■ 論文

イルカスピーカの開発

三島由夏, 宮本佳則 (東京海洋大学), 笹倉豊喜 (フュージョン有限会社)*¹

(2012年5月7日原稿受付)

Abstract:

To gain new insights into how dolphins communicate, we created an extremely broadband speaker called the “Dolphin Speaker”. To communicate or to detect their surroundings and prey, dolphins rely on a combination of a variety of vocalizations and vastly better acoustic abilities than humans have. Acoustic studies of dolphins have focused mainly on recording vocalizations and assessing hearing abilities; there have been relatively few playback experiments, which are very important for gaining a better understanding of dolphins’ acoustic abilities. This is because there have been no speakers that could project broadband sounds in the range that dolphins use, from several Hz up to more than 150 kHz, although some could project low-frequency sounds or parts of dolphin sounds. In 2011, we succeeded in developing a prototype broadband transducer for an echosounder by using new types of piezoelectric elements that had never been used for underwater acoustic transducers. We applied this technique to our Dolphin Speaker, and it can now project sounds from 8 to 170 kHz within ± 6 dB. The Dolphin Speaker’s beam width is 17.5° at 120 kHz. The structure of the Dolphin Speaker and the dolphins’ playback sounds by using it are also described.

Classification: 水産音響・バイオアコースティックス

Keyword: イルカ, スピーカ, 広帯域, 積層圧電素子, コミュニケーション

1. はじめに

イルカの鳴音の最大の特徴は広い周波数範囲に及んでいる(広帯域)ということであり, 彼らは低周波から高周波までさまざまなタイプの音を使って生活している. イルカの鳴音を大きく分けるとクリックス, バーストパルス, ホイッスルの3種である. クリックスはパルス状の広帯域音であり, 餌などの探知や対象判別で使用されている^{1),2)}. それに対し, バーストパルスとホイッ

スルはコミュニケーションに関わる音と言われている. バーストパルスはクリックスと同じパルス状の広帯域音であるが, パルスとパルスの間隔がクリックスより短く³⁾, 個体間が近距離のときに発せられ, 仲間内のコミュニケーションに用いられると示唆されている⁴⁾. 特にハンドウイルカのバーストパルスには多くの種類があり, 採餌⁵⁾, 威嚇⁶⁾, 喧嘩⁷⁾, 交尾⁸⁾の際に異なるバーストパルスが発せられる. ホイッスルは, 持続時間が長

Development of the Dolphin Speaker

* 1 Yuka MISHIMA, Yoshinori MIYAMOTO (Tokyo University of Marine Science and Technology), Toyoki SASAKURA (Fusion Inc.)

く抑揚のある低周波の狭帯域音で、自分の居場所を仲間に教えるための「コンタクトコール」の役割をもち、仲間同士で共有されるもの⁹⁾なども観察されている。また、ハンドウイルカではバーストパルスやホイッスル以外に、コミュニケーションに関わっている可能性が示唆されている音も見つかっており^{10),11)}、彼らはさまざまな音を用いて生活していることがわかる。

イルカの音響コミュニケーション能力を解明しようとする研究は世界的に多種のイルカで行われている。しかしその多くが鳴音を収録し、行動と結び付けるということに留まっており^{5)-8),10)-14)}、イルカに対して鳴音を再生し彼らがどう反応を示すかを研究した例は少ない。その理由は、イルカの鳴音の全周波数領域を再生できるスピーカがなく、従来は低周波の鳴音しか再生できなかったためである。したがって、これまでの再生実験は低周波にベースをもつホイッスルを対象に、周波数範囲が20kHz程度までの既存の水中スピーカを用いて行われてきた。再生できる鳴音は限られていたが、20kHz以下の再生実験からでもいくつかわかってきたことがある。例えばLangらは、収録した鳴音をそのままイルカに対して再生し、イルカ対イルカのときには発せられるが、イルカ対スピーカのときには発せられないホイッスルを見つけ、双方向のやり取りがないと意味のないホイッスルの存在を示唆した¹⁵⁾。また、イルカは個体特有の音(シグネチャーホイッスル)をもつと言われているが、再生実験によって実際にシグネチャーホイッスルが仲間に認識されているということが判明した¹⁶⁾⁻¹⁸⁾。これらのことから、低周波だけでなく、イルカの鳴音の全周波数領域のスピーカが開発されれば、さまざまな鳴音の再生実験が可能になり、イルカのコミュニケーション能力に関する研究が大きく前進することが期待される。

近年、海洋生物の資源量調査¹⁹⁾⁻²²⁾を目的とした広帯域の送受波器が開発されてきており、著者らも海洋生物(魚や動物プランクトン)を対象と

する音響探査システムの超広帯域送受波器の設計・製作²³⁾に成功した。しかしこれらの送受波器の周波数帯は、イルカのコミュニケーションに関わる鳴音の全周波数領域をカバーするものではない。そこで、開発した超広帯域送受波器の設計・製作方法をベースにイルカの鳴音の全周波数領域をカバーするイルカスピーカの開発を行った。

2. イルカスピーカの目標仕様

まず、目標とするイルカスピーカの帯域幅や指向性を決める必要がある。イルカの種によって使用周波数帯や指向性は異なる。例えばシャチは100kHz以下の音しか聞こえないが、逆にネズミイルカ科や、セッパリイルカ属のイルカは100kHz以上の高周波帯の音しか出さない²⁴⁾。また、体長に差があるハンドウイルカとシロイルカでは、音の送信システムの大きさにも差があり、指向性が異なる²⁵⁾。そこで、本研究ではハンドウイルカを基準に目標帯域幅および指向性を設定した。その理由は、ハンドウイルカは前章で述べたようにコミュニケーション音に関する研究例が多く、低周波から高周波までさまざまな音をコミュニケーションに使用していると示唆されてきており、上記したシャチ、ネズミイルカ科やセッパリイルカ属のイルカとは違い、広い周波数範囲を使用する典型的なイルカであると考えられるためである。

2.1 周波数特性

ハンドウイルカがコミュニケーションのために出していると考えられる音は、低域で数Hz、高域で150kHz程にまで及ぶ⁵⁾⁻¹¹⁾。一方、ハンドウイルカ *Tursiops truncatus* とその亜種 *Tursiops gilli* の聴覚曲線によると、高い聴力があるのは、それぞれ15~110kHz、30~80kHzで、聴覚範囲の低域の限界は200Hz、2kHz、高域の限界はそれぞれ150kHz、135kHzである²⁶⁾。

以上の2点から、ハンドウイルカは150kHz程度までの音を出すことも聴くこともでき、コミュニケーションに使用していると考えられる。そこ

で可能な限り低周波数から 150kHz までを目標帯域幅とした。

2.2 指向性

高周波の音ほど鋭い指向性をもつことから、ハンドウイルカの鳴音のうち高周波にエネルギーをもつクリックスの指向性に着目して、目標とするイルカスピーカの指向性を設定した。120kHz にエネルギーピークがあるハンドウイルカのクリックスの指向性利得 DI は、直径 40mm の円盤音源から送波した 120kHz の DI とほぼ同じであったと報告されている²⁵⁾。つまり、ハンドウイルカのクリックスの送信システムは 40mm の円盤音源でモデル化できるということである。このことから、スピーカに使用する素子の振動範囲の目安は直径 40mm の円とし、ハンドウイルカに近い指向性の実現を試みた。

3. 方法

3.1 試作

ランジュバン型の高周波用素子と、低周波用素子を組み合わせて目標とした仕様の実現を試みた。高周波用素子には、138kHz に共振をもつ 10×10×10mm の樹脂外装型積層圧電アクチュエータ (NEC トーキン) を採用し、低周波用素子には、10kHz に共振をもち、音の送波面が直径 35mm の円となっている金属ケース封入型積層圧電アクチュエータ (NEC トーキン) を採用した。

前述したように、ハンドウイルカが出す音と同じような指向性にするためには、特に鋭い指向性をもつ高周波において、直径 40mm 程度の円盤振動となるように製作する必要がある。そこで、高周波用素子を 4 個使用して Fig. 1 のように 40mm の円内に配列した。これらの素子を低周波用素子とともに、直径 110mm、厚み 15mm のアクリル円板に配置させた。高周波用素子のみアクリル円板で挟み込んだランジュバン構造とし、低周波用素子はフロントマスのアクリル円板にねじ留めた。

Fig. 2 は低周波用素子と高周波用素子の送波電

Fig. 1 Design of the Dolphin Speaker. The arrow represents the direction of the rotation in the directivity measurement.

Fig. 2 Transmitting sensitivities of the low-frequency element (the solid line) and the Langevin-type high-frequency elements (the broken line).

圧感度を別々に測定した結果である。この結果から 2 種の素子を併用することで広帯域化が可能になると考えられる。この低周波用素子と高周波用素子を組み合わせたものをイルカスピーカと呼ぶ (Fig. 3)。

3.2 周波数特性、および指向性の測定

2 種の素子を同時に駆動させるために、2ch で使用できる送信アンプを用いた (Fig. 4)。両方の素子の送波音圧が同じになるように、送信アンプ (JBL, GTO 504) の増幅率を調節した。送信アン

Fig. 3 The Dolphin Speaker.

Fig. 4 Block diagram of the experimental system.

プへの入力電圧を $0.05 V_{pp}$ に固定し、二つの素子から同時に同位相で音を出して、送波電圧感度の周波数特性および 120kHz における指向性を測定した。指向性を測定する際、スピーカの回転の向きは Fig. 1 の矢印の方向とし、高周波用素子に主軸が合うようにハイドロホンを設置した。

3.3 再生能力の評価実験

イルカスピーカからチャープ信号を再生させ、イルカスピーカの連続的な周波数特性を取得した。また実際にイルカスピーカから鳴音を再生し、イルカが出す音とイルカスピーカから再生される音を比較し、類似性を評価した。

実験は館山湾の水深約 40m 地点で行った。測定システムは、サンプリング周波数が 500kHz データレコーダ(NF, EZ 7510)、送信アンプ

(JBL, GTO 504)、イルカスピーカ、ハイドロホン(RESON, TC4013)、プリアンプ(システムインテック, SEQ-1001D)で構成された。再生に使用したチャープ信号は、パルス幅が 50ms で周波数が 5kHz から 170kHz へ変調するアップチャープで、信号発生器(NF, WF1946B)からデータレコーダへ取り込んだものである。再生に使用した鳴音は、長崎県佐世保市にある九十九島水族館で飼育されているハンドウイルカ(*Tursiops truncatus*) 2 頭とハナゴンドウ(*Grampus griseus*) 1 頭の鳴音である。鳴音の収録システムは、ハイドロホン(RESON, TC4013)、プリアンプ(システムインテック, SEQ-1001D)、データレコーダ(NF, EZ 7510) から構成された。すべての実験で解析ソフトは MATLAB を使用した。

4. 結果および考察

4.1 周波数特性

送波電圧感度の周波数特性の測定結果を Fig. 5 に示す。8~170kHz で $\pm 6\text{dB re } 1\mu\text{Pa/V at } 1\text{m}$ のリップル(平均値 167.9dB re $1\mu\text{Pa/V at } 1\text{m}$) に収まり、超広帯域化に成功した。30kHz 以下で送波感度の良い低周波用素子と、30kHz 以上で送波感度の良い高周波用素子(cf. Fig. 2)を同時に駆動させることで、両素子の感度が上手く繋がり、8~170kHz の範囲で送波電圧感度の周波数特性をほぼ平坦化することができた。しかし 8kHz 以下では感度が低いため、今後改善が必要であると考えている。

4.2 指向性

120kHz における指向性の測定結果を Fig. 6 に実線で示した。点線で示した指向性は、素子の配列と形状をもとに算出した各素子の遠距離での音圧を合成した計算値である。破線で示した指向性は、直径 40mm の円盤音源の理論値を表している。-3dB ビーム幅は、測定値、計算値、直径 40mm の円盤音源の理論値、の順にそれぞれ 17.5°, 23.8°, 18.4° で、サイドローブの値はそれぞれ -8.0~-8.1dB, -7.9dB, 17.6dB で

Fig. 5 Transmitting sensitivities of the Dolphin Speaker.

Fig. 6 Beam pattern at 120 kHz. The solid line with square markers represents the measured value and the dotted line represents the calculated value of the Dolphin Speaker. The broken line represents the model of a 40 mm diameter disk.

あった。まず測定値と計算値を比較すると、測定値の -3 dB ビーム幅は計算値に比べて少し狭いビームではあるがほぼ一致しており、サイドローブも良く一致していることから、設計通りの結果が得られたことがわかる。次に、測定値を目安とした直径 40 mm の円盤音源の理論値と比較すると、メインローブは良く一致しているが、サイドローブが大きい。今回の設計では、高周波用素子の配列を直径 40 mm の円に近づけようと考え、サイドローブを考慮した設計にできなかったためこのような結果になったが、今後使用していくうえでサイドローブの大きさが問題になった場合は、素子の配列をより円形に近づけ²⁷⁾、素子間隔も小さくしてグレーティングローブの影響を軽減する²⁸⁾ことでサイドローブを抑えることは可能である。以上のことから、メインローブに関しては、イルカスピーカの指向性は目

Fig. 7 Playback chirp signal (the frequency band was 5–170 kHz and the pulse length was 50 ms): (a) a waveform; (b) a spectrogram; and (c) a power spectrum (the solid line represents the playback chirp signal and the dots represent the relative result of the conventional measurement by using short pulses with 2 kHz or 5 kHz frequency steps as shown in Fig. 5).

安としたハンドウイルカの指向性に近似できたといえる。

4.3 チャープ信号の再生能力の評価

結果を **Fig. 7** に示す。上から電圧波形、スペクトログラム、パワースペクトル密度を示している。スペクトログラムで、チャープ信号を表す右肩上がりの一直線がはっきりと確認できた (Fig. 7 (b))。また、スペクトルから 5~170 kHz において連続的に音が再生されていることが確かめられた。チャープ信号のスペクトルと離散的に測定した送波電圧感度の周波数特性 (4.1 節) を比較したところ、5~150 kHz では良く一致した (Fig. 7 (c))。

スペクトログラムで高調波と 25~30 kHz、160 kHz 付近に一定のノイズが見られた。高調波の原因を検証したところ、信号発生器で生成した信号が既に完璧なサイン波ではなかったという可能性が考えられた。これは、信号発生器で生成したチャープ信号を直接データレコーダに入力し、

スペクトログラムにしたところ、既に高調波が見られたためである。またその他にも、200kHzのLPFに使用したフィルタの減衰カーブが緩く、エイリアシングの可能性も示唆された。しかし、サンプリング周波数が500kHzであるため、エイリアシングが起こるのは250kHz以上の高周波の音ということになるが、Wenzのノイズスペクトルから、自然界には100kHz以上のノイズは少ないことがわかる。したがって、ノイズは使用したシステムで生じている可能性も考えられ、今後システムの改良が必要となるかもしれない。25~30kHz、160kHz付近の一定のノイズに関しては、現段階で原因を明らかにすることはできなかった。ノイズの原因にはさまざまな問題が考えられるため、今後も引き続き検討する。しかし、今回見られたノイズはいずれもチャープ信号に比べて20dB以上低く、電力にして1/100以下の大きさであるため無視できる範囲であると考えた。

4.4 鳴音の再生音の評価

ホイッスル、バーストパルス、クリックスの測定結果をそれぞれ Figs. 8~10 に示す。再生に使用した元の音(以下、原音と称す)と、イルカスピーカから再生された音(以下、再生音と称す)の比較を行った。スペクトルは原音を点線、再生音を実線で示している。低周波の音であるホイッスルに関しては、スペクトログラムとスペクトルの周波数範囲を0~15kHzとし、広帯域の音であるバーストパルスとクリックスは0~170kHzとした。

各鳴音の原音と再生音は時間的に合致しており(Figs. 8~10 (a) and (b)), 25kHz付近を除くと周波数特性も似ていた(Figs. 8~10 (c))。周波数特性の詳細な比較を行うために、それぞれの最大周波数と-10dB帯域幅を求めた。

ホイッスルの原音と再生音の最大周波数は両方とも5.9kHzで一致した。さらに原音と再生音の-10dB帯域幅は、それぞれ4.8kHz(3.8~8.9kHz)、4.6kHz(4.0~8.6kHz)であり、ほぼ一致した。しかし、原音のスペクトログラムで

Fig. 8 Comparison of a whistle by (a) waveforms; (b) spectrograms; and (c) power spectra. (In (a) and (b), the upper diagrams represent original sounds and the lower diagrams represent playback sounds. In (c), the broken line represents the original sound and the solid line represents the playback sound.)

は2.5kHz付近にホイッスルのベース信号と考えられるバースト波のような信号が見られたが、再生音には見られなかった。これはイルカスピーカの再生能力が5kHz以下で大幅に落ちるためであり、今後さらに低周波帯の感度の改善が必要である。また、再生音のスペクトログラムの10~15kHz付近に原音にはない高調波が見られた。この原因は、現時点では正確には解明できていないが、Fig. 7 (c)で示した周波数特性の25kHz付近に感度の高い部分があることから、これが原因で高調波成分が増幅されたのではないかと考え

Fig. 9 Comparison of burst-pulse sounds.

られる。今後より一層の感度の平坦化が求められる。

バーストパルスは、低周波と高周波にエネルギーピークがあり、それぞれのピークで原音と再生音を比較した。原音の低周波の最大周波数は3.9kHz、-10dB帯域幅は8.9kHz(0~8.9kHz)であり、高周波の最大周波数は107.5kHz、-10dB帯域幅は61.0kHz(86.4~147.4kHz)であった。これに対し、再生音の低周波の最大周波数は5.9kHz、-10dB帯域幅は8.4kHz(3.2~11.6kHz)、高周波の最大周波数は107.5kHz、-10dB帯域幅は54.7kHz(87.2~141.9kHz)であった。高周波の最大周波数は一致したが、低周波の最大周波数には差が見られた。これもイルカスピーカの低周波帯の感度が低いということに起

Fig. 10 Comparison of echolocation clicks.

因する。

クリックスの原音と再生音の最大周波数は、それぞれ121.2kHz、115.3kHzと近い値が得られた。原音と再生音の-10dB帯域幅は、それぞれ60.7kHz(83.0~143.7kHz)、59.4kHz(82.9~142.3kHz)でありほぼ一致した。

これらの再生結果から、イルカスピーカは5kHz以上に関しては原音に近い音を再生することができるといえる。バーストパルスとクリックスの再生音のスペクトルに見られた25kHz付近のピークは、先に述べたように周波数特性の25kHz付近にあるピークが原因で低周波成分の高調波が現れたのではないかと考えられるほか、計測海域の水深が40mと浅いため、テッポウエビなどの生物雑音の影響や、館山沖のため船舶の

Fig. 11 Comparison of an echolocation click.

航行雑音の影響もあると考えられる。これらの影響を軽減するためには、さらに水深の深いところで船舶の航行海域を避けて実験を行う必要がある。

広帯域スピーカの最大の特徴は、パルス幅が短い音も再現可能であるということである。Fig. 11は原音と再生音の一つのクリックを表した電圧波形である。一つのクリックは図のように約6msの極めて短い時間の音であるが、再生音の波形は原音の波形と同じように立ち上がっていることがわかる。両者は良く似ており、イルカスピーカはインパルスに近い音も再現できることが確かめられた。

4. おわりに

2種の積層圧電アクチュエータを併用することで、8~170kHzの帯域で音の送波が可能な超広帯域イルカスピーカの開発に成功した。また、製作したイルカスピーカは、120kHzにおいて目安とした直径40mmの円盤音源に近い指向性をもつスピーカとなった。

イルカスピーカを用いた5~170kHzのチャープ音の再生により、5~170kHzにおいて、連続的にイルカスピーカから音が再生されていることが確かめられた。また、イルカスピーカを用いてホイッスル、バーストパルス、クリックスを再生し原音と再生音の比較を行ったところ、5kHz以上では、25kHz付近を除くと原音に近いスペクトルが得られた。

開発したイルカスピーカによりあらゆるタイプの鳴音の再生がほぼ可能になった。しかしイルカが数十Hz、数百Hzの音も使用していることから、さらに低周波帯の送波感度を向上させることが今後の課題であると考えている。本研究の次のステップは、イルカスピーカを用いてイルカに対して鳴音を再生することであり、再生実験の方法について今後充分に検討する予定である。

相対的脳サイズが大きく²⁴⁾、複雑な社会をもつイルカが高度なコミュニケーション能力をもっている可能性は十分に考えられる。これまでにホイッスルなどの「鳴き交わり」の様子がハンドウイルカ、シロイルカなどで観察されてきた^{9),12),15)}。Ivanovは学習実験を用いて、学習対象個体と実験観察個体との間の「対話」を、2個体の行動と鳴音から示唆した²⁹⁾。またセミイルカとカマイルカでは、数種のバーストパルスから成るパターンの繰り返しが観察された^{30),31)}。著者らが収録した音の中にも、数個のバーストパルスから成るパターンがいくつか見られた。

イルカが出す多様な音にどの程度意味があるのかはわからないが、イルカスピーカを用いた再生実験により、イルカのコミュニケーション能力のさらなる研究に貢献できれば幸いである。

謝辞

実験、論文の執筆に関してご助言頂いた東京海洋大学大学院柿原利治教授、内田圭一助教、先端科学技術研究センター甘糟和男助教、機器の製作にご協力頂いたフュージョンの阿部勇三氏、鳴音の収録にご協力頂いた九十九島水族館海きららの皆様に厚くお礼申し上げます。また、本研究の一部は科学研究費(挑戦的萌芽研究、24657015)の助成を受けた。

参考文献

- 1) W. W. L. Au, "The dolphin sonar: Excellent capabilities in spite of some mediocre properties," in *High-Frequency Ocean*

- Acoustics*, M. B. Porter, M. Siderius and W. A. Kuperman Eds. (AIP, NY, 2004), pp. 247-259.
- 2) 赤松友成, "イルカのハイパーセンサ," *バイオメカニズム学会誌*, **31**, 134-137 (2007).
 - 3) M. O. Lammers, W. W. L. Au, R. Aubauer and P. E. Nachtigall, "A comparative analysis of the pulsed emissions of free-ranging Hawaiian spinner dolphins (*Stenella longirostris*)," in *Echolocation in Bats and Dolphins*, J. A. Thomas, C. F. Moss and M. Vater Eds. (University of Chicago Press, Chicago, 2004), Chap. 58, pp. 414-419.
 - 4) M. O. Lammers, M. Schotten, and W. W. L. Au, "The spatial context of free-ranging Hawaiian spinner dolphins (*Stenella longirostris*) producing acoustic signals," *J. Acoust. Soc. Am.*, **119**, 1244-1250 (2006).
 - 5) V. M. Janik, "Food-related bray calls in wild bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*)," *Proc. R. Soc. Lond. B.*, **267**, 923-927 (2000).
 - 6) C. Blomqvist and M. Amundin, "High-frequency burst-pulse sounds in agonistic/aggressive interactions in bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*," in *Echolocation in Bats and Dolphins*, J. A. Thomas, C. F. Moss, and M. Vater Eds. (University of Chicago Press, Chicago, 2004), Chap. 58, pp. 425-431.
 - 7) C. Blomqvist, I. Mello and M. Amundin, "An acoustic play-fight signal in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) in human care," *Aqua. Mamm.*, **31**, 187-194 (2005).
 - 8) D. L. Herzing, "Vocalizations and associated underwater behavior of free-ranging Atlantic spotted dolphins, *Stenella frontalis* and bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*," *Aquat. Mamm.*, **22**, 61-79 (1996).
 - 9) F. Nakahara and N. Miyazaki, "Vocal exchanges of signature whistles in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*)," *J. Ethol.*, **29**, 309-320 (2011).
 - 10) R. C. Connor and R. A. Smolker, "'Pop' goes the dolphin: A vocalization male bottlenose dolphins produce during consortships," *Behaviour*, **133**, 643-662 (1996).
 - 11) P. Simard, N. Lace, S. Gowans, E. Quintana-Rizzo, S. A. Kuczaj II, R. S. Wells and D. A. Mann, "Low frequency narrow-band calls in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*): Signal properties, function, and conservation implications," *J. Acoust. Soc. Am.*, **130**, 3068-3076 (2011).
 - 12) V. Vergara, R. Michaud and L. Barrett-Lennard, "What can captive whales tell us about their wild counterparts? Identification, usage, and ontogeny of contact calls in belugas (*Delphinapterus leucas*)," *Int. J. Comp. Psychol.*, **23**, 278-309 (2010).
 - 13) E. E. Henderson, J. A. Hildebrand and M. H. Smith, "Classification of behavior using vocalizations of Pacific white-sided dolphins (*Lagenorhynchus obliquidens*)," *J. Acoust. Soc. Am.*, **130**, 557-567 (2011).
 - 14) S. M. Van Parijs and P. J. Corkeron, "Vocalization and behaviour of Pacific humpback dolphins *Sousa chinensis*," *Ethology*, **107**, 701-716 (2001).
 - 15) T. G. Lang and H. A. P. Smith, "Communication between dolphins in separate tanks by way of an electronic acoustic link," *Science*, **150**, 1839-1844 (1965).
 - 16) L. S. Sayigh, P. L. Tyack, R. S. Wells, A. R. Solow, M. D. Scott and A. B. Irvine, "Individual recognition in wild bottlenose dolphins: A field test using playback experiments," *Anim. Behav.*, **57**, 41-50 (1998).
 - 17) J. L. Miksis, M. D. Grund, D. P. Nowacek,

- A. R. Solow, R. C. Connor and P. L. Tyack, "Cardiac responses to acoustic playback experiments in the captive bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*)," *J. Comp. Psychol.*, **115**, 227-232 (2001).
- 18) V. M. Janik, L. S. Sayigh and R. S. Wells, "Signature whistle shape conveys identity information to bottlenose dolphins," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **103**, 8293-8297 (2006).
- 19) K. G. Foote, "Broadband acoustic scattering signatures of fish and zooplankton (BASS)," *Proc. the 3rd European Marine Science and Technology Conference*, **3**, 1012-1025 (1998).
- 20) T. Mortensen, M. T. Larsen, P. K. Eriksen, D. T. I. Francis, and P. R. Atkins, "Octave-Bandwidth transducers for ultra-bandwidth echo-sounding system," *Proc. Inst. Acoust.*, **21**(1), 27-41 (1999)
- 21) T. Imaizumi, M. Furusawa, T. Akamatsu and Y. Nishimori, "Measuring the target strength spectra of fish using dolphin-like short broadband sonar signals," *J. Acoust. Soc. Am.*, **124**, 3440-3449 (2008).
- 22) T. K. Stanton, "Broadband acoustic sensing of the ocean," *J. Marine Acoust. Soc. Jpn.*, **36**, 95-107 (2009).
- 23) 三島由夏, 甘糟和男, 澤田浩一, 向井 徹, 笹倉豊喜, "超広帯域送受波器の試作," *海音講論集*, 101-104 (2011).
- 24) 森阪匡通, "イルカの音声コミュニケーションとその制約要因," *哺乳類科学*, **49**, 121-127 (2009).
- 25) W. W. L. Au, *The Sonar of Dolphins* (Springer, NY, 1993), Chap. 6, pp. 104-112.
- 26) W. W. L. Au, *The Sonar of Dolphins* (Springer, NY, 1993), Chap. 3, p. 34.
- 27) 海洋音響学会, 海洋音響の基礎と応用(成山堂書店, 東京, 2004), pp. 43-45.
- 28) 海洋音響学会, 海洋音響用語辞典(海洋音響学会, 東京, 1999), p. 62.
- 29) M. P. Ivanov, "Study of dolphin Communicational behavior: Procedure, motor and acoustic parameters," *J. Evol. Biochem. Physiol.*, **45**, 696-705 (2009).
- 30) S. Rankin, J. Oswald, J. Barlow and M. Lammers, "Patterned burst-pulse vocalizations of the northern right whale dolphin, *Lissodelphis borealis*," *J. Acoust. Soc. Am.*, **121**, 1213-1218 (2007).
- 31) E. E. Henderson, J. A. Hildebrand and M. H. Smith, "Classification of behavior using vocalizations of Pacific white-sided dolphins (*Lagenorhynchus obliquidens*)," *J. Acoust. Soc. Am.*, **130**, 557-567 (2011).