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

松倉隆一,^{1*} 澤田浩一,² 安部幸樹,² 南 憲吏,³
永島 宏,⁴ 米崎史郎,⁵ 村瀬弘人,^{6a} 宮下和士⁷

(2012 年 12 月 25 日受付, 2013 年 4 月 7 日受理)

¹(財)水産総合研究センター日本海区水産研究所, ²(財)水産総合研究センター水産工学研究所,

³北海道大学大学院水産科学研究院, ⁴宮城県水産技術総合センター内水面水産試験場,

⁵(財)水産総合研究センター国際水産資源研究所, ⁶(財)日本鯨類研究所,

⁷北海道大学北方生物圏フィールド科学センター

Comparison of measurements and model calculations of target strength of juvenile sandeel in Sendai Bay

RYUICHI MATSUKURA,^{1*} KOUICHI SAWADA,² KOKI ABE,² KENJI MINAMI,³ HIROSHI NAGASHIMA,⁴
SHIROH YONEZAKI,⁵ HIROTO MURASE^{6a} AND KAZUSHI MIYASHITA⁷

¹Japan Sea National Fisheries Research Institute, Fisheries Research Agency, Chuo, Niigata 951-8121, ²National Research Institute of Fisheries Engineering, Fisheries Research Agency, Kamisu, Ibaraki 314-0408,

³Faculty of Fisheries Sciences, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041-8611, ⁴Miyagi Prefecture Fisheries Technology Institute, Freshwater Fisheries Experiment Station, Kurokawa-gun, Miyagi 981-3625, ⁵National Research Institute of Far Seas Fisheries, Fisheries Research Agency, Yokohama, Kanagawa 236-8648,

⁶The Institute of Cetacean Research, Chuo, Tokyo 104-0055, ⁷Laboratory of Marine Ecosystem Change Analysis, Field Science Center for Northern Biosphere, Hokkaido University, Hakodate, Hokkaido 041-8611, Japan

The target strength (TS) of juvenile sandeel (3.1–7.7 cm in standard length, SL) was measured for various tilt angles (–30° to 30°) at 120 kHz, and was compared with the theoretical TS calculated using the theoretical sound scattering model. The maximum TS measured at the tilt angle of 0° ranged from –68.8 to –60.8 dB, whereas the range of the theoretical TS was from –68.7 to –61.5 dB. The difference of the measured and theoretical values of the maximum TS was –1.6 to 0.9 dB, and the TS patterns showed good agreement, particularly in the range of the main lobes, in the tilt angle (–10° to 10°). The theoretical model was used to calculate the TS under the same conditions where the specimens were collected. The correlation between the SL and the maximum TS is given by the equation: $TS = 43.1 \log SL - 96.1$.

キーワード：TS 回帰式, イカナゴ, 仙台湾, ターゲットストレングス (TS)

イカナゴ *Ammodytes personatus* 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。¹⁾ また、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、²⁾ 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。

仙台湾では 1982 年から、湾内に設定した調査点における直接採集によって、イカナゴ夏眠期の分布調査が実施されている。²⁾ 2005 年以降、第二期北西太平洋鯨類捕獲調査 (JARNII) の一環として計量魚群探知機 (以下、計量魚探とする) による音響調査も実施されてい

* Tel : 81-25-228-0658. Fax : 81-25-224-0950. Email : matukura@affrc.go.jp

^a 現所属：(財)水産総合研究センター国際水産資源研究所 (National Research Institute of Far Seas Fisheries, Fisheries Research Agency, Yokohama, Kanagawa 236-8648, Japan)

る。³⁾ 仙台湾で実施されている音響調査は、水深 100 m に満たない浅い海域で実施されており、エコーグラムでは 38 kHz より 120 kHz で明確な魚群反応を確認できる。得られたエコーグラム上の魚群反応について、形状や環境情報を参考にし、トロール等による魚種確認を行いつつ、調査員の経験に基づいて魚種を判別している。³⁾

これまで、大西洋に分布する同属の *A. marinus* について計量魚探を用いた漁具による採集効率の検討⁴⁾や多周波数を利用した魚体サイズの判別⁵⁾が報告されている。これらの報告の中でターゲットストレングス(以下、TS とする)について十分に議論されていなかったが、Kubilius and Ona⁶⁾ は、ケージ内で自由遊泳する *A. marinus* の TS を測定し報告している。ここで、TS とは対象生物の音響反射強度であり、計量魚探で得られた体積(または面積)散乱強度を分布密度へと換算するためのスケールファクタである。Kubilius and Ona⁶⁾ は TS 測定と同時に遊泳状態をビデオカメラで撮影しており、無鰭魚で海水よりも密度の大きい *A. marinus* が頭をやや上げた状態で遊泳していることを示した。また、Thomas *et al.*⁷⁾ は太平洋のキタイカナゴ *A. hexapterus* の TS を測定し体長と TS の関係について報告している。一方、本研究のイカナゴについて水産音響に関する知見は少なく、伊勢湾で採集されたイカナゴについて TS が報告されている程度である。⁸⁾ 伊勢湾のイカナゴは湾周辺で生活史を完結させており、伊勢湾と仙台湾のイカナゴでは同種ながらも夏眠期間や成長に違いがみられる。⁹⁾

TS は魚種、サイズ、周波数、成長段階、遊泳姿勢角等によって異なる値を示すため、調査対象の種や体長に見合った TS を用いる必要がある。一般的に、魚の TS は姿勢による変動が大きく、特にイカナゴはシリンダ状の細長い形状をした魚であるため姿勢の影響は大きいことが予想される。TS の姿勢角特性を明らかにするため、本研究では姿勢角による TS の変動を実験的に測定する懸垂法を採用した。懸垂法とは麻酔を施した魚を送受波器の指向性主軸上にテグスで吊り、その姿勢を制御しながら魚の姿勢角に対する散乱特性を計測する方法である。近年、高精度な計測システムが構築され、^{10,11)} 精密な TS 測定が可能となったとはいえ、測定に係る繊細な作業や測定サンプルの確保等、容易に行い難いといった点も残っている。

一方、TS は音響理論散乱モデル(以下、理論モデルとする)を用いて数学的に計算することもできる。鰭のある有鰭魚の音響散乱の大部分は鰭によって生じ、その他の部位による音響散乱は相対的に小さい。¹²⁾ イカナゴは鰭を持たない無鰭魚なので、オキアミ等動物プランクトンと同様、魚体と周囲媒質である海水との密度比及び

音速比が重要なパラメータとなる。理論モデルでは、任意の体長、周波数及び姿勢角等における TS を推定することが可能なため、各種の特性を予測することでき、加えて実測に比べて測定作業が軽減されることも利点として挙げられる。そこで、本研究では仙台湾で採集されたイカナゴ当歳魚の密度比・音速比を測定すると共に、生きた魚体の TS を実測することで理論 TS と実測 TS の比較・検証を行った。さらに、理論モデルによるイカナゴ当歳魚の TS 推定の有効性について検証し、体長と理論 TS の関係を明らかにすることを目的とした。

材料および方法

サンプル 本研究に供したイカナゴは第二期北西太平洋鯨類捕獲調査の一環として、宮城県漁業調査指導船拓洋丸(120 t)により、2007 年 4 月に中層トロールによって仙台湾周辺海域で採集した。採集直後、拓洋丸船内において生体密度及び体内音速の測定を実施した。イカナゴ当歳魚(以下、当歳魚とする)は生きた状態で水産総合研究センター水産工学研究所へ輸送した。輸送した当歳魚は同研究所内で海水魚の飼育用の海水(水温 13.8~15.4°C、塩分 33.89~34.98 psu)を用い、最長 6 日間飼育した。このとき、飼育海水をイカナゴの棲息水域に合わせるといった調整は行っていない。また、飼育期間中の給餌は行っていない。

理論モデルによる TS 推定 魚体の形状を円筒薄片の連なりに近似する Distorted Wave Born Approximation 変形円筒モデル(以下、DWBA モデルとする)¹³⁻¹⁵⁾によって、以下の式から全体の後方散乱振幅 f_{bs} 、TS 及び後方散乱断面積 σ_{bs} を表すことができる。

$$f_{bs} = \int_{\bar{r}_{pos}} \frac{k_w^2 a_c}{4k_f} \left(\frac{1+h^2}{gh^2} - 2 \right) e^{2i\vec{k}_z \cdot \vec{r}_{pos}} \times \frac{J_1(2k_f a_c \cos \beta_{tilt})}{\cos \beta_{tilt}} |d\vec{r}_{pos}| \quad (1)$$

$$TS = 10 \log_{10} |f_{bs}|^2 = 10 \log_{10} (\sigma_{bs}) \quad (2)$$

ここで、 $\vec{r}_{pos}$ は円筒薄片に近似したときの体軸に沿った中心線上の位置ベクトル、 k は $k = 2\pi/\lambda$ で与えられる波数で λ は波長である。下付きの w 及び f はそれぞれ周囲媒質である海水及び魚体を示し、 i は虚数単位、 a_c は円筒薄片の半径、 h 及び g は魚体と周囲媒質との音速比及び密度比、 J_1 は第 1 種第 1 次ベッセル関数、 β_{tilt} は入射波と各円筒薄片の円筒軸に対する角度である。

各姿勢角における TS の推定値の計算には McGehee *et al.*¹⁵⁾ による Matlab (MathWorks) コードを用いた。このコードでは、入射角 0°とは体軸に対して平行に頭部方向からの入射となり、同様に入射角 90°は体軸に対して垂直に腹方向からの入射、-90°は体軸に対して垂直に背方向からの入射を意味する。しかし、本研究では一般的な魚類の遊泳姿勢角と計量魚探の関係に合わせ、

入射波に対して体軸が直交し背方向から入射した場合を姿勢角 0° 、頭部を下げた状態を負、上げた状態を正として、体軸が垂直のときの姿勢角を $\pm 90^\circ$ と定義した。

DWBA モデルによる TS 推定には、魚体の密度比 g 、音速比 h に加え魚体形状が必要である。魚体形状は、密度測定または TS 測定の後、背方向からデジタルカメラで撮影しその輪郭をトレースして得た。

また、測定した魚体の密度及び魚体の音速に対し、当歳魚を採集した海域の水温、塩分並びに深度から g 及び h を計算し、採集海域における TS を推定した。推定した TS は、Foote の平均法¹⁶⁾により遊泳姿勢角分布を正規分布と仮定して、その確率密度分布で重み付けをすることで平均化を行った。以降、平均姿勢角 0° 、標準偏差 15° であれば姿勢角の確率密度分布は $(0, 15)$ 、平均化した TS は $TS(0, 15)$ と表記する。当歳魚の平均 TS の計算は、本研究と同じイカナゴ属である *A. tobianus* の $(0, 15)$ ¹⁷⁾ 及び *A. marinus* の $(23.7, 18.2)$ 、⁶⁾ として鰹のガスを全て吐き出し無鰹魚と同じ状態となったカタクチイワシ *Engraulis japonicus* シラスの $(12.8, 22.1)$ ¹⁸⁾ を参考とした。

密度比 密度比 g は魚体の密度 ρ_f と周囲媒質の密度 ρ_w の比であり、次式で表される。

$$g = \frac{\rho_f}{\rho_w} \quad (3)$$

ρ_f の測定は density bottle 法¹⁹⁾を用いた。海水とグリセリンを混合して密度差を段階的に 2 kg/m^3 ずつ異にした混合溶液を作成し、 15°C 標準の硝子製浮秤比重計 (No. 6, No. 7, Shibata 製) で溶液の密度を確認した。測定を行う前に各個体には麻酔 (FA100, 田辺製薬) を施し、1 個体ずつ密度の小さい混合溶液から順次投入していった。投入後魚体が沈降した最大密度の混合溶液と、浮上した最小密度の混合溶液の中間値をその個体の密度とした。混合溶液中で沈降も浮上もせず中性浮力を示した場合は、その混合溶液の密度をその個体の密度とした。このとき、麻酔による密度への影響は無いものとした。測定後、海水で 10% に希釈した中性ホルマリンで固定し、後日、標準体長を測定した。

ρ_w の密度は TS 測定を実施した実験水槽内の水温、塩分から推定し、²⁰⁾ (3) 式から g を得た。

音速比 音速比 h は魚体内の音の伝搬速度 c_f と周囲媒質中の音の伝搬速度 c_w との比である。魚体内の音速は、アクリル製の T チューブを用いた伝搬時間計測法の一つである time average approach 法で測定した。²¹⁾ T チューブの横筒部分の両端には振動子が配置されており、ファンクションジェネレータ (SG-4105, IWATSU 製) によるパルス幅 $5 \mu\text{s}$ 、周波数 400 kHz の正弦波パルスを一方向から発射し、対面した振動子で受信する。このとき振動子間を伝搬する時間をオシロスコー

プ (DSO6012A, Agilent 製) で計測した。まず、媒質である海水と当歳魚を T チューブに入れた状態で伝搬時間 t_l を測定し、次いで海水のみ入れた状態で同様に伝搬時間 t_w を測定した。 t_l を測定した際の T チューブ内の容積と当歳魚の体積比を V 、当歳魚体内を伝搬する時間を t_f とすると、以下の関係が得られ、

$$t_l = (1 - V)t_w + Vt_f \quad (4)$$

このとき、 h は次式で表される。

$$h = \frac{t_w}{t_f} = \frac{c_f}{c_w} \quad (5)$$

本研究では (4) 式における t_l 及び t_w の測定は、T チューブ内の水温を変化させながら行った。T チューブを恒温槽に浸し、内部の水温を 10 分間におよそ 0.5°C の割合で上昇させながら、当歳魚を採集した水温 8.7°C を含むように、 $2.1 \sim 13.5^\circ\text{C}$ の範囲で測定を行った。伝搬時間の測定後、測定した当歳魚の体積を容積 100 mL (精度 1 mL) のメスシリンダーを用いた排水法で測定し、T チューブ内の容積に占める当歳魚の体積比 V を得た。

T チューブの振動子間距離は 200 mm なので、 t_w から c_w を計算することができる。測定に使用した海水 (当歳魚の採集海域付近で採水した表面海水) の音速を推定するため、CTD によって得られた水温及び塩分より現場海域の c_w を推定し、²²⁾ (5) 式から c_f を計算した。さらに、TS 測定を実施した実験水槽内の水温、塩分から音速 c_w を推定し、²²⁾ (5) 式から h を得た。

ターゲットストレングス測定 TS 測定は水産総合研究センター水産工学研究所にある海水水槽 (縦 $2.2 \text{ m} \times$

Fig. 1 The system for measuring the backscattering directivity pattern in a seawater tank ($2.2 \text{ m long} \times 3.7 \text{ m wide} \times 2.2 \text{ m deep}$). Top view (a) and side view (b).

横 3.7 m × 深 2.2 m) に設置された計測システム²³⁾により、2 日間に渡って測定した (Fig. 1)。送受波器は水平方向に設置し、測定魚を中心とする円軌道上 $\pm 30^\circ$ の範囲を 1° 刻みで可動する。入射角を変化させることで、姿勢角 1° 毎における TS 測定が可能である。姿勢角は理論モデルによる TS 推定時と同様に定義した。送受波器から約 1.5 m 離れた指向性主軸に、麻酔を施した当歳魚を釣糸で懸垂した。飼育水槽から麻酔兼移動用の小型容器を経由して TS 測定に至るまでの過程で、魚体は常に水中に浸した状態にあり空気には触れていない。

仙台湾の音響調査³⁾で使用されている周波数 120 kHz を用い、パルス幅 0.6 ms で測定した。TS の測定開始前及び測定後、1 日当たり 2 回、直径 38.1 mm のタングステンカーバイド製標準球により送受信系の校正を実施した。当歳魚を懸垂していた深度 1 m の音速を推定するため、TS 測定中は水温・塩分ロガー (ACT-HR, JFE アドバンテック製) を設置し、水温及び塩分を測定した。

結 果

生体密度、体内音速 計 50 個体の当歳魚について生体密度を測定した結果、全個体が 1061 kg/m^3 であった。生体密度を測定した当歳魚の標準体長 (以下、SL とする) の範囲は 4.9~7.3 cm、平均値は 6.1 cm、標準偏差は 0.6 cm となり、測定した SL の範囲において SL に関係なく生体密度は全て同じであった。

T チューブによる伝搬時間計測法で測定した当歳魚の体内音速を Table 1 に示した。このとき (4) 式における体積比 V は 0.74 であった。また、当歳魚の体内音速と水温の関係から次の回帰式を得た。

$$c_f = 2.8 \text{Temp} + 1511.2 \quad (p < 0.01) \quad (6)$$

Temp は水温を示す。TS 測定を実施した実験水槽内の水温、塩分並びに音響パラメータを Table 2 に示した。なお、 c_f は (6) 式より得た。

ターゲットストレンジス SL 範囲 5.2~7.4 cm、平均 SL 6.2 cm、標準偏差 0.8 cm、体重範囲 0.35~1.12

g、平均 0.68 g、標準偏差 0.28 g の計 13 個体の当歳魚について、姿勢角 $\pm 30^\circ$ の範囲で周波数 120 kHz の TS を測定した。測定は 1 日目に 5 個体、2 日目に 8 個体実施した。測定した個体毎の 120 kHz における実測 TS と理論 TS を Fig. 2 に示した。実測 TS と理論 TS は姿勢角 0° 付近で最大となり、概ねよく一致した。120 kHz における最大 TS は、実測 TS で $-68.2 \sim -60.8 \text{ dB}$ 、理論 TS で $-68.7 \sim -61.5 \text{ dB}$ の範囲にあった。個体毎に実測 TS と理論 TS における最大 TS の差を比較すると $-1.6 \sim 0.9 \text{ dB}$ ではば一致した。実測 TS、理論 TS

Table 1 Speed of sound through the juvenile fish and sea-water measured by the T-tube

Temp. ($^\circ\text{C}$)	c_f (m/s)	c_w (m/s)
13.5	1546.7	1505.3
13.0	1547.3	1503.4
12.5	1546.5	1501.6
12.0	1545.6	1499.8
11.5	1543.1	1498.0
11.0	1542.3	1496.1
10.5	1540.6	1494.3
10.0	1539.0	1492.5
9.5	1536.6	1490.7
9.0	1537.2	1488.9
8.5	1536.3	1487.1
8.0	1534.7	1485.3
7.5	1533.1	1483.6
7.1	1532.6	1482.1
6.5	1529.1	1480.0
6.0	1528.2	1478.2
5.5	1526.6	1476.5
5.0	1523.5	1474.7
4.5	1523.3	1472.9
4.0	1522.5	1471.2
3.5	1520.1	1469.4
3.0	1518.5	1467.7
2.8	1518.3	1467.0
2.1	1508.7	1464.6

Table 2 Acoustical parameters of juvenile fish used in the DWBA model

	Depth (m)	Temp. ($^\circ\text{C}$)	Sal. (psu)	ρ_f (kg/m^3)	ρ_w (kg/m^3)	g	c_f (m/s)	c_w (m/s)	h
1st day	1	14.8	33.9	1061	1025	1.035	1553	1504	1.032
2nd day	1	14.6	34.8	1061	1026	1.034	1553	1505	1.031
*Collected site SL: 4.9~7.3 cm	10~20	8.7	33.5	1061	1026	1.034	1536	1483	1.035
Juvenile fish ⁸⁾ SL: 3.3~7.4 cm	10~20	13.0	—	1048	1026	1.021	—	—	—
Adult fish ⁸⁾ SL: 7.5~13.2 cm	10~20	13.0	—	1059	1026	1.032	1527	1498	1.018

* Temperature, salinity, ρ_w , c_f , and c_f are averaged in the depth range where the net tows were conducted.

Fig. 2 Target strength (TS) of juvenile fish as a function of tilt angle. Comparison of TS measured by experiment at 120 kHz (diamonds) and estimated by the sound scattering model at 120 (solid line) and 38 (broken line) kHz, respectively.

共に姿勢角 0° 付近を中心におよそ $\pm 10^\circ$ の範囲内でメインローブを形成し, SL が大きいほどメインローブは狭くなった。姿勢角 $\pm 10^\circ$ の範囲において実測 TS と理論 TS を比較すると, 相関係数は $0.71 \sim 0.99$ で高い相関があり両者は良く一致した。姿勢角 $\pm 30^\circ$ の範囲における実測 TS と理論 TS の相関係数は, 3 個体 (No. 10, 12 及び 13, 相関係数 $0.46, 0.74$ 及び 0.41) を除く計 10 個体で $0.72 \sim 0.96$ の範囲にあり高い相関があった。

次に, 理論 TS の推定精度を確かめるため, TS を測定した各個体で姿勢角 θ における実測 TS と理論 TS の差を計算し, その平均値 $\delta(\theta)$ と, 標準偏差を Fig. 3 に示した。 $\delta(\theta)$ は次式で定義した。

$$\delta(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta TS_i(\theta) \quad (7)$$

n は測定個体数を示し, 本研究では $n = 13$ である。

Fig. 3 Comparison of target strength (TS) between experimental measurement and theoretical estimation. $\delta(\theta)$ is the mean difference of the measured and the theoretical value of TS as a function of tilt angle. $\delta(\theta)$ and standard deviation are indicated by the diamonds and short bars, respectively.

$\Delta TS_i(\theta)$ は i 番目の個体の姿勢角 θ における実測 TS と理論 TS の差とした。 $\delta(\theta)$ は TS の変化が大きいメインローブの両端 ($\pm 10^\circ$ 付近) と 20° 以上の範囲において大きく、最大 9.6 dB となった。このとき標準偏差も $\delta(\theta)$ の変動と同様の傾向を示し、メインローブの外側の範囲では値が大きくなった。一方、姿勢角 0° を中心としたメインローブでは $\delta(\theta)$ の値は $-1.4 \sim 3.0$ dB と小さく、標準偏差も 0.8~6.0 dB と相対的に小さかった。最大 TS を含むメインローブを中心として、理論 TS は実測 TS に良く一致したことが示された。

次に、Fig. 2 に示した 38 kHz と 120 kHz における理論 TS の姿勢角特性で、周波数による理論 TS の違いを比較した。38 kHz は一般的に計量魚探で使用されている周波数であり、実際の音響調査³⁾でも使用されている。38 kHz における理論 TS の最大値は $-86.8 \sim -78.6$ dB の範囲にあり、120 kHz の理論 TS より 7.2~8.7 dB 小さかった。120 kHz における理論 TS と比較すると、姿勢角の変化に対して TS の変化は緩やかで、メインローブは広く概ね $\pm 20^\circ \sim \pm 30^\circ$ の範囲に形成された。

TS 測定を実施した 13 個体について、実測 TS と理論 TS を姿勢角の確率密度分布で平均化し、個体毎にその差を Fig. 4 に示した。平均化した確率密度分布 (0, 15), (12.8, 22.1) 及び (23.7, 18.2) の角度範囲で実測 TS の測定角度範囲が占める割合は、95.8%, 76.3% 及び 64.4% であった。測定範囲外の姿勢角においては、 $\sigma_{bs}=0$ とし $TS(12.8, 22.1)$ 及び $TS(23.7, 18.2)$ は参考値とした。平均化した実測 TS と理論 TS の差について、各個体で比較すると、 $TS(0, 15)$ では平均 0.08 dB、標準偏差 0.81 dB、 $TS(12.8, 22.1)$ では平均 0.27 dB、標準偏差 1.01 dB、 $TS(23.7, 18.2)$ では平均 0.47 dB、標準偏差 1.39 dB となった。平均化した理論 TS と実測 TS の差は総じて非常に小さく、各個体で平均 TS はよく一致したことが示された。

最後に、当歳魚を採集した海域における条件で平均 TS を推定した。TS 推定に用いた g 及び h は、採集海域の深度 10~20 m の水温及び塩分の平均値から計算し、 c_f は (6) 式より推定した (Table 2)。これらの値を用いて、38 及び 120 kHz に加え計量魚探でよく使用される 70 kHz と 200 kHz における当歳魚 (SL 範囲 3.1~7.7 cm) の理論 TS を計算し、姿勢角の確率密度分布で平均化した。最大 TS 及び平均 TS と SL の関係を Fig. 5 に示した。最大 TS の場合のみ各個体の TS を示した。Table 3 には Fig. 5 に示した TS と SL の各回帰式 $TS = m \log SL + b$ (係数, 切片, 決定係数, 標準誤差) と、係数を 20 としたときの回帰式 $TS = 20 \log SL + TS_{cm}$ について示した。 TS_{cm} は規準化 TS と呼ばれ、体長 1 cm 当たりの TS である。一般に TS は体長 L の 2 乗に比例し、次式の関係が成り立つ。²⁴⁾

Fig. 4 Comparison of averaged target strength between experimental measurement and theoretical estimation for each specimen. Distributions of orientation angle, mean value and standard deviation of the difference for each specimen are shown in respective figures.

$$TS = TS_{cm} + 20 \log_{10} L \quad (8)$$

ここで、 TS_{cm} は各個体における推定 TS と $20 \log SL$ の差の平均値として、次式より求めた。

$$TS_{cm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (TS_i - 20 \log SL_i) \quad (9)$$

このとき、TS 推定を行った個体数 n は 109 であった。 TS_{cm} の標準偏差も Table 3 に示した。

回帰式 $TS = m \log SL + b$ では全ての場合において当歳魚の TS は、SL に比例して増加した。SL が等しいとき、回帰式の係数は 38 kHz で 43.1~53.8, 70 kHz で 40.9~51.2, 120 kHz で 33.7~43.1, 200 kHz では 1.6~5.0 の範囲にあり、周波数が低いほど係数は大きく SL に対する TS の変化量は大きかった。200 kHz では SL の範囲において TS の変化が小さく、各平均 TS における平均値と標準偏差は、最大 TS では -60.9 dB と 1.46 dB、 $TS(0, 15)$ では -66.2 dB と 1.25 dB、 $TS(12.8, 22.1)$ では 72.4 dB と 1.05 dB、 $TS(27.3, 18.2)$ では -74.7 dB と 1.05 dB となった。回帰式 $TS = 20 \log SL + TS_{cm}$ の切片 TS_{cm} は周波数が高くなるほど大きく、標準偏差は小さくなった。38 kHz の最大 TS では

Table 3 Equations of the regression line (TS–SL equation)

		$TS = m \log SL + b$				$TS = 20 \log SL + TS_{cm}$	
		m	b	R^2	SE	TS_{cm}	SD
38 kHz	Maximum TS	53.8	-121.5	0.72	1.86	-95.2	2.64
	$TS (0, 15)$	46.5	-118.6	0.65	1.91	-98.1	2.40
	$TS (12.8, 22.1)$	44.9	-119.3	0.64	1.89	-100.0	2.34
	$TS (23.7, 18.2)$	43.1	-119.7	0.62	1.87	-101.8	2.26
70 kHz	Maximum TS	51.2	-109.6	0.73	1.74	-85.4	2.46
	$TS (0, 15)$	45.7	-107.0	0.67	1.79	-87.1	2.28
	$TS (12.8, 22.1)$	41.7	-109.5	0.65	1.73	-92.6	2.10
	$TS (23.7, 18.2)$	41.0	-111.0	0.65	1.69	-94.7	2.05
120 kHz	Maximum TS	43.1	-96.1	0.74	1.43	-78.2	1.92
	$TS (0, 15)$	34.3	-96.4	0.68	1.33	-85.4	1.54
	$TS (12.8, 22.1)$	34.0	-98.4	0.68	1.31	-87.6	1.52
	$TS (23.7, 18.2)$	33.7	-100.6	0.68	1.29	-90.0	1.49
200 kHz	Maximum TS	5.0	-64.8	0.04	1.44	-76.4	1.33
	$TS (0, 15)$	1.6	-67.5	0.01	1.25	-81.7	1.45
	$TS (12.8, 22.1)$	1.7	-73.7	0.01	1.05	-87.9	1.24
	$TS (23.7, 18.2)$	1.7	-76.1	0.01	1.05	-90.2	1.22

The SE and SD indicate standard error and standard deviation, respectively.
 SL range is from 3.1 to 7.7 cm.

Fig. 5 The correlation between target strength and standard length of juvenile fish estimated by the DWBA model at 38, 70, 120, and 200 kHz. The logarithmic regressions are indicated as follows: circles and solid line, the maximum TS; broken line, $TS (0, 15)$; dotted line, $TS (12.8, 22.1)$; and dash-dotted line, $TS (23.7, 18.2)$, respectively.

-95.2 dB, 標準偏差 2.64 dB であったのに対し, 200 kHz では -76.4 dB, 標準偏差 1.33 dB であった。

考 察

魚体内の密度と音速 イカナゴは鰾を持たない無鰾魚であり, 魚体と周囲媒質である海水との密度比 g 及び音速比 h が, 理論モデルによる TS 推定では重要なパラメータとなる。そこで, これまでに報告されたイカナゴの g 及び h と本結果を比較検証する。Yasuma *et al.*⁸⁾ は伊勢湾で採集した SL 範囲 3.3~7.4 cm, 平均 5.3 cm のイカナゴ当歳魚について, 平均 ρ_f を 1048 kg/m³, g を 1.021 と報告している (Table 2)。本研究の当歳魚は SL 4.9~7.3 cm, 平均 6.1 cm ではほぼ同じサイズであったが, ρ_f は 1061 kg/m³ で 13 kg/m³ 大きかった。イカナゴの最大体長は伊勢湾産が 14.9 cm, 仙台湾産が 21.2 cm で約 6 cm 大きく, 魚体サイズは日本沿岸において北上するほど大型化する。^{9,25)} また, 伊勢湾産のイカナゴは他海域のイカナゴとの交流はなく, 伊勢湾周辺で生活史を完結させており, 地域差による生態的, 形態的な影響が ρ_f に反映している可能性が考えられた。^{9,25)} その他の条件を同じとしてそれぞれの g (1.021 または 1.034) を用いて TS を推定した場合, 本研究での推定値が約 1.8 dB 大きくなった。また, Yasuma *et al.*⁸⁾ は同じ海域で採集した成魚の ρ_f を 1059 kg/m³ と報告しており, 当歳魚より成魚の ρ_f が大きいことを報告している。仙台湾においても伊勢湾同様に成魚と当歳魚では ρ_f が異なる可能性が考えられ, 今後, 成魚の ρ_f も明らかにする必要がある。

次に, 音速比 h について考察する。Table 2 に示した伊勢湾での水温 13°C において, c_f は 1527 m/s, c_w は 1498 m/s 及び h は 1.018 であった。⁸⁾ これに対し, 本研究の仙台湾の環境で水温 13°C としたときの c_f , c_w 及び h は, それぞれ 1547.3 m/s, 1498.6 m/s, 及び 1.032 となった。海水はほぼ同じ条件であったが, c_f は約 20 m/s の差があった。その他の条件を同じとしてそれぞれの h (1.018 または 1.032) を用いて TS を推定した場合, 本研究での推定値が約 2.2 dB 大きくなった。比較に用いたのは伊勢湾のイカナゴは成魚ではあるが, ρ_f の場合と同様に地域差による影響の可能性も考えられた。仙台湾産の成魚について c_f も明らかにし, 仙台湾産の当歳魚や伊勢湾産の成魚と比較することが望まれる。

ターゲットストレングスの姿勢角特性 実測 TS と理論 TS の姿勢角特性はメインローブを中心に概ねよく一致したが, いくつかの個体でサイドローブに差が見られた。差が生じる理由として, 測定個体に付着した気泡の影響, 理論 TS の計算に用いた g 及び h が妥当で無かった可能性, 魚体の湾曲による影響が考えられた。

まず, 気泡の影響については, 最大 TS やメインロー

ブがよく一致していたことから可能性としては低いと推測された。次に, g 及び h の妥当性について考察する。本研究では g 及び h は魚体内で均一と仮定した。このとき, 音が散乱するのは音響インピーダンスの異なる海水と魚体の境界のみとなる。しかし, 実際の魚体は鱗, 筋肉, 内臓, 骨格等によって構成され, 音響インピーダンスの境界が魚体内に複数存在し, 複雑な音響散乱が生じると考えられる。貞安ら²⁶⁾ は特に頭部骨格の影響について論じており, より正確を期すならば各部位について測定を行う必要がある。また, Lavery *et al.*²⁷⁾ は十脚類について, 体内の音響インピーダンスが不均一であることにより, 頭部または尾部方向から入射となる姿勢角 $\pm 90^\circ$ に近づくほど TS が大きくなることを示唆している。これは, 体内の音響インピーダンスの異なる境界において複数回の散乱が生じるためである。しかし, $\pm 30^\circ$ 程度で同様の現象が起きるとは考え難かった。本研究の場合 TS を測定した 13 個体中 10 個体では実測 TS と理論 TS に大きな差は見られず, g 及び h の値は妥当であったことが示唆された。

続いて, 魚体の湾曲による TS への影響について考察する。湾曲は, 遊泳時に見られる体側方向への湾曲と, 通常は見られないが腹又は背方向への湾曲がある。 $\pm 30^\circ$ の範囲において, 体側方向への湾曲は姿勢角が 0° から外れるほど最大 TS や平均 TS を減少させる。²⁸⁾ そのため, 本研究の TS 測定時において体側方向に湾曲していたとは考え難い。一方, 腹又は背方向に湾曲した場合, TS の姿勢角特性でメインローブが広くなり, サイドローブが増加することから,²⁹⁾ TS 測定時に魚体が腹又は背方向に湾曲していた可能性が考えられた。また, 測定中は麻酔が施されてはいるものの, 呼吸によるエラの拍動やヒレの運動等があり魚体は完全に静止しているわけではない。魚体の湾曲や微細な運動により体軸が湾曲することで, 各散乱要素からの散乱波の位置に基づく位相に重畳する位相変動が原因となり,³⁰⁾ サイドローブにおける実測 TS と理論 TS の乖離が起きた可能性が考えられた。

ターゲットストレングスと体長 指向性の影響がほとんどない最大 TS において, 有鰾魚の場合, L を λ で規準化した規準化体長 L/λ が 1 を超える辺りから幾何領域に入り TS_{cm} がほぼ一定となるため (8) 式の関係が成り立つ。一方, 無鰾魚の場合, 幾何領域に入り TS_{cm} がほぼ一定となるのは L/λ が 7~8 を越える辺りからである。³¹⁾ L/λ が小さくなるとレイリー散乱特性を示し, TS は L の 6 乗及び周波数の 4 乗に比例する。³¹⁾

まず, TS_{cm} と L/λ の関係を明らかにするため, 38, 70, 120 及び 200 kHz における理論 TS の最大値を推定し, TS_{cm} と L/λ の関係を Fig. 6 に示した。本研究のイカナゴ当歳魚の SL/λ の範囲は, 38 kHz で 0.8~2.0,

Fig. 6 Relationship between the normalized maximum target strength (TS_{cm}) and SL/λ . The maximum TS_{cm} is estimated by the theoretical model at 38 (open circle), 70 (filled circle), 120 (triangle), and 200 kHz (cross), respectively. The solid line indicates the logarithmic regression between TS_{cm} and SL/λ . TS_{cm} at 38, 70, and 120 kHz are included in the regression.

70 kHz で 1.5~3.6, 120 kHz で 2.5~6.2, 200 kHz で 4.2~10.3 であった。レイリー散乱領域に相当する, SL/λ が 7 未満となった 120 kHz 以下の TS_{cm} と SL/λ について, 一次式で近似して得られた以下の式を Fig. 6 に実線で示した。

$$TS_{cm} = 33.9 \log_{10}(SL/\lambda) - 101.0 \quad (p < 0.01) \quad (10)$$

(10)式の係数から TS_{cm} は SL/λ の 3.4 乗に比例し, 周波数の 4 乗に比例するレイリー散乱特性に近い特徴が示された。次に, 200 kHz における TS_{cm} を比較した。 SL/λ の範囲が狭いこともあるが, TS_{cm} はほぼ一定で幾何領域に相当すると考えられた。このとき, TS_{cm} は平均 -76.4 dB, 標準偏差 1.33 dB となった (Table 3)。本研究で得られた TS_{cm} は, 同じ無鰾魚である大西洋サバ (-72~-70 dB)¹²⁾ や鰾が未発達で無鰾状態のミナミマグロ幼魚 (-75.1~-74.1 dB)³²⁾ と非常に近く, 信頼性が高いものと考えられた。

ここで, SL/λ を基準に TS と SL の回帰式についてまとめる。本研究の当歳魚の SL 範囲 (3.1~7.7 cm) の TS を 38, 70 及び 120 kHz で推定する場合には, SL/λ がレイリー散乱領域に相当したことから, Table 3 に示した TS と SL の回帰式は $TS = m \log SL + b$ がより適当であった。一方, 200 kHz においては TS_{cm} がほぼ一定で SL/λ が幾何領域に相当したことから, 回帰式 $TS = 20 \log SL + TS_{cm}$ がより適していた。このとき, 200 kHz においても回帰式 $TS = m \log SL + b$ を適用することは誤りではないが, 変数を増やし一般性を低下させるため, 最適とはいえないだろう。

平均ターゲットストレングス 姿勢角分布で平均化した平均 TS と SL の回帰式も, 最大 TS と同様に 200 kHz は $TS = 20 \log SL + TS_{cm}$ を用い, それ以外の周波

Fig. 7 Comparison of averaged target strength with other regions and other Ammodytes. Black thick lines are the logarithmic regressions of TS (0, 15) at 38 (dashed line), 70 (dash-dotted line), 120 (solid line), and 200 kHz (dotted line) in this study (Table 3). Gray lines are reference lines: dashed thick line, $TS = 56.5 \log SL - 125.1$ at 38 kHz,⁸⁾ solid thick line, $TS = 34.0 \log SL - 93.1$ at 120 kHz,⁸⁾ solid thin line, $TS = 24.5 \log SL - 84.1$ at 120 kHz,⁷⁾ respectively.

数には $TS = m \log SL + b$ を用いたとして, 各回帰式の係数を比較した。38 kHz で 43.1~46.5, 70 kHz で 40.9~51.2, 120 kHz で 33.7~34.3 となった (Table 3)。38, 70 及び 120 kHz では最大 TS の回帰式に比べ係数はやや小さく, 平均 TS は SL の約 3~4 乗に比例することが示された。これは, 平均化に際し姿勢角 0° 付近における最大 TS の寄与が小さくなるためである。特に, SL が大きくなるほど指向性は鋭くなるためメインローブが狭くなり, SL の増加量に対する平均 TS の増加量は減少する。また, 周波数で比較すると, 周波数が高いほど指向性が鋭くなり同様の結果となる。

Yasuma *et al.*⁸⁾ は SL 範囲 3.4~6.7 cm のイカナゴ当歳魚の TS と SL の回帰式について報告している。38 kHz における回帰式の係数は, 最大 TS で 62.2, $TS(0, 15)$ で 56.5 とどちらも本研究の値よりやや大きい。120 kHz における最大 TS は 35.6 で本研究の値よりやや大きい, $TS(0, 15)$ では 34.0 でほぼ同じ値となった。

他海域, 他のイカナゴ属の TS 他海域におけるイカナゴ当歳魚 (*A. personatus*) や, その他のイカナゴ属魚類の平均 TS と SL の関係を Fig. 7 に示した。本研究の $TS(0, 15)$ の値を図中に太い黒線で示し, 太い灰色が Yasuma *et al.*⁸⁾, 細い灰色が Thomas *et al.*⁷⁾ によって報告された値である。黒い破線で示した 38 kHz の平均 TS は Yasuma *et al.*⁸⁾ の値と近かったのに対し, 120 kHz では約 5~10 dB 本研究が大きかった。どちらも $TS(0, 15)$ であるが, このような違いが生じた。理由

の一つには先に考察した通り密度比 g 及び音速比 h の影響が考えられる。もう一つ、用いた理論モデルの違いによる影響も考えられるが、明確な理由には至ることはできない。Thomas *et al.*⁷⁾ の平均 TS において、近い体長範囲で比較すると本研究が約 2~4 dB 大きくなった。Thomas *et al.*⁷⁾ はある程度自由に遊泳できる状態に懸垂し TS 測定をしている。このときの遊泳姿勢角は測定されていないため不明である。本研究の平均 TS と遊泳姿勢角分布の特徴から推測すると、体長に対する平均 TS の増加が緩やかなことから、水平状態からやや傾いた状態で遊泳していたのではないかと推察された。

無鰾魚状態のカタクチイワシや、同じイカナゴ属においても、異なる姿勢角の確率密度分布が報告されており、これらを用いて得られる平均 TS も当然ながら異なる値となる。特に、イカナゴの魚体は細長いシリンダ状のため姿勢角による TS の変動が大きく、TS を平均化する際の姿勢角分布によって寄与する TS の値が大きく変動する。今後は、自然状態における遊泳姿勢角分布を明らかにして TS を平均化することで TS の精度を向上し、さらには資源計測の精度向上に貢献することが重要な課題である考える。

本研究ではイカナゴ属の 2 パターンの姿勢角分布を用いて、平均 TS を示した。では、どちらの TS を用いるのが正解なのか、残念ながら明確にはできない。しかし、状況に応じて使い分けることで、対応することは可能である。例えば、資源量を推定する場合には、平均 TS が最大となる $TS(0, 15)$ と最小となる $TS(23.7, 18.2)$ を用いればある程度絞り込むことができると考えられる。また、資源管理の観点から生物的漁獲可能量を算出するといった際には、より安全な水準で資源の利用を行うため平均 TS が最大となる $TS(0, 15)$ を用いることが望ましいだろう。

最後に、使用する周波数については、多くの調査船で搭載されている 38, 120 kHz の組み合わせで十分な成果が得られると考える。仙台湾の音響調査³⁾では、38 kHz のエコーグラムではエコーが弱く当歳魚の魚群をほとんど確認できないのに対し、120 kHz では確認することができる。つまり、TS の周波数特性を利用した魚種判別が可能である。さらに、イカナゴの分布する海域は水深 100 m 以浅の浅い海域であり、120 kHz を用いた場合でも十分な信号対雑音比を得ることができる。その他の周波数である 200 kHz や特に 70 kHz については、搭載船舶の絶対数がまだ少ないながらも、将来的には多周波インバース法³³⁾を利用した魚種判別に期待が寄せられる。

謝 辞

本研究は財団法人日本鯨類研究所、宮城県水産技術総合センター並びに独立行政法人水産総合研究センター国

際水産資源研究所が共同で実施した調査成果であり、これらの機関に感謝する。また、本研究のサンプル採集にあたり宮城県漁業調査指導船拓洋丸木村船長を始め、乗組員諸氏に協力を得た。記して感謝する。

文 献

- 1) Murase H, Nagashima H, Yonezaki V, Matsukura R, Kitakado T. Application of a generalized additive model (GAM) to reveal relationships between environmental factors and distributions of pelagic fish and krill: a case study in Sendai Bay, Japan. *ICES J. Mar. Sci.* 2009; **66**: 1417-1427.
- 2) 永島 宏. 沿岸性魚類資源の変動にかかわる短～長期的な水温の影響—仙台湾のイカナゴを例にして—. 月刊海洋 2006; **38**: 181-186.
- 3) 永島 宏, 村瀬弘人, 米崎史郎, 松倉隆一, 南 憲吏, 永木利幸, 川原重幸, 宮下和士. 仙台湾周辺における計量魚探を用いた鯨類餌生物の種判別. 宮城水産研報 2008; **16**: 15-25.
- 4) Mackinson S, Turner K, Righton D, Metcalfe JD. Using acoustics to investigate changes inefficiency of a sandeel dredge. *ICES J. Mar. Sci.* 2005; **71**: 357-363.
- 5) Johnsen SR, Pedersen R, Ona E. Size-dependent frequency response of sandeel schools. *ICES J. Mar. Sci.* 2009; **66**: 1100-1105.
- 6) Kubilius R, Ona E. Target strength and tilt-angle distribution of the lesser sandeel (*Ammodytes marinus*). *ICES J. Mar. Sci.* 2012; **69**: 1099-1107.
- 7) Thomas GL, Kirsch J, Thorne RE. Ex Situ target strength measurement of Pacific herring and Pacific sand lance. *Nor. Am. J. Fish. Manage.* 2002; **22**: 1136-1145.
- 8) Yasuma H, Nakagawa R, Yamakawa T, Miyashita K, Aoki I. Density and sound-speed contrasts, and target strength of Japanese sandeel *Ammodytes personatus*. *Fish. Sci.* 2009; **75**: 545-552.
- 9) 山田浩且. 伊勢湾におけるイカナゴの新規加入量決定機構に関する研究. 三重水研報 2011; **19**: 1-77.
- 10) Sawada K, Miyanohana Y, Ishii K. Precise target strength pattern measurement in an indoor tank. *J. Acoust. Soc. Jpn. E* 1997; **18**: 231-238.
- 11) 石井 憲, 古澤昌彦, 宮野鼻洋一. 魚体のターゲット・ストレングス測定の為の魚体懸垂回転機構. 水工研技報漁船工学 1985; **6**: 51-70.
- 12) Foote KG. Importance of the swimbladder in acoustic scattering by fish: A comparison of gadoid and mackerel target strengths. *J. Acoust. Soc. Am.* 1980; **67**: 2084-2089.
- 13) Chu D, Foote KG, Stanton TK. Further analysis of target strength measurements of Antarctic krill at 38 and 120 kHz: Comparison with deformed cylinder model and inference of orientation distribution. *J. Acoust. Soc. Am.* 1993; **93**: 2985-2988.
- 14) Stanton TK, Chu D, Weibe PH, Clay CS. Average echoes from randomly oriented random-length finite cylinders: Zooplankton models. *J. Acoust. Soc. Am.* 1993; **94**: 3463-3472.
- 15) McGehee DE, O'Driscoll RL, Traykovski LVM. Effect of orientation on acoustic scattering from Antarctic krill at 120 kHz. *Deep-Sea Res. II* 1998; **45**: 1273-1294.
- 16) Foote KG. Averaging of fish target strength functions. *J. Acoust. Soc. Am.* 1980; **67**: 504-515.
- 17) Kühlmann DHH, Karst H. Open water observations on

- the behavior of sandeel school (Ammodytidae) in the western Baltic. *Zeitschrift für Tierpsychologie* 1967; **24**: 282-297 (In German).
- 18) Ito Y, Yasuma H, Masuda R, Minami K, Matsukura R, Morioka S, Miyashita K. Swimming angle and target strength of larval Japanese anchovy (*Engraulis japonicus*). *Fish. Sci.* 2011; **77**: 161-167.
 - 19) Greenlaw CF. Backscattering spectra of preserved zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.* 1977; **62**: 44-52.
 - 20) Mellor GL. *Introduction to physical oceanography*. American Institute of Physics, New York. 1996.
 - 21) Foote KG. Speed of sound in *Euphausia superba*. *J. Acoust. Soc. Am.* 1990; **87**: 1405-1408.
 - 22) Mackenzie KV. Nine-term equation for sound speed in the oceans. *J. Acoust. Soc. Am.* 1981; **70**: 807-812.
 - 23) 澤田浩一, 石井 憲, 安部幸樹, 甘槽和男. 小型水槽でのターゲットストレングス測定限界—ターゲットストレングス測定-100 dB への挑戦—. 海洋音響学会 2006 年度研究発表会講演論文集, 特定非営利活動法人海洋音響学会, 東京. 2006; 69-72.
 - 24) Foote KG. Fish target strengths for use in echo integrator surveys. *J. Acoust. Soc. Am.* 1987; **82**: 981-987.
 - 25) 橋本博明. 日本産イカナゴの資源生態学的研究. 広島大学生物学部紀要 1991; **30**: 135-192.
 - 26) 貞安一廣. 魚類のターゲットストレングスの精密推定に関する研究. 博士論文, 北海道大学, 北海道. 2005.
 - 27) Lavery AC, Stanton TK, McGehee DE, Chu D. Three-dimensional modeling of acoustic backscattering from fluid-like zooplankton. *J. Acoust. Soc. Am.* 2002; **111**: 1197-1210.
 - 28) 貞安一廣, 安部幸樹, 澤田浩一, 高尾芳三, 向井 徹, 飯田浩二. 遊泳による魚体の屈曲運動がターゲットストレングスに与える影響. 海音学会誌 2005; **32**: 30-39.
 - 29) Amakasu K, Furusawa M. The target strength of Antarctic krill (*Euphausia superba*) measured by the split-beam method in a small tank at 70 kHz. *ICES J. Mar. Sci.* 2006; **63**: 36-45.
 - 30) Demer DA, Conti SG. Reconciling theoretical versus empirical target strengths of krill: effects of phase variability on the distorted-wave Born approximation. *ICES J. Mar. Sci.* 2003; **60**: 429-434.
 - 31) 古澤昌彦. 音響による動物プランクトン計測の展望. 海音学会誌 1995; **22**: 162-169.
 - 32) 宮下和士, 西田 勤. 実験イケース内のミナミマグロ *Thunnus maccoyii* 幼魚のターゲットストレングスの直接測定. 水産海洋研究 1999; **63**: 8-13.
 - 33) 甘槽和男, 小川誠記, 内川和久, 澤田浩一. 多周波インパルス法における解析パラメータ決定のためのシミュレーションによる検討. 海洋音響学会 2009 年度研究発表会講演論文集, 特定非営利活動法人海洋音響学会, 東京. 2009; 11-14.