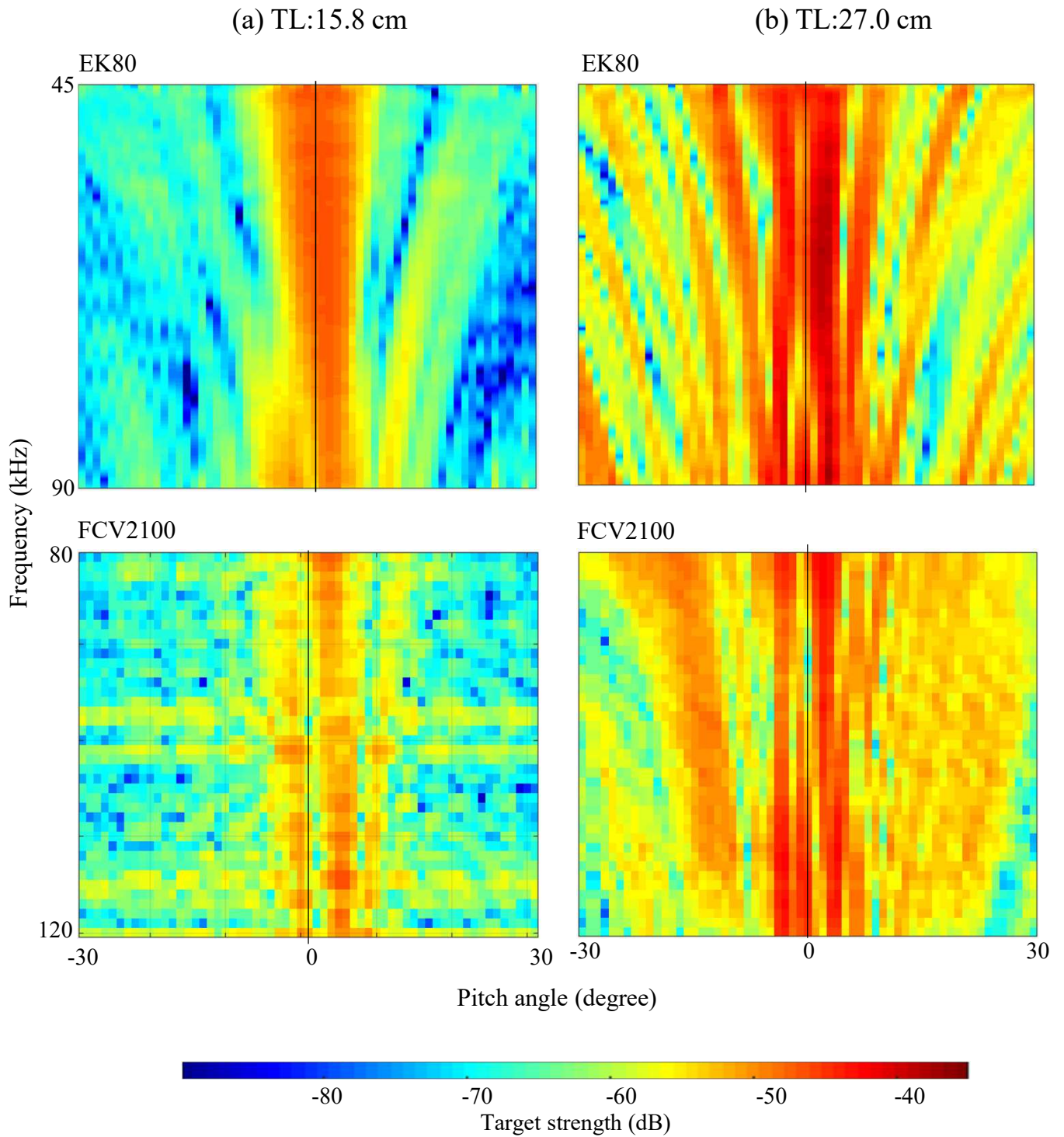


Fig. 4.6 ソウハチのターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性.
(a) TL = 15.8 cm; (b) TL = 27.0 cm.

4.3.2 無鰾魚のターゲットストレングスのピッチ角特性

周波数 38, 50, 70, 100, 120 kHz におけるホッケ, イカナゴ, ソウハチのターゲットストレングスのピッチ角特性の例を Fig. 4.7, Fig. 4.8, Fig. 4.9 にそれぞれ示す。図の横軸はピッチ角, 縦軸はターゲットストレングスであり, ターゲットストレングスが最大になる角度を各図の右上に示した。

これらの図を見ると, すべての魚種においてピッチ角の変化とともに, ターゲットストレングスの値も変動し, ピッチ角の少しの変動で 20 dB 前後も変化する様子が多く見られた。また, イカナゴ (Fig. 4.8) とソウハチ (Fig. 4.9) は水平状態になるほど, ターゲットストレングスが大きくなる傾向がみられ, ターゲットストレングスの最大値はほぼ 0° 付近に見られた。一方, ホッケ (Fig. 4.7) のターゲットストレングスのピッチ角特性は最大値がはっきり現れないか, またはヘッドダウンのときに現れた。

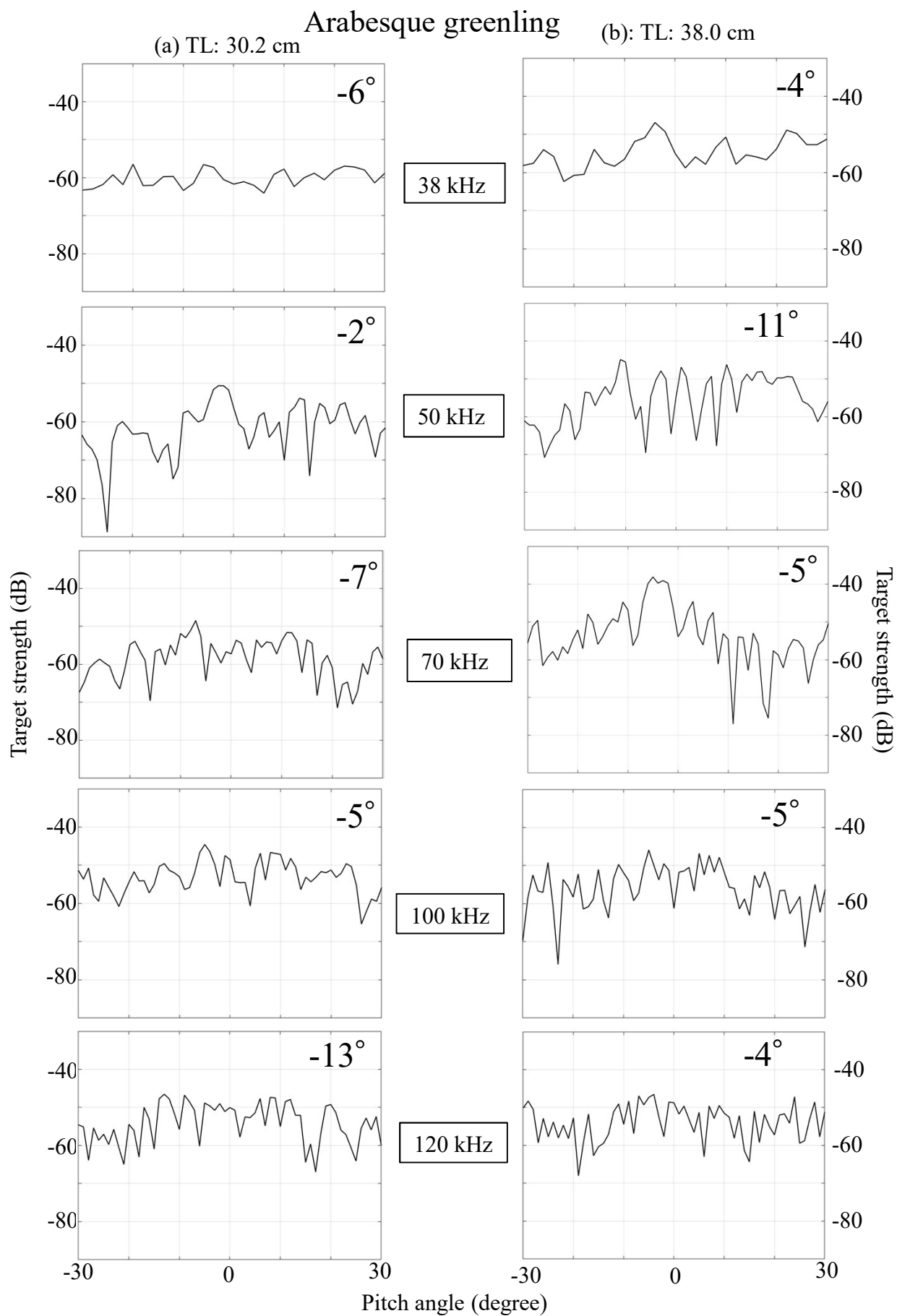


Fig. 4.7 代表5周波数におけるホッケのターゲットストレングスのピッチ角特性. 各図右上の数値はターゲットストレングスが最大値を示した角度を表す.
 (a) TL = 30.2 cm; (b) TL = 38.0 cm.

Japanese sand lance

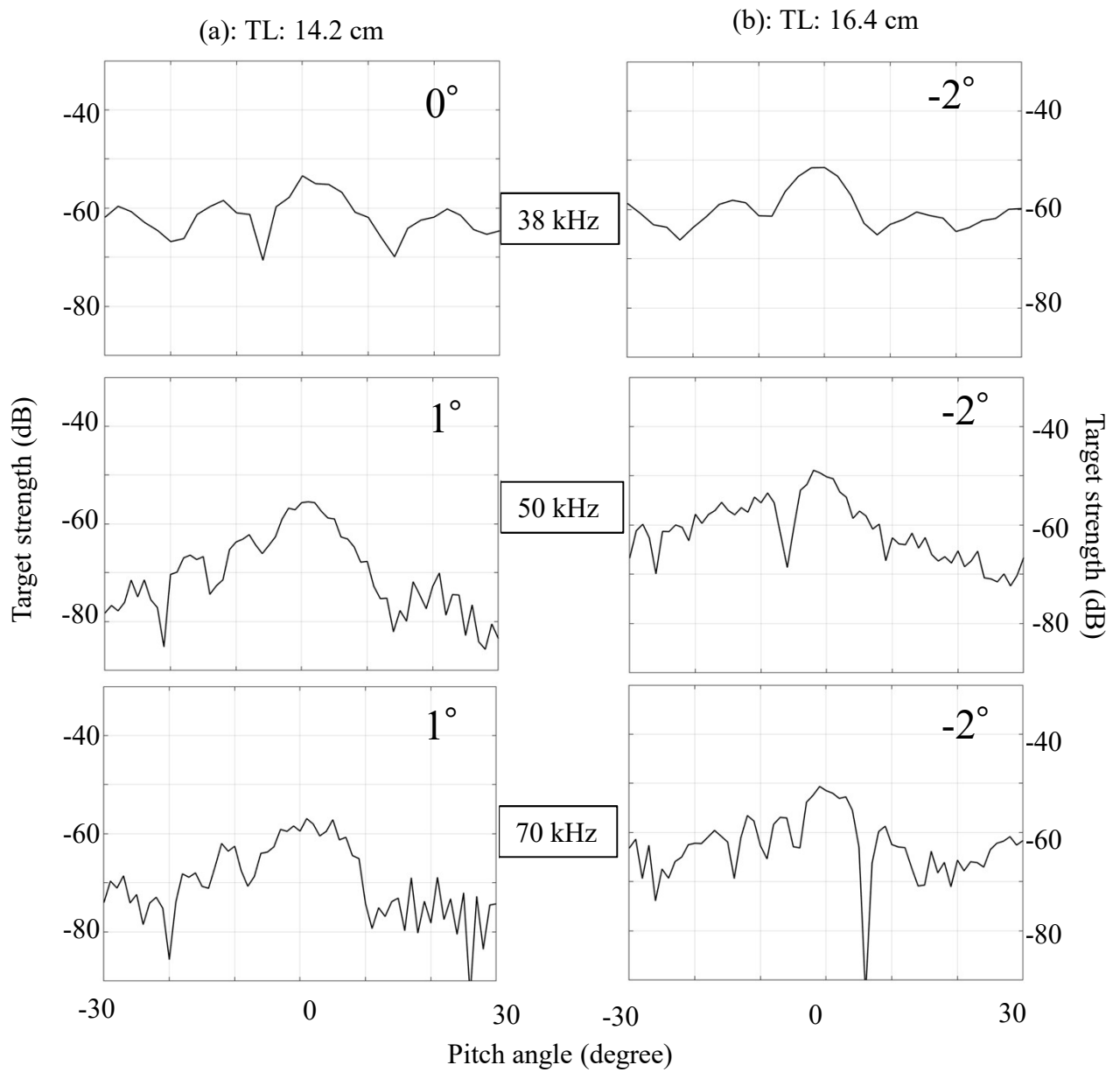


Fig. 4.8 代表3周波数におけるイカナゴのターゲットストレングスのピッチ角特性. (a) TL = 14.2 cm; (b) TL = 16.4 cm.

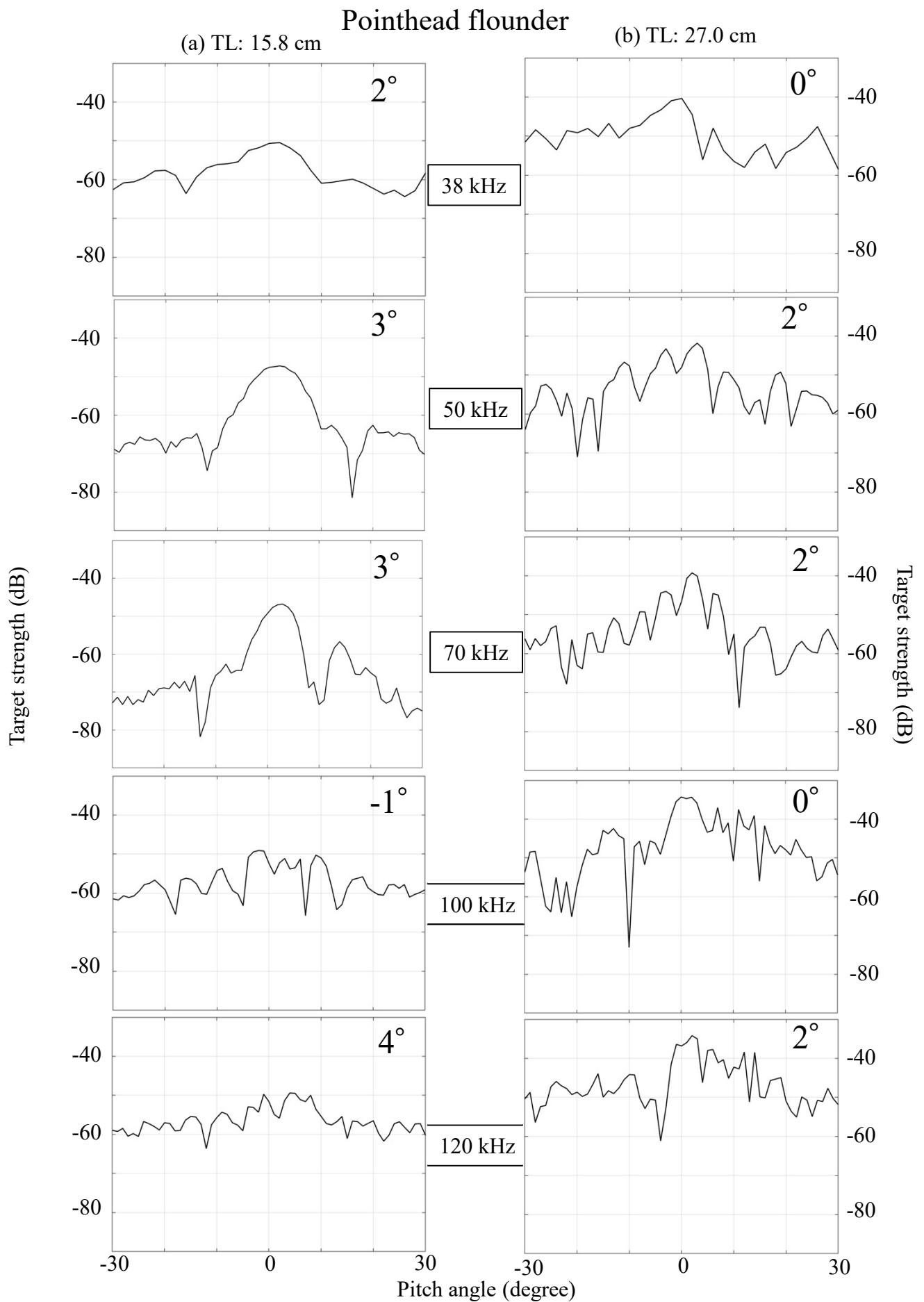


Fig. 4.9 代表5周波数におけるソウハチのターゲットストレングスのピッチ角特性. 各図右上の数値はターゲットストレングスが最大値を示した角度を表す.
 (a) TL = 15.8 cm; (b) TL = 27.0 cm.

4.3.3 無鰾魚のターゲットストレングスの周波数特性と体長依存性

ホッケ、イカナゴ、ソウハチのターゲットストレングスの周波数特性を Fig. 4.10, Fig. 4.11, Fig. 4.12 に示す。各図とも、上は最大ターゲットストレングス、下は姿勢平均ターゲットストレングスの結果で、横軸は周波数を表している。Fig. 4.10 のホッケのターゲットストレングスの周波数特性をみると、周波数 90 kHz までは高周波数になるほどターゲットストレングスが大きくなる傾向があり、90 kHz から 120 kHz まではターゲットストレングスの変化がほとんどないことが見て取れる。Fig. 4.11 のイカナゴのターゲットストレングスの周波数特性をみると、イカナゴは周波数が高くなるとターゲットストレングスがやや小さくなる傾向がみられた。Fig. 4.12 でソウハチのターゲットストレングスを見ると、45 kHz から 90 kHz は測定個体による変化の様子は一定ではなく、90 kHz から 120 kHz ではほぼターゲットストレングスのレベルが変わらず、周波数特性が見られなかった。

次に、Fig. 4.10, Fig. 4.11, Fig. 4.12 の横軸を波長で規準化した体長 (L/λ) にして、3 種のターゲットストレングスの体長依存性を調べた。その結果を Fig. 4.13, Fig. 4.14, Fig. 4.15 に示す。各図とも、上は最大ターゲットストレングス、下は姿勢平均ターゲットストレングス、横軸は波長で規準化した体長を表している。各個体において、同じ周波数帯 (45~90 kHz) でターゲットストレングスを測定しているため L/λ の幅は同一であり、 L/λ の大小は体長の大小を表していると考えることが出来る。したがって、各個体の体長とターゲットストレングスの関係をこれらの図から知ることができる。Fig. 4.13 から Fig. 4.15 に示したホッケ、イカナゴ、ソウハチとも、 L/λ が大きい個体のターゲットストレングスが全体的に大きい傾向が見られ、体長が大きいとターゲットストレングスが大きいという体長依存性を持つことが分かった。

Arabesque greenling

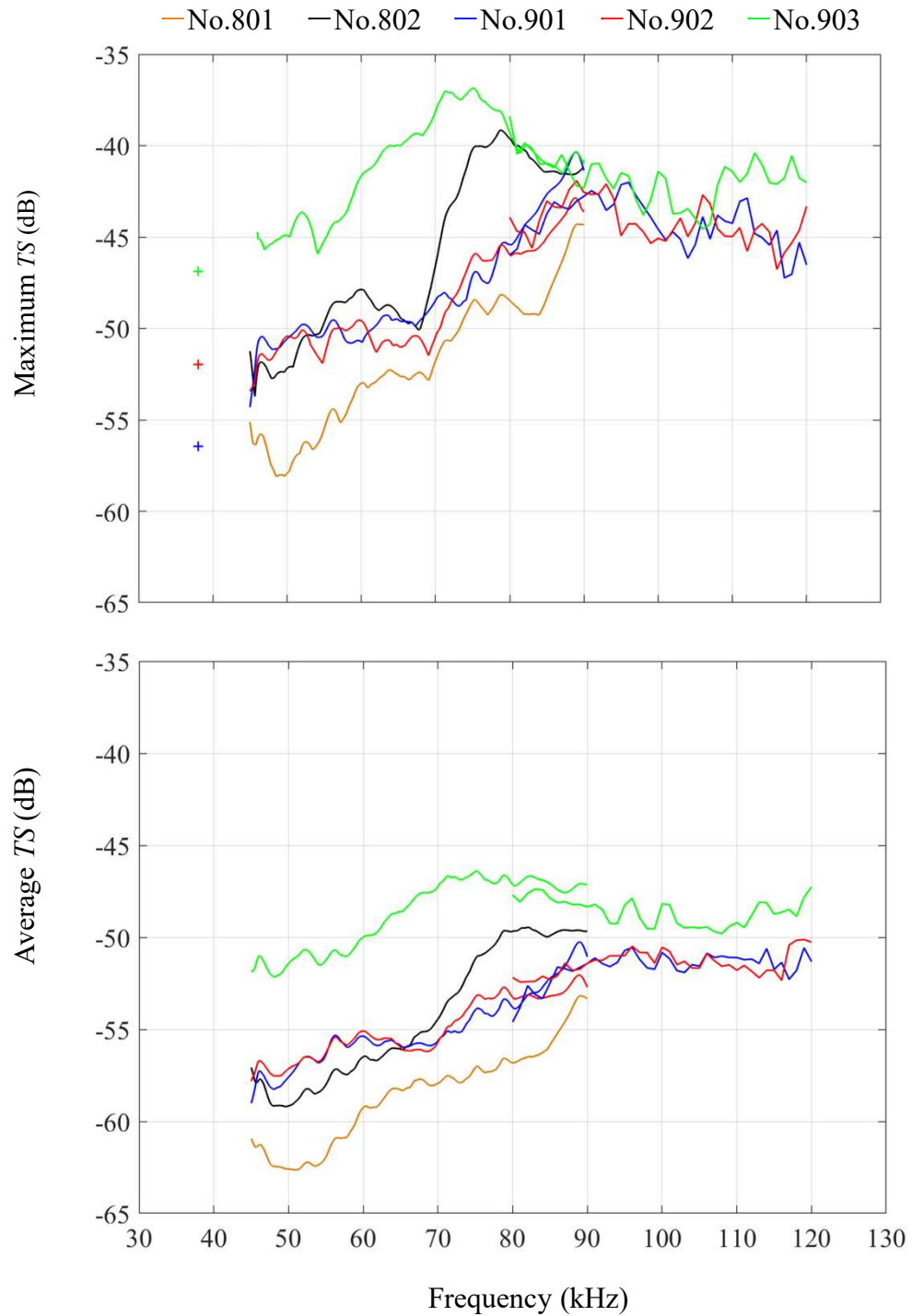


Fig.4.10 ホッケの最大ターゲットストレングス（上）と姿勢平均ターゲットストレングス（下）の周波数特性. 色の違いは個体の違い.

Japanese sand lance

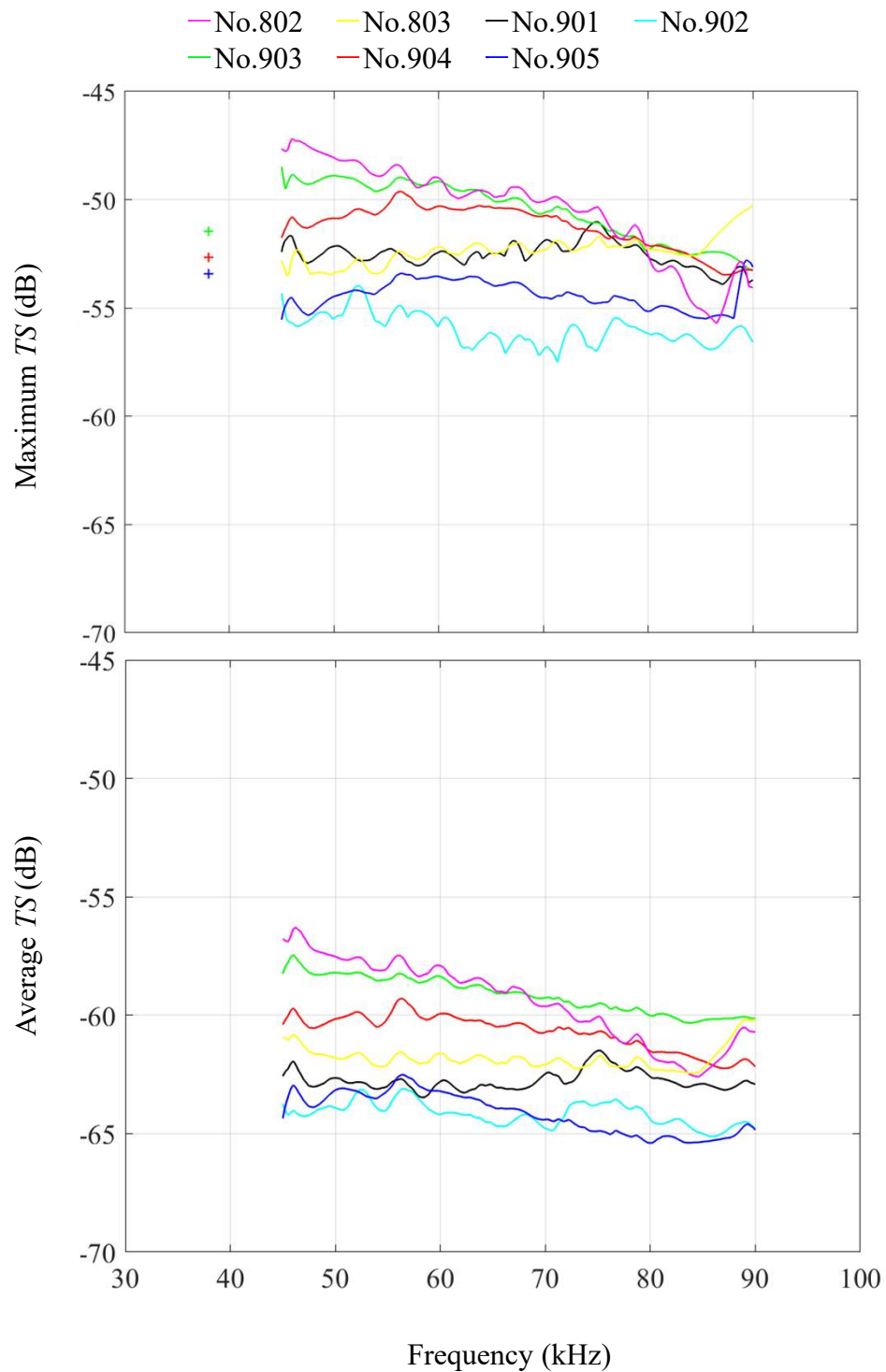


Fig.4.11 イカナゴの最大ターゲットストレングス（上）と姿勢平均ターゲットストレングス（下）の周波数特性. 色の違いは個体の違い.

Pointhead flounder

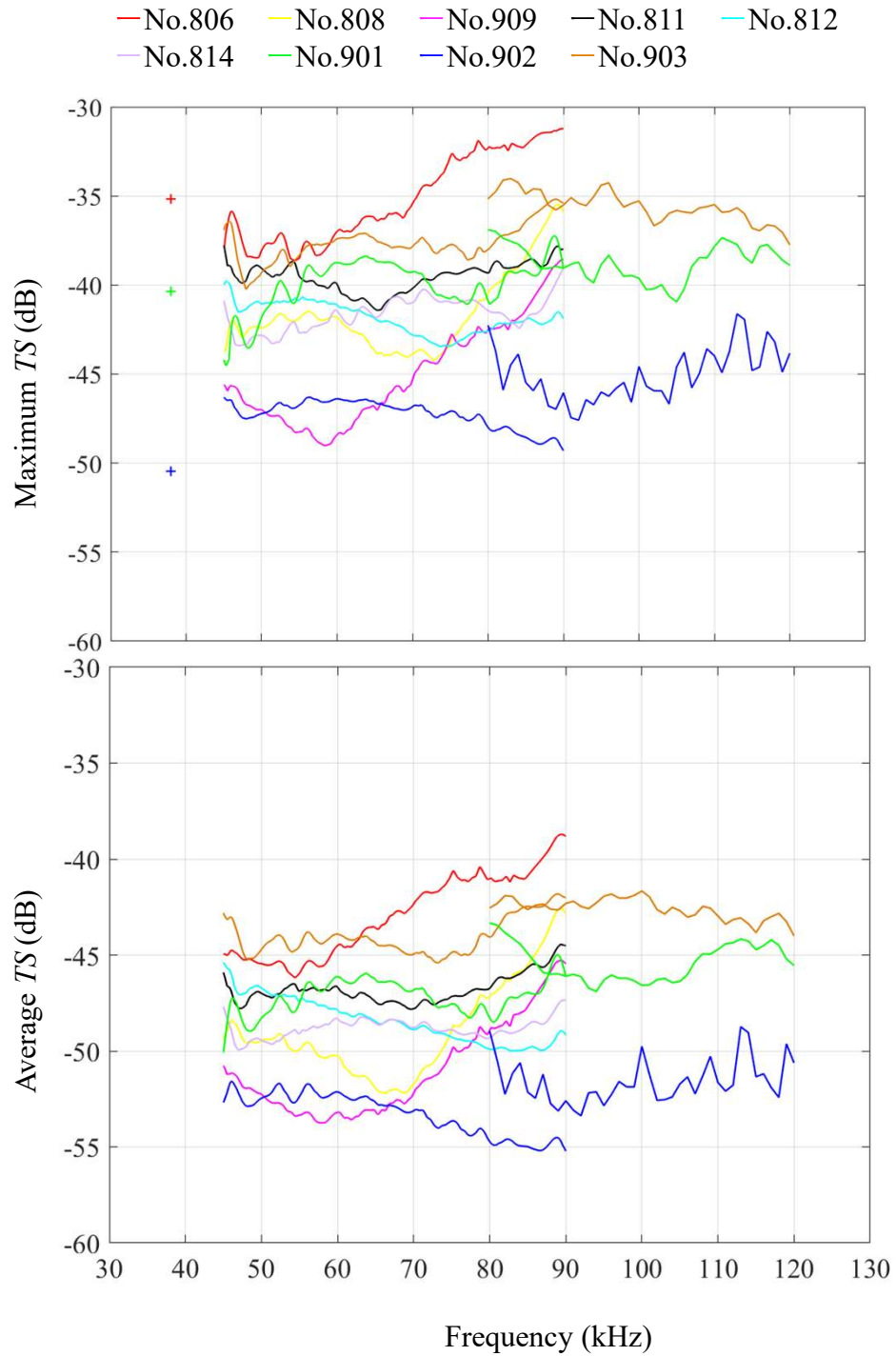


Fig.4.12 ソウハチの最大ターゲットストレングス（上）と姿勢平均ターゲットストレングス（下）の周波数特性．色の違いは個体の違い．

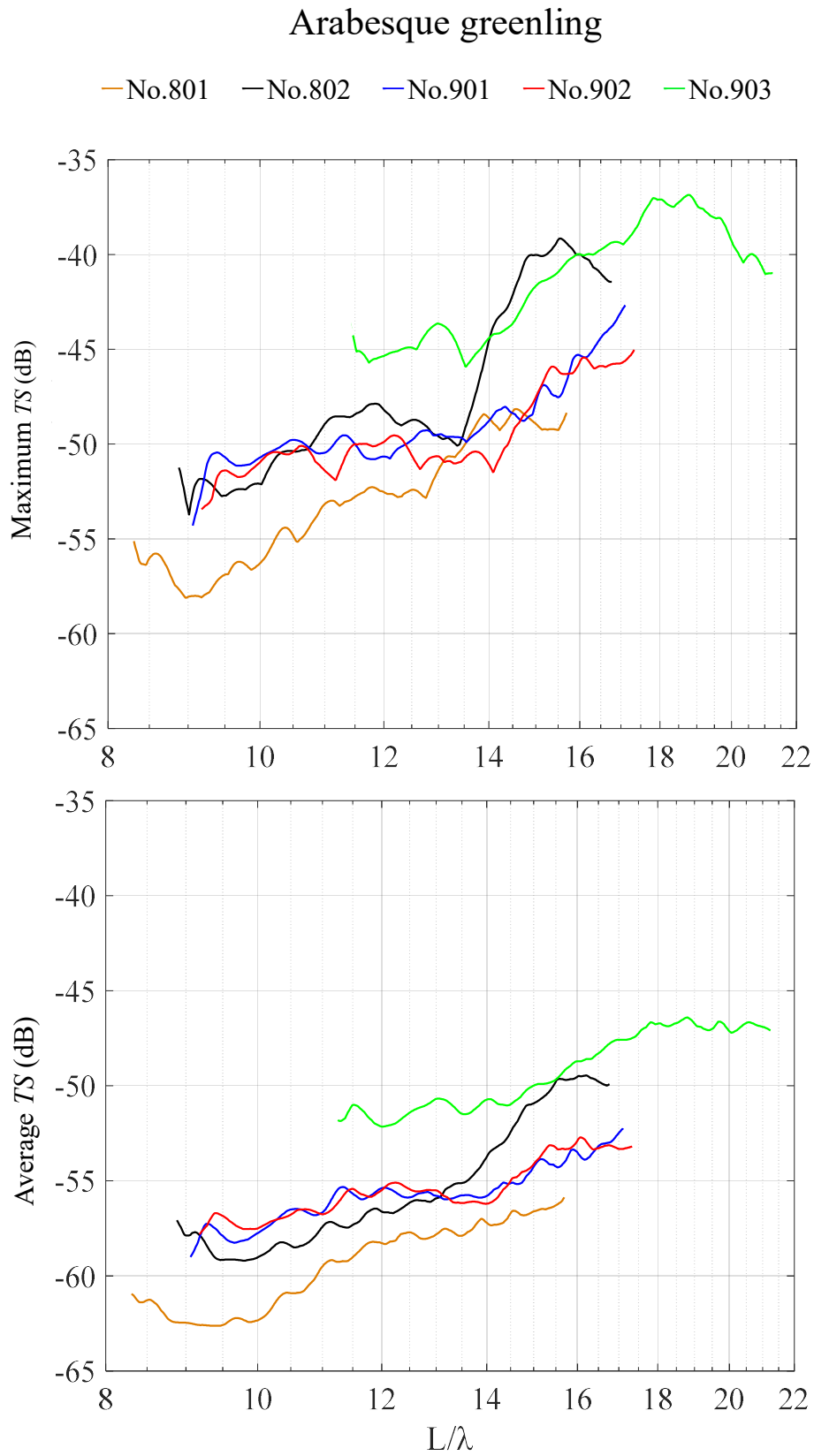


Fig. 4.13 ホッケの最大ターゲットストレングス（上）と姿勢平均ターゲットストレングス（下）と波長で規準化した体長の関係．色の違いは個体の違い．

Japanese sand lance

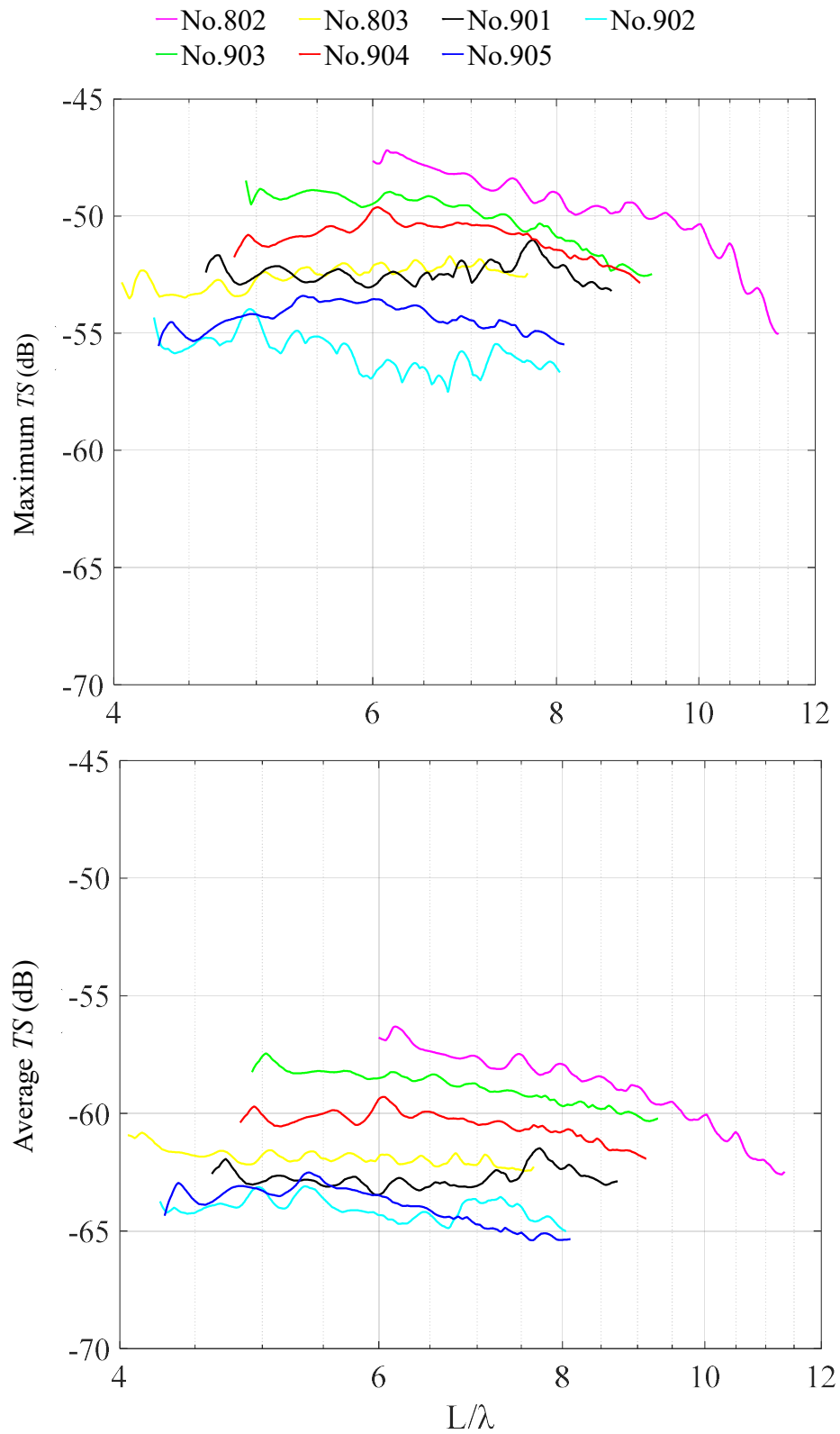


Fig. 4.14 イカナゴの最大ターゲットストレングス（上）と姿勢平均ターゲットストレングス（下）と波長で規準化した体長の関係．色の違いは個体の違い．

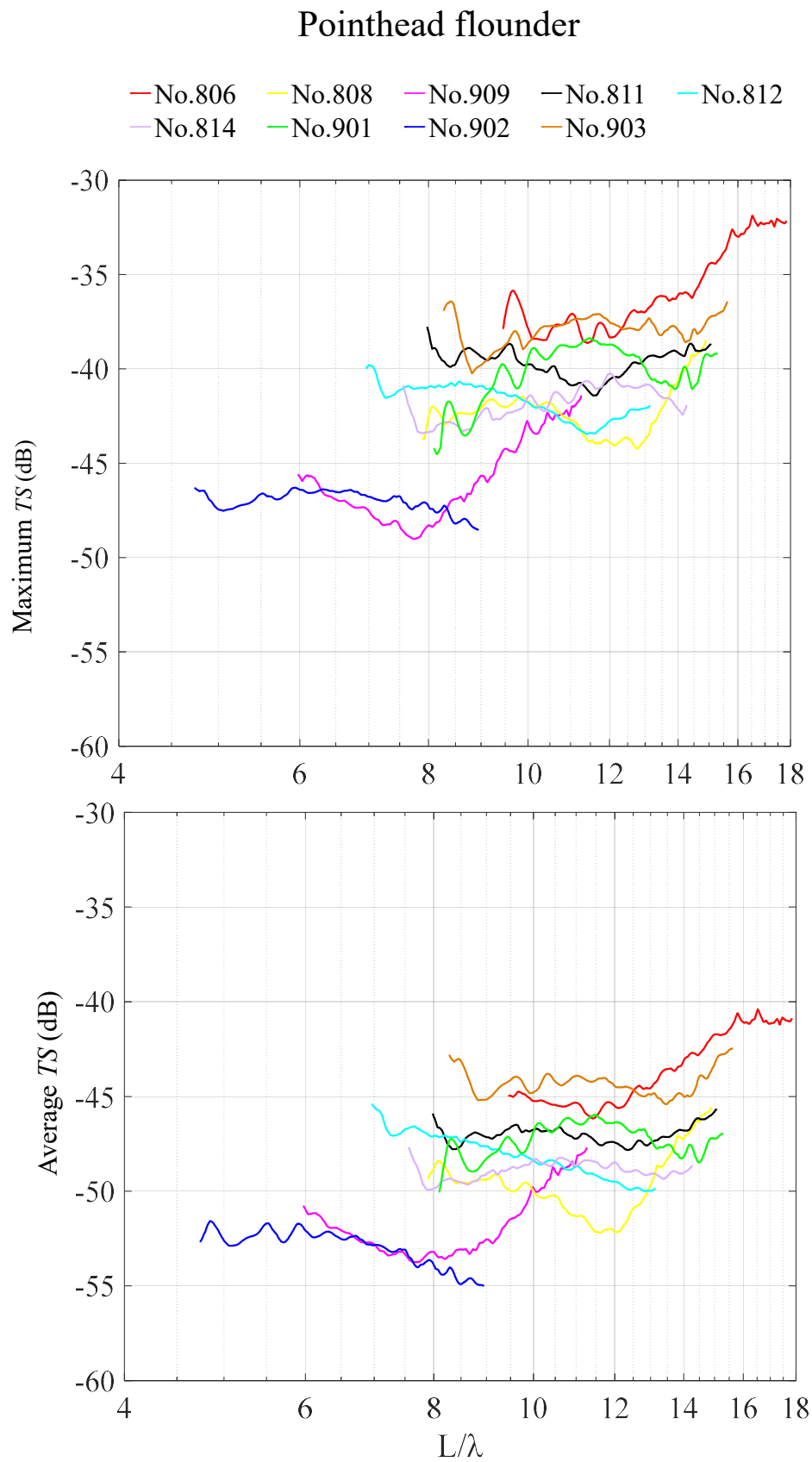


Fig. 4.15 ホッケの最大ターゲットストレングス（上）と姿勢平均ターゲットストレングス（下）と波長で規準化した体長の関係．色の違いは個体の違い．

4.3.4 魚肉除去前後におけるターゲットストレングスの変化について

魚肉ありのターゲットストレングスと魚肉なしのターゲットストレングスの比較を Fig. 4.16 と Fig. 4.17 に示す。Fig. 4.16 はホッケ 2 個体, Fig. 4.17 はソウハチ 2 個体の結果であり, それぞれ左半分が魚肉あり, 右半分が魚肉なしのものである。Fig. 4.16 のホッケについては, 上半分が体長 30.6 cm, 下半分が体長 38.0 cm の個体である。Fig. 4.17 のソウハチについては, 上半分は体長 27.0 cm の個体, 下半分が 27.6 cm の個体である。それぞれ, 横軸, 縦軸, カラーは前出のターゲットストレングススペクトルの図と同様である。これらを見ると, 魚肉なしの場合, ホッケについて, 小さい個体 (a) はあまり変化がないが, 大きい個体 (b) は魚肉ありの時より全体的にターゲットストレングスが小さくなっていた。一方, ソウハチについては, 魚肉なしの場合, 0° 付近のターゲットストレングスは魚肉ありの時より安定していることが分かった。

次に, 魚肉ありと魚肉なしのピッチ角特性を Fig. 4.18 と Fig. 4.19 で比較した。Fig. 4.18 はホッケ 2 個体, Fig. 4.19 はソウハチ 2 個体の結果であり, 黒は魚肉あり, 赤は魚肉なしを表し, 上から順に 38, 50, 70, 100, 120 kHz でのピッチ角特性を表している。ホッケについてみると, 2 個体とも魚肉ありと魚肉なし両方でターゲットストレングスの指向性が鋭く差があまり見られず, メインローブがはっきりしていないという特徴があった。一方, ソウハチについて魚肉ありと魚肉なしでのピッチ角特性を比較すると, 魚肉なしの場合のメインローブの幅が魚肉ありのときより広くなり, ピークもはっきり出ており, 最大ターゲットストレングスが魚肉ありの時より大きくなっていた。

魚肉の有無によるターゲットストレングスの変動や周波数特性を Fig. 4.20 に示す。左はホッケ 2 個体, 右はソウハチ 2 個体のものであり, 上は最大ターゲットストレングス, 下は姿勢平均ターゲットストレングスを表す。実線は魚肉あり,

破線は魚肉なしの結果であり，色は同じ個体を表している。ホッケの結果を見ると，魚肉なしのターゲットストレングスは魚肉ありのときと比べて，周波数全体を通して一様に大きくなったり小さくなったりする傾向は見られなかった。一方，ソウハチの場合，最大ターゲットストレングスは魚肉なしの方が全体的に大きくなった。周波数特性については，魚肉ありと魚肉なしはあまり変わらなかった。また，両種とも，魚肉なしの方が周波数によるターゲットストレングスの変化が平坦であり，安定しているように見えた。

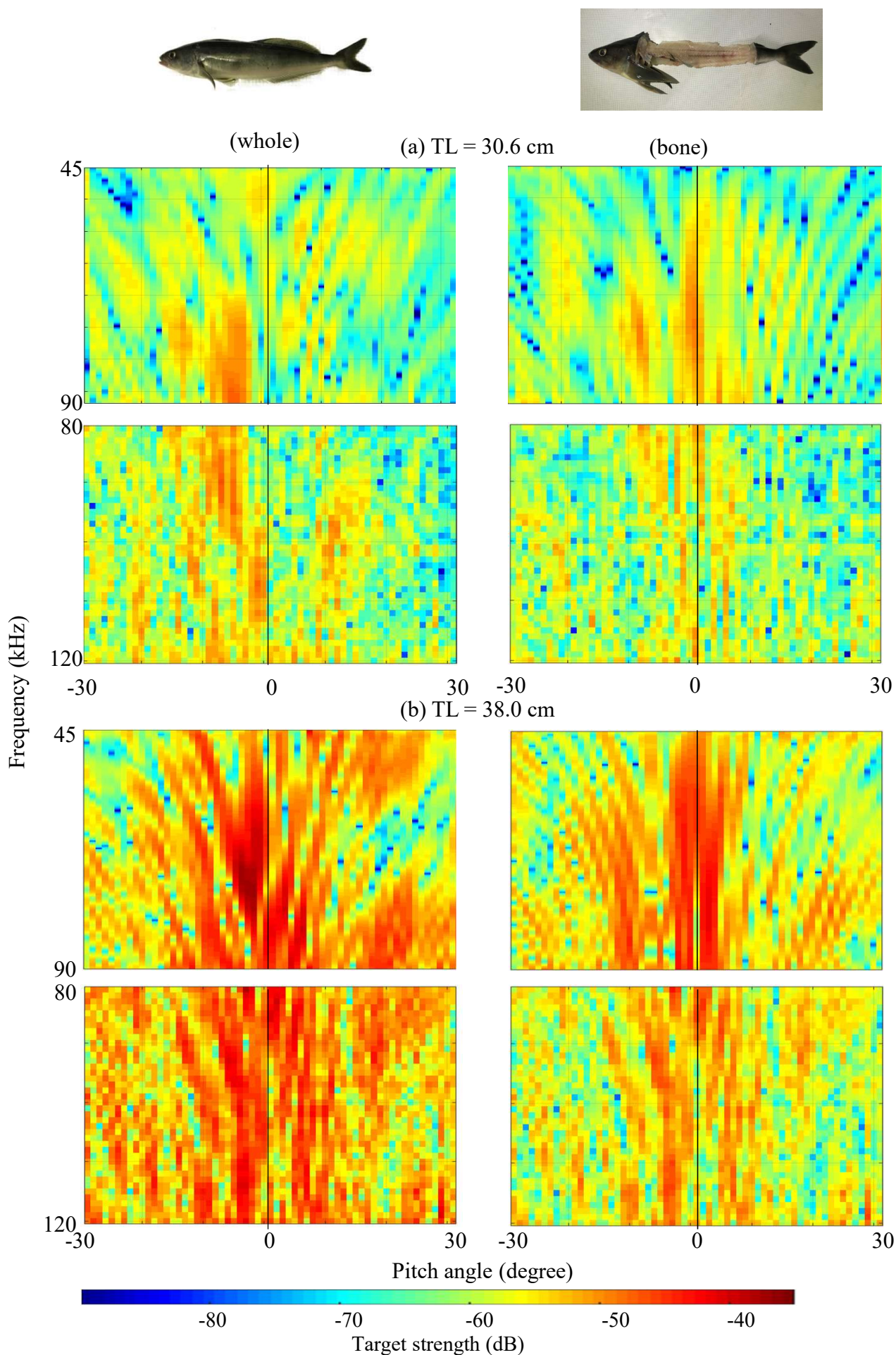


Fig. 4.16 ホッケの魚肉あり（左）と魚肉なし（右）のターゲットストレングスのスペクトル. (a) 体長 30.6 cm, (b) 体長 38.0 cm.

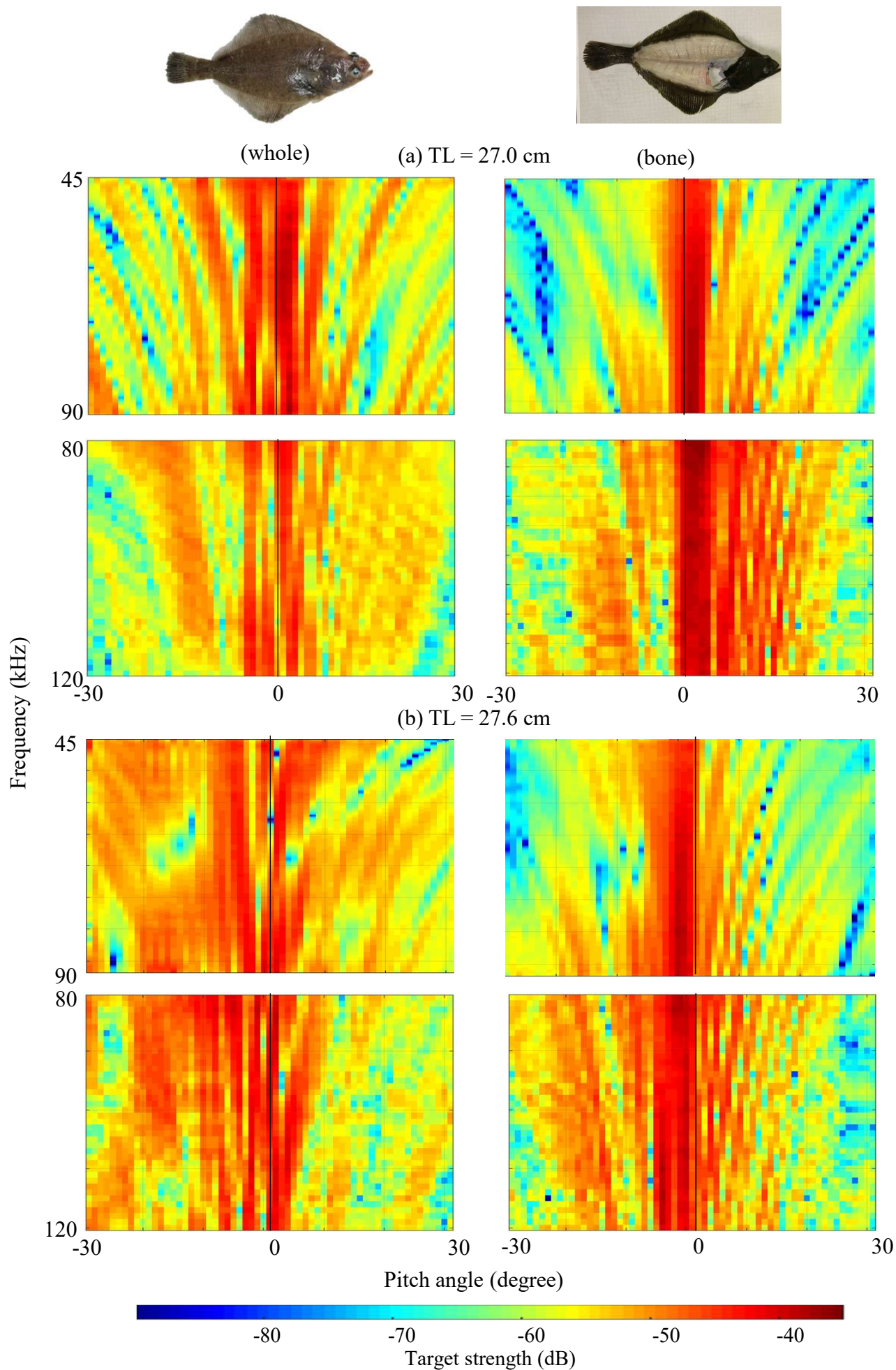


Fig. 4.17 ソウハチの魚肉あり（左）と魚肉なし（右）のターゲットストレングスのスペクトル. (a) 体長 27.0 cm, (b) 体長 27.6 cm.

Arabesque greenling

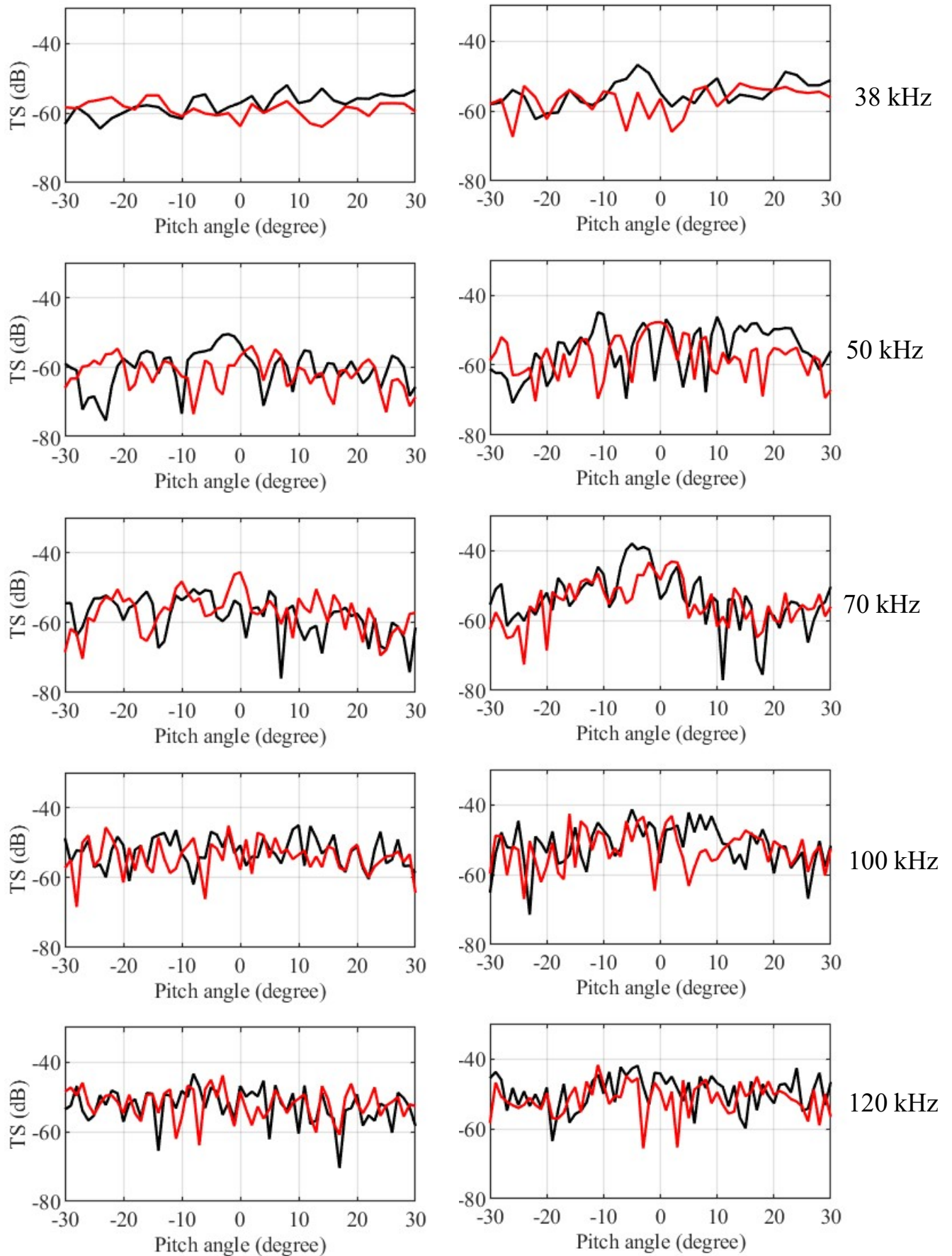


Fig. 4.18 ホッケの魚肉あり（黒）と魚肉なし（赤）のターゲットストレングスのピッチ角特性.

(左) 体長 30.6 cm, (右) 体長 38.0 cm

Pointhead flounder

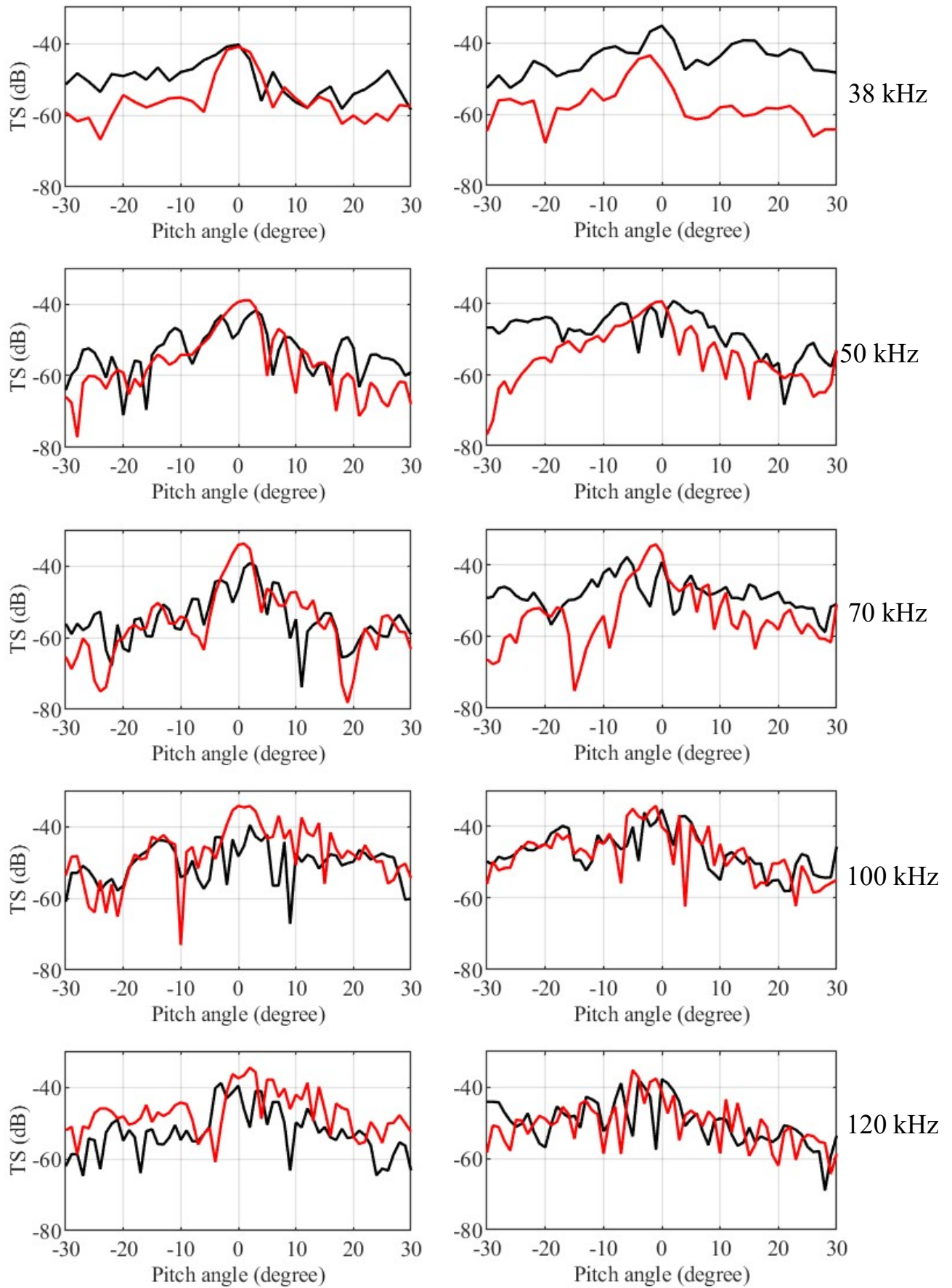


Fig. 4.19 ソウハチの魚肉あり（黒）と魚肉なし（赤）のターゲットストレングスのピッチ角特性.
(左) 体長 27.0 cm, (右) 体長 27.6 cm

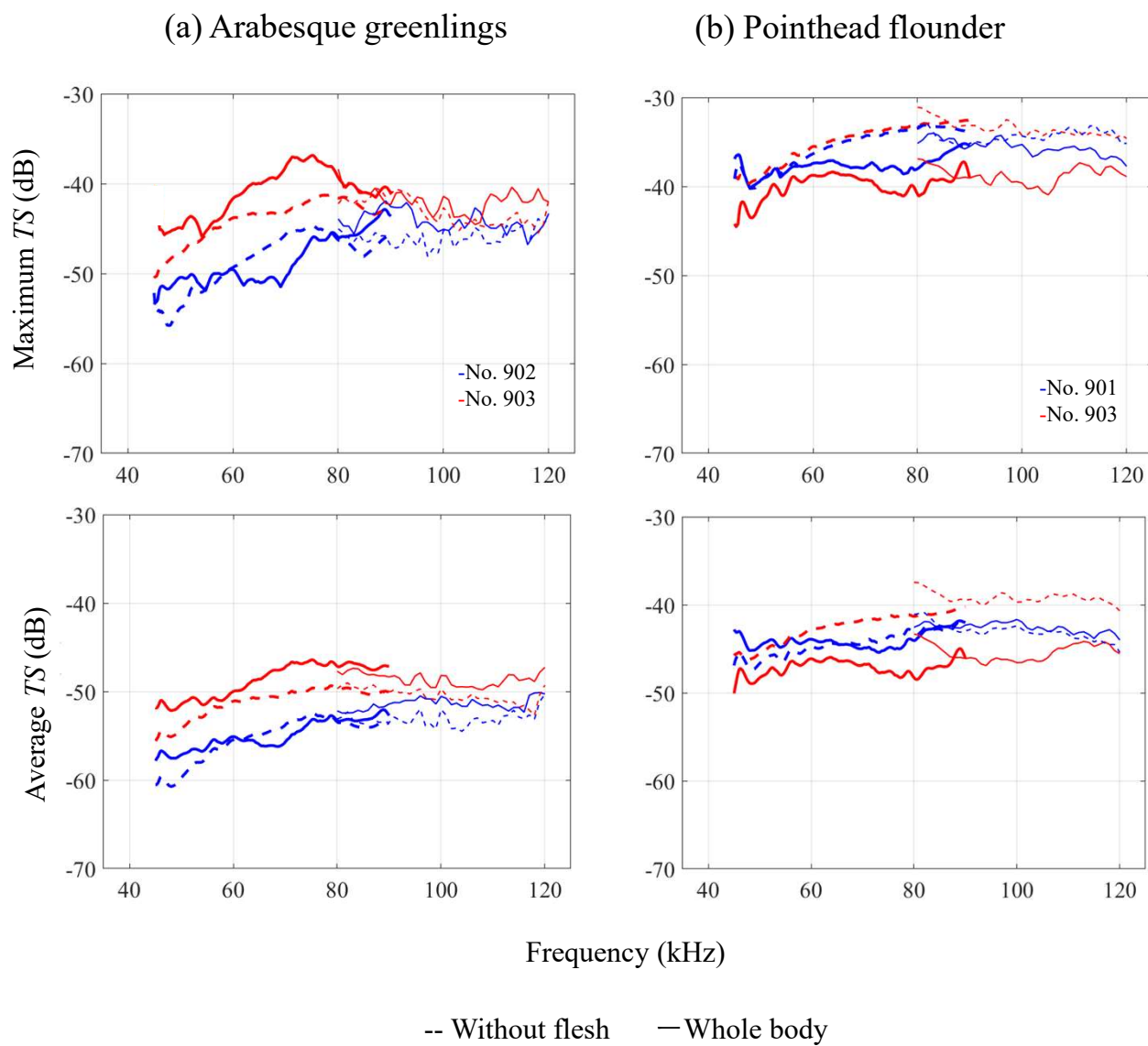


Fig. 4.20 魚肉あり（実線）と魚肉なし（破線）の最大ターゲットストレングス（上半分）と姿勢平均ターゲットストレングス（下半分）の周波数特性の比較.
(a)ホッケ, (b)ソウハチ.

4.4 考察

4.4.1 無鰭魚の規準化ターゲットストレンジス

3 魚種のターゲットストレンジスを比較するため、それぞれについて、体長を波長で規準化した L/λ と、最大ターゲットストレンジスおよび姿勢平均ターゲットストレンジスを体長の 2 乗で規準化した規準化最大ターゲットストレンジスおよび規準化姿勢平均ターゲットストレンジスの関係を Fig. 4.21 に示す。青がホッケ、緑がイカナゴ、赤がソウハチのものである。これらを見ると、 L/λ が大きくなるほど、ソウハチとホッケの規準化ターゲットストレンジスは大きくなるが、イカナゴの規準化ターゲットストレンジスはあまり変化が見られなかった。また、同じ L/λ のソウハチ、ホッケ、イカナゴでは、強側扁型のソウハチの規準化ターゲットストレンジスが最も大きいことが分かった。

次に、Fig. 4.21 に示した規準化最大ターゲットストレンジスと規準化姿勢平均ターゲットストレンジスを魚種ごとに平均し、Fig. 4.22 に示した。3 魚種の規準化ターゲットストレンジスに関し、ソウハチとイカナゴの場合、 L/λ が 5~10 までは、規準化最大ターゲットストレンジスの差が約 4~8 dB であり、規準化姿勢平均ターゲットストレンジスの差は約 6~10 dB であった。ソウハチとホッケを比較する場合、 L/λ が 10~18 までの間、規準化最大ターゲットストレンジスの差が約 9~13 dB であり、規準化姿勢平均ターゲットストレンジスの差は約 7~12 dB であった。一方、ホッケとイカナゴの比較については、体長が大幅に異なるため一概に同じ L/λ での比較は難しいが、全体的な規準化ターゲットストレンジスはほぼ同じ範囲であることがわかった。以上のことから、体高と体幅にあまり差がない紡錘型のホッケ、延長型のイカナゴより、体高と体幅の差が大きい強側扁型のソウハチの方が規準化ターゲットストレンジスが大きいことがわか

った。

また、周波数特性について、ソウハチとイカナゴの場合は、 L/λ が 5～10 までの間、両種とも規準化最大ターゲットストレングスも規準化姿勢平均ターゲットストレングスもほぼ変化がみられなかった。一方、ソウハチとホッケの場合、 L/λ が 10～18 までの間、両種の規準化最大ターゲットストレングスと規準化姿勢平均ターゲットストレングスとも L/λ の増加とともに大きくなる傾向がみられた。また、 L/λ が 18 を超えると規準化ターゲットストレングスは再び一定になるように見える。これらの結果により、強側扁型のソウハチの周波数特性は、紡錘型のホッケや延長型のイカナゴの周波数特性と一致していることがわかった。

以上より、本研究で測定した 3 種の無鰾魚のターゲットストレングスについて、周波数特性が一致し、レベルは強側扁形であるソウハチが一番大きいことが分かった。ソウハチと他 2 種のターゲットストレングスの差について、2 つの原因と考えられる。まず、ソウハチは他の 2 種より音波に当たる面積が大きいので、背方向の面積によるターゲットストレングスへの影響を調べる必要がある。また、体内構造で考えると、他 2 種は背方向から音波に当たるのは魚肉となり、ソウハチの場合は、内臓の方も直接に音波に当たるため、影響をしている可能性もある。

一方、イカナゴとソウハチの規準化ターゲットストレングスはほぼ同様の区間（イカナゴ： L/λ が 4～11；ソウハチ： L/λ が 5～13）に対し、体長依存性がみられた。この区間の規準化ターゲットストレングスを平均し、ターゲットストレングスと体長の関係式を次のように導いた。

イカナゴ ($4 < L/\lambda < 11$)

$$TS_{\max} = 20 \log L - 76.15 \quad (4.3)$$

$$TS_{\text{ave}} = 20 \log L - 85.39 \quad (4.4)$$

ソウハチ ($5 < L/\lambda < 13$)

$$TS_{\max} = 20 \log L - 70.51 \quad (4.5)$$

$$TS_{\text{ave}} = 20 \log L - 76.59 \quad (4.6)$$

ソウハチに関してはいままでに音響情報に関する知見はないが、ホッケとイカナゴについては測定例がある。そこで、それらの結果と本研究の結果を比較するとともに、無鰾魚で最も調べられている大西洋サバの研究結果とも比較し、Fig. 4.23 に示した。横軸は L/λ 、縦軸は規準化平均ターゲットストレングスである。青はホッケ、緑はイカナゴ、赤はソウハチのものである。また、図中、黒い○は、Scoulding *et al.* (2017) が現場で測定した大西洋サバのターゲットストレングス (38, 120 kHz; 平均体長 33 cm)、青い○は高嶋 (2006) が懸垂法で測定したホッケのターゲットストレングス (38, 120 kHz; 平均体長 33.1 cm)、緑の○は Forland *et al.* (2014) により懸垂法で得られたイカナゴのターゲットストレングス (120, 200 kHz; 平均体長 14.5 cm) である。イカナゴの結果を比較すると、本研究の結果は先行研究 (120 kHz) より 4 dB ほど小さかったが、これは 1 点での比較なので注意が必要である。ホッケについては、高嶋 (2006) の測定値と本研究の実測値は近かった。一方、周波数 38 kHz での大西洋サバのターゲットストレングスは、今回測定したホッケのターゲットストレングスとほぼ一致した。また、ソウハチのターゲットストレングスは他の無鰾魚の測定結果より大きいことが分かった。

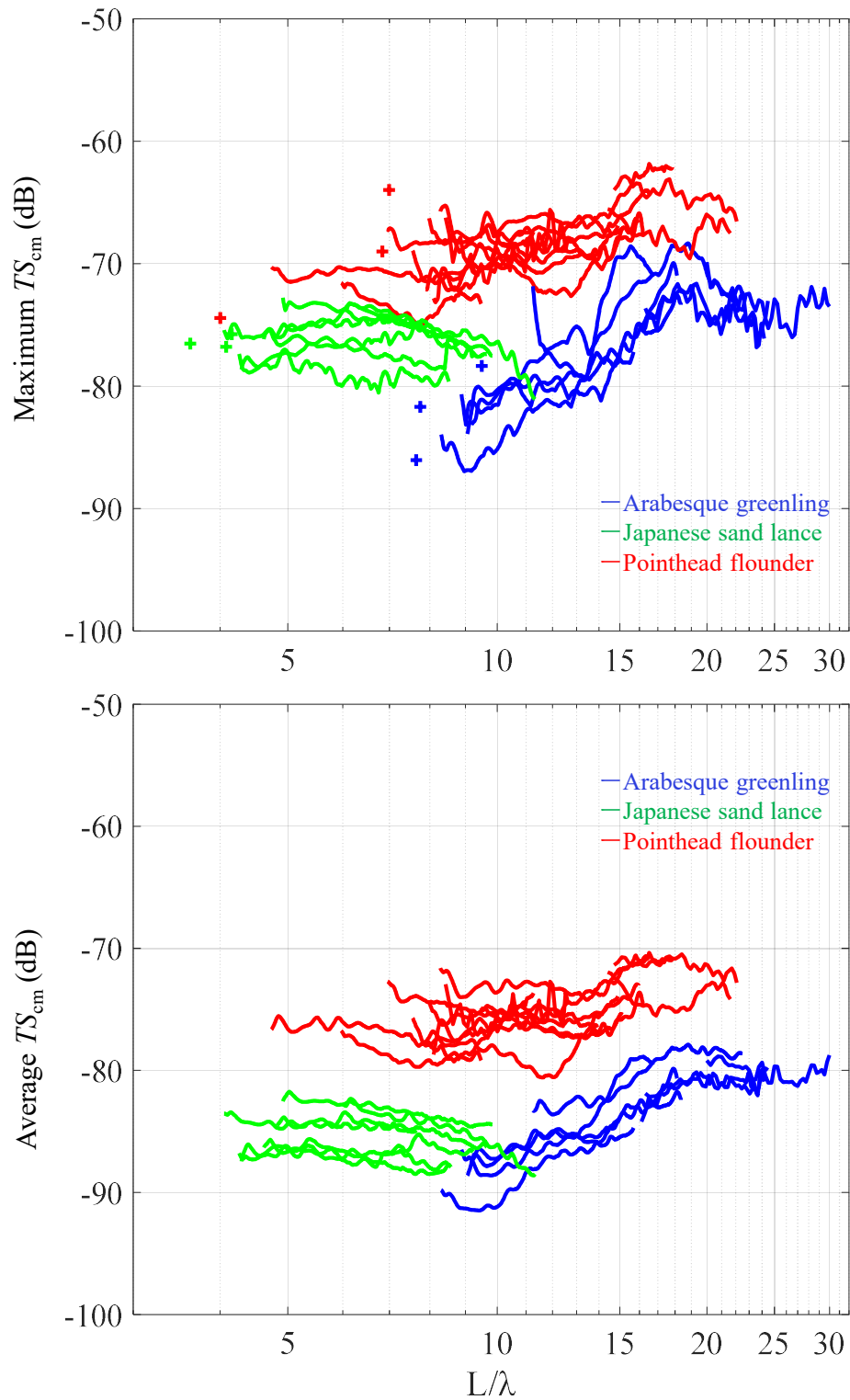


Fig. 4.21 波長で規準化した体長と体長の2乗で規準化した規準化ターゲットストレングスの関係. 青はホッケ, 緑はイカナゴ, 赤はソウハチ
 (上) 最大ターゲットストレングス, (下) 規準化姿勢平均ターゲットストレングス

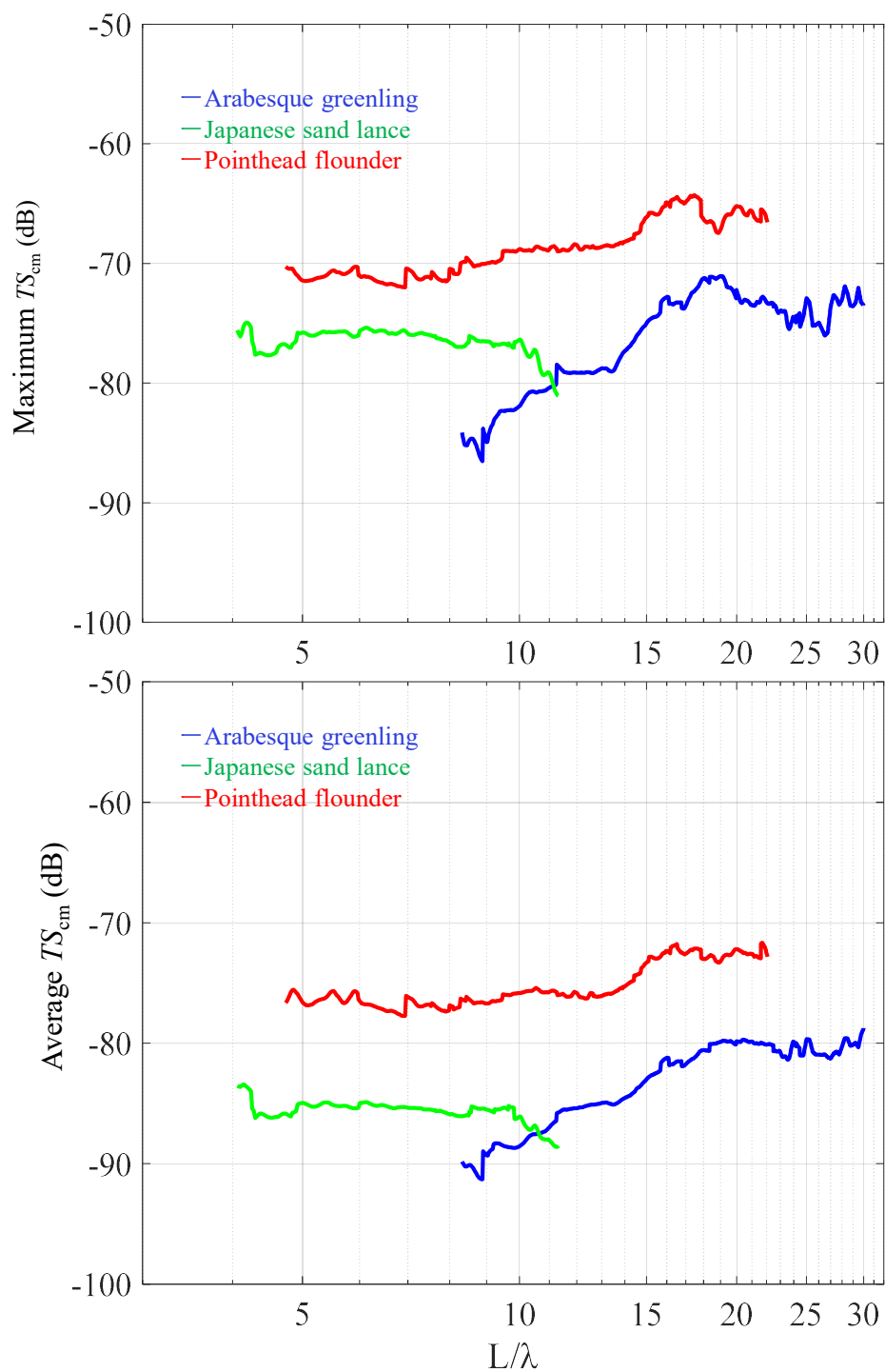


Fig. 4.22 波長で規準化した体長と体長の2乗で規準化した規準化ターゲットストレングスの関係. 青はホッケ5個体の平均, 緑はイカナゴ7個体の平均, 赤はソウハチ9個体の平均.

(上) 最大ターゲットストレングス, (下) 規準化姿勢平均ターゲットストレングス.

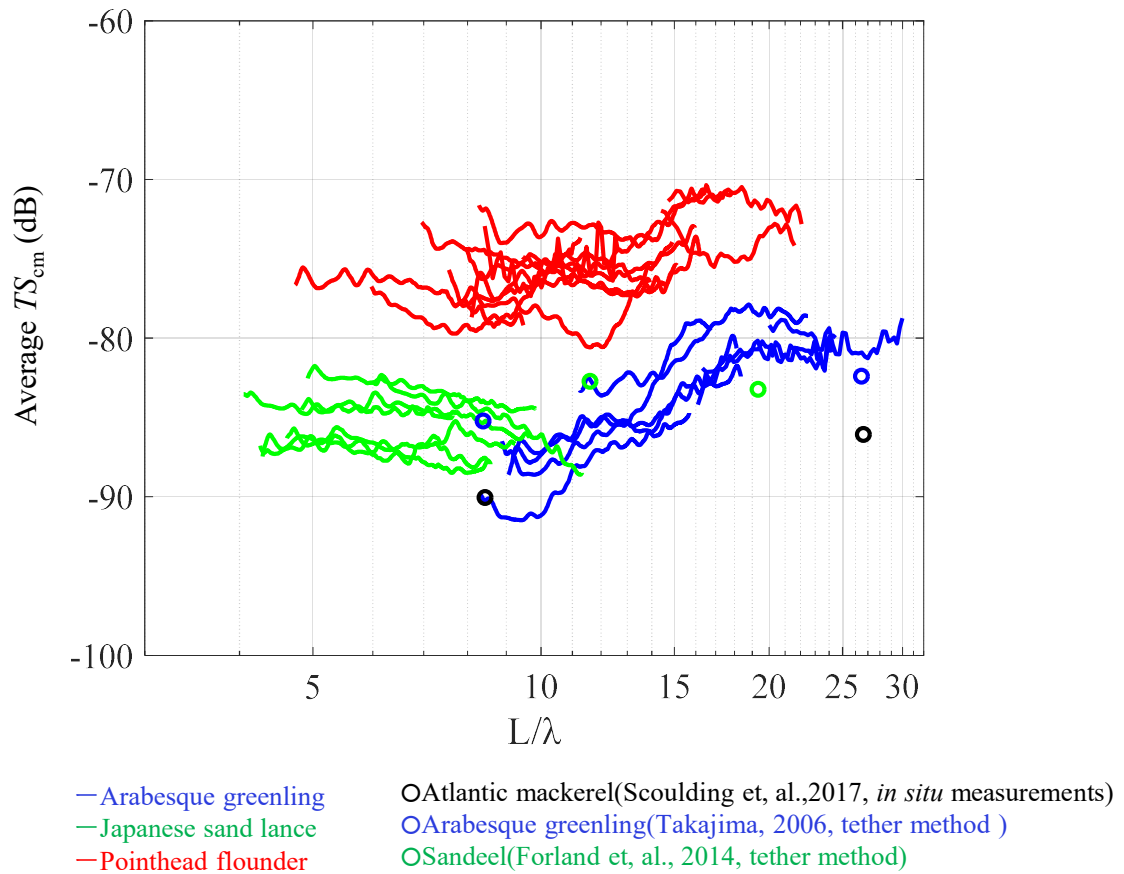


Fig. 4.23 過去に測定されている無鰾魚の波長で規準化した体長と体長の2乗で規準化した規準化姿勢平均ターゲットストレングスの関係. 青はホッケ, 緑はイカナゴ, 赤はソウハチ, 黒丸はScouldingらが自然法で測定した大西洋サバのデータ, 青丸は高嶋が懸垂法で測定したホッケのデータ, 緑丸はForlandらが懸垂法で測定したイカナゴのデータ.

4.4.2 無鰾魚の魚肉および骨によるターゲットストレングスへの影響

Fig. 4.20 から、魚肉を取り除くことにより、ソウハチについては、ターゲットストレングスの値がやや大きくなり、ホッケについては大きくなったり小さくなったりする傾向がみられた。特に、もともと種ごとの各 2 個体のターゲットストレングスに差があったが、魚肉を取り除くことにより差が小さくなった。これは魚肉がターゲットストレングスに影響を与えているものと考えられる。すなわち、肉の厚み、背方向の断面積が影響を及ぼしていると考えられる。一方、魚肉を取り除いても、周波数特性に大きな変化がなかった。これは骨の周波数特性が無鰾魚の周波数特性を主導しているためと考えられる。特にホッケでは、最大ターゲットストレングスがほぼマイナスの姿勢角で現れたが、魚肉なしの状態では最大ターゲットストレングスが 0° 付近に現れた (Fig. 4.18)。これは姿勢角の合わせ方の違いによるものと思われる。ホッケについて、魚肉ありの状態では、姿勢角 0° を魚体がトランスデューサ面と水平になるときとしているが、魚肉なしの状態では、背骨がトランスデューサ面と水平になるときとしており、この時にホッケの最大ターゲットストレングスが現れていた。以上のことから、ホッケに対して、背骨が最大ターゲットストレングスを主導していることが分かった。一方、今回は重量で半分程度の魚肉を取り除いたが、懸垂するために頭部や尾部を残し、技術的な問題で小骨も除去しなかった。測定したターゲットストレングスの値はこれら部位の影響も入っているため、今後これについて調べる必要がある。

4.4.3 面積で規準化した無鰐魚のターゲットストレンジス

4.4.1 で無鰐魚のターゲットストレンジスの大小は体形にもよることを示し、4.4.2 で背方向の断面積が無鰐魚のターゲットストレンジスの変動に影響を及ぼすことを示した。そこで、ターゲットストレンジスと背方向の断面積 S (cm^2) が比例すると仮定し、次の関係を導いた。

$$\sigma_{bs} = b S \quad (4.7)$$

これをデシベルで表現すると、

$$TS_{\text{area}} = TS - 10\log S \quad (4.8)$$

となる。ここで、 TS_{area} は面積で規準化したターゲットストレンジス、 S は魚体の背方向の断面積である。断面積 S の平方根を波長で割ったものと、面積で規準化した最大および姿勢平均ターゲットストレンジスの関係を Fig. 4.24 に示す。横軸は $\sqrt{S}/\lambda$ 、縦軸は TS_{area} を表し、青はホッケ、緑はイカナゴ、赤はソウハチを表した。これらの図から、面積規準によるソウハチとホッケのターゲットストレンジスの値が近いレベルになった。一方、イカナゴの面積は小さく、他の2魚種とは水平軸が重ならず、同じ $\sqrt{S}/\lambda$ で比較することはできなかった。3魚種の TS_{area} の値は全体的に類似しており、最大が-70~-60 dB、平均は-80~-70 dB に集中していた。

次に、魚種ごとに Fig. 4.24 に示した TS_{area} を平均した結果を Fig. 4.25 に示す。Fig. 4.25 から、最大 TS_{area} に関して、イカナゴとソウハチがほぼ同じ TS_{area} を示し、 $\sqrt{S}/\lambda$ が変化しても、 TS_{area} があまり変わらなかった。平均 TS_{area} では、両魚

種については $\sqrt{S}/\lambda$ の変化による平均 TS_{area} の変化はあまりないが、イカナゴの平均 TS_{area} はソウハチより小さかった。本研究で使用した平均ターゲットストレングスは姿勢平均であり、この差は両種の姿勢角分布の違いによるものと考えられる。これらの結果から、イカナゴとソウハチの TS_{area} は周波数による変化はあまりないを考える。一方、ホッケに関しては、 $\sqrt{S}/\lambda$ が大きくなると TS_{area} も大きくなる傾向がみられた。

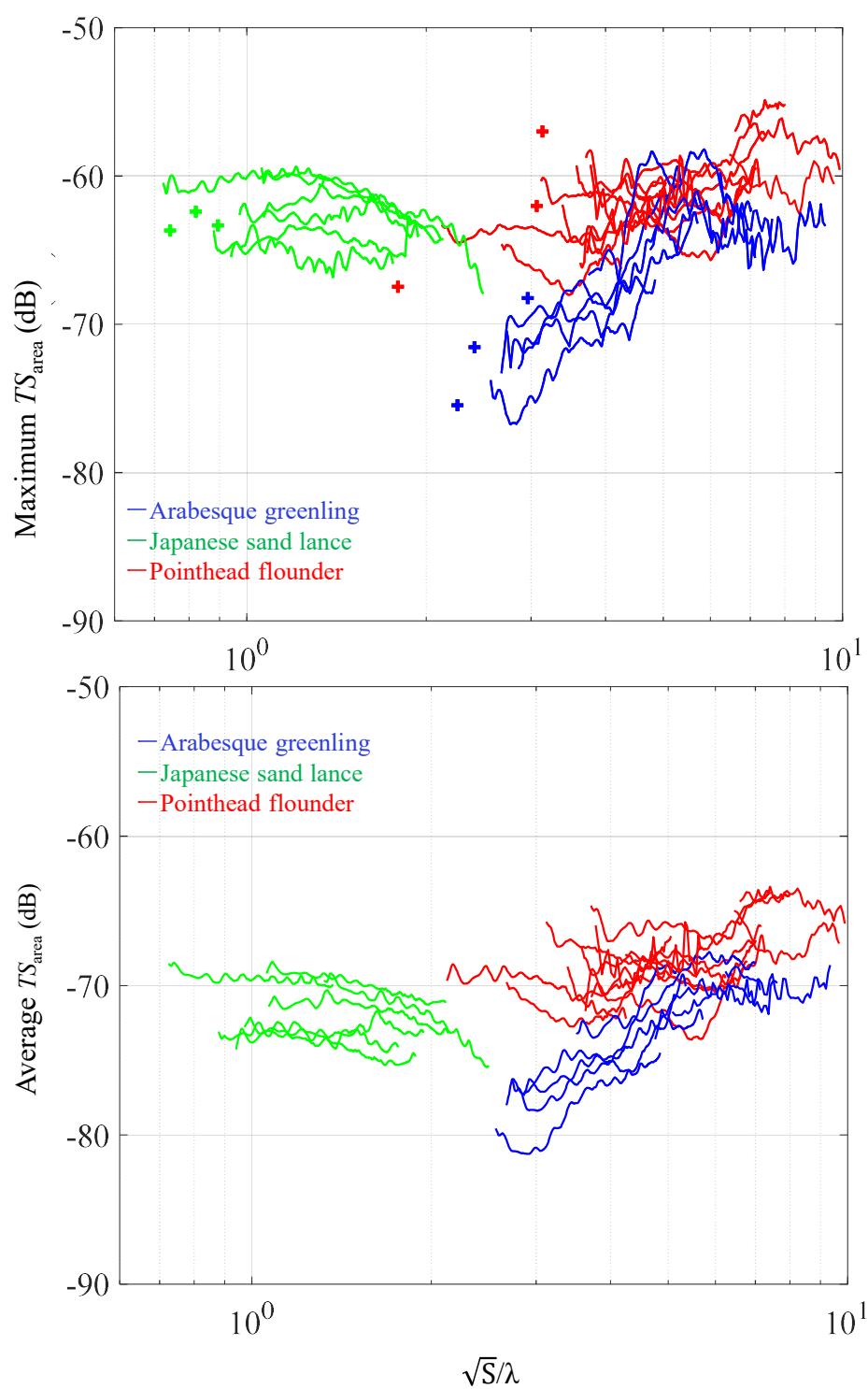


Fig. 4.24 面積の平方根を波長で規準化した値と面積で規準化した規準化ターゲットストレングスの関係. 青はホッケ, 緑はイカナゴ, 赤はソウハチ.
(上) 最大ターゲットストレングス, (下) 姿勢平均ターゲットストレングス.

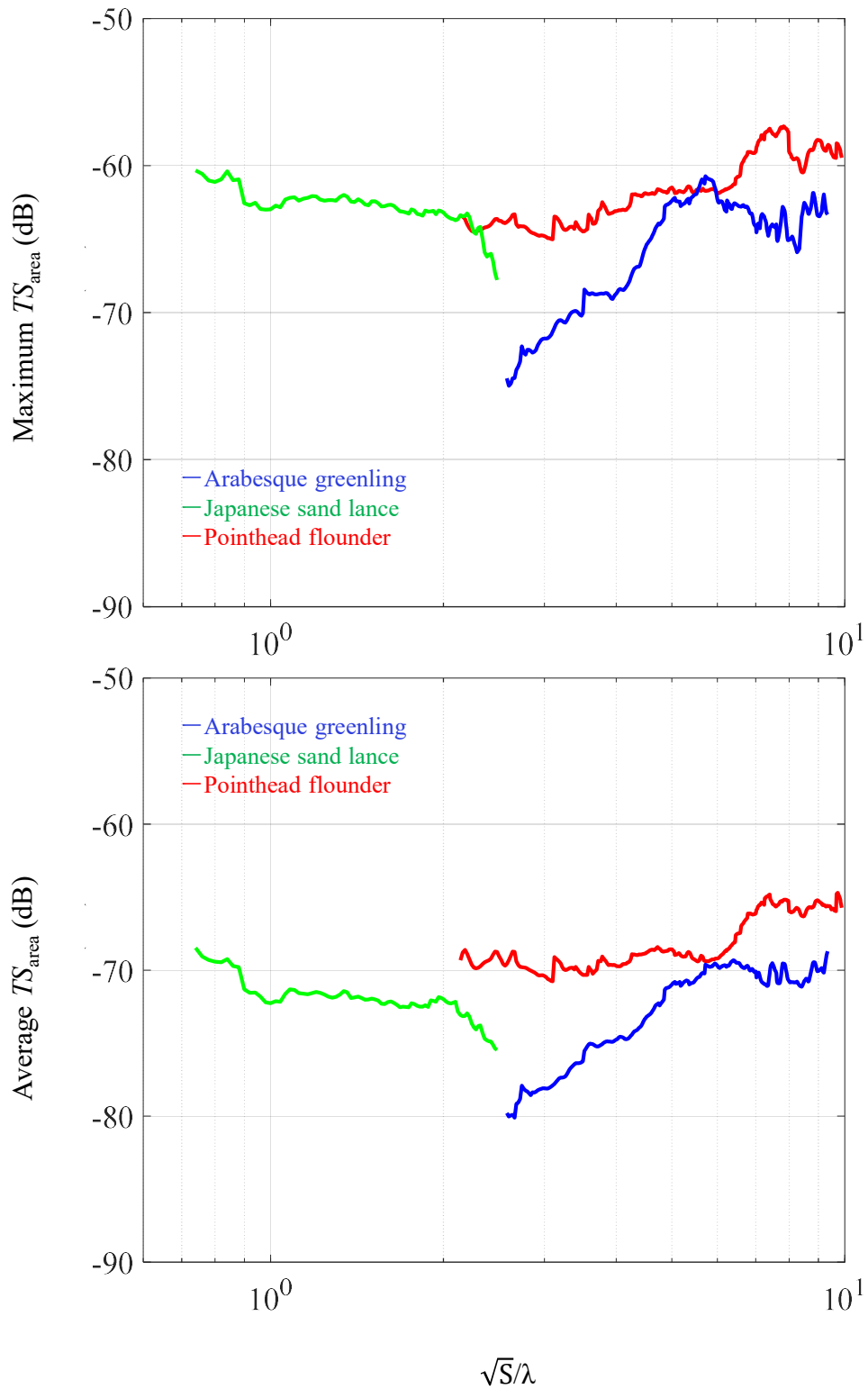


Fig. 4.25 面積の平方根を波長で規準化した値と面積で規準化した規準化ターゲットストレングスの関係. 青はホッケ5個体の平均, 緑はイカナゴ7個体の平均, 赤はソウハチ9個体の平均.

(上) 最大ターゲットストレングス, (下) 姿勢平均ターゲットストレングス.

4.4.4 無鰐魚のターゲットストレングスの体長，周波数依存性

4.4.1 と 4.4.3 で，無鰐魚のターゲットストレングスと体長や面積との関係を調べたが，イカナゴとソウハチについては両者との関係が見られたが，ホッケについては関係が見られなかった。そこで，ターゲットストレングスを波長の 2 乗で規準化し (Love, 1971)，無鰐魚のターゲットストレングスと体長，波長の関係を調べた。その結果を Fig. 4.26 に示す。青はホッケ，緑はイカナゴ，赤はソウハチを表し，上は最大，下は平均を表し，横軸は L/λ ，縦軸は σ/λ^2 ，ここの σ は散乱断面積であり，ターゲットストレングス T_S との関係は次式となる。

$$\sigma = 4\pi T_S \quad (4.8)$$

Fig. 4.26 より，各魚種における， L/λ と σ/λ^2 の回帰式を求め，下記の関係式を得た。

ホッケ ($8 < L/\lambda < 30$) :

$$\sigma_{\max}/\lambda^2 = 2.0 \cdot 10^{-11} (L/\lambda)^{5.543} \quad (R^2 = 0.84) \quad (4.9)$$

$$\sigma_{\text{ave}}/\lambda^2 = 3.0 \cdot 10^{-11} (L/\lambda)^{4.848} \quad (R^2 = 0.90) \quad (4.10)$$

イカナゴ ($4 < L/\lambda < 11$) :

$$\sigma_{\max}/\lambda^2 = 6.13 \cdot 10^{-7} (L/\lambda)^{1.620} \quad (R^2 = 0.46) \quad (4.11)$$

$$\sigma_{\text{ave}}/\lambda^2 = 6.0 \cdot 10^{-8} (L/\lambda)^{1.707} \quad (R^2 = 0.54) \quad (4.12)$$

ソウハチ ($5 < L/\lambda < 22$) :

$$\sigma_{\max}/\lambda^2 = 7.0 \cdot 10^{-8} (L/\lambda)^{3.353} \quad (R^2 = 0.82) \quad (4.13)$$

$$\sigma_{\text{ave}}/\lambda^2 = 4.0 \cdot 10^{-8} (L/\lambda)^{2.928} \quad (R^2 = 0.77) \quad (4.14)$$

これらの式をデシベル表現で表示すると次式のようになる。

ホッケ ($8 < L/\lambda < 30$) :

$$TS_{\max} = 55.43 \log L - 35.43 \log \lambda - 117.98 \quad (R^2 = 0.84) \quad (4.15)$$

$$TS_{\text{ave}} = 48.48 \log L - 28.48 \log \lambda - 116.22 \quad (R^2 = 0.90) \quad (4.16)$$

イカナゴ ($4 < L/\lambda < 11$) :

$$TS_{\max} = 16.20 \log L + 3.80 \log \lambda - 73.14 \quad (R^2 = 0.46) \quad (4.17)$$

$$TS_{\text{ave}} = 17.07 \log L + 2.93 \log \lambda - 83.21 \quad (R^2 = 0.54) \quad (4.18)$$

ソウハチ ($5 < L/\lambda < 22$) :

$$TS_{\max} = 33.53 \log L - 13.53 \log \lambda - 82.54 \quad (R^2 = 0.82) \quad (4.19)$$

$$TS_{\text{ave}} = 29.28 \log L - 9.28 \log \lambda - 84.97 \quad (R^2 = 0.77) \quad (4.20)$$

ここで上記式中、体長 L と波長 λ の単位は cm である。

ホッケとソウハチに関して、決定係数 R^2 は平均も最大も 0.75 以上となり、推定したターゲットストレングスと体長と波長の関係式は信頼度が高いことが示された。一方、イカナゴの場合は 0.5 前後であった。

これらの式で 3 種の体長依存性を比較すると、周波数が一定の場合、ホッケのターゲットストレングスは体長の約 5 乗に比例、イカナゴは約 2 乗、ソウハチは約 3 乗であることが分かった。周波数特性を比較すると、体長が一定の場合、ホッケとソウハチは λ が小さくなるほど（周波数が高くなるほど）ターゲットストレングスが大きくなり、ホッケのターゲットストレングスは周波数による影響が大きいことが分かった。一方、イカナゴに関しては、 λ が小さくなるほど（周波数が高くなるほど）ターゲットストレングスが小さくなり、かつ、周波数によるターゲットストレングスの寄与が小さいことが分かった。

以上のことから、ホッケ、イカナゴ、ソウハチのターゲットストレングスと体長と波長の関係式により、各種における精度の高いターゲットストレングスを推定することが可能と考えられる。一方、イカナゴとソウハチに対し、 L/λ がある一定範囲内において有効な規準化ターゲットストレングスも求めた。規準化ターゲットストレングスは有鰐魚に多く使用され、ターゲットストレングスを

比較, 評価する時に便利なパラメータである。従って, 他種との比較をするときに使用するのがよいと考える。

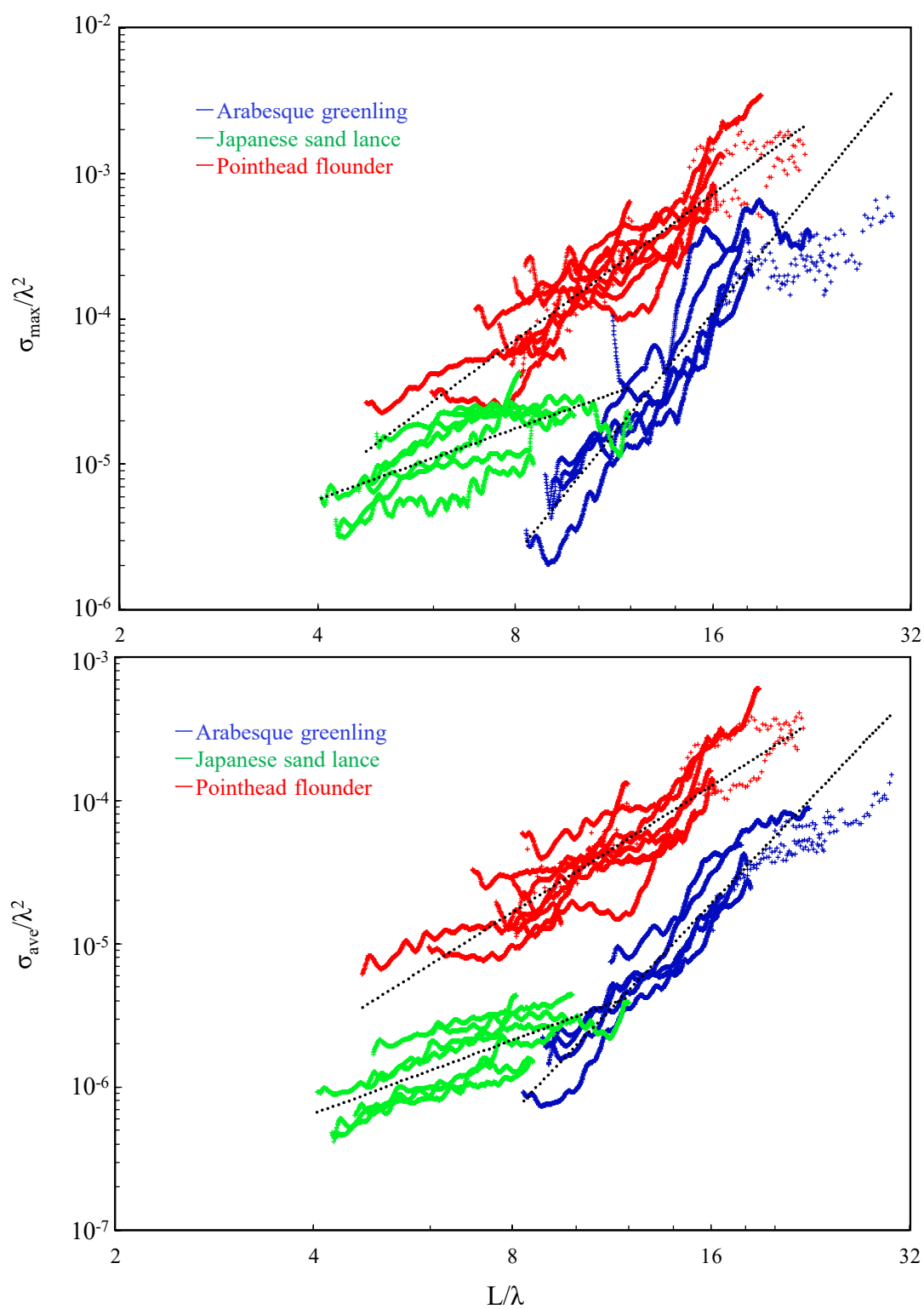


Fig. 4.26 体長を波長で規準化した値と音響散乱断面積を波長の2乗で規準化した規準化最大散乱断面積（上）と規準化姿勢平均散乱断面積（下）の関係．青はホッケ，緑はイカナゴ，赤はソウハチ．

第5章 音響モデルを用いた無鰾魚のターゲット ストレングス推定

5.1 緒言

魚を対象とした音響モデルは、球、有限長円筒などの簡単な形状から始まった (Haslett, 1962; Hashimoto and Maniwa, 1957)。1980 年代から、魚をより忠実に表現できる音響モデルが現れた。Foote (1985) は鰾の表面を微小三角片に分割し、それらに Kirchhoff 近似を用い、各微小面からの反射を合成して魚全体のターゲットストレングスを推定した。Furusawa (1988) は、扁長回転楕円体モード級数モデルを開発し、有鰾魚については鰾を中空回転楕円体とみなし、無鰾魚や動物プランクトンについては体を液状回転楕円体とみなして、回転楕円体波動方程式に境界条件を与え、解としての散乱振幅を計算した。また、Stanton (1989) や Ye (1997) は、魚体や鰾を円筒薄片の集まりとみなして各円筒薄片の表面の散乱の和で全体の散乱を表現できるとした変形円筒モデル (Deformed Cylinder Model; 以下 DC モデルとする) を開発した。最近是有鰾魚の音響モデルとして、Clay and Horne (1994) が開発した音線近似・短円筒合成モデル (Kirchhoff-Ray Mode Model; 以下 KRM モデルとする) が良く使われる。これは、魚体と鰾の形状をトレースし、それぞれの境界の表面における音響散乱を計算し、両者をコヒーレント加算して、全体の反射を求めるものである。一方、Stanton *et al.* (1988) は、無鰾魚やプランクトンのような弱散乱体を対象として、その形状を薄い円筒の集まりとして比較的忠実に形状近似できる変形ボルン近似・短円筒合成モデル (Distorted-Wave Born Approximation Model; 以下 DWBA モデルとする) を提案している。

本研究では、過去に無鰾魚のターゲットストレングス推定に採用されている

モデルおよび古澤（2016）が魚体モデルとして推奨しているモデルの中から 3 つのモデル，すなわち DC モデル，DWBA モデルおよび KRM モデルを採用した。KRM モデルについては，有鰐魚に適用される音響モデルとして，現在最も多く使用されているモデルである（Jech and Horne, 2002; Reeder *et al.*, 2004; Hazen and Horne, 2004; Jech *et al.* 2017）。このモデルは有鰐魚において，魚体と鰐の散乱を考えるが，最近，Jech *et al.*（2017）によってマナガツオの魚体と背骨の音響散乱のモデルとして使われた。そこで本研究においても，鰐の散乱の部分を背骨の散乱に置き換えて計算した。

ここでは，第 4 章でターゲットストレングスの精密測定を行った個体の魚体や骨の形状を用い，DC，DWBA，KRM モデルにおける無鰐魚のターゲットストレングスの理論推定を行い，実測値と理論値を比較することで無鰐魚の音響散乱特性を調べた。

5.2 方法

5.2.1 Deformed Cylinder Model (DC モデル)

変形円筒モデルは、魚体を短い円筒の連続として考え、各円筒からの散乱の和を散乱体全体の散乱とするものである。このモデルは Junger (1982) により提唱され、Stanton (1988, 1989) および Ye *et al.* (1997) により実用的なモデルとして開発された。本研究においては Ye *et al.* (1997) に基づいて計算を行った。散乱振幅 A_s は次式で与えられる。

$$A_s(\vec{k}_i, \vec{k}_s) = \int \frac{-i}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} B_n(z) F_n(z) (-i)^n \cos[n\Phi(z)] \exp[i\vec{k}_i \cdot \vec{r}_p(z) - i\vec{k}_s \cdot \vec{r}_p(z)] dz \quad (5.1)$$

$\vec{k}_i$ と $\vec{k}_s$ はそれぞれ円筒の軸方向を z としたときの入射波と反射波の波数ベクトル、 i は虚数単位を表す。 $B_n(z)$ と $F_n(z)$ は n 番目の展開係数で、境界条件によって決まる。 Φ は反射面の入射面からの角度であり、 $\vec{r}_p(z)$ は短円筒中心位置ベクトルである。散乱振幅 A_s とターゲットストレングス TS の関係は次式となる。

$$TS = 10 \log_{10}(|A_s|^2 / r_0^2) \quad (5.2)$$

ここで r_0 は規準距離であり、1 m である。DC モデルは、散乱体への超音波入射角の適用範囲が狭い ($< 25^\circ$) という制限がある。さらに、Ye *et al.* (1997) は、短軸と長軸の比 (アスペクト比) が大きすぎる (1 に近い) 形状には適用できず、長軸が短軸の 5 倍程度あることが望ましいとしている。そのため、DC モデル

はソウハチには適用できず，ホッケとイカナゴのターゲットストレングス推定に使用した。

5.2.2 Distorted-Wave Born Approximation Model (DWBA モデル)

DWBA モデルは、散乱体内の音速と密度が媒質のそれらと近く、散乱体の形状を体軸に沿った一連の円筒薄片とみなせる場合に使用でき、散乱振幅 A_s 、ターゲットストレングス TS は以下の式で示される。

$$A_s = \frac{k_1^2}{4} \int_{\vec{r}_p} \frac{a}{k_2} \left(\frac{1+h^2}{gh^2} - 2 \right) \exp(i2\vec{k}_2 \cdot \vec{r}_p) \frac{J_1(2k_2 a \cos \beta)}{\cos \beta} |d\vec{r}_p| \quad (5.3)$$

$$TS = 10 \log_{10}(|A_s|^2 / r_0^2) \quad (5.4)$$

ここで $\vec{r}_p$ は円筒薄片の中心の位置ベクトル、 k_1 は周囲媒質の波数、 k_2 は散乱体内部の波数、 a は円筒薄片の半径、 J_1 は第 1 種第 1 次ベッセル関数、 β は入射波と円筒の軸方向との成す角度、 g は生体と周囲媒質との密度比、 h は生体内と周囲媒質との音速比を表している。

ソウハチの場合、体幅と体高に大きな差があり、体を円筒に近似できないため、今回は形状のトレースは使わず、魚体を体長・体幅・体高それぞれの半分の長さを楕円体の半径とする扁平楕円体に近似してターゲットストレングスを求めた（奥村私信）。

5.2.3 Kirchhoff-Ray Mode Model (KRM モデル)

KRM モデルは、鰐と魚体をそれぞれ短円筒に近似して別々に散乱振幅を計算し、それらをコヒーレント加算して、全体の振幅とするモデルである。本研究では鰐の部分を背骨に置き換えて計算を行った。背骨による散乱振幅 A_{ss} は次式から求める。

$$A_{ss} = \frac{-iR_{bs}(1 - R_{wb}^2)}{2\sqrt{\pi}} \sum_{j=1}^{N_s} A_j [(k_b a_j + 1) \sin \theta]^{\frac{1}{2}} \exp[-i(2k_b v_j + \psi_{sj})] \Delta u_j \quad (5.5)$$

R_{bs} は魚体と背骨間の反射率、 R_{wb} は周囲の海水と魚体の間の反射率で透過率との関係は $1 - R_{wb}^2$ である。 N_s は背骨のシリンダー数、 k は媒質内の波数、 θ はトランスデューサに対する魚の角度、 A_j と ψ_{sj} は ka が小さいときの振幅と位相の補正項、 u_j は各要素の間隔、 a_j は半径、 v_j は背側の座標である。

一方、魚体の散乱振幅 A_{sb} は次式で求める。

$$A_{sb} = \frac{-iR_{wb}}{2\sqrt{\pi}} \sum_{j=1}^{N_b} \sqrt{k a_j} \Delta u_j \times \{ \exp(-i2k v_{Uj}) - (1 - R_{wb}^2) \exp[-i2k v_{Uj} + i2k_b(v_{Uj} - v_{Lj}) + i\psi_{bj}] \} \quad (5.6)$$

背骨と魚体からのそれぞれの散乱振幅はコヒーレントに合成され、魚全体の散乱振幅である A_{sw} 、ターゲットストレングス TS は

$$A_{sw} = A_{ss} + A_{sb} \quad (5.7)$$

$$TS = 10\log_{10}(|A_{sw}|^2/r_0^2) \quad (5.8)$$

となる。

5.2.4 音響モデルの計算に用いた各種パラメータについて

各魚種において、ターゲットストレングスの推定に使用した魚体の形状や背骨の形状は、第4章でターゲットストレングス測定を行ったホッケ、イカナゴ、ソウハチのX線写真をそれぞれトレースしたものである (Fig. 5.1)。トレースで得られた形状は、体長方向に1 mm 刻みで分割し、そのトレースデータを用いてターゲットストレングスを計算した。ターゲットストレングスは各魚種でピッチ角-30 ° から 30 ° まで 0.1 ° 刻みで推定し、平均ターゲットストレングスは第4章と同じ姿勢角分布を用いて平均した。

計算に用いた魚体および背骨の物理パラメータを Table 5.1 に示す。ホッケとソウハチについては Nesse *et al.* (2009) による大西洋サバの魚肉の音速比と密度比を用いた。イカナゴについては, Yasuma *et al.* (2009) が測定した値である音速比と密度比を使用した。背骨については高橋 (2007) が測定したハタハタの骨の音速比と密度比を使用した。

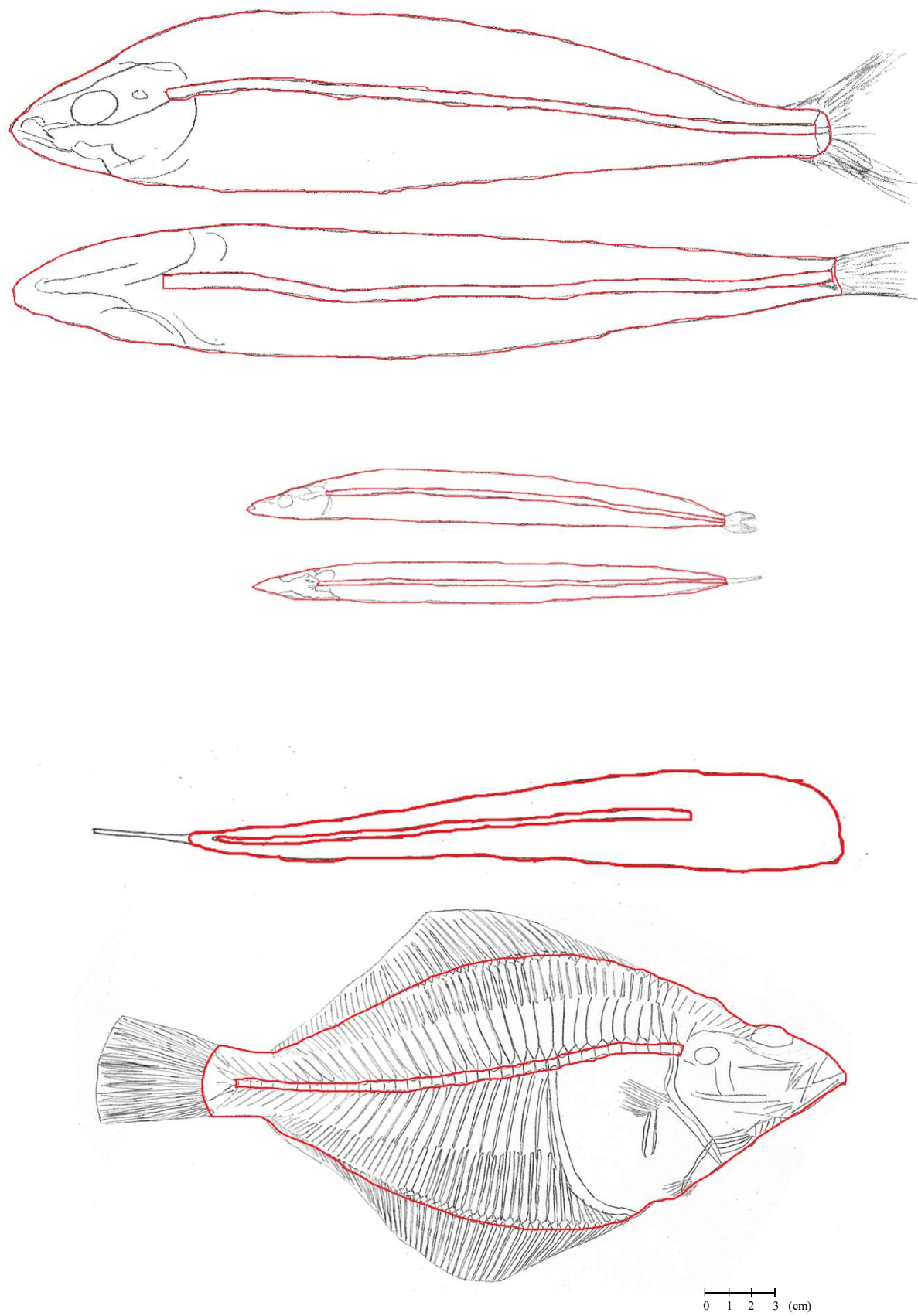


Fig.5.1 X線写真からトレースした魚体及び背骨の側面方向および背方向の形状.
(上から順に, ホッケ, イカナゴ, ソウハチ)

Table 5.1 音響モデルによるターゲットストレングスの推定に
使用した密度比 g と音速比 h .

		g	h
Flesh	Arabesque greenling	1.025	1.025
	Japanese sand lance	1.032	1.020
	Pointhead flounder	1.025	1.025
Backbone		1.150	1.347

5.3 結果

5.3.1 音響モデルによる無鰾魚のターゲットストレンジススペクトル

DC, DWBA, KRM モデルで推定した体長 30.2 cm のホッケのターゲットストレンジススペクトルをそれぞれ Fig. 5.2 から Fig. 5.5 に実測値とともに示す。横軸はピッチ角、縦軸は周波数であり、色でターゲットストレンジスの大小を表している。DC モデル (Fig. 5.2) と DWBA モデル (Fig. 5.3) については、左側が音響モデルによるターゲットストレンジススペクトル、右側は第 4 章における実測値である。KRM モデルについては、Fig. 5.4 の左は音響モデルで推定した背骨のターゲットストレンジス (以降、背骨の理論ターゲットストレンジスという)、右は音響モデルで推定した魚肉のターゲットストレンジス (以降、魚肉の理論ターゲットストレンジスという)、Fig. 5.5 の左は音響モデルで推定した背骨と魚肉を合わせた魚体のターゲットストレンジス (以降、魚体の理論ターゲットストレンジスという)、右は実測のターゲットストレンジスを表している。

DC モデル, DWBA モデルで推定したホッケの魚体の理論ターゲットストレンジスは、メインローブが 0° 付近に現れ、周波数が高くなるとメインローブが周期的に小さくなる。また、 0° での値は、メインローブの周期に従って幅が大きくなったり小さくなったり変動し、 0° から離れるほど理論ターゲットストレンジスが小さくなった。実測値と比較してみると、実測の方はメインローブがはっきりしておらず、理論ターゲットストレンジスより全体的に大きいことが分かった。KRM モデルで推定した背骨の理論ターゲットストレンジス (Fig. 5.4 左) は、メインローブがマイナスの角度に現れ、周波数が高くなるほどメインローブの幅がやや小さくなり、サイドローブが増え、指向性が鋭くなる傾向が見られた。一方、KRM モデルで推定した魚肉の理論ターゲットストレンジス (Fig.

5.4 右) は, DC モデル, DWBA モデルで推定した魚肉の理論ターゲットストレングスのパターンと類似しており, メインローブが 0° 付近に現れ, 周波数が高くなるとメインローブの幅が周期的に小さくなり, サイドローブが増えていった。Fig. 5.5 に示した KRM モデルで推定したホッケの魚体の理論ターゲットストレングスは, メインローブが若干マイナス側に現れ, 周波数が高くなるとメインローブがいくつかに分かれる様子が見られた。実測値と比較してみると, メインローブ付近は魚体の理論ターゲットストレングスの方が大きかった。

次に体長 14.2 cm のイカナゴの理論ターゲットストレングスのスペクトルを Fig. 5.6～Fig. 5.9 に示す。DC モデル (Fig. 5.6) と DWBA (Fig. 5.7) モデルで推定したイカナゴの魚体の理論ターゲットストレングスは, パターンが似ており, メインローブが 0° 付近に現れ, 周波数 80 kHz 付近でメインローブの最大ターゲットストレングスがやや小さくなり, 幅も狭くなっており, 80 kHz 以上で再びメインローブのターゲットストレングスや幅が大きくなる傾向が見られた。また, 0° から離れるに従って理論ターゲットストレングが小さくなるというピッチ角特性も見られた。これらの特徴を実測値と比較してみると, メインローブの位置やターゲットストレングスのピッチ角特性はよく一致していた。KRM モデルで推定したイカナゴの背骨の理論ターゲットストレングス (Fig. 5.8 左) は, メインローブがマイナスのほうに現れ, 周波数が高くなるほどサイドローブが多くなり, 指向性が鋭くなる傾向が見られた。一方, KRM モデルで推定した魚肉の理論ターゲットストレングス (Fig. 5.8 右) は, DC モデルと DWBA モデルで推定した魚肉の理論ターゲットストレングスパターンと似ており, メインローブが少しだけマイナス側に現れ, 周波数 65 kHz まではメインローブの最大ターゲットストレングスが高周波数になるほど小さくなり, 65 kHz 以上では高周波数になるほど大きくなる傾向が見られた。Fig. 5.9 に示した KRM モデルで推定したイカナゴの魚体の理論ターゲットストレングスは, メインローブが

マイナス側に現れ、周波数が高くなるとメインローブが広がっていた。メインローブの最大ターゲットストレングスはマイナス側に現れ、周波数が高くなると大きくなる傾向が見られた。実測値と比較してみると、KRM モデルで推定したメインローブの理論ターゲットストレングスの方が大きいことが分かった。

体長 27.0 cm のソウハチの理論ターゲットストレングスのスペクトルを Fig. 5.10 から Fig. 5.12 に示す。DWBA モデル (Fig. 5.10) で推定したソウハチの理論ターゲットストレングスは、メインローブが 0° 付近に現れ、周波数が高くなるとメインローブの幅が狭くなり、サイドローブが増え指向性が鋭くなる傾向が見られた。また、 0° から両サイドにいくほど理論ターゲットストレングが小さくなる傾向も見られた。実測値と比較したところ、メインローブの位置と幅の変化はよく一致していた。KRM モデルで推定したソウハチの背骨の理論ターゲットストレングス (Fig. 5.11 左) は、メインローブがマイナスのほうに現れ、周波数が高くなるほどメインローブが細くなり、サイドローブが多くなり指向性が鋭くなる傾向が見られた。一方、KRM モデルで推定した魚肉の理論ターゲットストレングス (Fig. 5.11 右) は、メインローブがはっきりしておらず、 0° 付近に複数のローブが現れ、周波数が高くなると周期的に大きくなったり、小さくなったりしていた。Fig. 5.12 に示した KRM モデルで推定したソウハチの魚体の理論ターゲットストレングスは、メインローブがマイナス側に現れ、周波数が高くなるとメインローブがいくつに分かれたり、指向性が鋭くなる傾向が見られた。実測値と比較してみると、KRM モデルで推定したソウハチの理論ターゲットストレングスのメインローブ位置やその幅はよく一致しているように見える。

Arabesque greenling

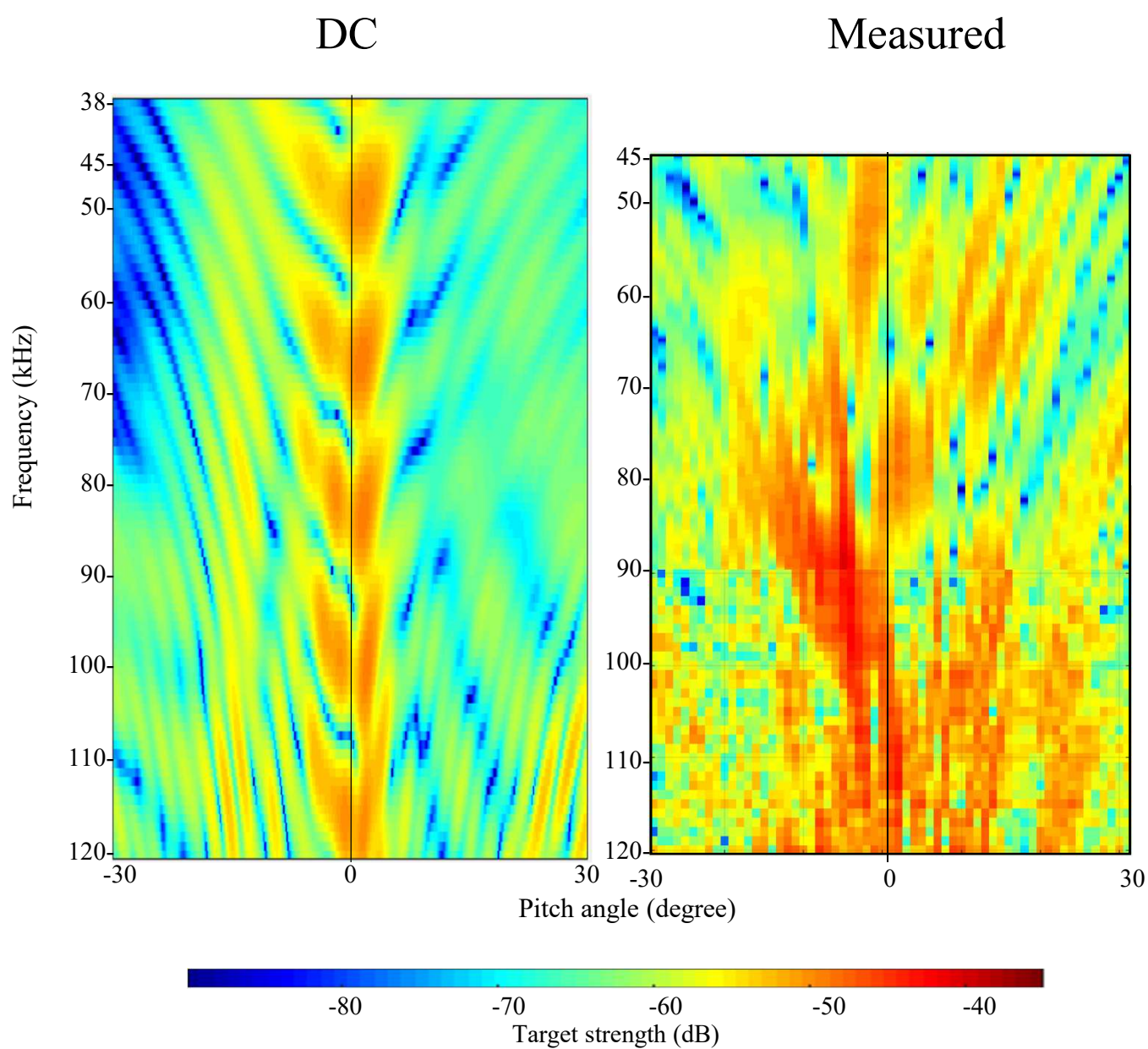


Fig.5.2 ホッケ（体長30.2 cm）のターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性のDCモデルによる推定値（左）と実測値（右）の比較

Arabesque greenling

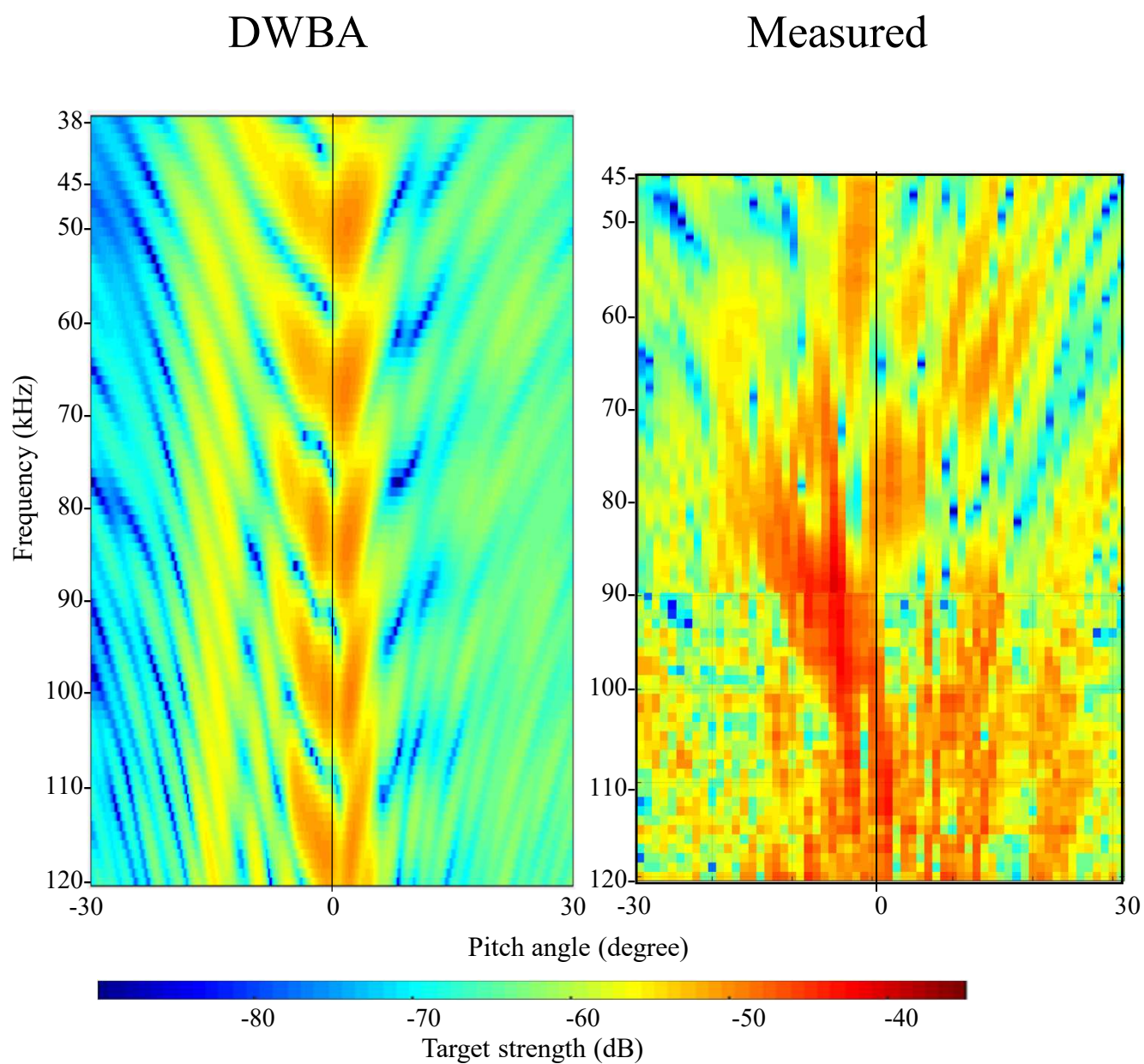


Fig.5.3 ホッケ（体長30.2 cm）のターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性のDWBAモデルによる推定値（左）と実測値（右）の比較

Arabesque greenling

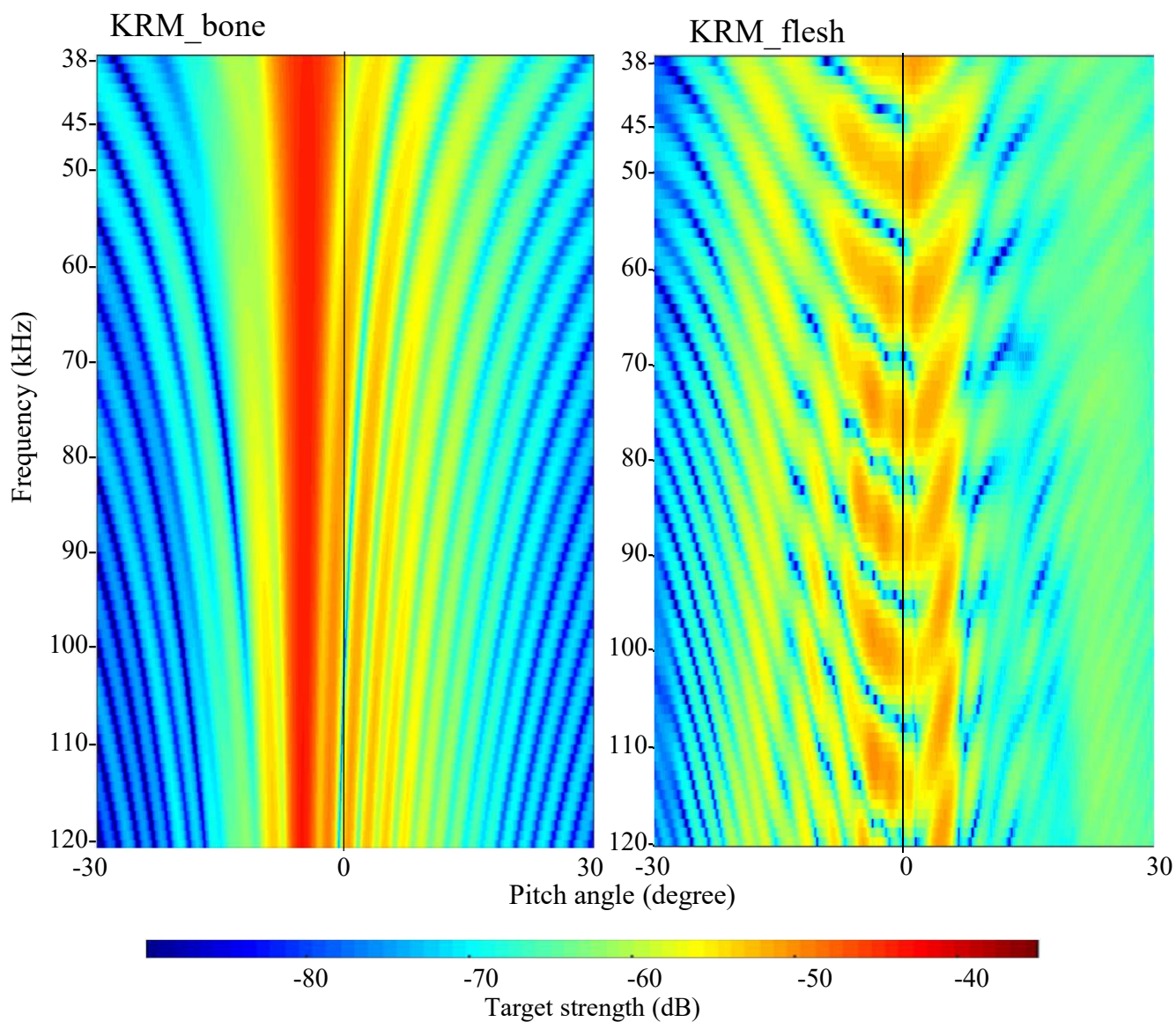


Fig.5.4 KRMモデルにより推定したホッケ（体長30.2 cm）の魚肉（左）や背骨（右）のターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性.

Arabesque greenling

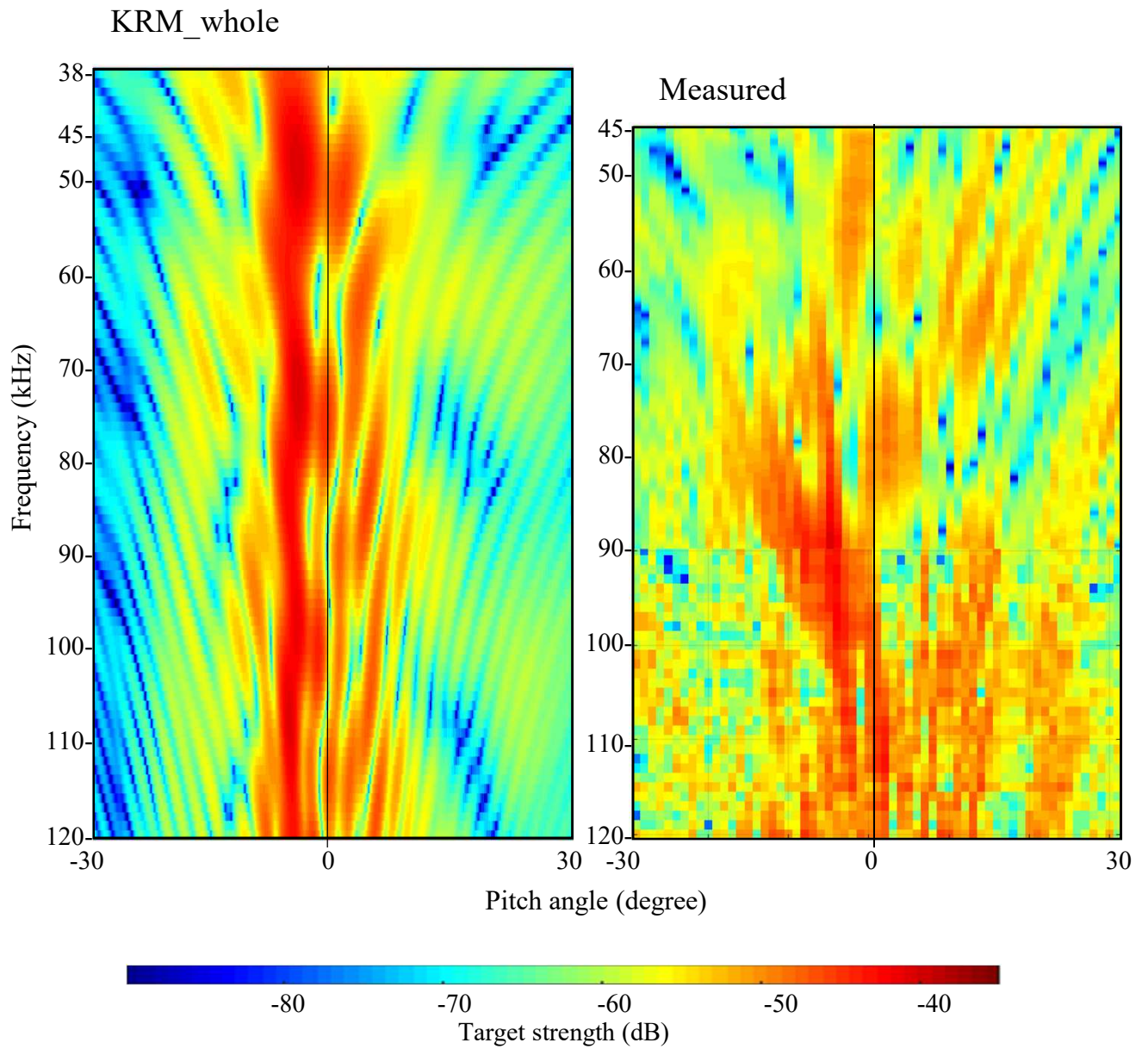


Fig.5.5 ホッケ（体長30.2 cm）のターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性のKRMモデルによる推定値（左）と実測値（右）。

Japanese sand lance

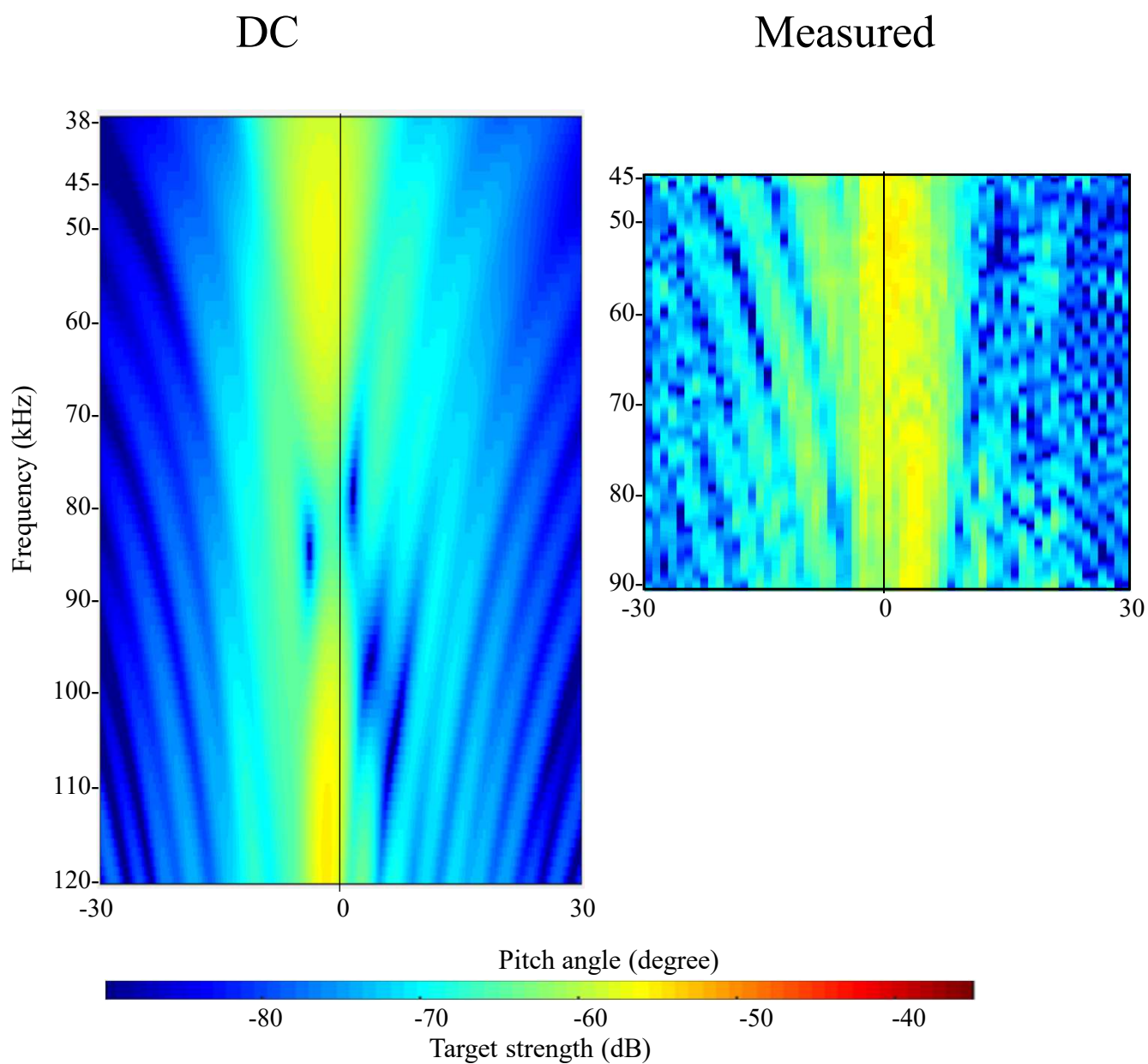


Fig.5.6 イカナゴ（体長14.2 cm）のターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性のDCモデルによる推定値（左）と実測値（右）の比較

Japanese sand lance

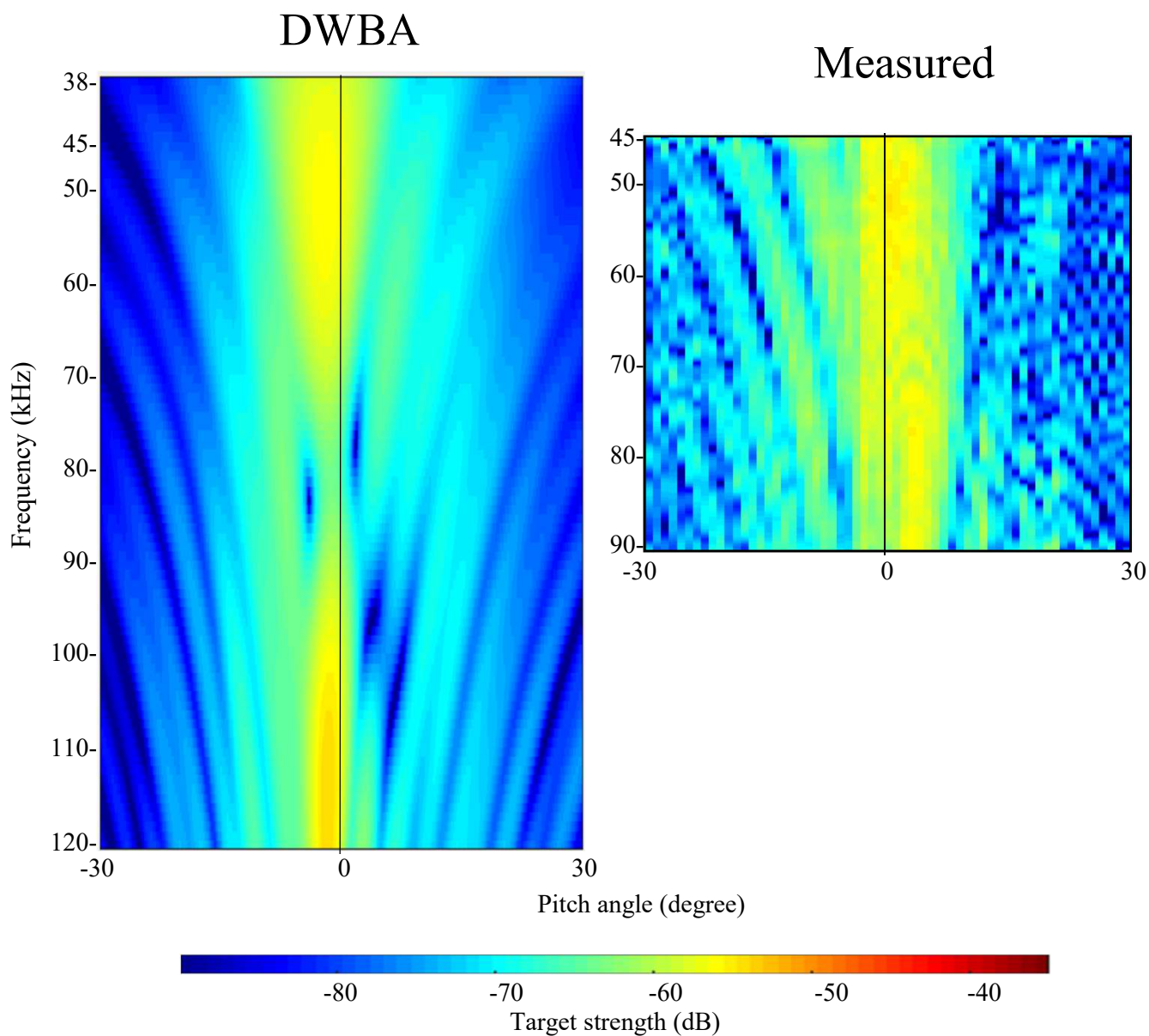


Fig.5.7 イカナゴ（体長14.2 cm）のターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性のDWBAモデルによる推定値（左）と実測値（右）の比較

Japanese sand lance

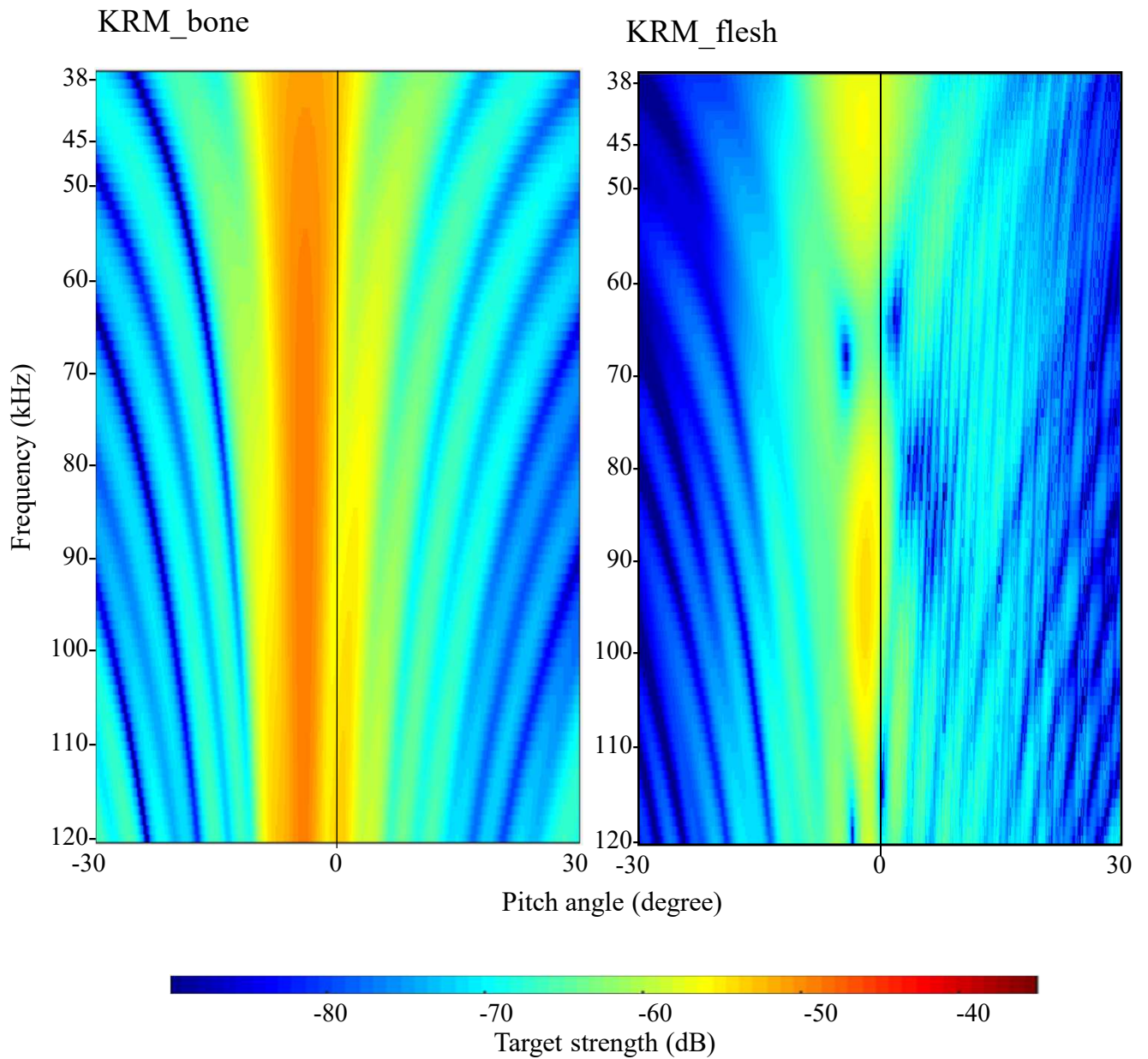


Fig.5.8 KRMモデルにより推定したイカナゴ（体長14.2 cm）の魚肉（左）や背骨（右）のターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性.

Japanese sand lance

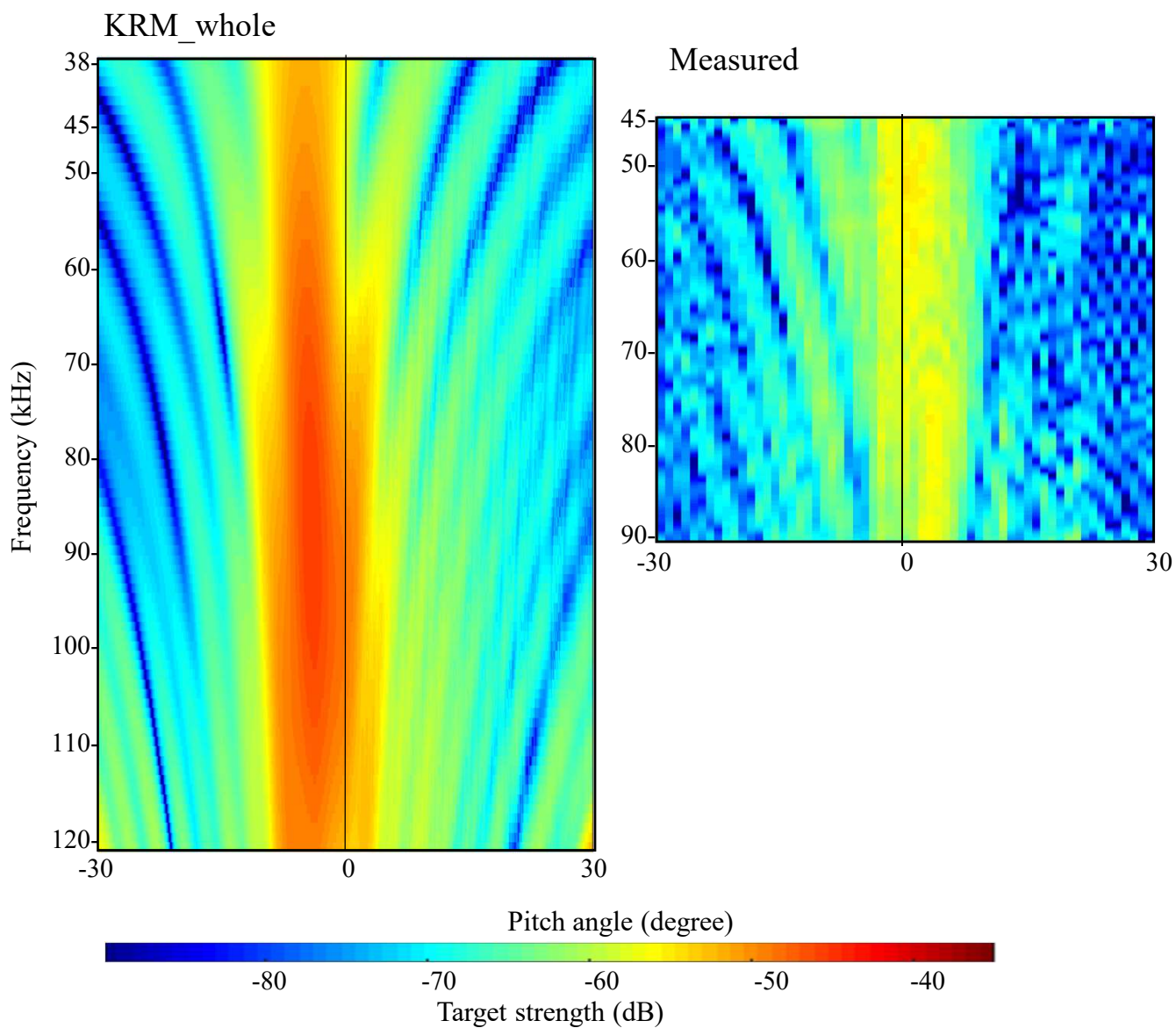


Fig.5.9 イカナゴ（体長14.2 cm）のターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性のKRMモデルによる推定値（左）と実測値（右）。

Pointhead flounder

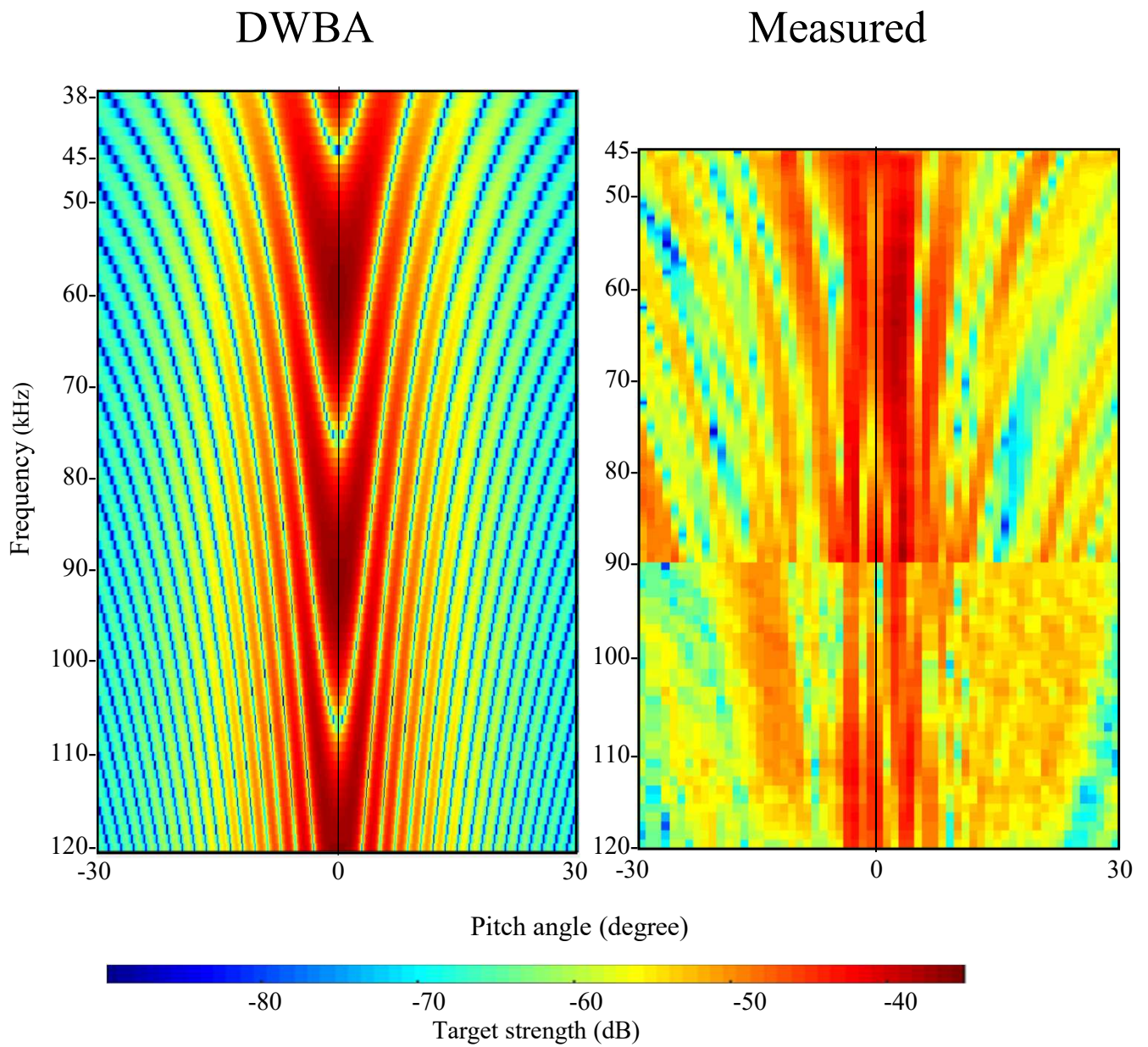


Fig.5.10 ソウハチ（体長27.0 cm）のターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性のDWBAモデルによる推定値（左）と実測値（右）の比較

Pointhead flounder

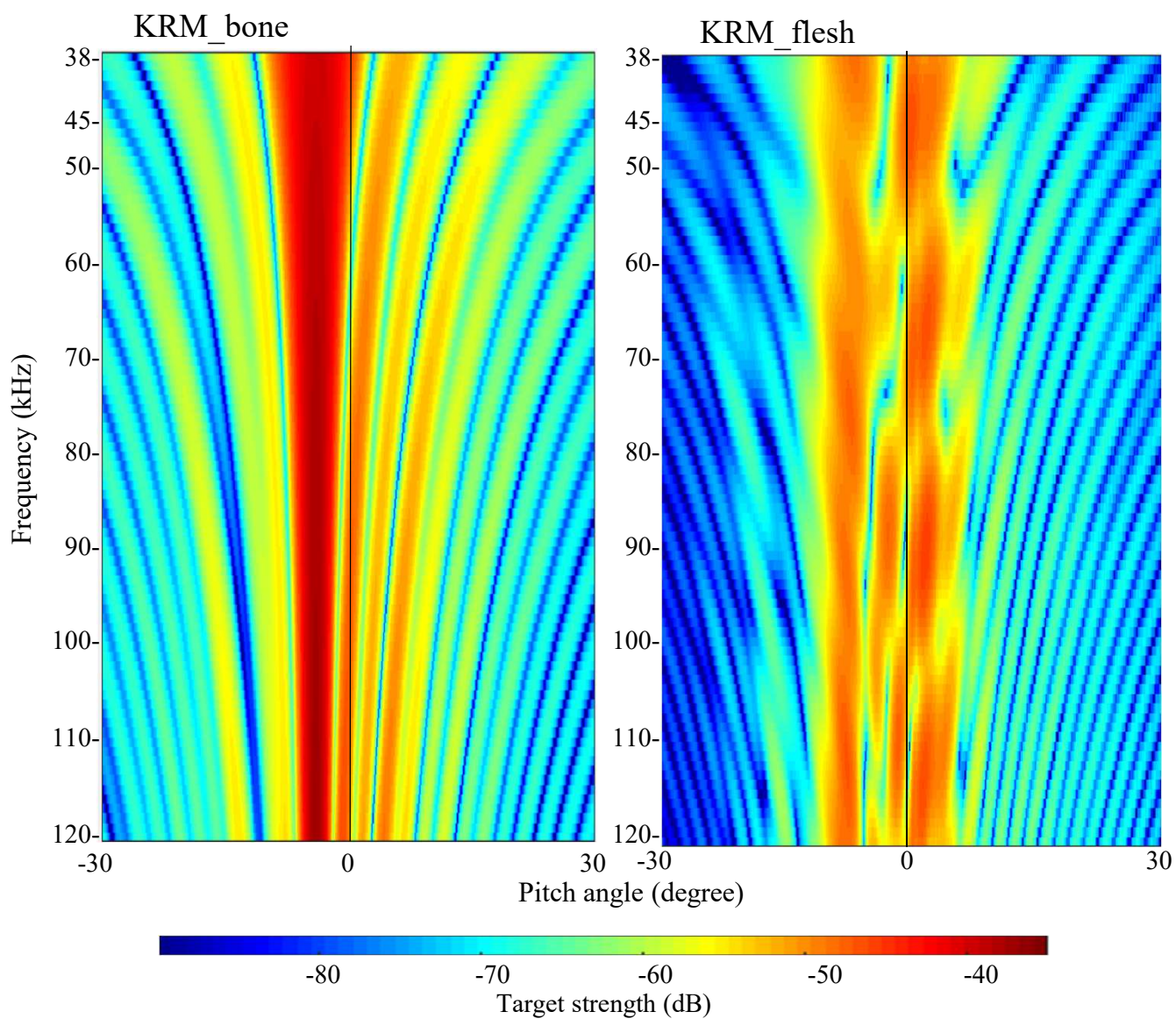


Fig.5.11 KRMモデルにより推定したソウハチ（体長27.0 cm）の魚肉（左）や背骨（右）のターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性.

Pointhead flounder

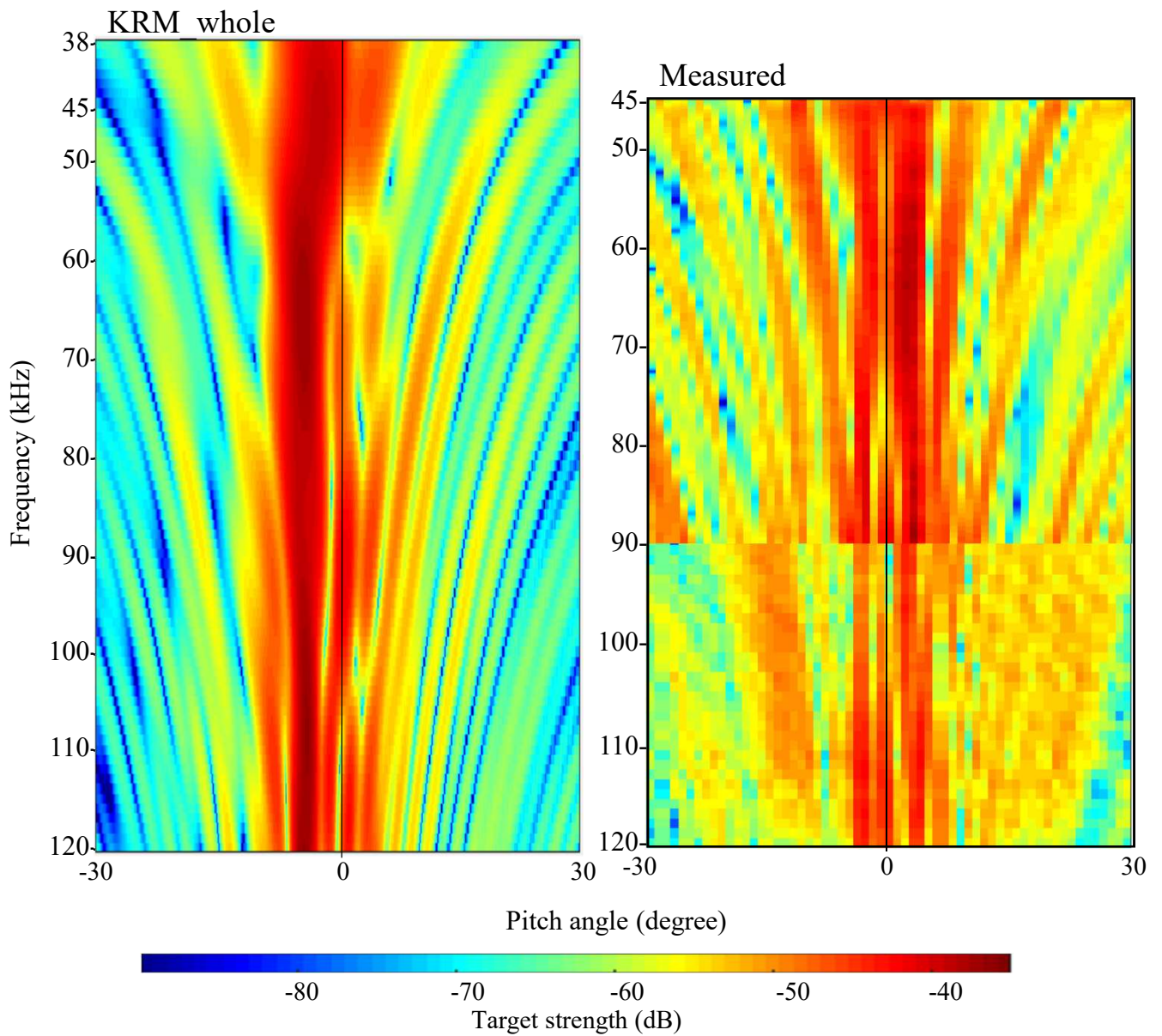


Fig.5.12 ソウハチ（体長27.0 cm）のターゲットストレングスの周波数・ピッチ角特性のKRMモデルによる推定値と実測値．左：理論値，右：実測値．

5.3.2 音響モデルによる無鰾魚のターゲットストレングスの姿勢角特性

5.3.1 に示した理論ターゲットストレングスのスペクトルから、周波数 38, 50, 70, 100, 120 kHz のターゲットストレングスの姿勢角特性（ターゲットストレングスパターン）のデータを抽出し、ピッチ角特性について実測値と比較した。その結果を Fig. 5.13～Fig. 5.18 に示し、ホッケ、イカナゴ、ソウハチそれぞれ 2 個体分を示した。上から順に、周波数 38, 50, 70, 100, 120 kHz のターゲットストレングスパターンであり、左側の列から順にそれぞれ DC モデル、DWBA モデル、KRM モデルで推定した理論値を表している。図の横軸はピッチ角、縦軸はターゲットストレングスであり、実測値は白○、音響モデルによる理論ターゲットストレングスは黒線、KRM モデルで推定した魚肉のみのターゲットストレングスを赤い破線、骨のターゲットストレングスを青い一点鎖線で表している。最大ターゲットストレングスおよび姿勢平均ターゲットストレングスの実測値（赤）と理論値（黒）を図中に示した。

ホッケのピッチ角特性（Fig. 5.13, Fig. 5.14）について、DC モデルと DWBA モデルで推定した理論ターゲットストレングスは似ており、メインローブが 0° 付近に現れ、高周波数になるほど指向性が鋭くなる傾向が見られた。実測値と比較してみると、小さい個体（Fig. 5.13）について、周波数 70 kHz までは、最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスは実測値と約 3 dB 以内の差であったが、周波数 100 kHz と 120 kHz では実測値より約 5 dB 以上小さくなっていた。大きい個体（Fig. 5.14）については、周波数 38 kHz で最大ターゲットストレングスは実測値と約 3 dB 以内の差であったが、周波数 50 kHz 以上になると、最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスは実測値より約 5 dB 以上小さくなっていた。一方、KRM モデルで推定した理論ターゲットストレングスは、小さい個体（Fig. 5.13）について、周波数 50 kHz

までは最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスに実測値と約 5 dB 以上の差があったが、周波数 70 kHz からは最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスの実測値との差は約 5 dB 以内であった。大きい個体について Fig. 5.14 で見てみると、周波数 38 kHz では、最大ターゲットストレングスで実測値と約 6 dB の差があり、周波数 50 kHz 以上になると、最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスは実測値と約 4 dB 以内の差となった。以上のことから、ホッケについては、低周波数では DC モデルや DWBA モデルで推定した理論ターゲットストレングスは実測値と近かったが、高周波数になると KRM モデルで推定した理論ターゲットストレングスが実測値に近くなることが分かった。

次にイカナゴ (Fig. 5.15, Fig. 5.16) について、DC モデルと DWBA モデルで推定した理論ターゲットストレングスのパターンはお互いに似ており、メインローブの最大値は 0° 付近に見られ、高周波数になるほど指向性が鋭くなる傾向が見られた。実測値と比較してみると、小さい個体 (Fig. 5.15) については、周波数 50 kHz までは最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスにおける実測値との差は約 3 dB 以内であったが、周波数 70 kHz では最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスが実測値より約 5 dB 以上小さいことが分かった。大きい個体 (Fig. 5.16) については、周波数 38 kHz では、最大ターゲットストレングスは実測値と約 3 dB 以内の差であったが、周波数 50 kHz 以上になると、音響モデルによる理論値の最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスは実測値より約 5 dB 以上小さいことが分かった。一方、KRM モデルで推定した理論ターゲットストレングスは、メインローブのピークがマイナス側に現れた。また、KRM モデルで推定したイカナゴの理論ターゲットストレングスのパターン (黒線) は、骨のみの理論ターゲットストレングス (青一点鎖線) のパターンとよく一致していた。実測と比較

してみると、メインローブのパターンがずれており、2 個体とも、周波数 50 kHz までは理論値の最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスは実測値と約 3 dB 以内の差であったが、周波数 70 kHz では理論値の最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスは実測値より 8 dB ほど大きかった。以上のことから、イカナゴについては、低周波数においては DC モデルや DWBA モデルで推定した理論ターゲットストレングスは実測値とよく合うが、高周波数になると理論ターゲットストレングスの方が小さいことが分かった。KRM モデルで推定したターゲットストレングスは低周波数で実測値に近い値になっていたが、メインローブの位置は実測とずれていた。また、高周波数になると、理論値が実測値より大きいことが分かった。

ソウハチ (Fig. 5.17, Fig. 5.18) について、DWBA モデルで推定した理論ターゲットストレングスは、メインローブのピークが 0 度付近に現れ、周波数が大きくなるほどメインローブの幅が小さくなり指向性が鋭くなる傾向が見られた。実測値と比較してみると、小さい個体 (Fig. 5.17) では、メインローブのパターンや幅が似ており、各周波数における最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスは実測値と 4 dB 以内の差であった。大きい個体 (Fig. 5.18) は、各周波数における理論値の最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスは実測値と 7 dB 以内の差であった。KRM モデルで推定した理論ターゲットストレングスは、メインローブのピークがマイナス側に現れ、周波数が大きくなるほどメインローブが狭くなり、指向性が鋭くなる傾向が見られた。また、KRM モデルで推定したソウハチの理論ターゲットストレングスのパターン (黒線) は、骨のみのターゲットストレングス (青一点鎖線) のパターンとよく一致していた。実測値と比較してみると、小さい個体 (Fig. 5.17) は、メインローブのパターンや幅が似ており、各周波数における理論値の最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスは実測値と 4 dB 以

内の差であった。大きい個体 (Fig. 5.18) では、各周波数における理論値の最大ターゲットストレングスや姿勢平均ターゲットストレングスは実測値と 3 dB 以内の差であった。以上のことから、ソウハチに対して、2 つのモデルとも実測値と近い傾向を示したが、KRM モデルで推定したほうがより適合していると思われる。

Arabesque greenling

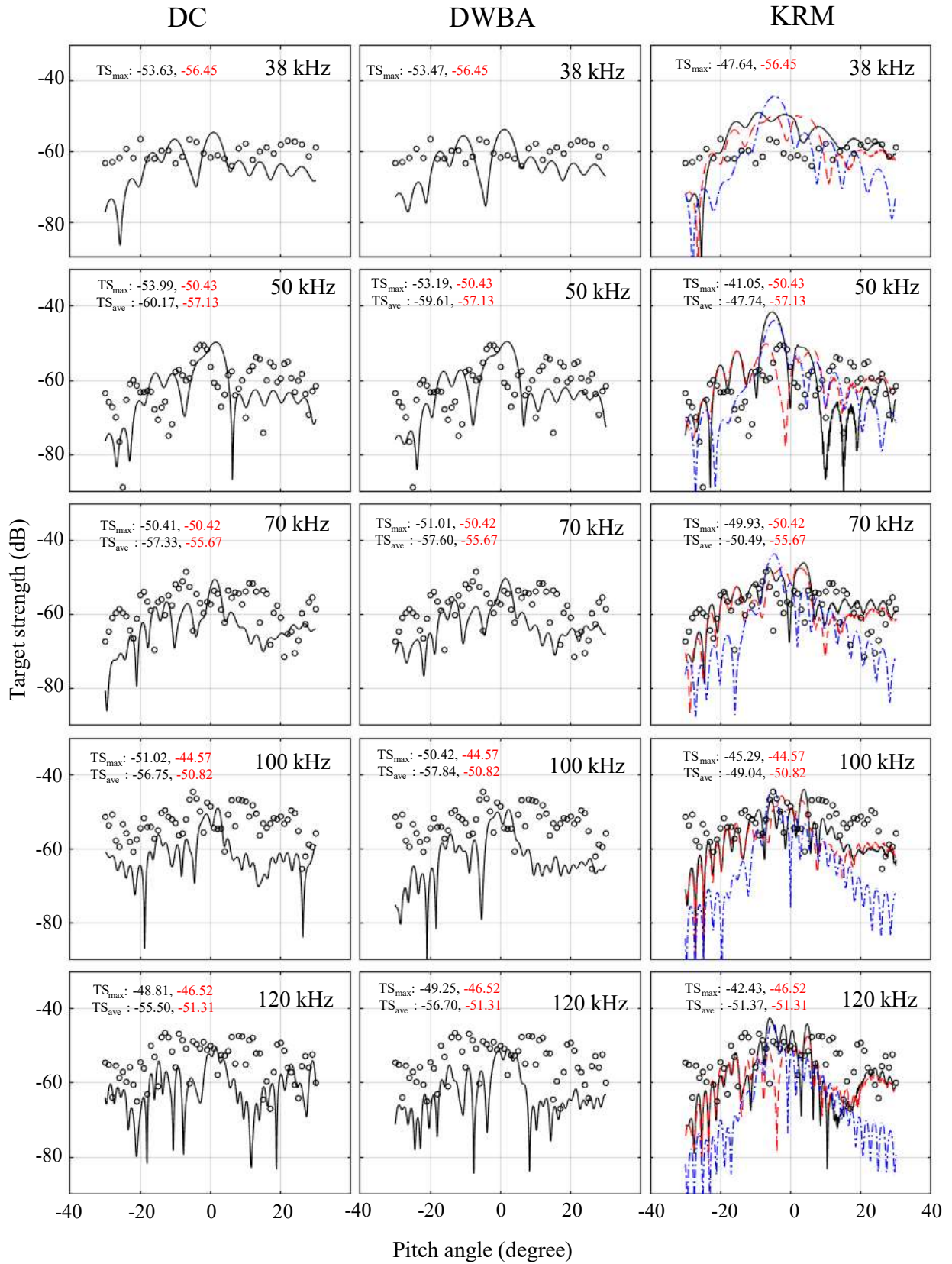


Fig. 5.13 周波数38, 50, 70, 100, 120 kHzにおけるホッケ（体長30.2 cm）のターゲットストレングスのピッチ角特性におけるモデル推定値（実線）と実測値（○）の比較。左から順にDCモデル，DWBAモデル，KRMモデル。KRMモデルにおける赤線は魚肉のみ，青線は背骨のみを表す。また，図中に最大値や平均値を記し，黒は理論値，赤は実測値を表している。

Arabesque greenling

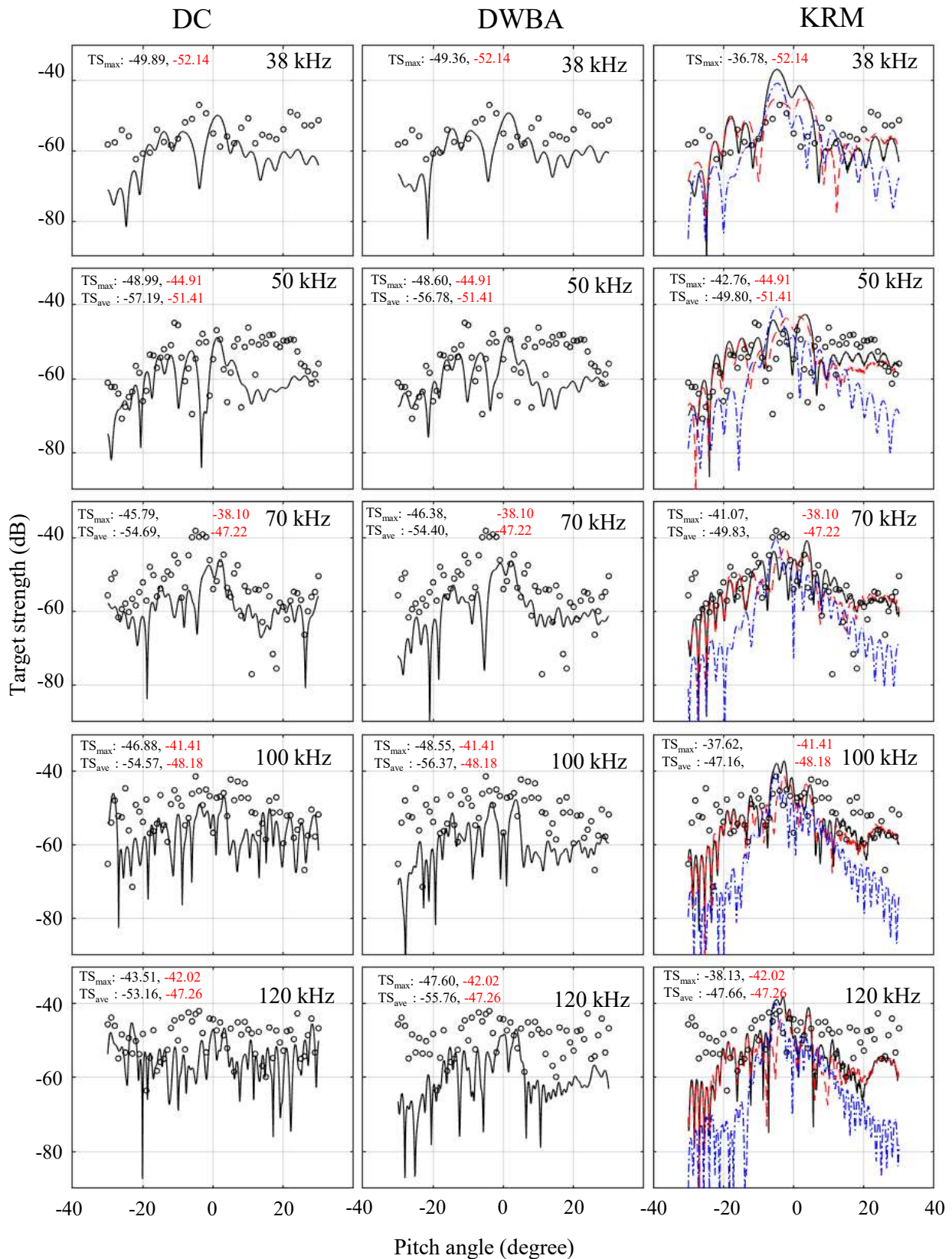


Fig. 5.14 周波数38, 50, 70, 100, 120 kHzにおけるホッケ（体長38.0 cm）のターゲットストレングスのピッチ角特性におけるモデル推定値（実線）と実測値（○）の比較。左から順にDCモデル，DWBAモデル，KRMモデル。KRMモデルにおける赤線は魚肉のみ，青線は背骨のみを表す。また，図中に最大値や平均値を記し，黒は理論値，赤は実測値を表している。

Japanese sand lance

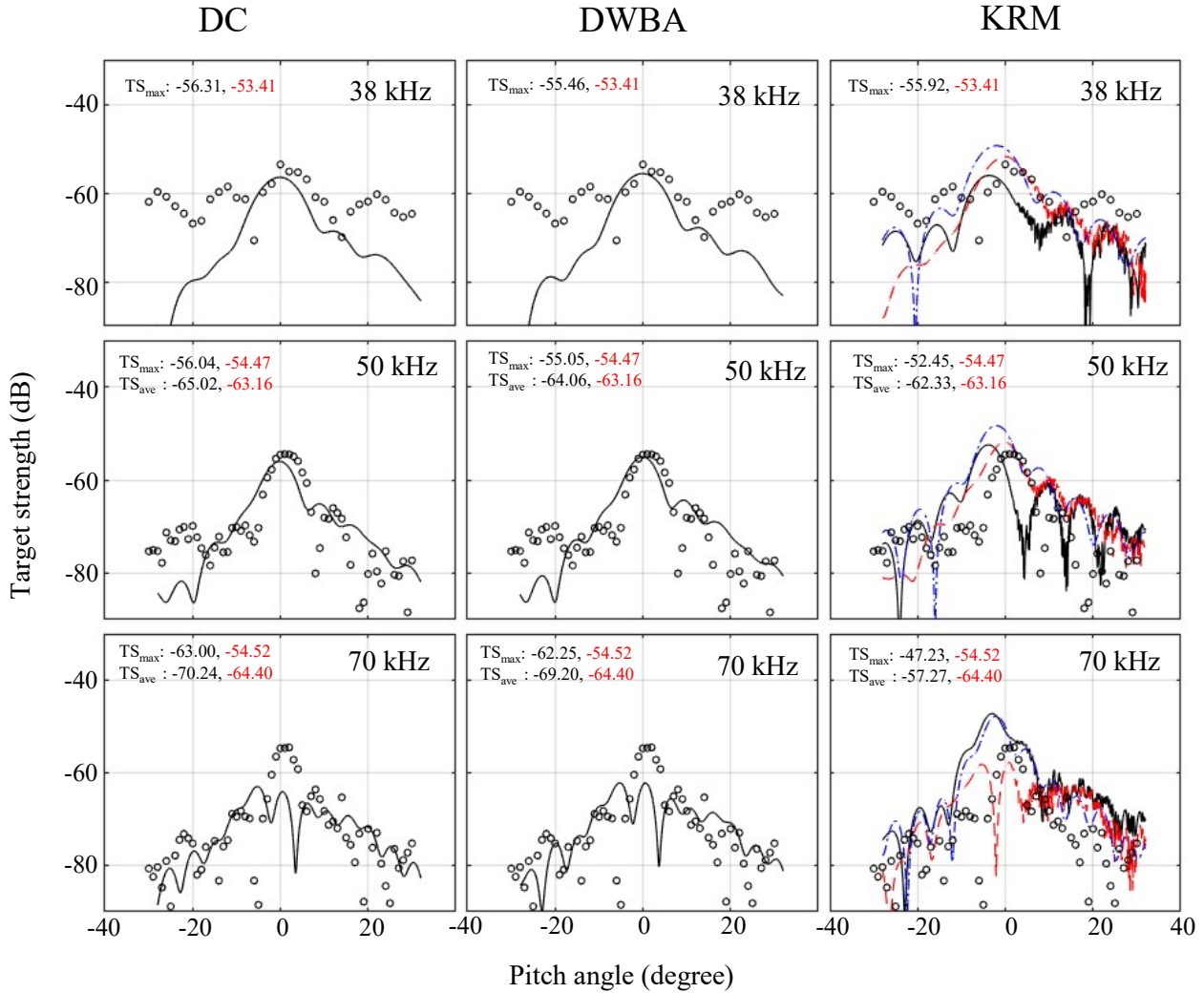


Fig. 5.15 周波数38, 50, 70 kHzにおけるイカナゴ（体長14.2 cm）のターゲットストレングスのピッチ角特性におけるモデル推定値（実線）と実測値（○）の比較. 左から順にDCモデル, DWBAモデル, KRMモデル. KRMモデルにおける赤線は魚肉のみ, 青線は背骨のみを表す. また, 図中に最大値や平均値を記し, 黒は理論値, 赤は実測値を表している.

Japanese sand lance

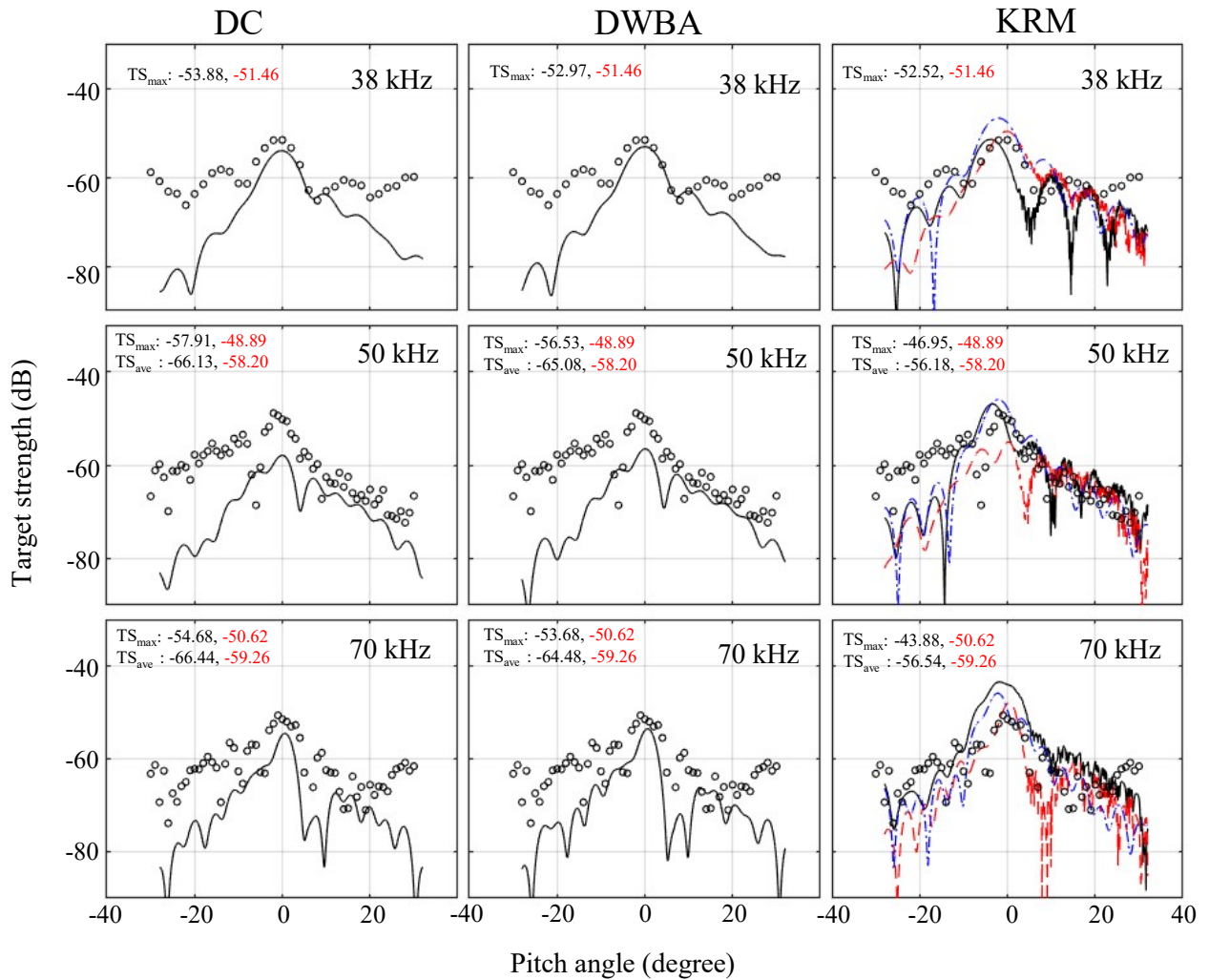


Fig. 5.16 周波数38, 50, 70 kHzにおけるイカナゴ（体長16.4 cm）のターゲットストレングスのピッチ角特性におけるモデル推定値（実線）と実測値（○）の比較. 左から順にDCモデル, DWBAモデル, KRMモデル. KRMモデルにおける赤線は魚肉のみ, 青線は背骨のみを表す. また, 図中に最大値や平均値を記し, 黒は理論値, 赤は実測値を表している.

Pointhead flounder

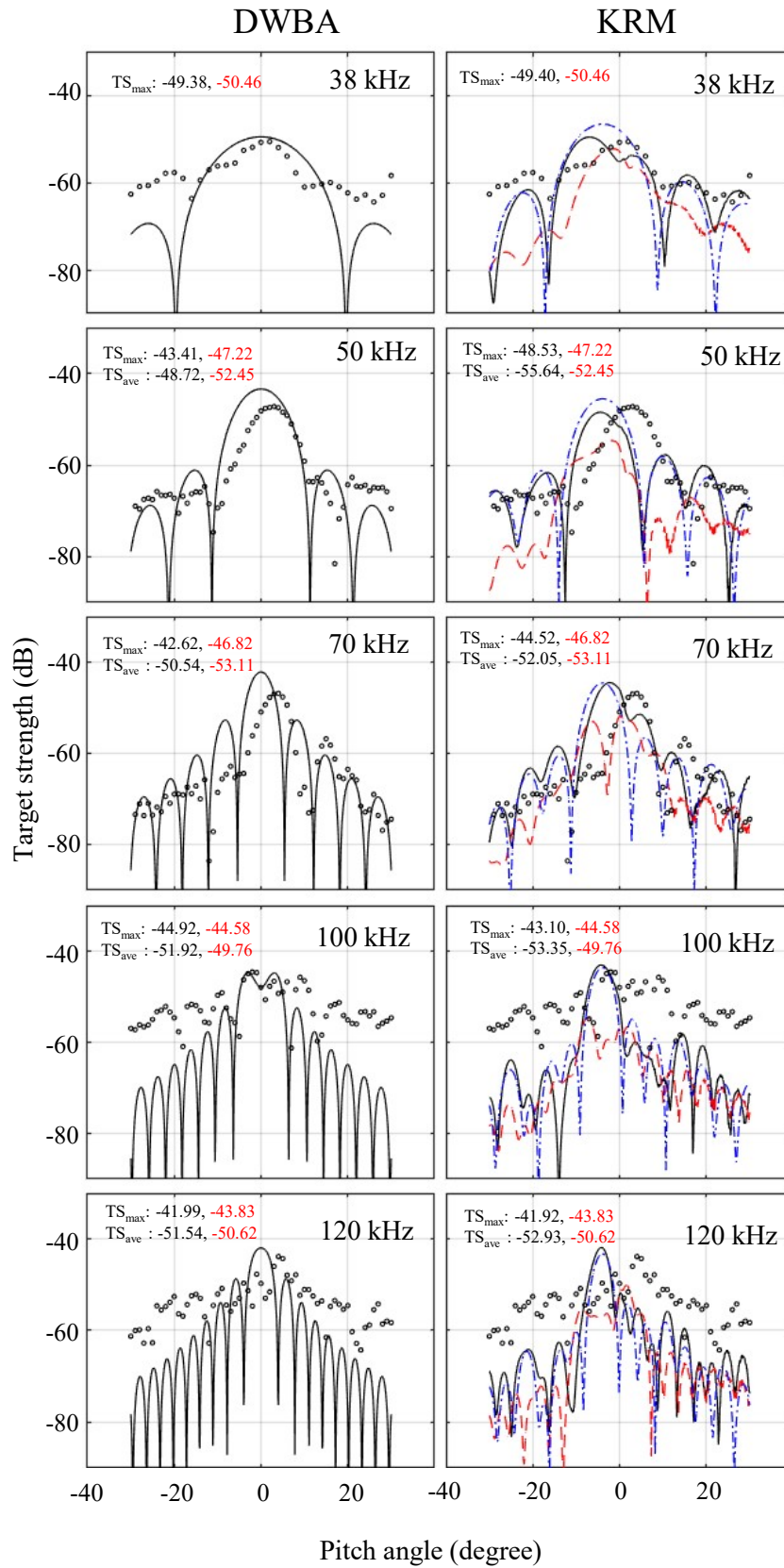


Fig. 5.17 周波数38, 50, 70, 100, 120 kHzにおけるソウハチ（体長15.8 cm）のターゲットストレングスのピッチ特性におけるモデル推定値（実線）と実測値（○）の比較。左から順にDWBAモデル，KRMモデル。KRMモデルにおける赤線は魚肉のみ，青線は背骨のみを表す。また，図中に最大値や平均値を記し，黒は理論値，赤は実測値を表している。

Pointhead flounder

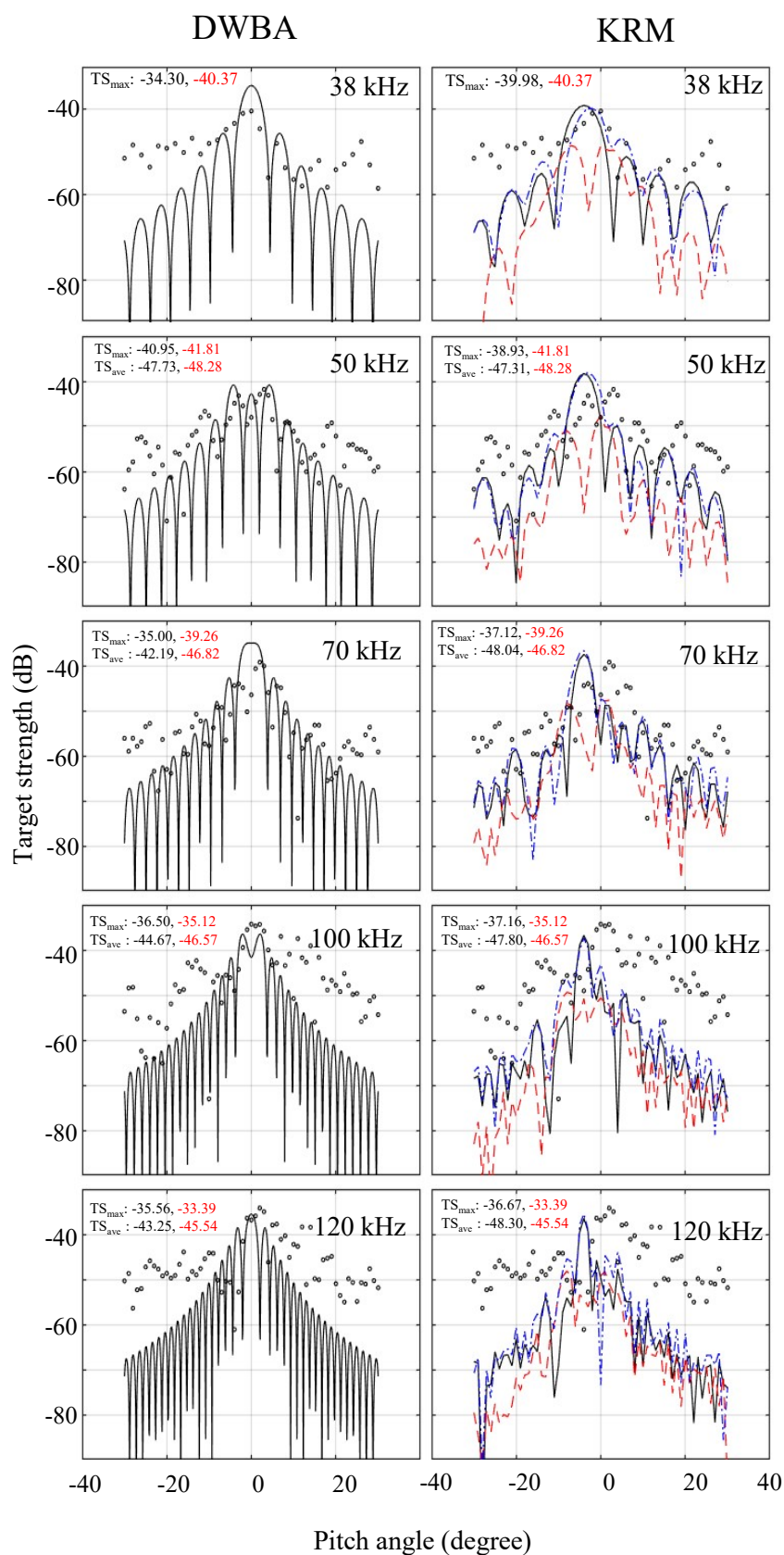


Fig. 5.18 周波数38, 50, 70, 100, 120 kHzにおけるソウハチ（体長27.0 cm）のターゲットストレングスのピッチ特性におけるモデル推定値（実線）と実測値（○）の比較．左から順にDWBAモデル，KRMモデル．KRMモデルにおける赤線は魚肉のみ，青線は背骨のみを表す．また，図中に最大値や平均値を記し，黒は理論値，赤は実測値を表している．

5.3.3 理論モデルによる無鰾魚の規準化ターゲットストレングス

DC, DWBA, KRM モデルで推定した 3 魚種の規準化ターゲットストレングスをそれぞれ Fig. 5.19, Fig. 5.20, Fig. 5.21 に示す。上半分は最大ターゲットストレングス, 下半分は姿勢平均ターゲットストレングスに関するもので, 横軸は L/λ , 縦軸は規準化ターゲットストレングスを表している。黒い線は第 4 章で示した各魚種の平均的なデータであり, 赤線は DC モデル, 緑線は DWBA モデルで推定した規準化ターゲットストレングス, 青線は KRM モデルで推定した魚肉の規準化ターゲットストレングス, 青太線は KRM モデルで推定した魚肉と背骨を合わせた魚体の規準化ターゲットストレングスを表している。Fig. 5.19 のホッケの規準化ターゲットストレングスをみると, DC モデル, DWBA モデル, 魚肉のみの KRM モデルで推定した規準化ターゲットストレングスは, それぞれ似たような振幅や周期で波のように変動しており, L/λ が大きくなっても値の変化はあまりないことが分かった。そのうち, KRM モデルで推定した魚肉のターゲットストレングスが一番小さかった。一方, KRM モデルで推定した魚体の規準化ターゲットストレングスについては, 他のモデルの推定値より大きくなっていった。実測値と比較してみると, L/λ が 15 より小さい場合, 魚肉のみを考えた DC モデル, DWBA モデル, KRM モデルの規準化ターゲットストレングスが, 実測値とほぼ近い値を示したが, L/λ が 15 より大きくなると, 実測値は背骨を考慮した KRM モデルによる規準化ターゲットストレングスに近かった。

次に Fig. 5.20 でイカナゴの結果を見ると, DC モデル, DWBA モデル, 魚肉のみの KRM モデルで推定した規準化ターゲットストレングスは, ほぼ同じレベルであり, 周波数特性があまりないことが分かった。一方, KRM モデルで推定した魚体の規準化ターゲットストレングスは, 他のモデルの推定値より大きくなっていった。実測値と比較してみると, 骨を考慮した KRM モデルによる規準化

ターゲットストレングスは、実測値より全体的に大きくなっていた。一方、DC モデル、DWBA モデル、魚肉のみの KRM モデルで推定したイカナゴの規準化ターゲットストレングスは、実測値と近いレベルを示した。

最後に Fig. 5.21 のソウハチの規準化ターゲットストレングスを見ると、DWBA モデル、魚肉のみの KRM モデルで推定した規準化ターゲットストレングスは、周波数特性があまりなく、DWBA モデルで推定したターゲットストレングスが大きかった。一方、KRM モデルで推定した魚体の規準化ターゲットストレングスは、 L/λ が大きくなるほど大きくなる傾向が見られた。実測値と比較してみると、骨を考慮した KRM モデルで推定した規準化ターゲットストレングスが実測値とほぼ一致していた。KRM モデルで推定した魚肉のターゲットストレングスについても、 L/λ が 15 までは実測値と近い傾向が分かった。また、DWBA モデルで推定した規準化ターゲットストレングスは、全体的に実測値より大きかった。

Arabesque greenling

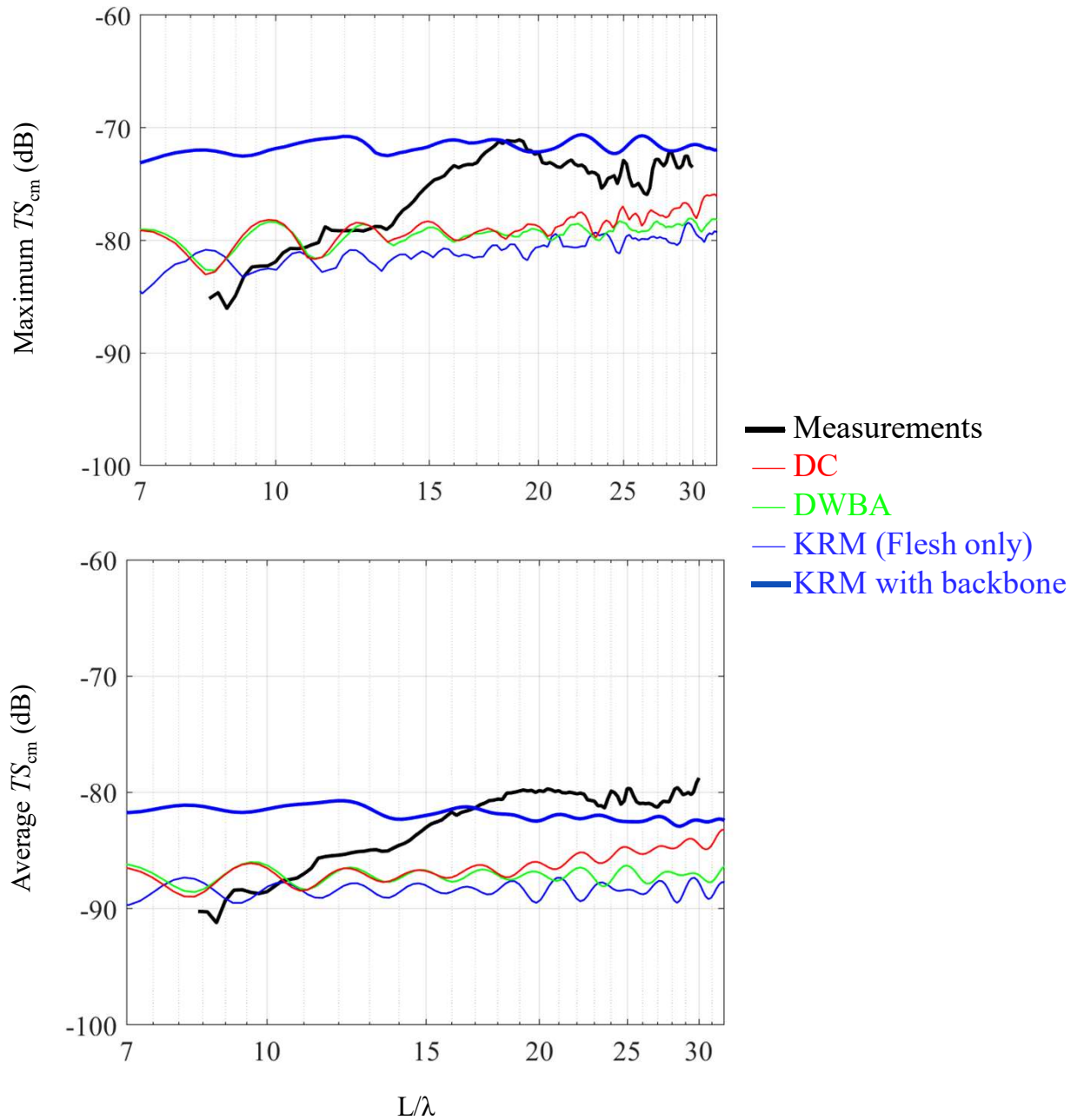


Fig.5.19 ホッケの規準化最大ターゲットストレングス，規準化姿勢平均ターゲットストレングスにおける実測値と理論モデル推定値の比較.

Japanese sand lance

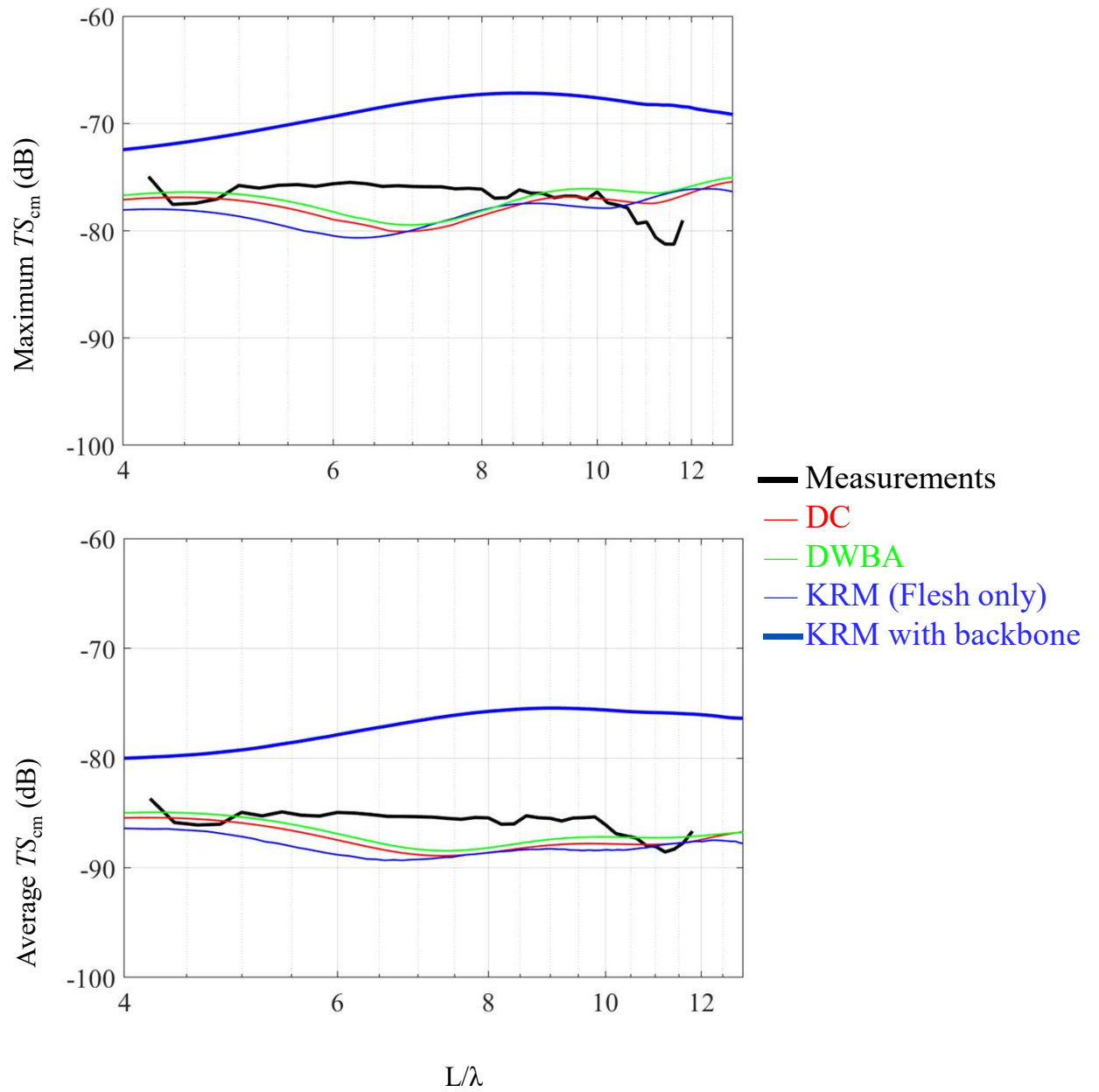


Fig.5.20 イカナゴの規準化最大ターゲットストレングス，規準化姿勢平均ターゲットストレングスにおける実測値と理論モデル推定値の比較.

Pointhead flounder

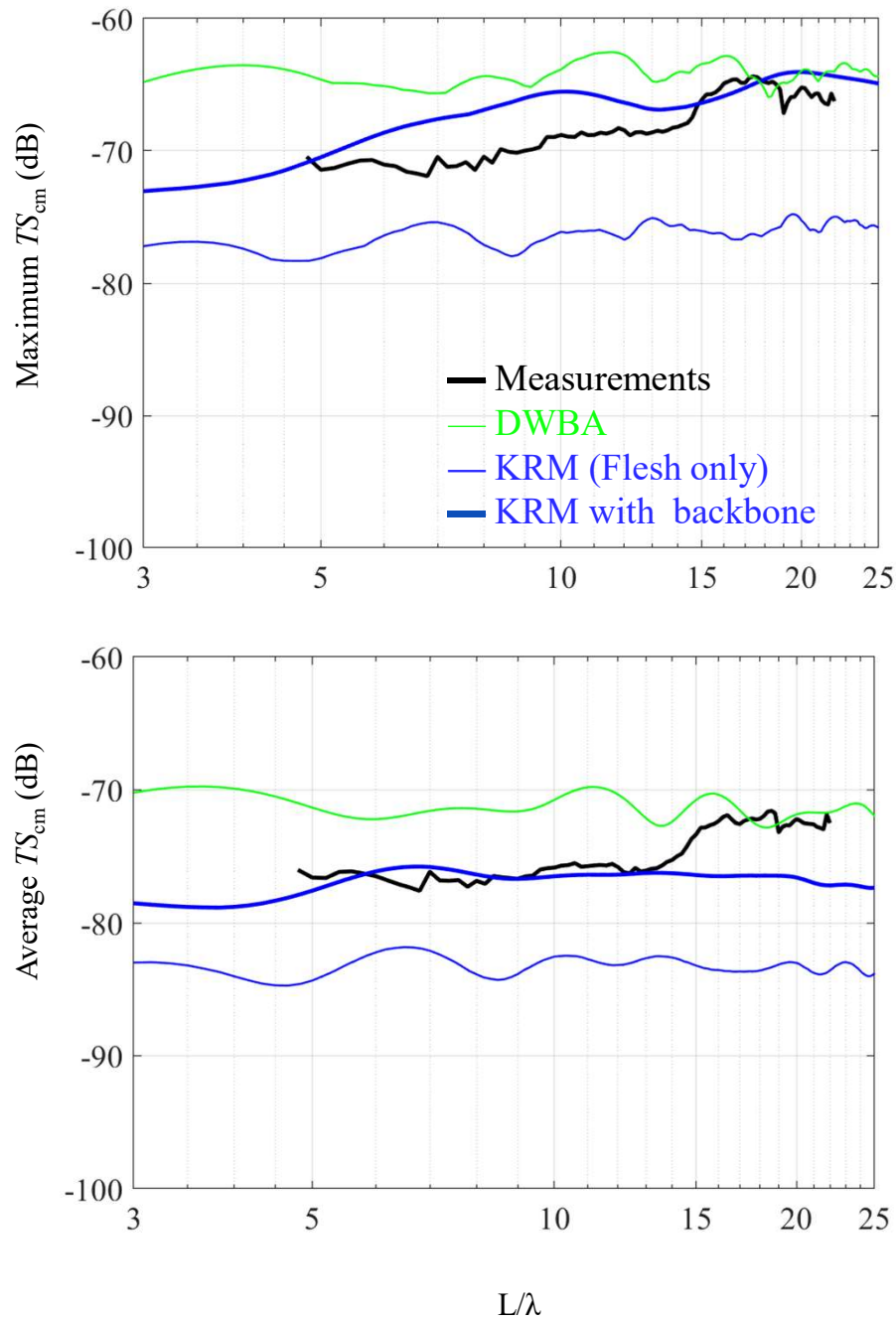


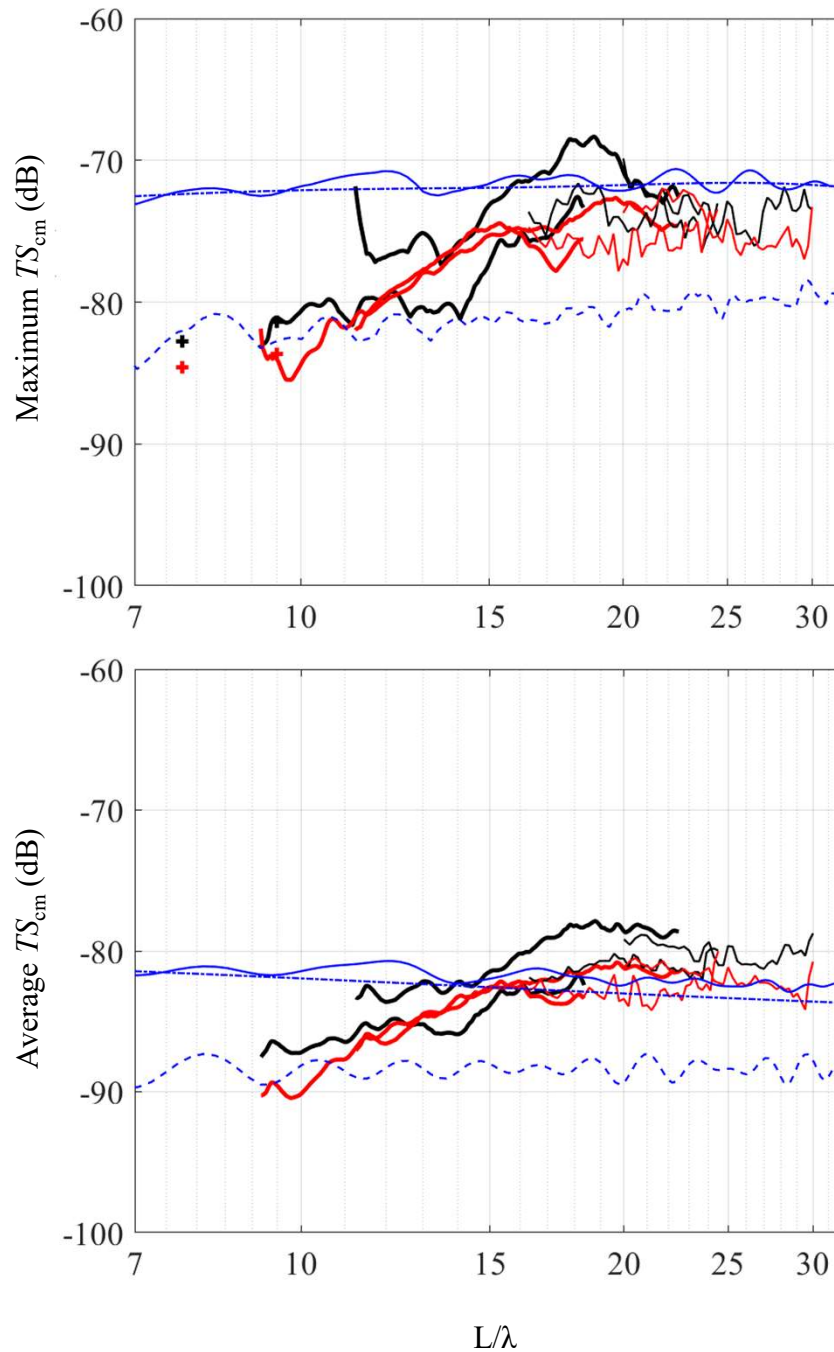
Fig.5.21 ソウハチの規準化最大ターゲットストレングス，規準化姿勢平均ターゲットストレングスにおける実測値と理論モデル推定値の比較.

5.3.4 KRM モデルによる無鰭魚の骨のターゲットストレングス特性

第 4 章でホッケとソウハチに対し、一部の魚肉を取り除いて骨のターゲットストレングスを調べた。本章で使用した KRM モデルでは骨のターゲットストレングスを計算できるため、ここで第 4 章の測定結果と比較した。その結果を Fig. 5.22 と Fig. 5.23 に示す。上半分は規準化最大ターゲットストレングス、下半分は規準化姿勢平均ターゲットストレングス、横軸は L/λ 、縦軸は規準化ターゲットストレングス、黒線は魚肉ありで実測した 2 個体のターゲットストレングス、赤線はその後一部の魚肉を取り除いて実測した魚肉なしのターゲットストレングス、青実線は KRM モデルで推定した魚体全体のターゲットストレングス、青破線は魚肉のみの理論ターゲットストレングス、青一点鎖線は背骨の理論ターゲットストレングスを表している。Fig. 5.22 のホッケの結果から、骨については L/λ にかかわらず規準化最大ターゲットストレングスはほぼ一定であり、規準化姿勢平均ターゲットストレングスでは小さくなる傾向が示された。一方、魚肉なしの実測値は規準化最大ターゲットストレングスも規準化姿勢平均ターゲットストレングスも L/λ が大きくなるに従い大きくなる傾向を示した。また、 L/λ が 15 より大きい場合、理論推定したホッケの背骨の規準化平均ターゲットストレングス（一点鎖線）は実測の魚肉なしのもの（赤線）とほぼ一致した。

Fig. 5.23 のソウハチの結果をみると、KRM モデルで推定した背骨の規準化最大ターゲットストレングスは L/λ が大きくなるほど大きくなり、規準化姿勢平均ターゲットストレングスは L/λ が大きくなるほどやや小さくなっていた。一方、魚肉なしの実測値は規準化最大ターゲットストレングスも規準化姿勢平均ターゲットストレングスも L/λ が大きくなるほど大きくなる傾向であった。また、理論推定したソウハチの背骨の規準化最大ターゲットストレングス（一点鎖線）は実測の魚肉なしのもの（赤線）より小さいことが分かった。

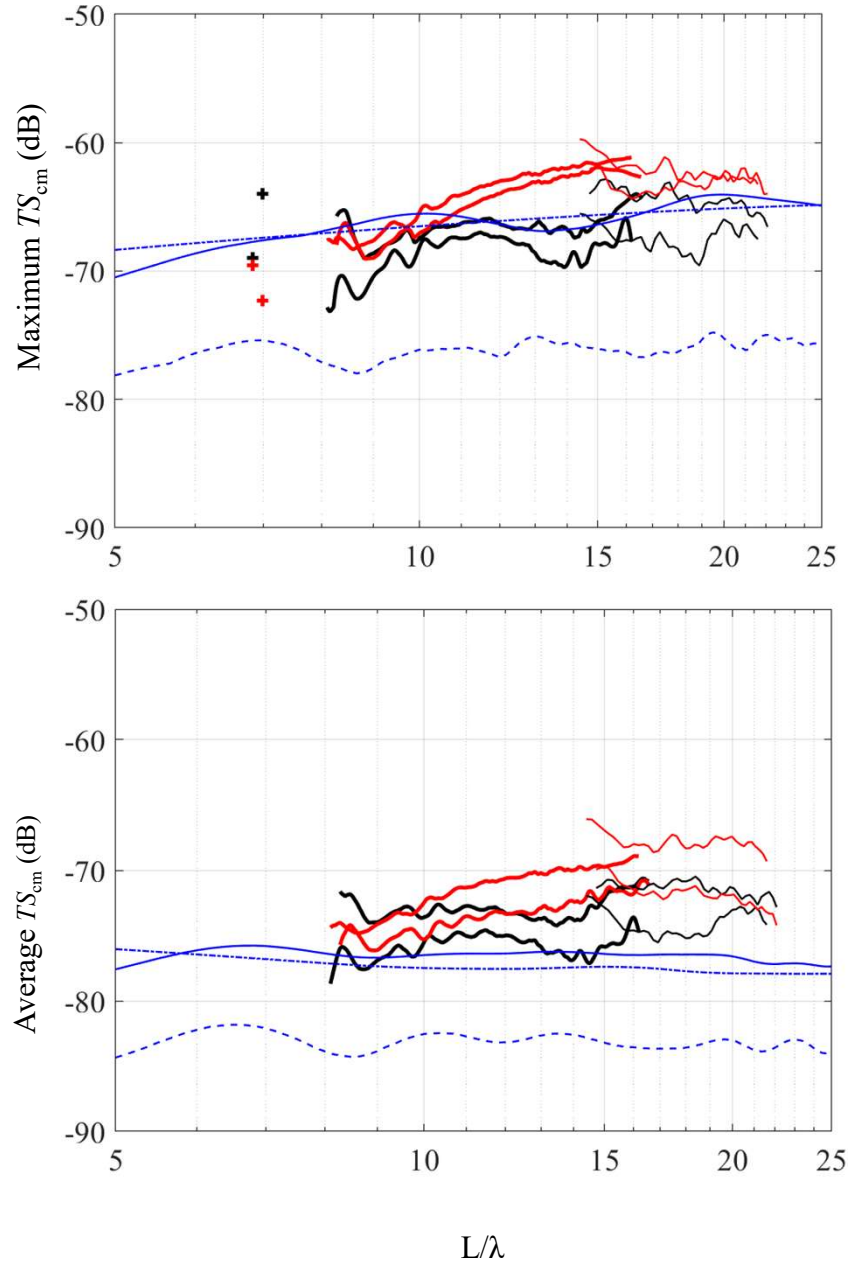
Arabesque greenling



— Measurements whole fish — Measurements without flesh
 — Whole fish by KRM ----Flesh by KRM -·-·-Backbone by KRM

Fig.5.22 魚肉ありと魚肉なしのホッケの規準化ターゲットストレングスの実測値と音響モデルによる推定値との比較. (上は規準化最大ターゲットストレングス, 下は規準化姿勢平均ターゲットストレングス)

Pointhead flounder



— Measurements whole fish — Measurements without flesh
 — Whole fish by KRM ----Flesh by KRM -·-·-Backbone by KRM

Fig.5.23 魚肉ありと魚肉なしのソウハチの規準化ターゲットストレングスの実測値と音響モデルによる推定値との比較。（上は規準化最大ターゲットストレングス，下は規準化姿勢平均ターゲットストレングス）

5.4 考察

5.4.1 3つの理論モデルによる無鰾魚のターゲットストレングスの比較

DC モデル, DWBA モデル, KRM モデルで推定したホッケとイカナゴのターゲットストレングスを Fig. 5.19 と Fig. 5.20 で比較すると, DC モデルと DWBA モデルで推定したターゲットストレングスの傾向は似ており, 骨を考慮した KRM モデルで推定したターゲットストレングスは他のモデルより全体的に大きかった。これは KRM モデルで推定したターゲットストレングスは背骨の影響を含め, 背骨のターゲットストレングスは魚肉より大きいので, 全体的なターゲットストレングスも大きくなったと考えられた。一方, ソウハチの場合, DWBA モデルで推定したターゲットストレングスは KRM モデルのそれより大きかった (Fig. 5.18)。DWBA モデルは, 魚体を魚肉のみと仮定しているが, KRM モデルの魚肉のみのターゲットストレングスと比較しても, ターゲットストレングスは大きかった。これについて, DWBA モデルでソウハチのターゲットストレングスを推定するときに, ソウハチの形状のトレースを使用せず, 体長, 体幅, 体高のデータを使用し楕円体に近似したためと考えられた。Fig. 5.1 のソウハチの側面のトレースから, 頭の方の厚みが大きく, 中心対称の楕円体とは少し離れた形である。一方, KRM モデルでは, 魚体のトレースデータを使用し, 魚の形に近い形状のターゲットストレングスを示したと考えられる。これを楕円体に近似することで, 平均体高は実際より小さくなった。Fig. 5.24 にソウハチの体高を変化させたときの, 理論ターゲットストレングスの変化を示した。上は DWBA モデルによる推定した理論ターゲットストレングス, 下は KRM モデルで推定した魚肉のターゲットストレングス, 横軸は周波数である。体長や体幅をそのままにし, 体高のみを 0.5, 0.8, 1.3, 1.5 倍したときのターゲットストレ

ングスである。この図から、ソウハチは体高が小さくなるとターゲットストレングスが大きくなることが分かった。従って、楕円体に近似されたソウハチの理論ターゲットストレングスがトレースした魚体で推定したものより大きい理由の一つは体高の影響と考えられる。

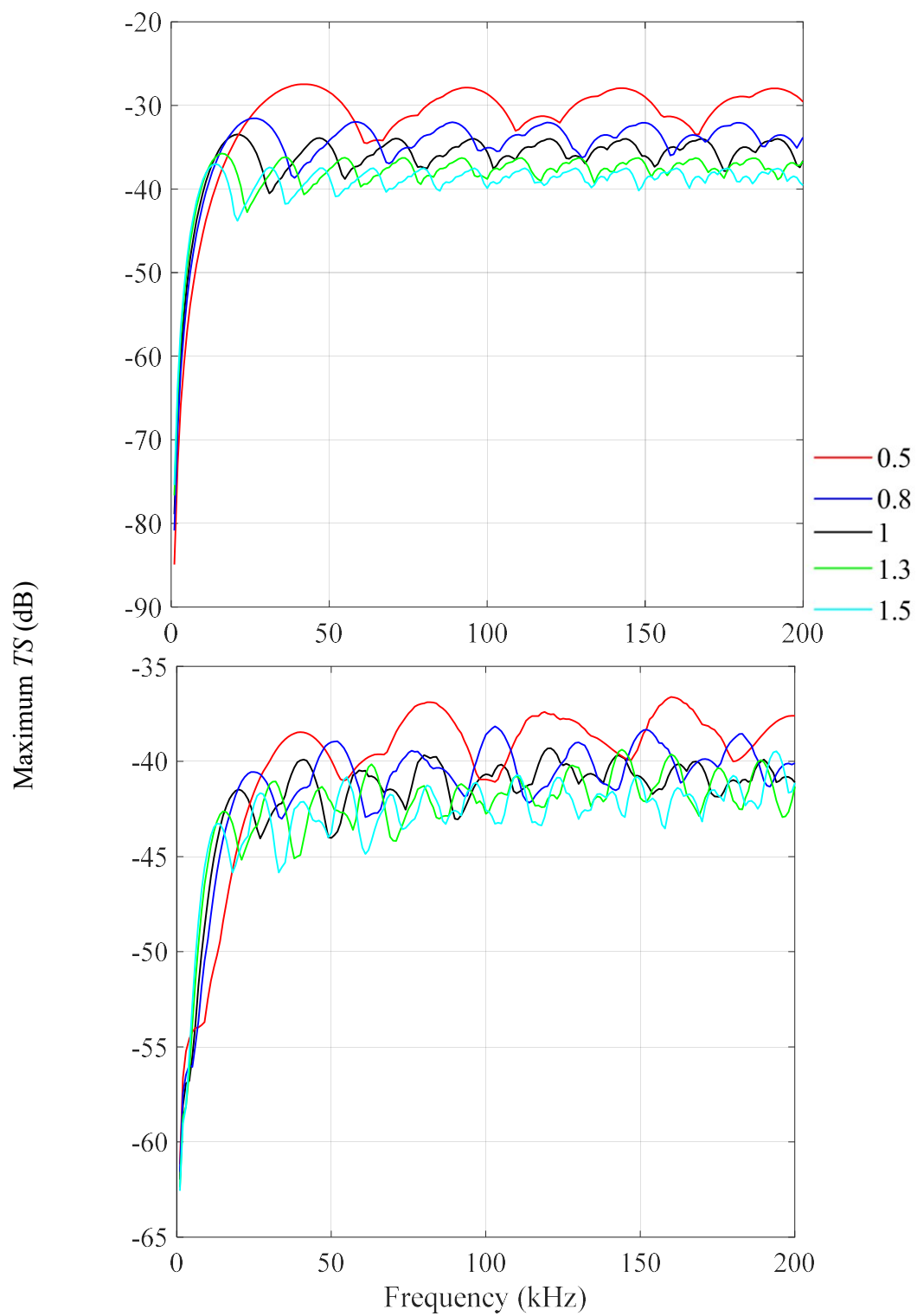


Fig.5.24 DWBAモデル（上）とKRMモデル（下）で推定したソウハチの体高変化による魚肉の最大ターゲットストレングスの変化（体長31.5 cm）.

5.4.2 理論モデルによる無鰾魚のターゲットストレングス推定の検討

DC モデル, DWBA モデルで推定したホッケの理論ターゲットストレングスは, 低周波数で実測値やそのパターンが似ていた (Fig. 5.13, Fig. 5.14) が, 周波数が高くなるほど実測値より全体的に小さくなった (Fig. 5.19)。一方, 背骨を考慮して KRM モデルで推定したホッケのターゲットストレングスは, 低周波数で実測値より大きく, 高周波数 (L/λ が約 15~) になるほど実測値に近くなった (Fig. 5.19)。背骨を考慮すると, 高周波数でターゲットストレングスが合うことより, ホッケの高周波数でのターゲットストレングスの特性は背骨によるものと考えられる。Gorska *et al.* (2007) は, 体長 28 ~ 42 cm の大西洋サバについて周波数 18, 38, 70, 120, 200, 364 kHz のターゲットストレングスを音響モデルで推定し, 周波数 70 kHz から背骨がターゲットストレングスの周波数特性に影響を与えると述べている。これを L/λ で考えた場合, 13.1~19.6 くらいで背骨の影響が効いてくることになる。本研究でホッケについて見られた 15 はこの範囲に含まれており, 背骨の影響によるものと推察された。

イカナゴの場合は, DC モデル, DWBA モデル, KRM モデルの魚肉のみのモデルで推定したターゲットストレングスが実測値と近い傾向を示した (Fig. 5.20)。一方, 背骨の影響も考慮した KRM モデルで推定したターゲットストレングスは, 周波数が高くなるほど実測値より大きくなっていった。これらの結果から, 測定した範囲 (L/λ が 4~11) では, イカナゴのターゲットストレングスは主に魚肉によるものであり, 背骨の影響は現れていないと考えられる。一方, Forland *et al.* (2014) は, 周波数 180 kHz 以上ではイカナゴ (13.0 ~ 14.5 cm) の音響散乱は背骨が主導していると報告した。180 kHz で 14.5 cm を L/λ にすると 17.4 になり, 今回の測定範囲外であった。従って, イカナゴについても, L/λ が大きければ, 背骨の影響が効いてくる可能性があると考ええる。

ソウハチについては、KRM モデルで推定した理論ターゲットストレングスが実測値と近い傾向を示した (Fig. 5.21)。魚肉のみの KRM モデルと実測値は差が生じた。KRM モデルにより推定した背骨の最大ターゲットストレングスは魚体の最大ターゲットストレングスと近いレベルを示し (Fig.5.23)、メインローブのパターンも魚体のパターンと一致していた (Fig. 5.17, Fig.5.18)。これらの結果から、ソウハチのターゲットストレングスは骨が主導していることを示唆した。Fig. 5.23 から、モデルで推定したソウハチの規準化最大ターゲットストレングスは実測値と傾向が似ていたが、背骨のみの理論値は魚肉なしの実測値より全体的に小さくなっていた。これについては、実測では魚肉を取り除いたため、超音波は海水から直接骨に当たるが、KRM モデルでは超音波は魚肉を通して背骨に当たると考え計算している。海水、魚肉、骨の音響インピーダンスについては海水<魚肉<骨となる。従って、音波が魚肉から骨に当たるよりも、海水から骨に当たるときの反射率が高い。これが、実測時の骨のターゲットストレングスが理論値より大きい理由の一つと考えられる。また、ソウハチの場合は、体の形状で背骨以外に多くの小骨にも直接音波が当たるため、小骨も TS に影響を及ぼしているものと考ええる。これについては今後の課題である。

ホッケとソウハチについて、体長の大きいときあるいは周波数の高いときに理論ターゲットストレングスは実測より鋭い指向性を示した (Fig.5.13, Fig.5.14, Fig.5.17, Fig.5.18)。高周波数になるにしたがい、ターゲットストレングスの姿勢角特性は複雑になることが知られている (宮野鼻, 1994)。理論値は 0.1° 刻みで計算したが、実測は 1° 刻みで測定を行ったため、測定できていないピークや落ち込みがあると考えられる。また、理論値のターゲットストレングスは、周波数により値が振動していた。これは理論計算のとき、魚の体質は均一と近似したためと考えられる。実際の魚の体質は均一ではないので、実測のほうはあまり振動が見られなかった。

イカナゴは、 L/λ が 4~11 の範囲で、魚肉のみの理論モデルにより推定したターゲットストレングスが実測値とほぼ一致していた。ホッケについては、 L/λ が約 15 以上になると、背骨のターゲットストレングスの影響が効いてくることを示した。ソウハチについては、測定した範囲で、背骨のターゲットストレングスが主導していることを示した。

以上のことから、低周波数における、無鰾魚のターゲットストレングスは主に魚肉によるものであり、周波数特性はあまりないと考えられる。一方、高周波数における、背骨がターゲットストレングスを主導し、周波数が高くなるほどターゲットストレングスが大きくなると考えられる。

無鰾魚の音響調査の場合、以上のような周波数特性により、できるだけ離れた 2 つの周波数を使用し、2 周波数でのターゲットストレングスの差を使ってエコーグラム上から対象魚種を抽出することが可能と考えられる。

第 6 章 現場海域における無鰮魚の音響判別

6.1 緒言

海洋には様々な生物種が生息しており、音響手法により種ごとの資源現存量の推定を行う場合、音響種判別は重要な課題である。前章までで見てきたように海洋生物のサイズや体の組成によって、音響散乱には周波数特性が現れる。この周波数特性を用いた種判別が試みられている (Simmonds and MacLennan, 2005; Fernandes, 2009; Korneliussen, 2018)。

第 4, 5 章で、ホッケとソウハチは、同じ体長の個体でも、周波数が高くなるターゲットストレングスが大きくなる傾向を示した。この周波数特性は有鰮魚とは異なり動物プランクトンのものと類似し、無鰮魚が現場で有鰮魚と混在している場合、この特性を使って音響判別できる可能性がある。

そこで、本章は、北海道噴火湾に生息するソウハチを対象として現場で音響調査を行い、ソウハチの反応を確認するとともに、周波数特性を利用した混在他魚種との音響判別の可能性を調べた。

6.2 方法

調査は 2015～2019 年の 4 月と 5 月に噴火湾周辺海域 (Fig. 6.1) において、北海道大学附属練習船うしお丸 (179 トン, 39.39 m) を用いて行った。2015 年～2017 年は湾内部や湾外部で調査を行い、ソウハチの探索やエコーグラムでの音響散乱についての魚種確認を行い、ソウハチの音響的な特徴 (エコーの形, 周波数特性) を求めた。2018 年の調査はソウハチの音響的な特徴を利用して、他種との判別を行い、魚種確認の実用性を確認した。2019 年には、湾内から湾外まで定線航走 (Fig. 6.1) を行い音響データを収録した。

調査に使用した計量魚探機は Simrad 社製の EK60 であり、周波数は 38, 120, 200 kHz を用いた。各年における 3 周波数の設定値を Table 6.1 に示す。パルス幅以外のパラメータは、毎回の調査の直前あるいは直後に、直径 38.1mm のタンダステンカーバイド較正球を用いたキャリブレーションにより求めた。

一方、計量魚探機に映し出された魚群エコーの正体を確認するため、竿釣り、またはフレームトロール網 (Itaya *et al.*, 2001, 2007; FMT; 網口 2 m×2 m, 網目脚長 1.5 mm; Fig. 6.2) を用いて水平曳網 (曳網速度 3～4 knot; 曳網時間: 5 分または 10 分) を行った。FMT の上部に深度センサー PI50 (Simrad) を取り付け、網の深度をリアルタイムにモニターした。釣り深度、曳網深度ともに、計量魚探機に反応が認められた深度を目標深度とした。釣獲したソウハチから、任意の個体数を抽出して、現場において、あるいは、冷凍保存個体を後日解凍して、サイズ測定を行った。一方、FMT で採集した生物は、現場において 5%ホルマリン溶液で固定し、後日、実験室にて生物分類し、個体数および湿重量を測定した。また、釣りと FMT 水平曳網を行った地点で、CTD (SBE43, Seabird 社製) による水温と塩分の測定を行った。

解析は、以下の手順で行った。まず、ビームに対して広く分布する多数の散

乱体からの反射波の強さである体積後方散乱強度 SV は次式で表現される。

$$SV = 10 \log sv = 10 \log n + TS \quad (6.1)$$

ここで、 sv は体積後方散乱係数であり、 n は分布密度 (ind./m³) である。

今回の調査では 3 つの周波数を使用した。(6.1) 式から、同じ魚群に対し、同じビーム幅で体積後方散乱強度を求めると次の式が成り立つ。

$$SV(f_{\text{high}}) - SV(f_{\text{low}}) = TS(f_{\text{high}}) - TS(f_{\text{low}}) \quad (6.2)$$

すなわち、2 つの周波数における体積後方散乱強度の差とターゲットストレングスの差が等しくなる。そこで、魚種確認を行った地点のエコーグラムから、3 周波数での体積後方散乱強度を求め、その差を調べた。

音響データの解析には Echoview 9 (Echoview) を使用した。パッチ状のエコーがある場合はそのエコーを 1 つのセルとして、層状のエコーである場合は垂直方向 5 m × 水平方向 5 min. でセル化し平均体積後方散乱強度を求めた。そして、分布密度を表す指標として海里面積散乱係数 Nautical Area Scattering Coefficient (NASC) を使用してソウハチと他種の混在状況や分布を調べた。ここで NASC は次式で示される。 sa は面積後方散乱係数である。

$$NASC = 4 \pi * 1852^2 * sa \quad (6.3)$$

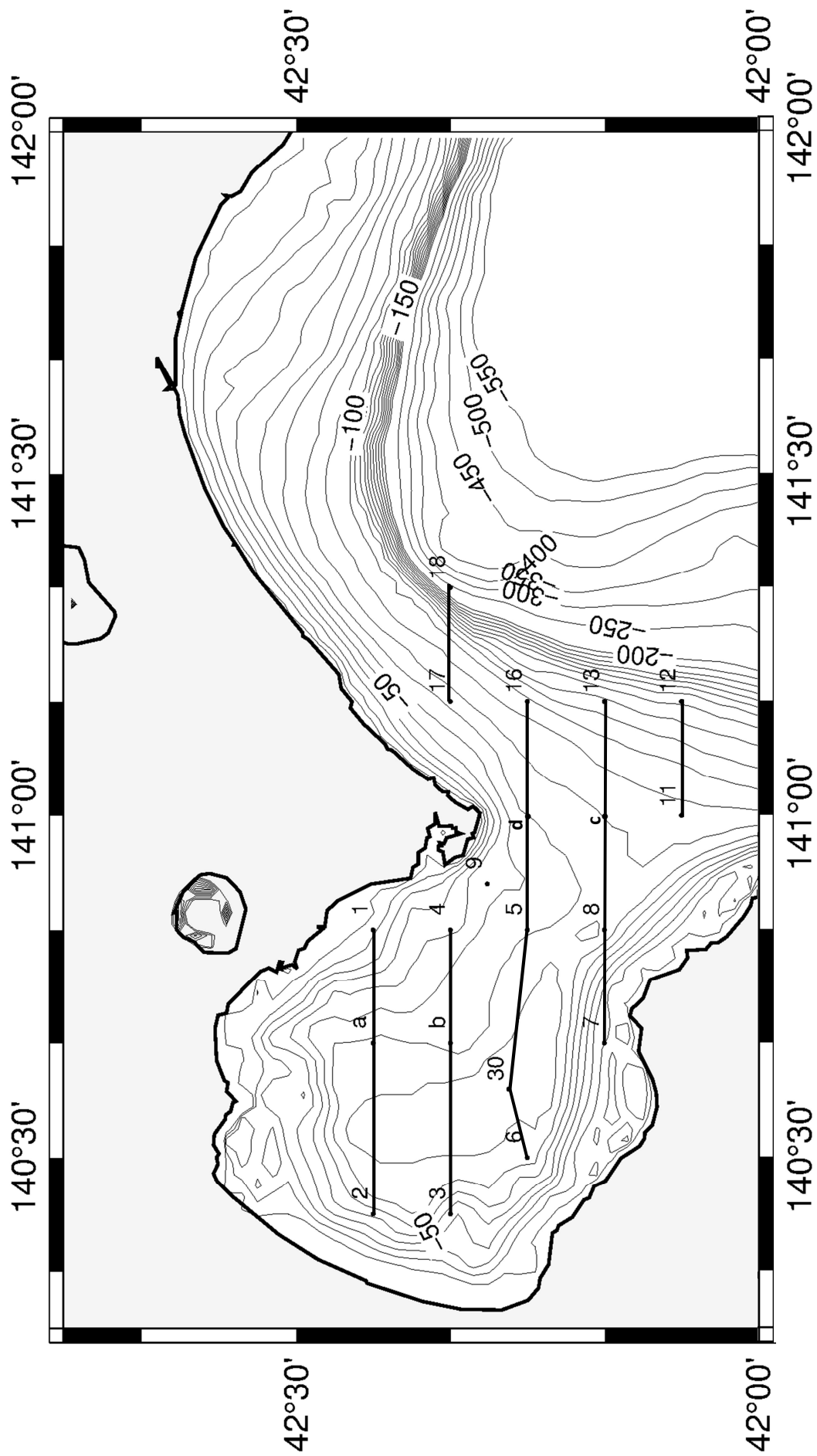


Fig.6.1 調査海域である北海道噴火湾．黒線は航走ライン，黒点はCTDによる海洋観測を行った地点である．



Fig. 6.2 フレーム型中層トロール網

Table 6.1 計量魚群探知機EK60の各種パラメータの設定

Year	2015				2016				2017				2018			
	38	120	200	200	38	120	200	200	38	120	200	200	38	120	200	200
Frequency[kHz]																
Gain[dB]	24.25	26.56	26.63	26.63	24.01	25.74	25.18	23.81	23.81	26.54	24.6	26.12	23.8	26.26	26.12	26.12
Sa corr[dB]	-0.72	-0.73	-0.40	-0.40	-0.68	-0.61	-1.25	-0.70	-0.70	-0.70	-0.35	-0.44	-0.76	-0.64	-0.44	-0.44
3-dB Beam width, Along.[deg]	6.99	6.59	6.45	6.45	6.94	6.41	6.35	7.10	7.10	6.56	7.05	6.48	7.30	6.54	6.48	6.48
3-dB Beam width, Athwart.[deg]	7.00	6.56	6.67	6.67	7.02	6.41	6.39	6.91	6.91	6.50	6.94	6.45	7.22	6.54	6.45	6.45

6.3 結果

6.3.1 生物採集結果

釣獲されたソウハチの体長 (Total length) 分布を Fig. 6.3 に示す。釣れた 740 個体の全長は 16~39 cm に分布し (平均 26.1 cm, 標準偏差 3.6 cm), 4 月と 5 月の体長分布に差は見られなかった ($p\text{-value} > 0.05$)。また, 5 月より 4 月のほうが多く釣れており, ソウハチ以外の魚種は釣れなかった。

FMT で採集した生物は, 主にスケトウダラ稚魚 (湿重量の 70 % 以上), オキアミ類 (4 月 < 13 %, 5 月 < 4 %), 端脚類 (4 月 < 7 %, 5 月 < 23 %) であった。スケトウダラは鰾を持ち混在する動物プランクトンより音響散乱が強い。本研究で FMT でサンプリングした地点のエコーグラムを主にスケトウダラ稚魚の反応とした。採集されたスケトウダラ稚魚の全長頻度分布を Fig. 6.4 に示す。4 月, 5 月に採れたスケトウダラ稚魚の全長は 9 mm~62 mm であった (平均 25 mm ; 4 月は平均 18.7 mm, 標準偏差 6.8 mm ; 5 月は平均 28.9 mm, 標準偏差 5.8 mm)。この図を見ると, 4 月, 5 月で採集されたスケトウダラ稚魚は 1 ヶ月で 1 ~2 cm 大きくなっていることが分かった。

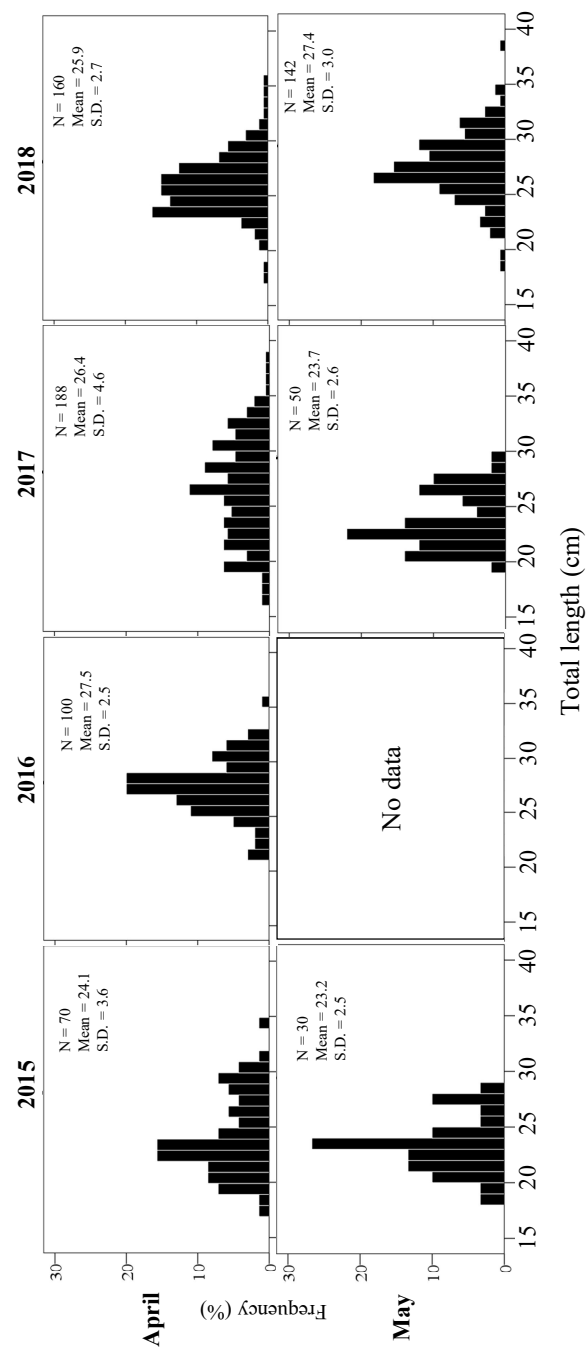


Fig. 6.3 2015年から2018年の各年4月と5月に行った釣り調査で採集したソウハチの体長分布.

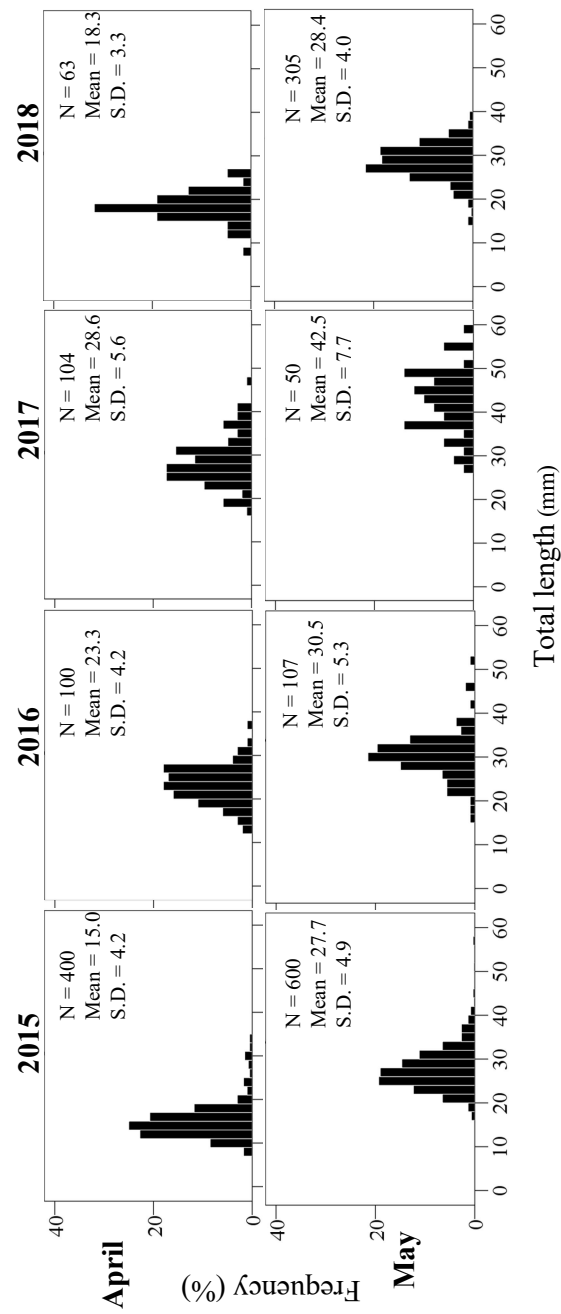


Fig. 6.4 2015年から2018年の各年4月と5月に行ったFMT曳網により採集したスケトウダラ稚魚の体長分布.

6.3.2 エコーグラム上の特徴

ソウハチが釣れた地点の平均体積後方散乱強度のエコーグラムの例を Fig. 6.5 に示す。左から順に周波数 38, 120, 200 kHz のエコーグラムを表している。横軸は時間、縦軸は深度である。エコーグラムで、深度 60 m 前後にパッチ状に分布しているのがソウハチ魚群であり、3 周波数いずれにおいても確認できる。また、釣獲およびエコーグラム上で、夜間においてソウハチのエコーは確認できなかった。

FMT 曳網時のエコーグラムを Fig. 6.6 に示す。上半分は夜間、下半分は昼間のエコーグラムを表している。どちらも左から順に 38, 120, 200 kHz のエコーグラムである。横軸は時間、縦軸は深度である。また、黒の破線は FMT の曳網深度を表している。昼のエコーグラムでは深度 40 m に、夜間のエコーグラムでは深度 10 m に層状反応が現れており、3 周波数ともその平均体積後方散乱強度が強く、スケトウダラ稚魚の魚群であった。

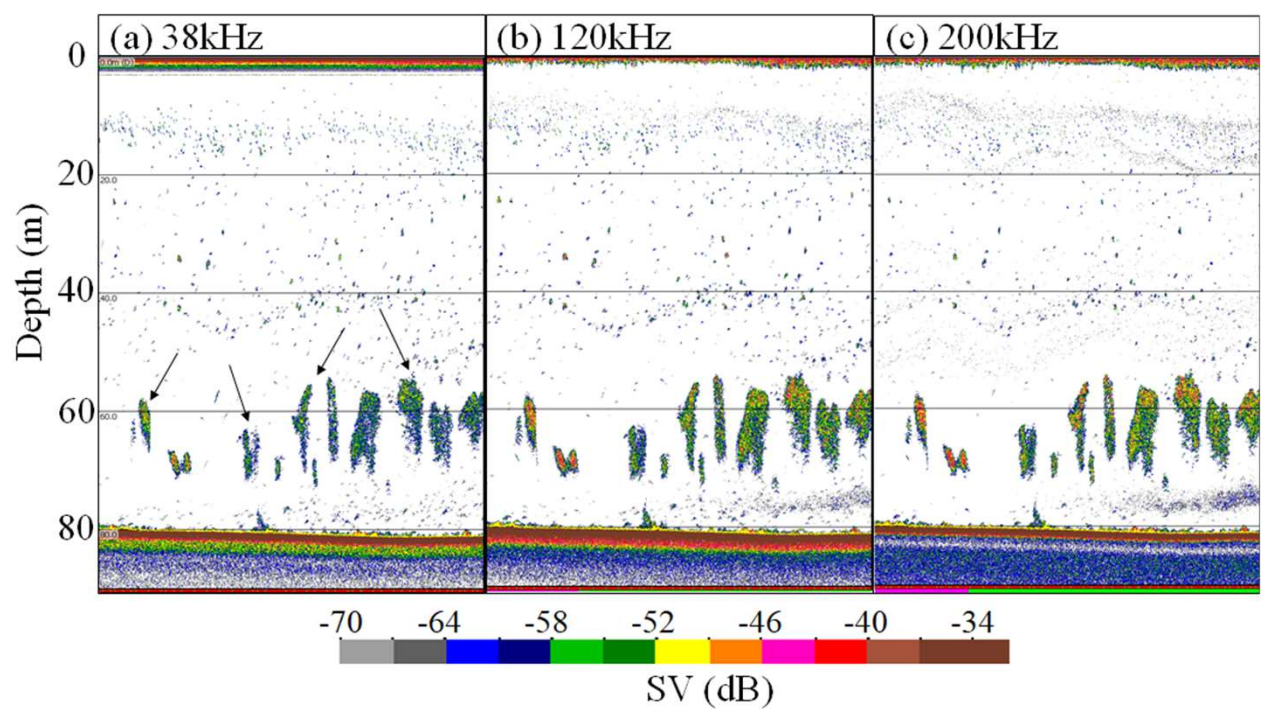


Fig. 6.5 2016年5月に行ったソウハチ釣り調査地点における平均体積後方散乱強度のエコーグラム.

左から順に周波数38 kHz, 120 kHz, 200 kHzであり, 図中矢印のエコーがソウハチ魚群.

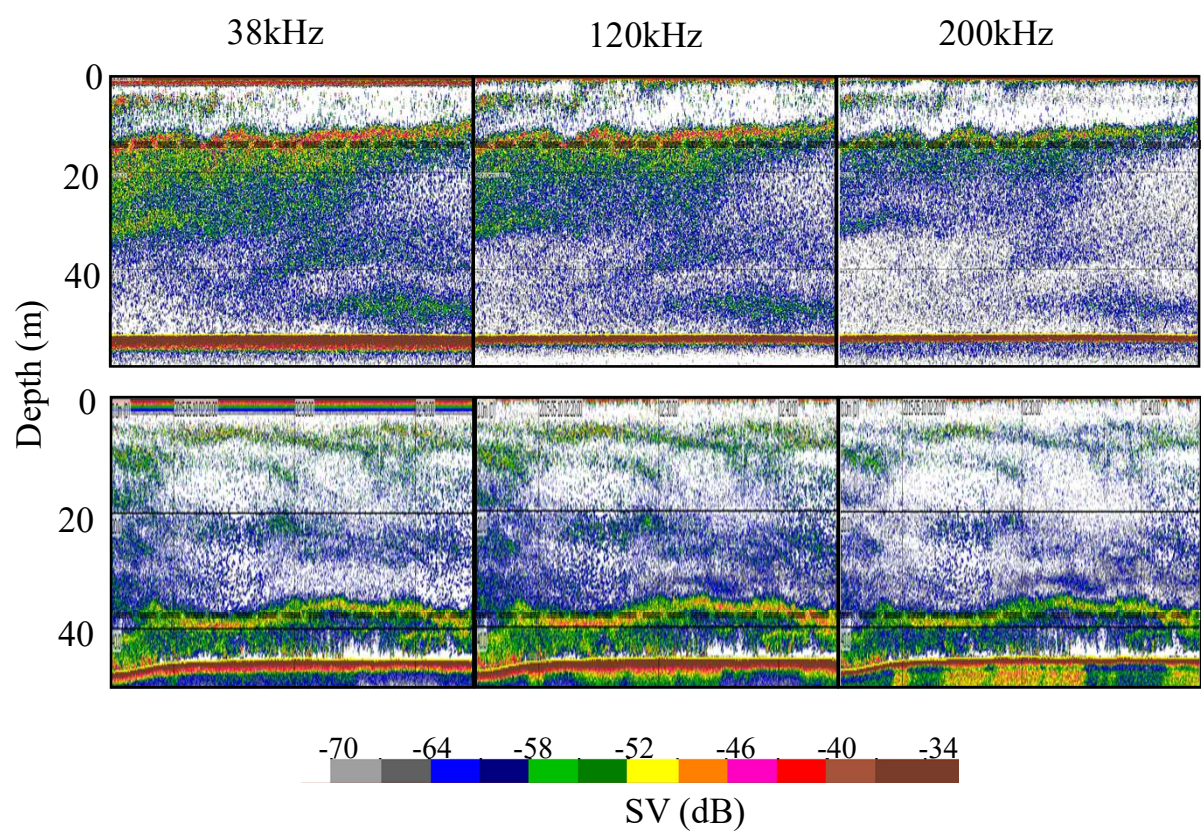


Fig. 6.6 スケトウダラ稚魚が採れた地点の平均体積後方散乱強度のエコーグラム. 上半分は2016年5月夜間, 下半分は同昼間, 左から順に周波数38 kHz, 120 kHz, 200 kHzであり, 黒色破線はFMTの曳網深度FMT (13 m and 38 m).

6.3.3 平均体積後方散乱強度の分布

釣りおよび FMT によりそれぞれソウハチ，スケトウダラ稚魚と確実に判別されている魚群を抽出し，3 周波数の平均体積後方散乱強度を算出し，それぞれにおける周波数特性を調べた。

3 周波数におけるソウハチ魚群とスケトウダラ稚魚魚群の平均体積後方散乱強度の周波数特性を Fig. 6.7 に示す。それぞれ上半分がソウハチ，下半分がスケトウダラ稚魚であり，左から順に，38 と 120，120 と 200，38 と 200 kHz の平均体積後方散乱強度の関係を表している。実線は 2 周波数の平均体積後方散乱強度が等しい直線である。この図を見ると，ソウハチは， $SV(120)$ は $SV(38)$ より大きく，差の平均は $SV(120) - SV(38) = 3.5$ dB (p-value<0.01)， $SV(200)$ は $SV(120)$ と $SV(38)$ より大きく，差の平均は $SV(200) - SV(120) = 1.8$ dB (p-value<0.01)， $SV(200) - SV(38) = 5.2$ dB (p-value<0.01) であった。ソウハチの周波数特性は，高周波数になるほど平均体積後方散乱強度が大きくなる傾向がみられ，前章までに得られた知見と一致した。

スケトウダラ稚魚では，120 kHz と 38 kHz での平均体積後方散乱強度はほぼ同じであり，平均した差は $SV(120) - SV(38) = -0.2$ dB であった (p-value>0.05)。200 kHz での平均体積後方散乱強度は 120 kHz と 38 kHz での平均体積後方散乱強度より小さく，差の平均は $SV(200) - SV(120) = -3.0$ dB (p-value<0.01)， $SV(200) - SV(38) = -3.1$ dB (p-value<0.01) であった。スケトウダラ稚魚は高周波数で平均体積後方散乱強度が小さいことが分かった。

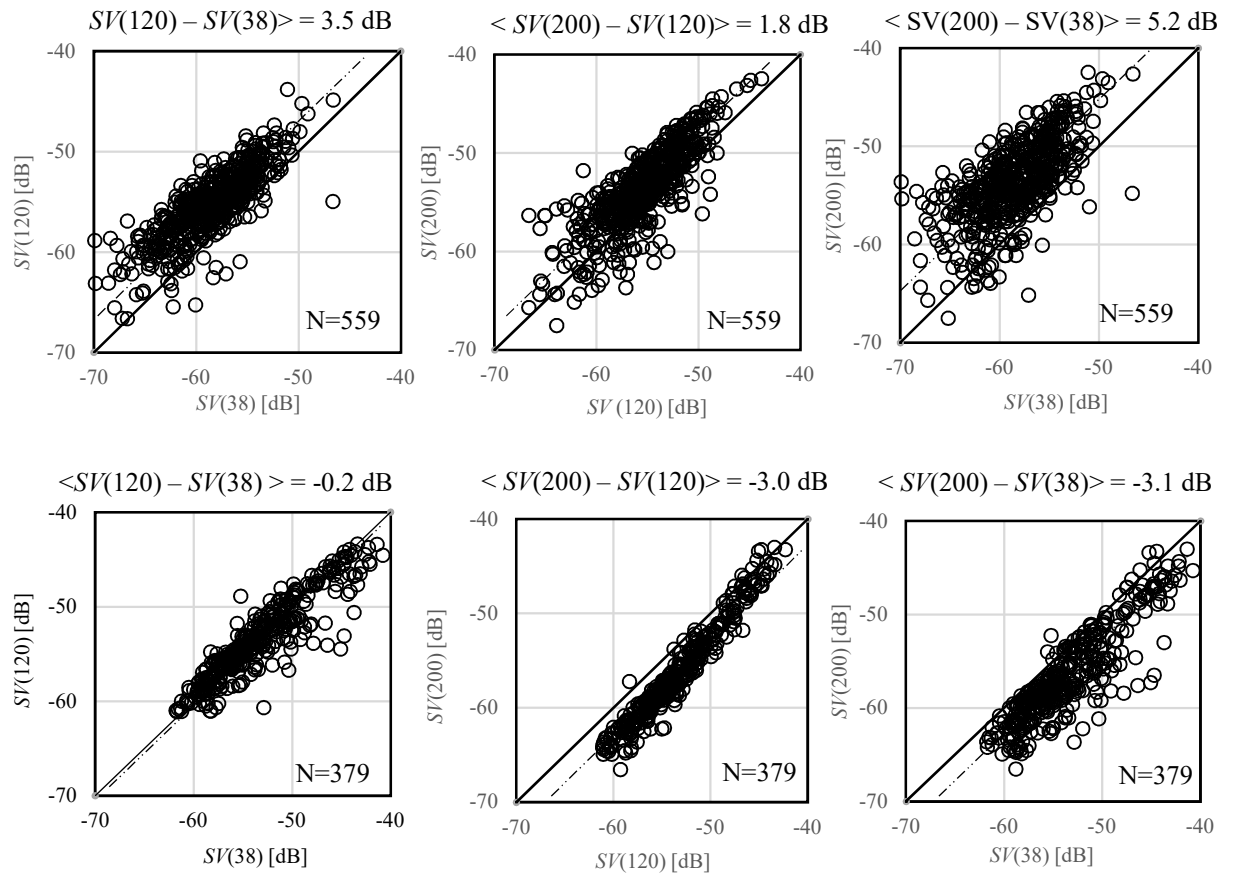


Fig. 6.7 2015年から2017年に得られたソウハチ（上）とスケトウダラ稚魚（下）の平均体積後方散乱強度の周波数特性．左から順に $SV(38)$ と $SV(120)$, $SV(120)$ と $SV(200)$, $SV(38)$ と $SV(200)$ の関係を表している．黒線は両周波数で平均体積後方散乱強度が等しい線，2点鎖線は平均値

6.3.4 音響判別

Fig. 6.7 において、周波数 38 kHz と 200 kHz での平均体積後方散乱強度の差はソウハチで 5.2 dB、スケトウダラ稚魚で -3.1 dB であり差が一番大きくなっていた。そこで、この 2 つの周波数を利用したスケトウダラ稚魚とソウハチの判別を試みた。平均体積後方散乱強度の差の範囲を決定するため、両種の $SV(200)$ と $SV(38)$ の差の分布を調べた (Fig. 6.8)。スケトウダラ稚魚の $SV(200) - SV(38)$ のデータ範囲は -8 ~ 0 dB (この範囲でスケトウダラ稚魚のデータの 92 % を含む)、ソウハチの範囲を 1 ~ 10 dB にした (83 % のソウハチのデータを含む)。これらの差分値範囲で両魚種のエコーの分離を行った。

Fig. 6.9 と Fig. 6.10 にソウハチとスケトウダラ稚魚の採集地点のエコーグラムを体積後方散乱強度の周波数差で分けた結果を示す。左から順に、38 kHz, 200 kHz のエコーグラム (a,b), 平均体積後方散乱強度の差分値のエコーグラム (c), 差分値を用いてそれぞれスケトウダラ稚魚, ソウハチと判別された反応のみを抽出した周波数 38 kHz のエコーグラム (d, e) を表している。Fig. 6.9(d) ではソウハチの魚群がほぼ除外されており、逆に Fig. 6.9(e) でソウハチの魚群が抽出されているのがわかる。また、Fig. 6.10(e) を見ると、スケトウダラ稚魚をほぼ完全に除外できており、パッチ状のエコーが Fig. 6.10(d) にはなく、この地点ではソウハチとの混在がないことがわかった。

2018 年 4 月に収集されたデータを使って識別を行った結果を Fig. 6.11 に示す。このとき、釣りや FMT でソウハチとスケトウダラ稚魚が確認でき、両種が混在していることを確認している。平均体積後方散乱強度の差分値を示した Fig. 6.11(c) を見ると、両魚種の分布が重なり合っていることが明確に示されていた。また、Fig. 6.11(d), (e) を見ると両魚種のエコーが分離できているのがわかる。Fig. 6.11(d) においては、深度 50 ~ 60 m 付近に現れていた層状のエコーをスケトウダ

ラ稚魚と判断し、Fig. 6.11(e)では深度 30～40 m に見られるパッチ状のエコーをソウハチと判断していた。これらより、使用した平均体積後方散乱強度の差分範囲でソウハチとスケトウダラ稚魚の音響判別が有効であると考えられた。

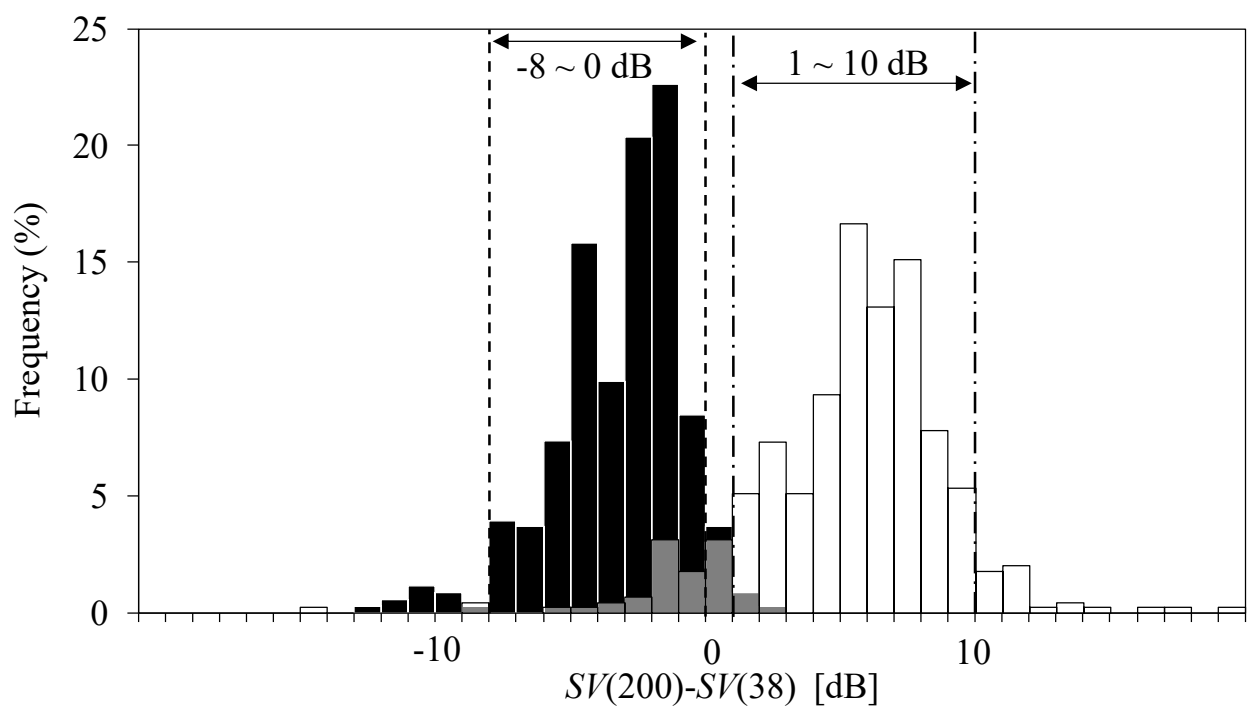


Fig. 6.8 ソウハチとスケトウダラ稚魚それぞれで得られた周波数200 kHzと38 kHzの平均体積後方散乱強度の差のヒストグラム. 黒はスケトウダラ稚魚, 白はソウハチ, 灰は両種が被る領域.

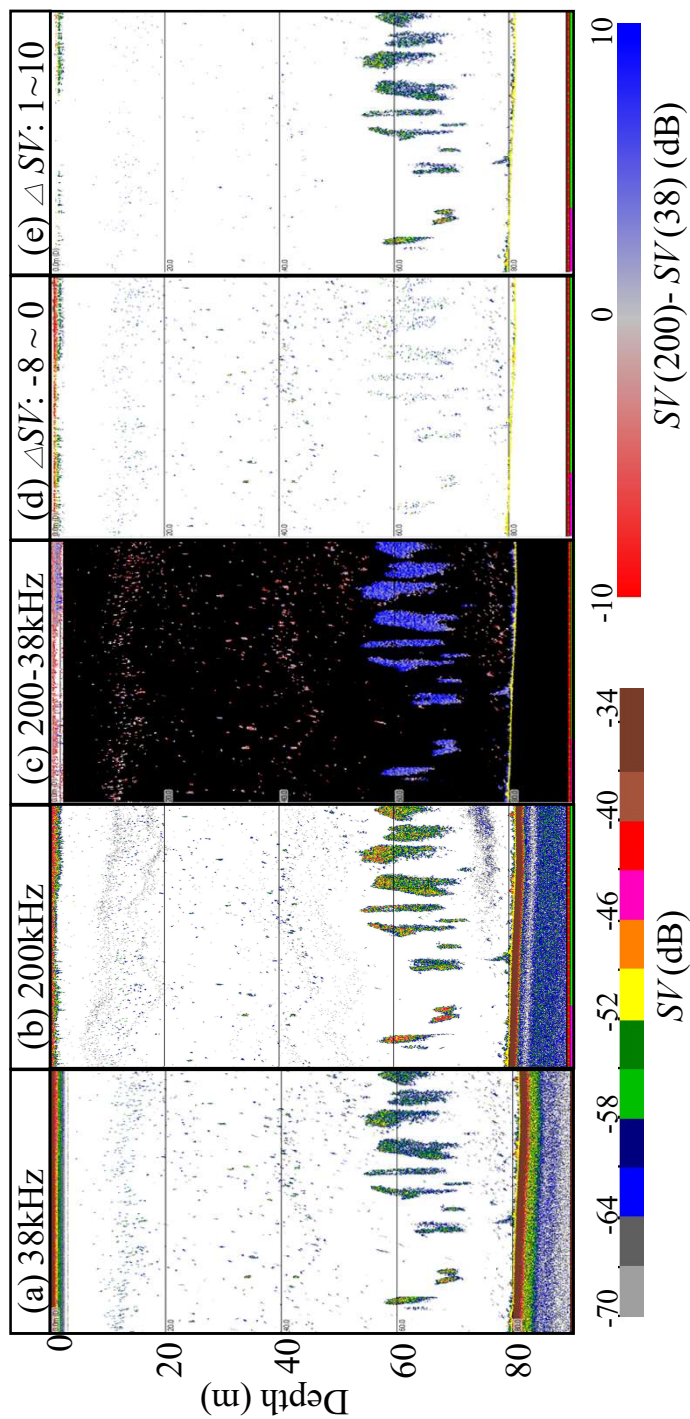


Fig. 6.9 周波数38 kHz と200 kHzの平均体積後方散乱強度の差を使ってソウハチとスケトウダラ稚魚の判別を行った例. (a) と (b) は2周波数でのオリジナルの平均体積後方散乱強度のエコーグラム, (c) は $SV(200) - SV(38)$ のエコーグラム, (d) は平均体積後方散乱強度の差分がスケトウダラ稚魚の周波数特性である $-8 \text{ dB} < SV(200) - SV(38) < 0 \text{ dB}$ となったところだけ抽出した周波数38kHzのエコーグラム, (e) はソウハチと思われる $1 \text{ dB} < SV(200) - SV(38) < 10 \text{ dB}$ の部分のみ抽出したエコーグラムである.

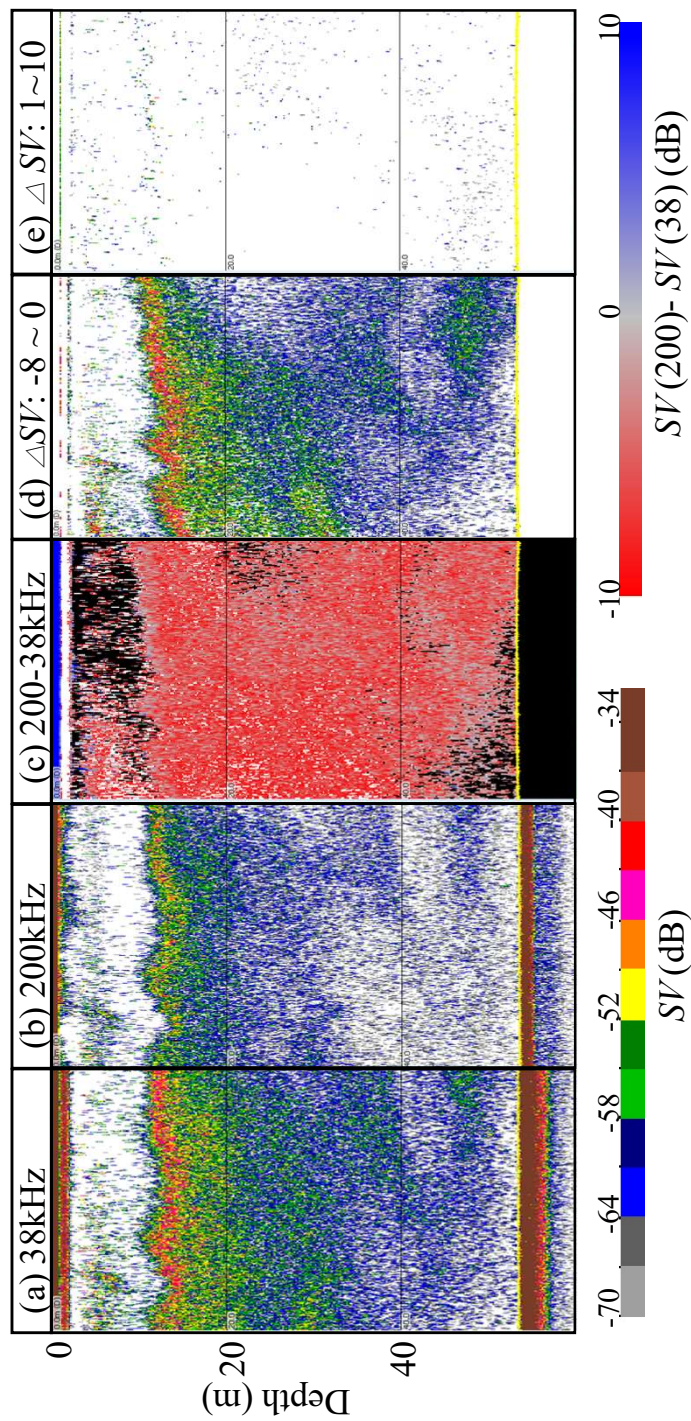


Fig. 6.10 周波数38 kHz と200 kHzの平均体積後方散乱強度の差を使ってソウハチとスケトウダラ稚魚の判別を行った例. (a) と (b) は2周波数でのオ리지ナルの平均体積後方散乱強度のエコーグラム, (c) は $SV(200) - SV(38)$ のエコーグラム, (d) は平均体積後方散乱強度の差分がスケトウダラ稚魚の周波数特性である $-8 \text{ dB} < SV(200) - SV(38) < 0 \text{ dB}$ となったところだけ抽出した周波数38kHzのエコーグラム, (e) はソウハチと思われる $1 \text{ dB} < SV(200) - SV(38) < 10 \text{ dB}$ の部分のみ抽出したエコーグラムである.

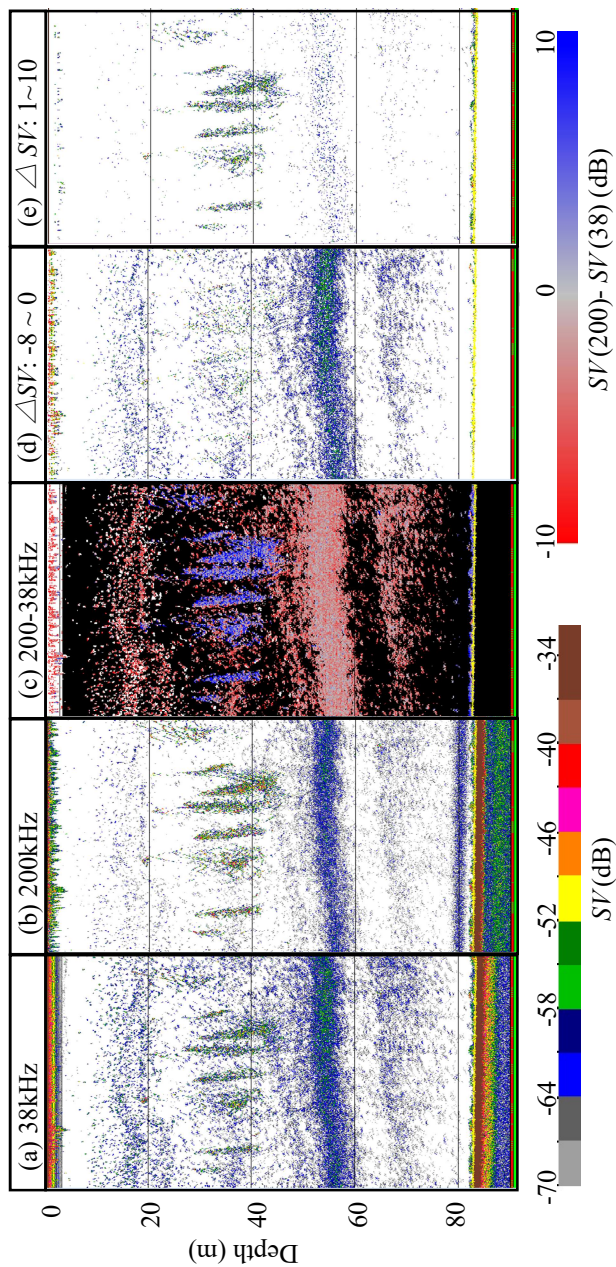


Fig. 6.11 周波数38 kHz と200 kHzの平均体積後方散乱強度の差を使ってソウハチとスケトウダラ稚魚の判別を行った例. (a) と (b) は2周波数でのオリジナルの平均体積後方散乱強度のエコーグラム, (c) は $SV(200) - SV(38)$ のエコーグラム, (d) は平均体積後方散乱強度の差分がスケトウダラ稚魚の周波数特性である $-8 \text{ dB} < SV(200) - SV(38) < 0 \text{ dB}$ となったところだけ抽出した周波数38kHzのエコーグラム, (e) はソウハチと思われる $1 \text{ dB} < SV(200) - SV(38) < 10 \text{ dB}$ の部分のみ抽出したエコーグラムである.

6.3.5 周波数特性により識別されたソウハチとスケトウダラ稚魚の水平分布

2019年4月、5月に定線航走で調べた両種のNASCの水平分布をFig. 6.12（4月）とFig. 6.13（5月）に示した。赤はスケトウダラ稚魚を、青はソウハチを表している。4月の分（Fig. 6.12）からみると、湾内の航走ラインでは、スケトウダラ稚魚の反応がほとんどであり、湾外の航走ラインではソウハチの反応が多かった。また、4月のスケトウダラ稚魚は湾内の奥、水深の浅い沿岸側に多く分布していることが分かった。5月の結果（Fig. 6.13）では、スケトウダラ稚魚は大部分が湾内に分布しているが、ソウハチは湾外から湾内まで観察された。5月では4月に比べてスケトウダラ稚魚は沿岸側から湾口部へ移動したと見える。

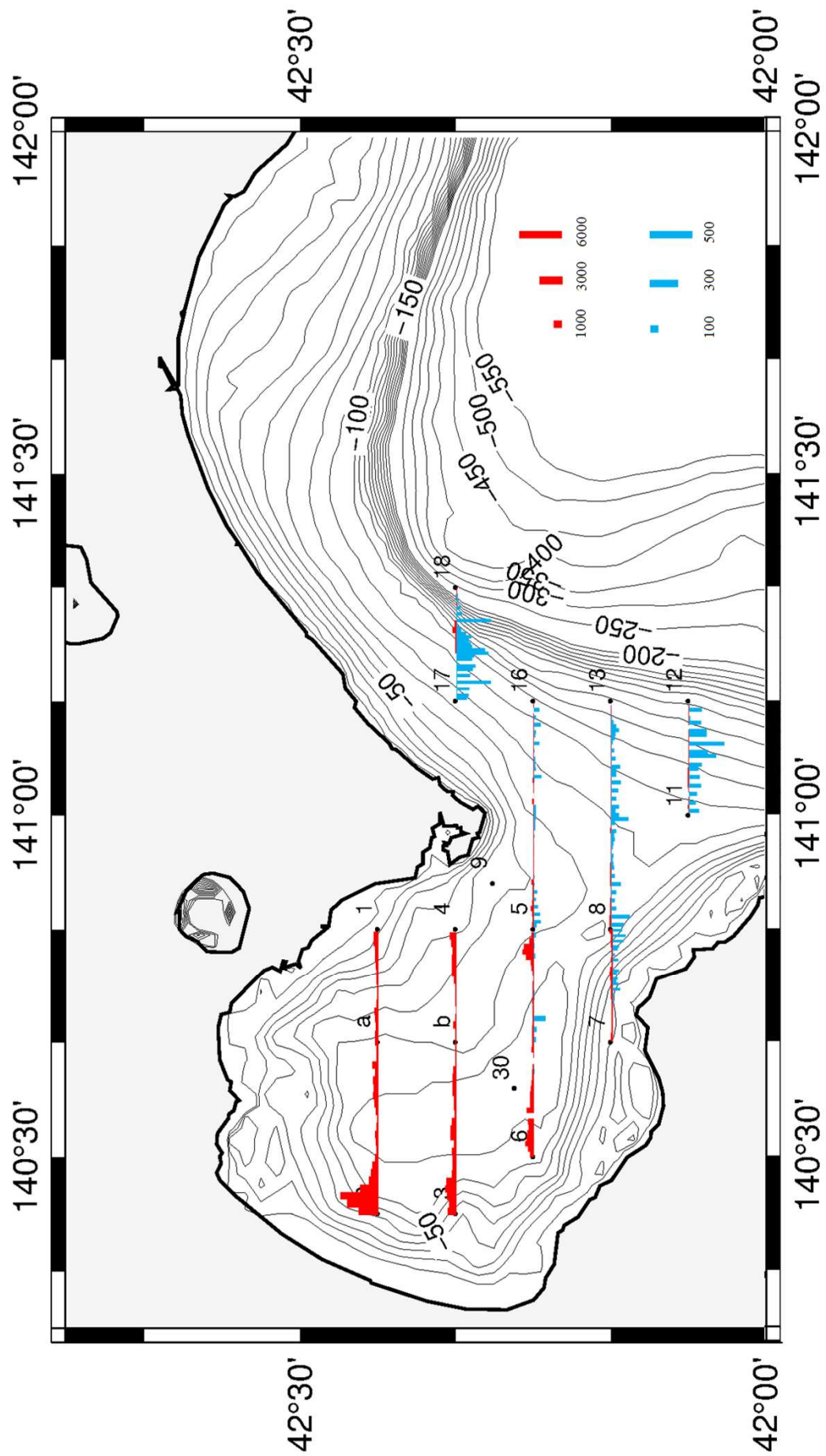


Fig. 6.12 ソウハチとスケトウダラ稚魚の分布密度 (4月) . 赤はスケトウダラ稚魚, 青はソウハチ.

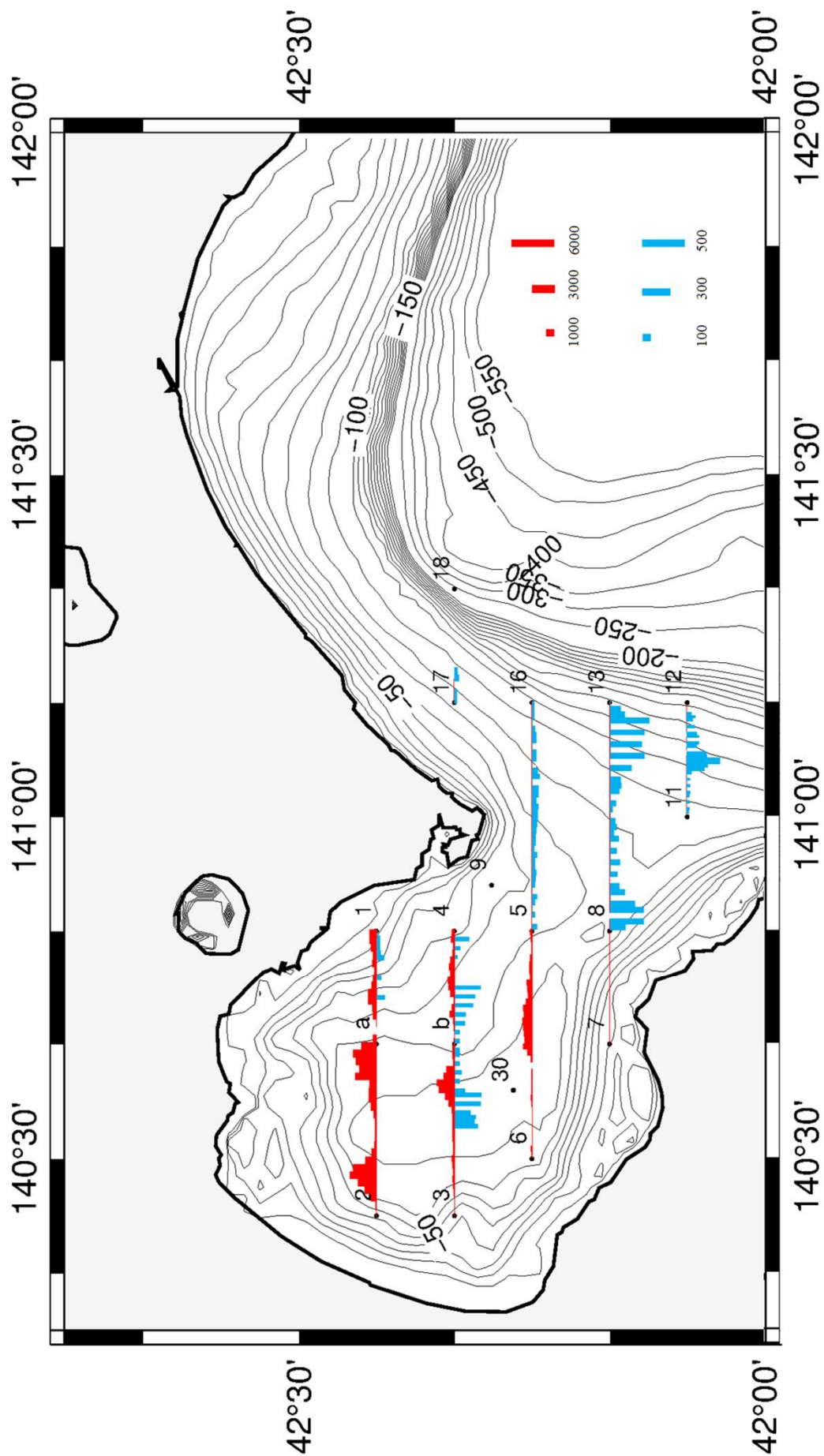


Fig. 6.13 ソウハチとスケトウダラ稚魚の分布密度 (5月) . 赤はスケトウダラ稚魚, 青はソウハチ.

6.4 考察

6.4.1 ソウハチの周波数特性

本章で観察されたソウハチの周波数特性は、周波数が高いほど平均体積後方散乱強度が高くなり、 $SV(200) - SV(38) = 5.2$ dB, $SV(120) - SV(38) = 3.5$ dB, $SV(200) - SV(120) = 1.8$ dB であった。一方、第 4 章で示した懸垂法で得られたソウハチの平均ターゲットストレングスの周波数特性は、(4.20) 式から、 $TS(200) - TS(38) = 6.7$ dB, $TS(120) - TS(38) = 4.6$ dB, $TS(200) - TS(120) = 2.1$ dB であった。(6.3) 式から、平均体積後方散乱強度の差は平均ターゲットストレングスの差と同じである。しかしこれらの間にはそれぞれ、1.5 dB, 1.1 dB, 0.3 dB の差が見られた。この差について、第 4 章でのターゲットストレングス測定は、周波数 200 kHz では行っておらず、周波数 200 kHz でのターゲットストレングスは推定値であり、実際のターゲットストレングスと異なる可能性がある。また、第 4 章で求めたソウハチの平均ターゲットストレングスは、 -30° から $+30^\circ$ までの範囲で平均したものであり、現場でのソウハチの姿勢角分布が水槽で測定した分布と異なっており差が生じた可能性がある。また、現場調査で得られた平均体積後方散乱強度は、ソウハチのみの反応と仮定したが、他の魚類もしくはプランクトンが混在していれば、平均体積後方散乱強度の周波数特性に影響する可能性もある。

この 3 周波数での他の無鰾魚の周波数特性に関して、函館水産試験場は周波数 38 kHz と 120 kHz でホッケの音響調査を行い、2 周波数で観察したホッケのエコーは、海底近くに分布してパッチ状になり、周波数 120 kHz での反応は 38 kHz での反応より 8~17 dB 強いことを報告している（藤岡, 2011）。また、Boyra *et al.* (2018) が現場で周波数 38, 120, 200 kHz について求めたカツオの規準化ターゲットストレングスはそれぞれ、-76 dB, -71 dB, -70.5 dB であった。さら

に, Scoulding *et al.* (2017) が現場で測定した大西洋サバのターゲットストレンジスは, 周波数 38 kHz で-59.60 dB, 120 kHz で-55.63 dB, 200 kHz で-53.58 dB であった。いずれの魚種においても, 周波数 38, 120, 200 kHz での無鰾魚の音響反射は, 高周波数になるほど強くなる傾向であった。従って, 本章で得られたソウハチの周波数特性は一般的な無鰾魚の周波数特性と同じことが分かった。

6.4.2 ソウハチの音響資源調査

本研究において、初めて現場における周波数特性を利用したソウハチの抽出が出来た。エコーの形からソウハチとスケトウダラ稚魚のエコーを分けることも可能であるが、周波数特性を使用することによりさらに正確な抽出ができ、また抽出の自動化が可能となる。

今回、ソウハチのサンプリングは釣りのみであったが、音響資源調査では漁獲データが重要な参考データになるため、できる限り定量採集できるサンプリング方法が必要となる。また、ソウハチが中層に分布していることが今回の調査で確認できたが、底層の音響デッドゾーンに生息する量は音響手法では調べられない。今後ソウハチの音響資源調査を実施する場合は、浮いているソウハチの割合を調べる必要がある。

本研究において、ソウハチのエコーの抽出には周波数 38 kHz と 200 kHz を使用したが、周波数が高いと吸収減衰が大きくなりノイズの影響が大きくなるため、対象生物が周波数 200 kHz でも検出されるような状況で調査する必要がある。噴火湾は一番深い所でも水深は 100 m ほどであり、特に問題はないと考える。Scoulding *et al.*(2017) は、大西洋サバに対し、周波数 200 kHz でのターゲットストレングスが安定しているため、資源量を推定するには周波数 200 kHz を使用したほうがよいと報告しているが、本研究では周波数 38 kHz でソウハチの分布密度を求めた。4月や5月には噴火湾内にはオキアミが生息している可能性があり、金 (2016) が同海域で調べたオキアミの周波数特性 $TS(200) - TS(38)$ である 6~29 dB とソウハチの周波数特性 (Fig. 6.8) が一部重複している。この問題については、周波数特性を用いて抽出した周波数 38 kHz のデータを用いて、そのスレッショルドを的確に設定することで、動物プランクトンの反応は除去できると考えられる。従って、噴火湾におけるソウハチの音響資源調査で量を推定する場

合は，周波数 38 kHz のデータを使用したほうがよいと考える。

第7章 総合考察

本研究は、無鰮魚の音響散乱特性を解明することを目的とし、水槽実験、理論モデル計算、現場調査を行ってきた。本章は、得られた知見をまとめ、本研究で得られた成果の応用や展望について議論する。

7.1 推定方法による無鰮魚のターゲットストレングスについて

本研究では、自由遊泳法、懸垂法、音響モデル法により無鰮魚のターゲットストレングスを調べた。自由遊泳法では、自然法のように魚の生理状態、遊泳行動などの情報を含めたターゲットストレングスを得ることができ、さらに実験水槽を使うことで、魚の種類、体長などの情報も既知となり、自然法のデメリットを解消できる。しかしながら、自然環境ではないため、遊泳時の制限がかかっている可能性もある。懸垂法では、ターゲットストレングスと周波数、魚種、体長、姿勢角などとの詳細な関係を知ることができるが、麻酔された状態で測定を行うので、サンプルの生理状態は自然状態時と異なる可能性がある。

Fig. 7.1 は第3章と第4章で測定したホッケ、ソウハチの規準化姿勢平均ターゲットストレングスの比較である。横軸は L/λ 、縦軸は規準化ターゲットストレングスを表し、上の図はホッケ、下の図はソウハチであり、それぞれ赤は自由遊泳法、黒は懸垂法で得られた結果である。懸垂法で求めた平均ターゲットストレングスは、自由遊泳法で得られた遊泳姿勢角分布を使用して平均した値である。Fig. 7.1 から、自由遊泳法で得られた平均ターゲットストレングスは、懸垂法で得られた平均ターゲットストレングスと大きな違いが見られなかった。これより、今回の測定において麻酔によるサンプルの生理状態の変化は無鰮魚のターゲットストレングスに影響をもちたさなかったと考える。

第5章では、音響モデル法で無鰾魚のターゲットストレンジスを推定し、第4章の懸垂法の結果と比較した。その結果、各魚種について、今回の体長範囲で適用可能なモデルを得ることができた (Fig. 5.19～Fig. 5.21)。イカナゴに関して、魚体を魚肉のみで考えたモデル (DC モデル, DWBA モデル, KRM モデルの魚体のみ) が実測値とよく一致した (L/λ が 4～11)。ソウハチは背骨の影響を考えた KRM モデルが実測値とよく一致した (L/λ が 5～22)。一方、ホッケに関しては、低周波数で魚体のみのモデルと一致 (L/λ が 8～15) し、高周波数になると、背骨を考慮した KRM モデルが実測値とよく一致した (L/λ が 15～30)。従って、無鰾魚のターゲットストレンジスに対し、背骨の影響を考える必要がある。

第6章は、現場におけるソウハチの周波数特性を調べた。周波数 38, 120, 200 kHz におけるソウハチの周波数特性を調べたところ、懸垂法で得られた周波数特性とほぼ一致した。しかし、周波数 120 kHz と 38 kHz での SV の差は懸垂法で得られたターゲットストレンジスの差と 1.1 dB の違いがあった。これについて、現場におけるソウハチの遊泳姿勢角分布の違いや他種の混在などの原因と考えられ、今後は現場で姿勢角分布を調べる必要がある。第3章で測定したソウハチの音響姿勢角と遊泳姿勢角の分布が一致したため、現場における音響姿勢角分布を調べることで現場での遊泳姿勢角分布を得ることができる。一方、周波数特性が一致したことにより、懸垂法では周波数 200 kHz におけるターゲットストレンジスを測定していないが、懸垂法で測定した周波数範囲で推定したソウハチのターゲットストレンジス特性が周波数 200 kHz にまで適用できることを示唆した。つまり、今回求めたソウハチのターゲットストレンジスと体長、波長の関係式は幅広い周波数範囲で有効であると考えられる。

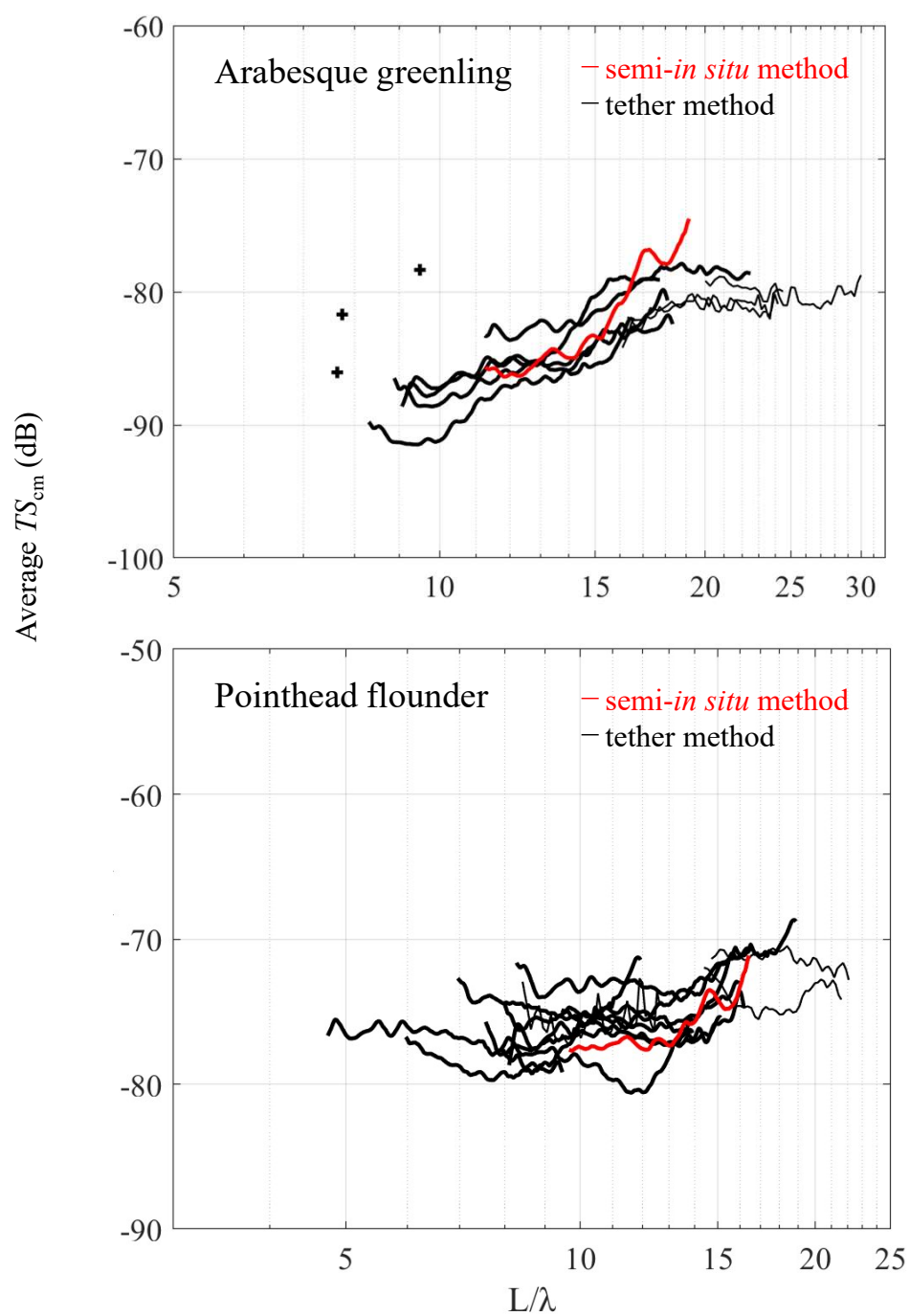


Fig. 7.1 自由遊泳法（赤）と懸垂法（黒）で求めた規準化姿勢平均ターゲットストレングスの体長・周波数依存性. 上：ホッケ, 下：ソウハチ.

7.2 無鰐魚の音響散乱特性

7.2.1 無鰐魚のターゲットストレングスの周波数特性

本研究で測定した無鰐魚について、ターゲットストレングスを測定した体長範囲や周波数範囲におけるターゲットストレングスの周波数特性を述べる。まず、ホッケについて、自由遊泳法と懸垂法で得られた周波数特性 (L/λ が 8~30) (Fig. 7.1 上) は、高周波数になるほど規準化姿勢平均ターゲットストレングスが大きくなる傾向であった。イカナゴについては、懸垂法で測定した範囲 (L/λ が 4~11) においては、規準化姿勢平均ターゲットストレングスにあまり周波数特性が見られなかった (Fig. 4.21)。ソウハチの周波数特性 (Fig. 7.1 下) については、低周波 (L/λ が 5~13) で周波数特性がなく、高周波数 (L/λ が 13~22) においては周波数が高くなるほど規準化姿勢平均ターゲットストレングスが大きくなる傾向があった。まとめると、 L/λ が大きくなると、無鰐魚の規準化姿勢平均ターゲットストレングスは周波数が高くなるほど大きくなる傾向であった。一方、イカナゴに関しては高周波数で測定できなかったため、今後さらにイカナゴの高周波数での規準化姿勢平均ターゲットストレングスの情報を増やす必要がある。

7.2.2 背骨が無鰾魚のターゲットストレングスに与える影響

有鰾魚の音響反射は 90%以上が鰾によるものであることが知られている。無鰾魚の場合、魚肉、骨、内臓などの各部位からの反射を総合的に考える必要がある。いままで、無鰾魚に関する研究では、魚体を魚肉のみで考える例が多かった (Gauthier and Horne, 2004; Yasuma *et al.*, 2009; 松倉ら, 2013; Safruddin *et al.*, 2013)。先行研究で使用した DC モデル, DWBA モデル, KRM モデルを用い、無鰾魚の魚肉の理論ターゲットストレングスを推定した。結果として、イカナゴは理論値と実測値に近い傾向を示したが、ホッケは低周波数で一致したが、高周波数になると理論値が実測値より小さく、ソウハチは全周波数で実測値より理論値が小さくなっていた。Gorska *et al.* (2007) は、大西洋サバの成魚のターゲットストレングスを音響散乱モデルにより計算し、周波数 18 と 38 kHz で魚肉が主な散乱体、70, 120, 200, 364 kHz になると背骨が主な散乱体になることを確認した。そこで本研究では、KRM モデルを使用し、背骨や背骨を含む魚体のターゲットストレングスを計算した。背骨のターゲットストレングス特性について、最大ターゲットストレングスは L/λ の増加とともに大きくなる傾向を示し、平均ターゲットストレングスは L/λ が大きくなるほど小さくなる傾向であった。一方、骨を含む魚全体の理論ターゲットストレングスについて、最大ターゲットストレングスは L/λ の増加とともに大きくなり、平均ターゲットストレングスは L/λ が大きくなってもほぼ変わらない傾向を示した。得られた理論値と実測値を比較したところ、体長の小さいイカナゴに対しては、背骨を考慮した魚全体の理論ターゲットストレングスは実測値より大きくなっていたが、体長の大きいソウハチでは一致していた。一方、ホッケは、低周波数では背骨を含む魚全体の理論値が実測値より大きかったが、 L/λ が大きくなると、実測値と近くなった。以上のことから、 L/λ が大きくなるほど、背骨を考慮した KRM モデルが無鰾魚

に適すると考えられる。従って、 L/λ が小さいときにはターゲットストレングスに対する魚肉の寄与が大きい、 L/λ が大きくなるとターゲットストレングスに対する背骨の寄与が大きくなると考えられる。一方、第 4 章でホッケとソウハチに対し、魚肉なしのターゲットストレングスを測定したところ、魚肉なしのターゲットストレングスは魚肉ありのものとほぼ同じレベルであった。これについてはモデルの結果と一致した。

一方、KRM モデルで推定した無鰾魚のターゲットストレングスが、小さい L/λ の範囲で実測と合わなかったことについて、背骨のターゲットストレングスの過大評価か、魚肉や背骨以外の頭骨、内臓などの影響によりものかまだ解明されていない。音響モデルで理論ターゲットストレングスを計算するとき重要なパラメータである音響インピーダンスについて、本研究では測定していなかった。イカナゴの魚肉については先行研究があるが、ホッケとソウハチの魚肉についてはまだ調べられていない。さらに、魚の骨の音速や密度に関する文献が少なく、本研究では高橋（2007）が測定した無鰾魚であるハタハタの骨の音速比（1.374）や密度比（1.150）を使用した、同時に測定していた有鰾魚のサバの骨の音速比（1.355）や密度比（1.265）とは差があった。今後は魚種毎に骨の音響インピーダンスを調べる必要がある。また、魚肉や背骨以外の部位からターゲットストレングスへの影響については、今後の研究課題である。

7.2.3 無鰐魚の遊泳姿勢角分布

魚のターゲットストレングスは、姿勢角により大きく変動することが知られている（向井，1994）。そこで、魚の平均ターゲットストレングスを求める時に、正確な姿勢角分布が必要となる。第3章でビデオカメラやスプリットビーム式計量魚探機を使用しホッケとソウハチの遊泳姿勢角分布を調べた。2つの方法で推定した遊泳姿勢角分布がほぼ一致したため、両魚種に対して、音響的に推定した姿勢角分布が有効であると考えられた。今後ホッケやソウハチの現場調査を行う際、カメラの代わりに音響データを用いて遊泳姿勢角分布を推定してもよいと考えられる。

有鰐魚の遊泳姿勢角分布に関して、Olsen（1971）による大西洋タラの姿勢角分布は $N(-4.4, 16.2)$ ，Ona（1984）によるニシンの姿勢角分布は $N(-3.9, 12.8)$ ，Foote and Ona（1987）により観察したシロイトダラの遊泳姿勢角は $N(-0.9, 5.4)$ ，Sawada *et al.*（2009）によるサンマの遊泳姿勢角分布は $N(-1.1, 15.4)$ ，甘糟ら（2012）によるカタクチイワシの遊泳姿勢角分布は $N(-3.7, 8.6)$ であった。これらの知見から、有鰐魚の場合はほぼ水平または頭を下げて泳いでいる状態が多いことが分かった。これは、体内における鰐の形によると言われている。ほとんどの有鰐魚の鰐は、紡錘形をしており体内において口と尾を結ぶ軸に対して尾側が下がっていることが多い。そのため、頭を少し下げた場合に鰐の長軸が水平となり、魚が安定した姿勢をとることが出来る考える。

一方、第3章で調べた無鰐魚の遊泳姿勢角分布は、ホッケについては、エコートレース法で $N(5.8, 22.7)$ ，ビデオカメラ法で $N(5.1, 20.7)$ であり、ソウハチについてはそれぞれ $(6.7, 27.9)$ ， $(7.9, 24.7)$ であった。イカナゴについて本研究では調べていないが，Safruddin *et al.*（2013）がカメラで観察した姿勢角分布が $N(20.4, 18.5)$ ，Kubilius and Ona（2012）がカメラで観察した姿勢角分布が

$N(23.7, 18.2)$ であり、すべて平均姿勢角がプラスになり、頭を上げた状態が多いことを示した。これは、無鰾魚の場合、常に負の浮力であり、一定の深さを維持するためには頭を上げて泳ぐ必要があるためと考えられた。

本研究ではいままで調べられていないホッケとソウハチの遊泳姿勢角分布を求めたので、より正確な平均ターゲットストレンジスを求めることができたと考えられる。特にソウハチに対して、姿勢角分布のモードが2つ現れ、正規分布に仮定できないため姿勢角分布の確率関数を使用し平均ターゲットストレンジスを求めた。この姿勢角分布を正規分布と仮定した場合の平均ターゲットストレンジスの一例を Fig. 7.2 に示した。横軸は周波数、縦軸は姿勢平均ターゲットストレンジスであり、黒は姿勢角分布を正規分布と仮定した場合の平均ターゲットストレンジス、灰色は姿勢角分布の確率関数を使用して求めた平均ターゲットストレンジスを表している。この図から、ソウハチの姿勢角分布を正規分布に仮定する場合は、平均ターゲットストレンジスは約 2 dB 小さくなることが分かった。ソウハチの資源量を求めるときに、姿勢角分布を正規分布に仮定することで資源量の過大評価をもたらす可能性がある。

一方、向井 (1994) によるとマナガツオ (側扁型, compressed form) のような無鰾魚のターゲットストレンジスは姿勢によって決まるため、ピッチ角のみならず、ロール角による変動も重要である。ホッケやイカナゴのような体幅と体高が近い魚は、ロール角の影響があまりないと報告されている (飯田, 1988) が、ソウハチの場合は考える必要がある。そこで、ソウハチのターゲットストレンジスのロール角特性を周波数 38 kHz で調べた例を Fig. 7.3 に示す。これは第 4 章に示した懸垂法によるターゲットストレンジスの測定時に、同じシステムで体長 23.7 cm のソウハチのロール角を $\pm 30^\circ$ 変化させてターゲットストレンジスを測定したものである。この結果から、最大ターゲットストレンジスからロール角が 5 度ずれるとターゲットストレンジスが約 3 dB 小さくなることが分かり、

ロール角が少なからずターゲットストレングスに影響を与えることがわかる。

第 3 章のソウハチの遊泳行動観察においては、遊泳時のロール角の大きな変動はみられなかったが、Fig. 7.3 のように、少しのロール角の変動でターゲットストレングスが大きく変わるため、ソウハチの音響資源調査に使用する姿勢平均ターゲットストレングスを求めるときには、ロール角分布の考慮も必要と考える。

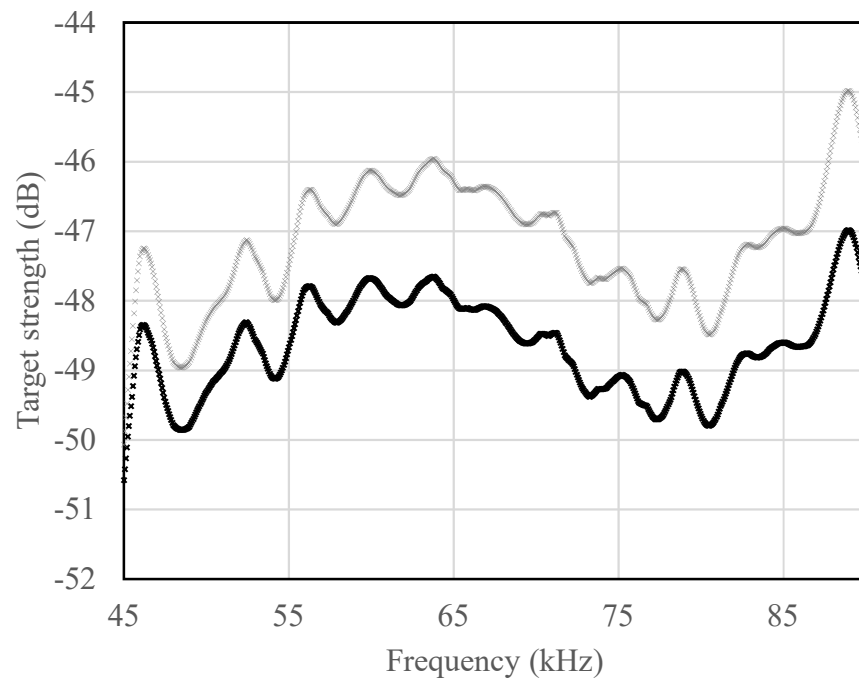


Fig.7.2 姿勢角分布を正規分布と仮定して求めた平均ターゲットストレングス（黒）と実測された姿勢角分布を用いて求めた平均ターゲットストレングス（灰）の比較。

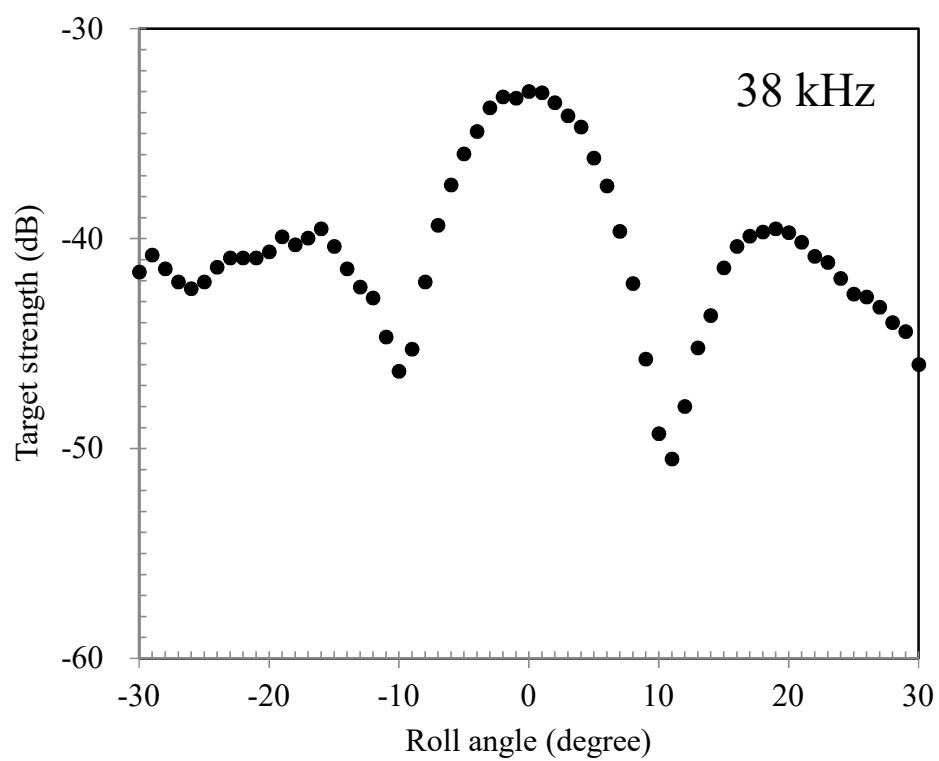


Fig.7.3 周波数38 kHzにおけるソウハチ(TL = 23.7 cm)のターゲットストレングスのロール角特性.

7.2.4 無鰮魚のターゲットストレングスに及ぼす体形の影響

魚体形状の違いによる魚の音響散乱への影響は大きいと報告されている（斎藤，1994）。そこで本研究は，体形の異なる3種の無鰮魚のターゲットストレングスを測定した。3種のターゲットストレングスのピッチ角特性に関して，同じ体長でも強側扁型であるソウハチの指向性が一番鈍く，ターゲットストレングスの最大値から3dB小さくなるメインローブの幅が一番大きいことが分かった。同じ体長の無鰮魚でも，体形が違えばターゲットストレングスに大きな差（Fig. 4.21；同じ L/λ で，ソウハチはホッケ，イカナゴより約 10 dB 大きい）が生じた。また，第4章で提案した面積規準化ターゲットストレングスを使用したイカナゴとソウハチの結果（Fig. 4.24）から，体形の違いにより生じたターゲットストレングスの違いは，超音波が当たる魚体の断面積の違いが一つの原因と考えられた。先行研究でも，Forland *et al.*（2014）は，大西洋サバのターゲットストレングスは背方向よりも側面方向の方が大きく，それは，側面方向の面積が大きいと報告している。従って，音波が当たる断面積が無鰮魚のターゲットストレングスの大小に影響する重要なパラメータであると考えられる。一方，無鰮魚のターゲットストレングスにおける体形による周波数特性の違いはみられなかった。これは体形を維持するのは魚肉であり，魚肉には周波数特性があまりないため，形状による周波数特性の変動がみられなかったと考える。

7.3 無鰐魚の音響調査

本論文の実験対象であるホッケ、イカナゴ、ソウハチは日本で重要な漁獲対象種であり、水産資源を持続的に利用するための適切な資源管理が必要である。そして、現存量の把握と将来の資源量の予測が必要である。そこで直接的な現存量評価方法が期待されている。音響資源調査は、短時間で広い範囲を調査できるため、世界中で行われている。計量魚探機を用いた資源量推定法では、対象種のターゲットストレングスが必要であり、その精度が調査の精度を大きく左右する。本研究で、無鰐魚であるホッケ、イカナゴ、ソウハチのターゲットストレングスの測定や推定を行い、広い周波数帯域でこれらのターゲットストレングスの姿勢角特性、体長依存性、面積依存性、周波数特性を明らかにした。さらに、無鰐魚の周波数特性を利用したソウハチの音響調査を行った。現場で得られたソウハチの周波数特性は水槽で測定した結果とほぼ一致し、無鰐魚の音響資源調査の可能性が示唆された。

ホッケに関して本研究では、現場で音響散乱特性を確かめていないが、藤岡（2011）は北海道周辺海域におけるホッケの SV を調べ、周波数 120 kHz での反応は 38 kHz での反応より 8~17 dB 強いと報告した。第 4 章で求めたホッケのターゲットストレングスの関係式 (4.16) から 120 kHz と 38 kHz でのターゲットストレングスの差は 14.2 dB であり、藤岡（2011）が現場で観察した結果とよくあう。この周波数特性は動物プランクトンに近いが、ターゲットストレングスの大きさと動物プランクトンとの判別が可能と考える。例えば、本研究で推定した周波数 38 kHz における体長 30 cm のホッケの平均ターゲットストレングスは -62 dB であり、金（2016）による周波数 38 kHz でのオキアミのターゲットストレングスである -95~-90 dB とは大きく差がある。そのため、ホッケの生物量を推定する際にはできるだけ低周波数を使用し、解析閾値を設定することで動物プ

ランクトンの影響を除去することが可能と考えられる。いままでホッケの資源動向は漁獲量を指標としたが、漁獲量は天候、漁業方式など様々の要因に影響される。そのため、漁獲と独立な情報である音響的な生物量を得ることができれば、正確な資源状態の把握が期待される。本研究において、音響手法を用いた資源量評価に重要なパラメータであるターゲットストレングスを周波数と体長情報から推定できる関係式を求めた。これは、ホッケの資源量調査の一助になると考えられる。また、ホッケの場合は周波数特性があり高周波数でターゲットストレングスが大きいいため、差分法による現場での判別や抽出が可能と考えられる。

イカナゴに関して、本研究の測定範囲で周波数特性があまりなかった。過去に研究された例から、調査によく使用されている周波数 38, 120, 200 kHz でのイカナゴのターゲットストレングスの差は 2 dB 以内であることが分かっている (Mosteiro *et al.*, 2004 ; Safruddin *et al.*, 2013)。従って、イカナゴのターゲットストレングスは周波数による変動があまりなく、音響調査時は動物プランクトン、ホッケ、イカナゴのような周波数特性のある生物との判別が可能と考えられる。また、周波数特性があまりない有鰐魚と混在する場合は、有鰐魚のターゲットストレングスが大幅に大きいいため、解析の閾値を調整することで有鰐魚との判別も可能と考えられる。

以上の知見から、無鰐魚であるホッケ、イカナゴ、ソウハチの音響散乱特性が明らかになり、音響調査中の種判別、体長推定、生物量推定に重要な知見を得ることができた。本研究で得られた成果が今後無鰐魚の音響資源調査に貢献することを期待する。

結論

以下に本研究で得られた知見をまとめる。

1. 自由遊泳法で測定したホッケとソウハチのターゲットストレングスは、周波数 50 kHz～85 kHz において、周波数が高くなるほど大きくなる傾向が見られた。また、ソウハチのターゲットストレングスはホッケより大きかった。
2. 海水水槽でビデオカメラにより観察した自由遊泳状態のホッケの遊泳姿勢角分布は、正規分布を仮定し平均値、標準偏差で表現すると $N(5.1^\circ, 20.7^\circ)$ であった。ソウハチの遊泳姿勢角分布は、2 峰性となり、平均 7.9° 、標準偏差 24.7° であった。一方、計量魚探機で計測した遊泳方向分布は、ホッケについては $N(5.8^\circ, 22.7^\circ)$ であり、ソウハチは 2 峰性で、平均 6.7° 、標準偏差 27.9° となった。ホッケとソウハチそれぞれで 2 つの方法の結果に違いが見られなかったため、音響手法による遊泳方向分布を遊泳姿勢角分布とみなしても良いと考えられた。
3. 懸垂法により求めた周波数 38 kHz, 45～120 kHz のターゲットストレングスを用いて、各個体毎にターゲットストレングスの最大値や姿勢平均値を求め、魚種毎に体長 L (cm)、波長 λ (cm) との関係式を求めたところ次のようになった。

ホッケ ($8 < L/\lambda < 30$) :

$$TS_{\max} = 55.43 \log L - 35.43 \log \lambda - 117.98 \quad (R^2 = 0.84)$$

$$TS_{\text{ave}} = 48.48 \log L - 28.48 \log \lambda - 116.22 \quad (R^2 = 0.90)$$

イカナゴ ($4 < L/\lambda < 11$) :

$$TS_{\max} = 16.2\log L + 3.80 \log \lambda - 73.14 \quad (R^2 = 0.46)$$

$$TS_{\text{ave}} = 17.07\log L + 2.93 \log \lambda - 83.21 \quad (R^2 = 0.54)$$

ソウハチ ($5 < L/\lambda < 22$) :

$$TS_{\max} = 33.53\log L - 13.53 \log \lambda - 82.54 \quad (R^2 = 0.82)$$

$$TS_{\text{ave}} = 29.28\log L - 9.28 \log \lambda - 84.97 \quad (R^2 = 0.77)$$

4. イカナゴのターゲットストレングスの実測値は、魚体を魚肉のみで考えたモデル (DC モデル, DWBA モデル, KRM モデルの魚体のみ) が実測値とよく一致した (L/λ が 4~11)。ソウハチでは背骨の影響を考えた KRM モデルが実測値とよく一致した (L/λ が 5~22)。一方、ホッケに関しては、低周波数 (L/λ が 8~15) で魚体のみのモデルと一致し、高周波数 (L/λ が 15~30) になると、背骨を考慮した KRM モデルが実測値とよく一致した。従って、 L/λ が大きくなると、無鰾魚のターゲットストレングスに対し、背骨の影響を考える必要がある。

5. 現場において、周波数 38, 120, 200 kHz を用いて無鰾魚であるソウハチの音響反応を調べたところ、エコーは主に中層にパッチ状に分布していた。また、周波数特性は $SV(120) - SV(38) = 3.5$ dB, $SV(200) - SV(120) = 1.8$ dB, $SV(200) - SV(38) = 5.2$ dB であり、懸垂法による結果から求めたターゲットストレングスの差分値とほぼ一致した。これらの差分値を用いてソウハチの音響判別が可能であることがわかった。

謝辞

本論文の執筆にあたり、終始懇切なる御指導、御鞭撻を賜りました北海道大学大学院水産科学研究院 海洋生物資源科学専攻 海洋計測学講座 向井 徹教授に心から感謝いたします。

（向井老师，非常感谢这六年来您对我的耐心指导、教育，以及对我的无限包容。您既是我的恩师也是我的榜样，您对工作的认真、对科研的专注精神让我深深感动，也在无形中影响着我。我一定不会辜负您的期望，未来成为一名认真严谨的科研人员，将这种精神传承下去！十分感谢您对留学生们的照顾，能成为您的学生我们都非常荣幸！您尊重我们的文化，尊重我们的想法，实事求是。我们都尊敬您，爱戴您！如果我以后能成为教师，我也希望能成为像您一样的教师。在您的鼓励和支持下，我终于完成了博士论文。这段经历将是我一生的财富！千言万语说不尽我的感谢！再次谢谢您！中日友好！）

本論文を御査読していただいた海洋計測学講座 藤森康澄教授ならびに長谷川浩平助教に深く感謝いたします。

また、御指導をいただいた北海道大学 飯田浩二名誉教授，水産学部 福田美亮特任助教，北方生物圏フィールド科学センター生態系変動解析分野 山本潤助教に心より感謝いたします。

本論文におけるサンプル採集の際にご協力いただいた北海道大学水産学部附属練習船うしお丸の亀井佳彦船長始め乗組員の皆様に感謝いたします。

北海道大学大学院水産科学研究院 中屋光裕准教授にはソウハチの飼育方法についてアドバイスを頂いた。ここに感謝の意を表します。

一緒に乗船して生物採集や水槽実験の際に御協力いただいた海洋計測学講座音響グループの呂振先輩および後輩方に心より感謝いたします。

学会の際にお会いしたたくさんの研究者の方には、多大なる有益な御指導、御鞭撻をいただきました。ここに感謝申し上げます。

博士課程の期間は公益財団法人ウシオ財団から奨学金を頂き、生活費などの心配をすることなく、研究に専念できました。ここに感謝申し上げます。

本研究の一部は、日本科学協会の笹川科学助成および日本学術振興会による助成を受けたものです。ここに感謝の意を表します。

北海道大学に留学の機会を与えられた母校である中国大連海洋大学に心より感謝申し上げます。さらに、多くの助言や激励を与えてくださった大連海洋大学湯 勇教授に感謝の意を申し上げます。

最後に、これまでの学生生活を支えてくれた両親や祖母に心から感謝いたします。

参考文献

- 甘糟和男, 貞安一廣, 安部幸樹, 高尾芳三, 澤田浩一, 石井憲. 2012. カタクチイワシ (*Engraulis japonicus*) の鰾形状およびターゲットストレングスと体長の関係. 海洋音響学会誌, 37, 46-59.
- Anderson V. C. 1950. Sound scattering from a fluid sphere. J. Acoust. Soc. Am. 22, 426–431.
- Boyra, G., Moreno, G., Sobradillo, B., Pérez-Arjona, I., Sancristobal, I., Demer, D.A. 2018. Target strength of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) associated with fish aggregating devices (FADs). ICES J. Mar. Sci. 75, 1790–1802.
- Clay, C. S., and Horne, J. K. 1994. Acoustic models of fish: The Atlantic cod (*Gadus morhua*). J. Acoust. Soc. Am., 96: 1661-1668.
- Demer, D., Berger, L., Bernasconi, M., Bethke, E., Boswell, K., Chu, D., Domokos, R., Dunford, A., Fassler, S., Gauthier, S., Hufnagle, L.T., Jech, J.M., Bouffant, N., Lebourges-Dhaussy, A., Lurton, X., Macaulay, G.J., Perrot, Y., Ryan, T., Parker-Stetter, S., Stienessen, S., Weber, T., Williamson, N. 2015. Calibration of acoustic instruments. ICES Coop. Res. Rep. 326, 133.
- Fernandes P. G. 2009. Classification trees for species identification of fish-school echotraces. ICES J. Mar. Sci., 66(6), 1073–1080.
- Foote, K. G. 1980. Averaging of fish target strength functions. J. Acoust. Soc. Am., 67(2), 505–515.
- Foote, K. G. 1980. Importance of swimbladder in acoustic scattering by fish: A comparison of gadoid and mackerel target strength. J. Acoust. Soc. Am., 67(6), 393–396.
- Foote, K. G. 1985. Rather-high-frequency sound scattering by swimbladdered fish. J. Acoust. Soc. Am., 78, 688–700.
- Foote, K.G., Knudsen, H.P., Vestnes, G. 1987. Calibration of acoustic instruments for fish density estimation: A practical guide. International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen: 81.
- Foote K.G. and Ona E. 1987. Tilt angles of schooling penned saithe. J. Cons. Int. Explor. Mer, 43,

118-121.

Forland, T.N., Hobæk, H., Ona, E., Korneliussen, R.J. 2014. Broad bandwidth acoustic backscattering from sandeel—measurements and finite element simulations. ICES J. Mar. Sci. 71, 1894–1903.

藤岡崇. 2011. 地方独立行政法人北海道立総合研究機構水産研究本部. 試験研究は今, No.683.

福田美亮, 澤田浩一, 向井徹. 2014. 油球を持つカイアシ類のターゲットストレングス推定に必要な油の音速比と密度比測定. 海洋音響学会 2014 年度研究発表会講演論文集. 29-30.

Furusawa M. 1988. Prolate-spheroid models for predicting general trends of fish target strength. Journal of the Acoustical Society of Japan, 9: 13-24.

古澤昌彦. 2016. 水中音響と水産音響の講座. 楽音軒.

Gauthier, S., Horne, J.K. 2004. Acoustic characteristics of forage fish species in the Gulf of Alaska and Bering Sea based on Kirchhoff-approximation models. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 61, 1839–1850.

Gorska, N., Korneliussen, R.J., Ona, E. 2007. Acoustic backscatter by schools of adult Atlantic mackerel. ICES J. Mar. Sci. 64, 1145–1151.

Greenlaw, C.F. 1979. Acoustical estimation of zooplankton populations, Limnol. Oceanogr., 24, 226-242.

Hazen E. L., Horne J. K. 2004. Comparing the modelled and measured target-strength variability of walleye pollock, *Theragra chalcogramma*, ICES J. Mari. Sci., 61(3), 363–377.

Haslett R.W.G. 1962. Determination of acoustic backscattering patterns and cross section of fish. Br. J. Appl. Phys., 13, 349-357.

Hashimoto T. and Maniwa Y. 1957. Study on reflection loss of 100kc to 400kc ultrasound on fish-body. J. Acoust. Soc. Jp., 13, 1-6.

北海道立総合研究機構水産研究本部. 2019. 北海道水産資源管理マニュアル, 20.

北海道水産現勢. <http://www.pref.hokkaido.lg.jp/sr/sum/03kanrig/sui-toukei/suitoukei.htm>

Horne, J.K., and Clay, C.S. 1998. Sonar system and aquatic organisms: matching equipment and

- model parameters. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 55: 1296–1306.
- 飯田浩二. 1988. 魚のターゲットストレングス研究の現状と展望. 海洋音響学会誌, 15(4), 207-218.
- 飯田浩二. 1994. 音響資源調査法の基礎. 「月刊 海洋 水産資源の音響調査手法—現状と展望—」(月刊海洋編集部) 海洋出版, 東京. 602-610.
- Itaya, K., Fujimori, Y., Shimizu, S., Komatsu, T. and Miura, T. 2007. Effect of towing speed and net mouth size on catch efficiency in framed midwater trawls. Fish. Sci., 73: 1007-1016.
- Itaya, K., Fujimori, Y., Shiode, D., Aoki, I., Yonezawa, T., Shimizu, S. and T. Miura. 2001. Sampling performance and operational quality of a frame trawl used to catch juvenile fish. Fish. Sci., 67: 436-443.
- Jech, J.M., Lawson, G.L., Lavery, A.C. 2017. Wideband (15–260 kHz) acoustic volume backscattering spectra of Northern krill (*Meganyctiphanes norvegica*) and butterfish (*Peprilus triacanthus*). ICES J. Mar. Sci. 74, 2249–2261.
- Jech J. M. and Horne J. K. 2002. Three-dimensional visualization of fish morphometry and acoustic backscatter,” Acoust. Res. Lett. 3, 35–40.
- Jech, J. M., Horne, J. K., Chu, D., Demer, D. A., Francis, D. T. I., Gorska, N., Jones, B., Lavery, A. C., Stanton, T. K., Macaulay, G. J., Reeder, D. B., and Sawada, K. 2015. “Comparisons among ten models of acoustic backscattering used in aquatic ecosystem research,” J. Acoust. Soc. Am. 138(6), 3742–3764.
- Johnson, R. K. 1977. Sound scattering from a fluid sphere revisited. J. Acoust. Soc. Am., 61: 375-377.
- Junger, M. C. 1982. Scattering by slender bodies of revolution. J. Acoust. Soc. Am, 72: 1954–1956.
- 金銀好, 向井徹, 飯田浩二. 2016. 体積後方散乱強度の周波数差を利用した北海道噴火湾周辺におけるオキアミ類とカイアシ類の識別. 日本水産学会誌, 82(4): 587-600.
- Korneliussen, R.J. 2002. The acoustic identification of Atlantic mackerel. ICES J. Mar. Sci. 67(8), 1749–1758.
- Korneliussen, R. J., Heggelund, Y., Eliassen, I. K., and Johansen, G. O. 2009. Acoustic species identification of schooling fish. ICES Journal of Marine Science, 66: 1111-1118.

- Korneliussen, R. J. 2010. The acoustic identification of Atlantic mackerel. ICES J. Mar. Sci. 67(8), 1749–1758.
- Korneliussen, R. J. (ed.). 2018. Acoustic target classification. ICES Coop. Res. Rep. No.344, 1-104.
- Kubilius R., Ona E., 2012. Target strength and tilt-angle distribution of the lesser sandeel (*Ammodytes marinus*). ICES J. Mar. Sci., 69(6), 1099-1107.
- 工藤尚之. 2020. 制御法および自然法による活スルメイカ (*Todarodes pacificus*) の広帯域音響散乱特性. 北海道大学修士論文.
- Lee WJ, Lavery AC, Stanton TK. 2012. Orientation dependence of broadband acoustic backscattering from live squid. J. Acoust. Soc. Am. 131: 4461.
- Love, R. H. 1971. Dorsal-aspect target strength of an individual fish. J. Acoust. Soc. Am., 49: 816-823.
- McGehee D.E., O'Driscoll R.L., Traykovski L.V. M. 1998. Effects of orientation on acoustic scattering from Antarctic krill at 120 kHz. Deep-Sea Research II. 45, 1273-1294.
- 松倉隆一, 澤田浩一, 安部幸樹, 南憲吏, 永島宏, 米崎史郎, 村瀬弘人, 宮下和士. 2013. 仙台湾周辺におけるイカナゴ *Ammodytes personatus* 当歳魚のターゲットストレングス測定とモデル計算による比較. 水産学会誌. 79, 638–648.
- 宮野鼻洋一. 1994. 魚の音響散乱特性—鰭の影響—. 「月刊 海洋 水産資源の音響調査手法—現状と展望—」(月刊海洋編集部) 海洋出版, 東京. 617-623.
- Miyashita, K., Aoki, I., Seno, K., Taki, K., Ogishima, T. 1998. Acoustic identification of isada krill, *Euphausia pacifica* Hansen, off the Sanriku coast, north-eastern Japan. Fish. Oceanogr. 6, 266–271.
- Mosteiro, A., Fernandes, P. G., Armstrong, F., and Greenstreet, S. P. R. 2004. A dual frequency algorithm for the identification of sandeel school echotraces. ICES Document CM 2004/R: 12. 13pp.
- 向井徹. 1994. 魚体の超音波反射特性におよぼす鰭と姿勢の影響に関する基礎的研究. 北海道大学博士論文.
- 向井徹. 1994. 魚の音響散乱特性：姿勢の影響. 日本水産学会誌. 60(6), 797-798.
- 向井徹. 2004. 魚類および動物プランクトンのターゲットストレングスに関する研究.

- 日本水産学会誌. 70(5), 667-670.
- Mukai T. and Iida K. 1996. Depth dependence of target strength of live kokanee salmon in accordance with Boyle's law. ICES J. Mar. Sci., 53(2), 245-248.
- Nesse, T. L., Hobæk, H., and Korneliussen, R. J. 2009. Measurements of acoustic-scattering spectra from the whole and parts of Atlantic mackerel. ICES J. Mar. Sci., 66: 1169-1175.
- Olsen K. 1971. Orientation measurements of the cod in Lofoten obtained from underwater photographs and their relation to target strength. ICES CM 1971/B: 17.
- Ona E. 1984. Tilt angle measurements on herring. ICES CM 1984/B:19.
- Reeder, D. B., Jech, J. M., and Stanton, T. K. 2004. "Broadband acoustic backscatter and high-resolution morphology of fish: Measurement and modeling," J. Acoust. Soc. Am. 116, 747-761.
- Safruffin, Kawauchi Y., Ito Y., Minami K., Itaya K., Maeda K., Matsukura R., Abe K., Yasuma H., Miyashita K. 2013. Tilt Angle and Theoretical Target Strength of the Japanese Sandeel, *Ammodytes personatus*, Captured on the Northern Coast of Hokkaido. J. Marine Acoust. Sco. Jpn., 40(4), 329-338.
- 齊藤清隆. 魚の音響散乱特性—形状の影響—. 1994. 「月刊 海洋 水産資源の音響調査手法—現状と展望—」(月刊海洋編集部) 海洋出版, 東京. 611-616.
- 澤田浩一. 2000. 魚のターゲットストレングスの高精度推定に関する研究. 東京海洋大学. 博士論文.
- 澤田浩一, 石井憲, 高尾芳三, 安部幸樹, 名波敦. 2003. 小型生物のターゲットストレングスパターン測定システムの測定精度の検証. 日本海洋音響学会 2003年度研究発表会講演論文集, 33-36.
- Sawada K., Takahashi H., Abe K., Ichii T., Watanabe K., and Takao Y. 2009. Target-strength, length, and tilt-angle measurements of Pacific saury (*Cololabis saira*) and Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*) using an acoustic-optical system," ICES J. Mar. Sci., 66, 1212-1218.
- Scoulding, B., Gastauer, S., MacLennan, D.N., Fässler, S.M.M., Copland, P., Fernandes, P.G., 2017. Effects of variable mean target strength on estimates of abundance: the case of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*). ICES J. Mar. Sci. 74, 822-831.
- Simmonds, J., MacLennan, D. 2005. Fisheries Acoustics, Theory and Practice, Second Edition.

Blackwell Publishing company. UK.

Soule M., Barange M., Hampton I. 1995. Evidence of bias in estimates of target strength obtained with a split-beam echo-sounder. ICES J. Mar. Sci, 52, 139-144.

Stanton, T. K. 1988. Sound scattering by cylinders of finite length. I. Fluid cylinders. J. Acoust. Soc. Am., 83: 55-63.

Stanton, T. K. 1988. Sound scattering by cylinders of finite length. II. Elastic cylinders. J. Acoust. Soc. Am., 83: 64-67.

Stanton, T. K. 1989. Sound scattering by cylinders of finite length. III. Deformed cylinders. J. Acoust. Soc. Am., 86: 691-705.

Stanton. T. K. 1989b. Simple approximate formulas for backscattering of sound by spherical and elongated objects. J. Acoust. Soc. Am., 86: 1499-1510.

高橋里佳. 2007. 医療用超音波カメラを用いた海洋生物の形態計測. 北海道大学修士論文.

高嶋孝寛. 2006. 海中垂下されたホッケ *Pleurogrammus azonus* のターゲットストレングス. 北水試研報, 70, 73-80.

Thomas G. L., Kirsch J., Thorne R. E.. 2002. Ex situ target strength measurements of Pacific herring and Pacific sand lance, North American Journal of Fisheries Management, 22, 1136-1145.

Yasuma H., Nakagawa R., Yamakawa T., Miyashita K., Aoki I., 2009. Density and sound-speed contrasts, and target strength of Japanese sandeel *Ammodytes personatus*, Fisheries Science, 75, 545-552.

Ye Z., 1997. A novel approach to sound scattering by cylinders of finite length. J. Acoust. Soc. Am., 102, 877-884.

Ye Z., Hoskinson E., Dewey R.K., Ding L., and Farmer D.M., 1997. A method for acoustic scattering by slender bodies. I. Theory and verification. J. Acoust. Soc. Am., 102, 1964-1976.