魚類の腹腔内に挿入したピンガの送波音圧の変化

宮城 亜紀,^{1a} 甘糟 和男,^{2*} 安部 幸樹,³
今泉 智人,³ 宮本 佳則,⁴ 柿原 利治⁴

(2011 年 2 月 7 日受付, 2011 年 5 月 12 日受理)

¹東京海洋大学大学院海洋科学技術研究科, ²東京海洋大学先端科学技術研究センター,
³独立水産総合研究センター水産工学研究所, ⁴東京海洋大学海洋科学部

Change of source level of pinger due to implanting into fish

AKI MIYAGI,^{1a} KAZUO AMAKASU,^{2*} KOKI ABE,³
TOMOHIITO IMAIZUMI,³ YOSHINORI MIYAMOTO⁴ AND TOSHIHARU KAKIHARA⁴

¹The Graduate School of Marine Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, ²Research Center for Advanced Science and Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, ³National Research Institute of Fisheries Engineering, Fisheries Research Agency, Kamisu, Ibaraki 314-0408, ⁴Faculty of Marine Science, Tokyo University of Marine Science and Technology, Minato, Tokyo 108-8477, Japan

The purpose of this study was to clarify the change of the source level (SL) of a pinger implanted in a fish and its influence on the receiving distance of an ultrasonic biotelemetry system. A nondirectional transmitter was implanted in three southern bluefin tuna instead of a pinger and the SL of the implanted transmitter was measured from various directions for each tuna. As a result, it was confirmed that the SL changed according to the direction. The maximum decrease of the SL was about 34 dB and the decrease in the receiving distance was estimated to be about 460 m. Our results suggest that the SL and the receiving distance are decreased by implanting a pinger in a fish.

キーワード：受信距離, 超音波バイオテレメトリー, ピンガ, 腹腔内

水生生物の資源管理や保護を行うためには、対象生物の生態把握が必要である。特に行動に関する研究は盛んに行われており、行動追跡を行う手法の一つとして、超音波バイオテレメトリー（以下、バイオテレメトリーと称す）手法が適用されている。¹⁻⁴ 本手法は、超音波発信器（以下、ピンガと称す）を対象生物に装着して放し、その信号を超音波受信器で受けることにより生物の行動を推定する。⁵ 本手法を用いる際、受信器の受信範囲が重要である。バイオテレメトリー手法の一つである設置型方式は、複数の受信器を海底等に設置し、各受信器が対象生物に装着したピンガの信号を受信し、時刻、個体識別番号、深度などを記録することにより生物の広範囲に及ぶ行動が推定できる。⁶⁻¹⁰ しかし、受信範囲を実際より過大に推測した場合、実際の範囲と推測した範囲と

の間は、生物が存在しても探知できない範囲となる。これにより、追跡漏れが生じる。いくつかの先行研究では、簡易的な実験によって最大受信距離を測定し、受信範囲の決定をしている。⁸⁻¹⁰ その受信範囲は同様のシステムであってもばらつきがある。受信器がピンガ信号を検出する際、受信器で受信される信号にはピンガからの信号と、妨害成分である雑音が含まれている。したがって、測定される最大受信距離はピンガの送波音圧の変化、周囲雑音の変化などに影響を受けるものと考えられる。

先行研究によると、ピンガを腹腔内に装着する利点として、魚の遊泳に影響を及ぼさないことやピンガの脱落が少ないことなどが挙げられている。¹¹ そのため、生物の長期間の行動計測においてピンガを腹腔内に装着する

* Tel : 81-3-5463-0485. Fax : 81-3-5463-0485. Email : amakasu@kaiyodai.ac.jp

^a 日本学術振興会特別研究員 DC

ことが適しているとされており, 近年の研究では対象生物 (本研究では魚類とする) の腹腔内にピンガを埋め込むことが多い。⁶⁻¹⁰⁾ 魚の腹腔内にピンガを装着する場合, 鰾の有無, 骨, 筋肉, 内臓等の魚の内部構造によってピンガの送波音圧が変化することが予想され, 受信器で受ける音圧に大きく影響し, 受信距離も変化すると考えられる。

以上から, 本研究では, 魚類の腹腔内から超音波を放射し, 様々な方向で送波音圧を測定し, その変化を明らかにし, 受信距離に及ぼす影響について検討することを

目的とした。

方 法

供試魚 本研究ではミナミマグロ *Thunnus maccoyii* を供試魚とした。ミナミマグロは南半球の中緯度海域に広く分布するマグロであり, クロマグロの次に体が大きく, 肉質も良いことから, 市場では高級品として出回っている。漁獲されたものは食用として日本に多く輸入され, 主に刺身や寿司として利用されている。¹²⁾ また, 蓄養マグロとして, インドマグロの名で広く流通してい

Transmitting system

Receiving system

Fig. 1 Block diagram of the measurement system for the source level.

Fig. 2 Layout of the equipment for the measurement system in a large freshwater tank (15 m long × 10 m wide × 10 m deep). In 2009, Receiver (R) 1, 2, and 3 were used, and z and d were 3 and 2 m, respectively. In 2010, R1, 2, 3, and 4 were used, and z and d were 4 and 3 m, respectively.

る。しかし、世界的にマグロ類の資源減少が懸念されており、その中でも特にミナミマグロは絶滅が危惧されている。ミナミマグロの資源評価および管理は1994年に発効したみなみまぐろ保存委員会（CCSBT）の下で行われており、近年、バイオテレメトリー手法を用いた行動調査も盛んに行われている。¹³⁻¹⁵⁾

また、ミナミマグロは魚類として比較的大型で肉厚もあり、取り扱いが容易であること、腹腔内にピンガを挿入しても魚体が破損する恐れが少ないことなどを考慮し、供試魚として選んだ。

測定システム 測定システムをFig. 1に示す。使用した送波器と受波器は、Fig. 2に示すように、水産総合研究センター水産工学研究所の淡水大型水槽（縦15 m×横10 m深×10 m）に設置して実験を行った。バイオテレメトリーで主に用いられている市販の代表的なピンガの送信パルス幅は約10 msである。このパルス幅は距離に換算すると15 mであり、本研究の実験環境では、水槽の壁や底、水面などから反射波がピンガから受信器へ伝搬する直接波と重畳してしまう。そのため、直接波のみを測定することが困難である。そこで、本実験ではピンガの代用として、円筒型の無指向性ハイドロフォン（TC4013, Reson 製）を送波器として用い、信号発生器で生成したパルス幅1 msのパルス（トーンバースト波）をパワーアンプで増幅して送波した。送波器からのパルスを無指向性の受波器（TC4013, Reson 製）で受信し、プリアンプ（EC6061, Reson 製）で増幅し、PXI（National Instruments 製）に組み込んだ多チャンネルデジタイザ（サンプリング周波数2.5 MHz）で収録した。周波数はバイオテレメトリー手法で使用されている51, 60, 78 kHz、また、近年開発が進んでいる30 kHzとした。¹⁶⁾

実験は2009年12月と2010年6月に行い、2009年の実験では、送波器は深度約3 mに釣り糸を用いて設置し、受信器は送波器を中心として約2 mの距離に3つ設置した。2010年の実験では、送波器は深度約4 mに設置し、受波器は4つ設置した。送波器を設置した釣り糸は回転機構につながっており、±60°回転させ、5°毎に受信波形を収録した。本研究では、魚体の角度は、魚体の頭部を0°、背鰭を90°、尾鰭を180°、腹鰭を270°とし、360°において送波音圧の測定を行った。なお、70°～110°を魚体の背部方向、160°～200°を尾部方向、250°～290°を腹部方向、340°～20°を頭部方向と定義し、呼称する。また、送波器は供試魚の腹部に数cm程切り込みを入れ、送波器が回転機構の中心となるように釣り糸を用いて魚体を懸垂した。

本実験では、冷凍保存されていたミナミマグロを3個体供試魚として用い、尾叉長が長い個体からA, B, Cとした（Table 1）。3個体全て幼魚のため鰾は未発達で

Table 1 The size of the fish used in the experiment

Specimen No.	A	B	C
Fork length [cm]	51.5	48.5	35.7
Weight [kg]	3.2	2.4	0.9

あった。計測中に供試魚の体内に気泡が入ると精確な測定が行えない可能性があるため、解凍した供試魚の腹腔内へ送波器を挿入する際は、気泡が入らないように作業を水中で行った。供試魚の頭部や鰓などにも気泡が付着しないように細心の注意を払った。また、測定後の魚体を軟X線で撮影し、気泡がないことを確認した。個体Bの測定は2009年12月、個体A, Cは2010年6月に行った。

解析方法 送波音圧 P_{SL} (dB re 1 μ Pa at 1 m) は、次式を用いて算出した。

$$P_{SL} = 20 \log_{10} E - M - G + 20 \log_{10} r + \alpha r \quad (1)$$

ここで、 $E(V_{rms})$ はプリアンプからの出力電圧であり、受信波形の中心0.5 ms分の実効値である。 M (dB re 1 V/ μ Pa) は受波器の受波感度であり、メーカーから提供された較正值とした。 G はプリアンプのゲイン (32 dB) である。 r (m) は送波器と受波器の距離であり、受信波形のエンベロープから到達時間を求め、それと音速から算出した。本実験は淡水で実施しており、吸収係数 α (dB/m) は非常に小さい値であり、 r も短い。したがって、吸収減衰項 αr は無視した。

まず、送波器のみの送波音圧を測定し、変化の基準となる値にした。次に、魚体の腹腔内に送波器を挿入した状態で送波音圧を測定した。送波音圧の変化量は、同じ角度で測定された基準値から腹腔内に挿入した場合の送波音圧を引いた値とした。

受信距離推定方法 送波音圧の変化が受信距離に及ぼす影響について、以下に述べる方法により検討した。音響系の評価は、受信器で受けるピンガからの信号と周囲の雑音で決まる信号対雑音比（以下、SN比と称す）を基にして行うができる。¹⁷⁾ この方法を用い、SN比を考慮して受信距離を求めた。受波器に届く受波音圧 P_R (dB re 1 μ Pa) は、

$$P_R = P_0 - 20 \log_{10} r - \alpha r \quad (2)$$

で表わされる。受波器の帯域幅を Δf (Hz)、雑音スペクトルレベルを N_P (dB re 1 μ Pa/Hz^{1/2}) とすると、受信器で受ける雑音の音圧 P_N (dB re 1 μ Pa) は

$$P_N = N_P + 10 \log_{10} \Delta f \quad (3)$$

である。

(2)式の受波音圧 P_R と(3)式の雑音音圧 P_N から、SN比 SNR は

$$\begin{aligned} SNR &= P_R - P_N \\ &= P_0 - 20 \log_{10} r - \alpha r - N_P - 10 \log_{10} \Delta f \quad (4) \end{aligned}$$

Fig. 3 Directivity characteristic of the transmitter source level.

である。

最大受信距離は(4)式の関係式を用いて, SNR が規定値になる距離を求めればよい。

結 果

送波器の送波音圧と指向性 送波器の送波音圧を測定した結果を Fig. 3 に示す。この測定は, 2009年12月の実験において, 個体 B の腹腔内に送波器を挿入する前に行った。周波数が高くなるにつれて送波音圧が高くなっているのは, 送波器の送波感度に依存しているためである。周波数が異なってもほぼ同様の傾向を示したため, ここでは 60 kHz における測定結果を例に説明する。60 kHz における送波器の送波音圧は 143.3~151.0 dB (平均 148.6 dB) であり, 角度によって 5~10 dB 程度の変化はあるが, ほぼ無指向性であった。50°~200°方向は送波器のケーブル側であるため, 送波音圧が 5 dB 程度低い。また, 2010 年 6 月の実験において, 個体 A, C の腹腔内に送波器を挿入する前に測定した送波器の送波音圧は, 個体 A は 138.5~148.0 dB (平均 144.4 dB), 個体 B は 137.6~148.1 dB (平均 144.6 dB) であり, 2009 年 12 月の測定結果と同様の傾向であった。こ

れらの送波音圧は, 既存のピンガ (146 dB: V9-2L, Coded transmitter, Vemco 製) の送波音圧と同程度である。

腹腔内に挿入した場合の送波音圧変化量 Fig. 4 に 3 個体の送波音圧の変化量を個体別に示す。また, 送波音圧の変化量の平均値, 最大値, 最小値を Table 2 に示した。なお, 個体 A の測定結果において, 65°~115°方向は測定ミスがあったためデータを示していない (Fig. 4A)。3 個体とも, ほぼ全方向で送波音圧が低下した。特に頭部方向と尾部方向の送波音圧は低下が著しく, それに比べ背部方向と腹部方向は低下が少ない。また, 同じ個体であると周波数によって送波音圧の変化量は異なっているが, 変化の傾向は同様であった。送波音圧は個体 B の 78 kHz で最大 34.5 dB 低下した。

次に, 個体による変化量の違いを検討するため, 周波数 60 kHz における個体 A, B, C の送波音圧の変化量を Fig. 5 に示す。さらに傾向を見やすくするために, Fig. 5 の送波音圧を 45°毎に平均した平均送波音圧の変化量を Fig. 6 に示す。個体 A の送波音圧の変化量は最大 -29.2 dB, 平均 -19.9 dB であり, 個体 C は最大 -15.3 dB, 平均 -5.8 dB であった。個体 A と個体 C の変化量

Fig. 4 Change of source level at four frequencies. The fork lengths of the fish were 51.5 cm (A), 48.5 cm (B), and 35.7 cm (C).

Table 2 The maximum, average, and minimum value of source level change

Specimen No. Frequency [kHz]	A				B				C			
	30	51	60	78	30	51	60	78	30	51	60	78
Ave. [dB]	-4.7	-4.3	-3.8	-4.5	-9.6	-8.4	-8.7	-7.8	-1.7	-1.7	-0.9	-0.9
Max. [dB]	-17.7	-26.5	-29.2	-34.5	-19.9	-20.8	-25.2	-25.7	-8.1	-12.9	-15.3	-18.9
Min. [dB]	4.6	0.2	2.5	3.1	-4.2	-2.7	-1.8	-2.1	2.2	2.3	4.2	4.6

を比較すると、全体的に個体Cは低下が少ない。これは、個体Cに比べ個体Aの尾叉長が長いことから、大きい個体ほど送波音圧の低下が大きくなる傾向が見られた。

考 察

以上の結果から、本実験では、ミナミマグロの腹腔内から超音波を放射すると、その信号は魚体内の影響を受け、送波音圧が全体的に低下し、音波が魚体を通過する方向によって変化があることを確認した。また、個体が大きいほど送波音圧が低下することが明らかとなった。

送波音圧の変動要因 送波音圧が変化した要因として、魚体内から放射された超音波が魚の内部構造（内

臓、骨、筋肉等）を伝搬する過程で生じた減衰とパルスが複数の経路を伝搬したことによる干渉が考えられる。減衰した要因として、音波のエネルギーが媒質の粘性により熱などのエネルギーに変換することによる吸収減衰、生体組織の不均質による散乱減衰が考えられる。¹⁸⁾ 医療の分野で使用されているMHz帯における減衰の知見¹⁹⁾はあるが、バイオテレメトリーで使用されている周波数帯での影響は明らかにされていない。また、記録した波形は大きく変化している場合があり、干渉の影響によるものと考えられる。このような現象が魚体内部で生じているため、送波音圧が低下し、角度によって変化があったと考えられる。しかし、生体中の音波の減衰には、散乱、拡散、吸収の効果が重なり、さらに複数の経路を伝

Fig. 5 Change of the source level at 60 kHz.

Fig. 6 Source level change model for southern bluefin tuna. The value is the average of the source level every 45°.

搬することによる音波の干渉の影響も加わるため、非常に複雑である。それぞれの要因がどの程度送波音圧の変化に影響しているか解明するためには、魚の内部構造をCT スキャンなどで詳細に把握し、各部位の音速や密度の測定を行った上で、理論的に魚体内部の音波伝搬を推定していくことに可能性を見出すことができる。²⁰⁾

本実験結果から、大きい個体ほど送波音圧が低下することは明らかになった。しかし、魚類の体形は5型に大別され、本実験で供試魚としたミナミマグロは紡錘形に属するが、魚類の体形は極めて変異に富み、細長いものや楕円体をしたものなどさまざまである。同じ種類であっても、体形は必ずしも一定ではなく、成長段階によって変化する場合がある。²¹⁾ そのため、体形が異なると魚体内部の音波伝搬過程が異なり、送波音圧が変化することが予想される。さらに本実験の供試魚は幼魚で鰾が未発達であり、今回は無鰾魚と考えることができる。一

方で、超音波バイオテレメトリー手法で対象とする魚類の中には有鰾魚も多く、鰾によって送波音圧が変化する可能性がある。計量魚群探知機など音響手法による魚類の資源量推定のために、魚一個体当たりの反射強度であるターゲットストレングス（以下、TS と称す）に関する研究が行われている。TS の値は鰾の有無によって異なることが知られており、有鰾魚の場合は鰾の寄与が非常に大きく、主要な反射部位である。²²⁾ 本研究にあてはめて考えてみると、鰾の存在によって魚体内部における音波伝搬過程が大きく変化することが推測され、同体長の無鰾魚とは送波音圧の変化が異なると考えられる。今後、超音波バイオテレメトリー手法で調査されているさまざまな体形の有鰾魚についても、送波音圧の変化を検討する必要がある。

本実験で用いた供試魚は、冷凍保存された魚である。TS に関する研究で、冷凍保存された供試魚と生きた供試魚とで TS が異なり、その主な原因は冷凍時に魚体内に混入した気泡の影響と考えられている。²³⁾ 本実験では、気泡が魚体内に入らないように送波器を供試魚の腹腔内に挿入する時は水中で作業を行うなど細心の注意を払い、送波音圧を測定した後は軟 X 線を用いて供試魚の体内に気泡がないことを確認した。しかし、確認できない微細な気泡が残っていた可能性もあるため、今後生きた供試魚を用いた測定も行う必要があるだろう。

送波音圧の変化が受信距離に及ぼす影響 前述したように、ピンガを腹腔内に挿入すると受信器と魚の位置関係によって送波音圧が変化することが示された。そこで、魚体の姿勢によって変化する送波音圧がどの程度受信距離に影響するか考察する。ピンガの周波数を 69 kHz、雑音スペクトルレベル N_p を 29 dB (Wenz²⁴⁾ 周囲雑音スペクトル曲線と熱雑音から試算)、吸収係数 α を 17 dB/km (水温 19°C、水深 20 m の場合²⁵⁾)、受信器の帯域幅 Δf を 10 kHz、受信器の SNR スレッシュホールドを 15 dB とした場合、受信距離とピンガの送波音圧の関係を(4)式を用いて求めると、Fig. 7 に示したように送波音圧が高くなると受信距離も長くなることがわかる。

例えば、送波音圧が 146 dB のピンガ (V9-2L, Coded transmitter, Vemco 製相当) を個体 A と同体長のミナミマグロの腹腔内に挿入し、行動調査を行うとする。魚体の腹腔内にピンガを入れず、そのまま使用した場合の受信距離は 486 m であるが (Fig. 7)、ピンガを腹腔内に挿入し使用すると、最低でも送波音圧は 1.8 dB 低下するので 55 m 短くなる。さらに、魚体の姿勢によっては送波音圧が最大で 34 dB 低下 (送波音圧は 112 dB) するので、最大受信距離は 24 m となり、462 m も短くなってしまふ。無指向性の設置型受信器を使用して長期間行動追跡を行う場合、360°方向で受信を行うため、受信距離が 462 m 短くなると、直径にして 924 m も受

Fig. 7 Relationship between maximum receiving distance and pinger's source level. The following values are assumed: frequency of pinger $f = 69 \text{ kHz}$, noise spectral level $N_p = 29 \text{ dB}$, absorption attenuation coefficient $\alpha = 17 \text{ dB/km}$, bandwidth of the receiver $\Delta f = 10 \text{ kHz}$, and threshold of $\text{SNR} = 15 \text{ dB}$.

信できない範囲ができてしまう。また、指向性がある受信器を使用して行動追跡を行う場合、常に指向性の主軸方向を対象魚に向けて追跡するが、対象生物の姿勢が変化して受信距離が大きく変動すると、指向性の主軸方向に捉えていた対象魚を見失う可能性がある。

設置型受信器 (VR-2, Vemco 製) とピンガ (V8SC-6L, Vemco 製) を用いてミナミマグロの行動を調査している先行研究によれば、受信距離は 450 m と設定している。¹³⁻¹⁵⁾ この値は本論文で試算したピンガをミナミマグロの腹腔内に挿入しない場合の受信距離と近く、妥当な距離であろう。しかし、設置した受信器と腹腔内にピンガを挿入したミナミマグロの位置関係によっては、受信距離が大きく変化することが考えられ、ピンガの信号が受信されていないことも考えられる。

結 論

本研究では、魚の腹腔内から超音波を放射し、その周囲の送波音圧を測定することによって、バイオテレメトリーシステムにおける受信距離の変動要因に関する知見を得た。その結果、ピンガをミナミマグロの腹腔内に挿入した場合、送波音圧が魚の姿勢によって変化する可能性があることがわかった。魚の大きさによって送波音圧の変化量は異なるが、頭部方向と尾部方向で大きく送波音圧が低下し、最大で約 34 dB 低下した。魚の姿勢によって送波音圧が変動すると、バイオテレメトリーシステムを用いた生物の行動調査において、調査時に受信距離が大きく変化し、本来の行動を捉えきれない恐れがある。以上から、魚類の腹腔内に挿入したピンガの送波音

圧の変化を測定することは非常に重要であると考えられる。

これまでバイオテレメトリーシステムを用いた研究においてピンガを対象生物の腹腔内に挿入する場合、送波音圧が変化することは考慮されていない。簡易的な実験によって受信距離推定を行っていることが多く、送波音圧の変化による受信距離の変動が懸念される。今後、バイオテレメトリーシステムを用いてピンガを対象生物の腹腔内に挿入する場合には、あらかじめ魚の姿勢によって送波音圧が変化することを把握し、それを踏まえた上で受信距離を決定し、機器の設置や解析を行う必要がある。

本実験では供試魚がバイオテレメトリーシステムで調査されている対象としては大型のミナミマグロであるため、他にも小型の対象魚などを用いて測定を行い、魚種による特徴の有無を検証する必要がある。また、今回は冷凍保存されていた供試魚での結果であるため、活魚に近い状態で測定を行う必要がある。更に有鰓魚と無鰓魚での特徴の有無を検証する必要があると考える。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（特別研究員奨励費）の助成を受けて行われました。感謝申し上げます。佃水産総合研究センター水産工学研究所では、澤田浩一博士ほか、皆様の全面的な協力を賜りました。深く感謝いたします。本実験のミナミマグロは水産庁ミナミマグロ加入量モニタリング事業、ミナミマグロ幼魚音響調査で得られたものを使用させていただきました。本研究に対し、東京海洋大学名誉教授古澤昌彦博士、フ

ーション(旬)笹倉豊喜博士にはご助言いただきました。
感謝申し上げます。

文 献

- 1) Acolas ML, Be'gout Anras ML, Ve'ron V, Jourdan H, Sabatie' MR, Baglinie're JL. An assessment of the upstream migration and reproductive behavior of allis shad (*alosa alosa* L.) using acoustic tracking. *ICES J. Mar. Sci.* 2004; **61**: 1291-1304.
- 2) Wroblewski JS, Nolan BG, Rose GA, Young B. Response of individual shoaling Atlantic cod to ocean currents on the northeast Newfoundland Shelf. *Fish. Res.* 2000; **45**: 51-59.
- 3) Arendt MD, Lucy JA, Evans DA. Diel and seasonal activity patterns of adult *tautog*, *tautoga onitis*, in lower Chesapeake Bay, inferred from ultrasonic telemetry. *Environ. Biol. Fish.* 2001; **62**: 379-391.
- 4) Klimley AP, Holloway CF. School fidelity and homing synchronicity of yellowfin tuna, *Thunnus albacores*. *Mar. Biol.* 1999; **133**: 307-317.
- 5) 山岡勝太郎, 山根 猛, 光永 靖. 「テレメトリー—水産動物の行動と漁具の運動解析」 恒星社厚生閣, 東京. 2006.
- 6) Heublein JC, Kelly JT, Crocker CE, A. Peter Klimley PA, Lindley ST. Migration of green sturgeon, *acipenser medirostris*, in the Sacramento river. *Environ. Bio. Fish.* 2009; **84**: 245-258.
- 7) Kawabata Y, Okuyama J, Mitamura H, Asami K, Yoseda K, Arai N. Post-release movement and diel activity patterns of hatchery-reared and wild black-spot tuskfish *Choerodon schoenleinii* determined by ultrasonic telemetry. *Fish. Sci.* 2007; **73**: 1147-1154.
- 8) Mitamura H, Arai N, Sakamoto W, Mitsunaga Y, Tanaka H, Mukai Y, Nakamura K, Sasaki M, Yoneda Y. Role of olfaction and vision in homing behaviour of black rockfish *sebastes inermis*. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 2005; **322**: 123-134.
- 9) Mitamura H, Arai N, Mitsunaga Y, Yokota T, Takeuchi H, Tsuzaki T, Itani M. Directed movements and diel burrow fidelity patterns of red tilefish *Branchiostegus japonicus* determined using ultrasonic telemetry. *Fish. Sci.* 2005; **71**: 491-498.
- 10) Yokota T, Mitamura H, Arai N, Masuda R, Mitsunaga Y, Itani M, Takeuchi H, Tsuzaki T. Comparison of behavioral characteristics of hatchery-reared and wild red tilefish *Branchiostegus japonicus* released in Maizuru Bay by using acoustic biotelemetry. *Fish. Sci.* 2006; **72**: 520-529.
- 11) Mellas EJ, Haynes JM. Swimming performance and behavior of rainbow trout (*salmo gairdneri*) and white perch (*morone americana*): Effects of attaching telemetry transmitters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 1985; **42**: 488-493.
- 12) 平成22年度国際漁業資源の現状. 水産庁・水産総合研究センター, 東京. 2011.
- 13) Honda K, Hobday AJ, Kawabe R, Tojo N, Fujioka K, Takao Y, Miashita K. Age-dependent distribution of juvenile southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) on the continental shelf off southwest Australia determined by acoustic monitoring. *Fish. Oceanogr.* 2010; **19**: 2: 151-158.
- 14) Fujioka K, Hobday AJ, Kawabe R, Miyashita K, Honda K, Itoh T, Takao T. Internnual variation in summer habitat utilization by juvenile southern bluefin tuna (*Thunnus maccoyii*) in southern Western Australia. *Fish. Oceanogr.* 2010; **19**: 3: 183-195.
- 15) Fujioka K, Kawabe R, Hobday AJ, Takao Y, Miyashita K, Sakai O, Itoh T. Spatial and temporal variation in the distribution of juvenile southern bluefin tuna *Thunnus maccoyii*: implication for precise estimation of recruitment abundance indices. *Fish. Sci.* 2010; **76**: 403-410.
- 16) 笹倉豊喜. M 系列信号を用いた広帯域ビンガー. 超音波 TECHNO 超音波 TECHNO 編集部 日本工業出版株式会社, 東京. 2010; 11-16.
- 17) 朴 柱三, 古澤昌彦. 超音波バイオテレメトリーの音響系の評価および設計方法. 日水誌 2002; **68**: 334-344.
- 18) 蜂谷弘之, 秋山いわき. 医用超音波. 「超音波便覧」(超音波便覧編集委員会編) 丸善株式会社, 東京. 1999; 419-422.
- 19) 八木晋一, 遠藤信行, 平田経雄, 伊東紘一. 超音波工学の基礎知識. 「超音波医学 TEXT 基礎超音波医学」(伊東紘一) 歯葉出版株式会社, 東京. 1998; 10-14.
- 20) Aroyan JL, Cranford TW, Kent Joel, Norris KS. Computer modeling of acoustic beam formation in *Delphinus delphis*. *J. Acoust. Soc. Am.* 1992; **92**: 2539-2545.
- 21) 松原喜代松, 落合 明, 岩井 保. 外部形態. 「魚類学(上)」 恒星社厚生閣, 東京. 1965; 9-11
- 22) 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.
- 23) 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.
- 24) Wenz GM. Acoustic ambient noise in the ocean: Spectra and sources. *J. Acoust. Soc. Am.* 1962; **34**(12): 1936-1956.
- 25) Francois RE, Garrison GR. Sound absorption based on ocean measurement. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption. *J. Acoust. Soc. Am.* 1982; **72**: 1879-1890.