

## アクリル窓に設置した水中マイクの受波感度 —水族館におけるイルカ音声研究の簡便化をめざして—

吉田 弥生<sup>1)2)\*</sup>・森阪 匡通<sup>2)3)</sup>・中原 史生<sup>4)</sup>・斎藤 繁実<sup>5)</sup>

### Receiving Sensitivity of the Hydrophones Attached to Acrylic Plate — Towards Simplification of Dolphin Sound Study at Aquariums —

Yayoi M Yoshida<sup>1)2)\*</sup>, Tadamichi Morisaka<sup>2)3)</sup>, Fumio Nakahara<sup>4)</sup>, and Shigemi Saito<sup>5)</sup>

#### Abstract

Sound recording system for captive aquatic animals (especially dolphins) in a tank is developed where small hydrophones are externally attached to the acrylic glass of the tank. Here this system is evaluated by measuring the sound transmission loss of the acrylic plates with three different thicknesses (15, 20 and 30 mm) for various frequencies in the range between 3–130 kHz. Results do not show any correlations between acrylic plate thickness and the sound transmission loss for every frequency. In addition, the sound transmission loss shows great values between 3–40 kHz, while it shows negative values between 50–130 kHz regardless of the plate thickness. The former increased loss is due to the negative reflection at the interface between water and air. The latter gain is due to the enhanced sensitivity of the hydrophone with increased mechanical Q in air. Thus researchers who measure the sound pressure level with this system need to be careful of such variations of the receiving sensitivity.

---

1) 東海大学海洋学部海洋生物学科 〒424-8610 静岡市清水区折戸 3-20-1

Department of Marine Biology, School of Marine Science and Technology, Tokai University 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka 424-8610, Japan

2) 東海大学海洋研究所 〒424-8610 静岡市清水区折戸 3-20-1

Institute of Oceanic Research and Development, Tokai University 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka 424-8610, Japan

3) 東海大学創造科学技術研究機構 〒424-8610 静岡市清水区折戸 3-20-1

Tokai University Institute of Innovative Science and Technology 3-20-1 Orido, Shimizu-ku, Shizuoka 424-8610, Japan

4) 常磐大学コミュニティ振興学部 〒310-8585 水戸市見和 1-430-1

College of Community Development, Tokiwa University 1-430-1 Miwa, Mito, Ibaraki, 310-8585, Japan

5) 東海大学 〒259-1292 平塚市北金目 4-1-1

Tokai University, 1-4-1 Kitakaname, Hiratsuka 259-1292, Japan

\* Corresponding author : Yayoi M YOSHIDA (m.yoshida841@gmail.com)

(2016年2月6日受付／2016年2月19日受理)

## 緒 言

水族館等施設において、動物の鳴音を録音する際には、これまで水槽内に直接水中マイクを設置して行われてきた。水槽内における動物の誤飲や衝突を回避するために、設置時において多くの苦勞を伴う。また、水中内に異物が設置されるため、動物へのストレスとなりうるものが懸念される。近年、飼育水生動物の音響調査を目的とした水中マイクが多く開発されてきており、その一つに小型で平らな面に直接装着して、音を受波するイルカ音響タッチパネル用マイク（㈱アクアサウンド）が設計・制作された。アクリルと水の固有音響インピーダンスが近い値であるため、このマイクを水槽内ではなく、水槽の外側のアクリル面に設置すれば、簡便に動物の鳴音を録音できるシステムを構築することができる。しかし、アクリルを通しての録音は、本来の仕様とは異なる使用方法であり、解析に耐えうる精度の録音ができるのかを確認する必要がある。

水からアクリルに音が入る際には、水とアクリルのインピーダンスの差により、特定の受信周波数における音圧が損失する可能性が考えられる。物体の固有音響インピーダンスは、物体内の音速と密度の積により定義される。温度 20°C の状態で、水のインピーダンスは、音速  $1.5 \times 10^3$  m/s、密度  $1.0 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> であることから  $1.5 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>s であり、アクリルのインピーダンスは、音速  $2.7 \times 10^3$  m/s、密度  $1.18 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup> であることから  $3.1 \times 10^6$  kg/m<sup>2</sup>s である。工業的には、これらの差は微小とされ近似するものとして扱われているが、実際に動物の音響調査を行う場合の影響は、再評価する必要がある。

また、アクリルの板厚によりその損失率が変化する事も考えられる。Penner ら (1970) は、飼育アマゾンカワイルカのエコーロケーションの研究において、1.6 mm アクリル板 (120 cm × 48 cm) に試験音を透過させた際の損失率が評価されている。実験はイルカの飼育されている水槽 (淡水) にて行われ、40 kHz ~ 約 300 kHz までの損失率は 0 dB (40 kHz) ~ 2.5 dB (300 kHz) へとただらかに増加している。著者らは、この程度の損失であれば無視できるものであると結論づけている。アマゾンカワイルカのパルスの中心周波数は 80 ~ 100 kHz 付近であり (Yamamoto et al., 2015)、Penner らによ

る評価値では影響はほとんど出ないものと考えられる (Penner and Murchison, 1970)。しかし、近年の水族館において用いられるアクリルは 15 cm 以上と分厚く、1.6 mm 厚における評価値を当てはめることができるかはわからない。したがって、本システムにおける周波数帯域と音圧の損失率の関係を評価する必要がある。

著者らが研究対象とするイルカは、低周波から高周波まで広帯域の鳴音を発し、その鳴音はクリックス、バーストパルス、ホイッスルの 3 種類に大きく分けることができる (Janik and Sayigh, 2013)。クリックスはパルス状の広帯域音であり、餌や障害物などの探知や判別のためのエコーロケーション (音響定位) に使用されている (Au, 1993)。これに対して、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であるとされる (Blomqvist and Amundin, 2004; Tyack, 1986)。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、一方ホイッスルは狭帯域音であり、持続時間が長い鳴音である。イルカのコミュニケーションを解明しようとする研究は世界的に行なわれているが、水中では音速が空気中の約 4.4 倍 (水中: 約 1500 m/s、空気中: 約 340 m/s) であり、またイルカの鳴音発声は陸上動物の声帯発声とはそのメカニズムが異なることから、どの個体が鳴音を発しているかを定位する事が非常に難しい。そのために、通常複数の水中マイクを使用し、定位する必要がある。しかし、飼育施設水槽内に複数のマイクを設置することは、前述したとおり、動物への負担や危険性を多くはらんでいる。

本研究は、本録音システムが今後、イルカの鳴音研究に正しく用いられるように、アクリル板厚ごとのシステムの周波数特性を明らかにすることを目的としている。

## 材料と方法

測定は、東海大学海洋学部臨海実験所のコンクリート水槽 (縦 3 m × 横 2 m × 深さ 2 m、水道水を充水) で行った。測定の様子を Fig. 1 に示す。水面および 3 種類のアクリル板厚 (15, 20, 30 mm) を通して受信した、各周波数における振幅の測定を実施

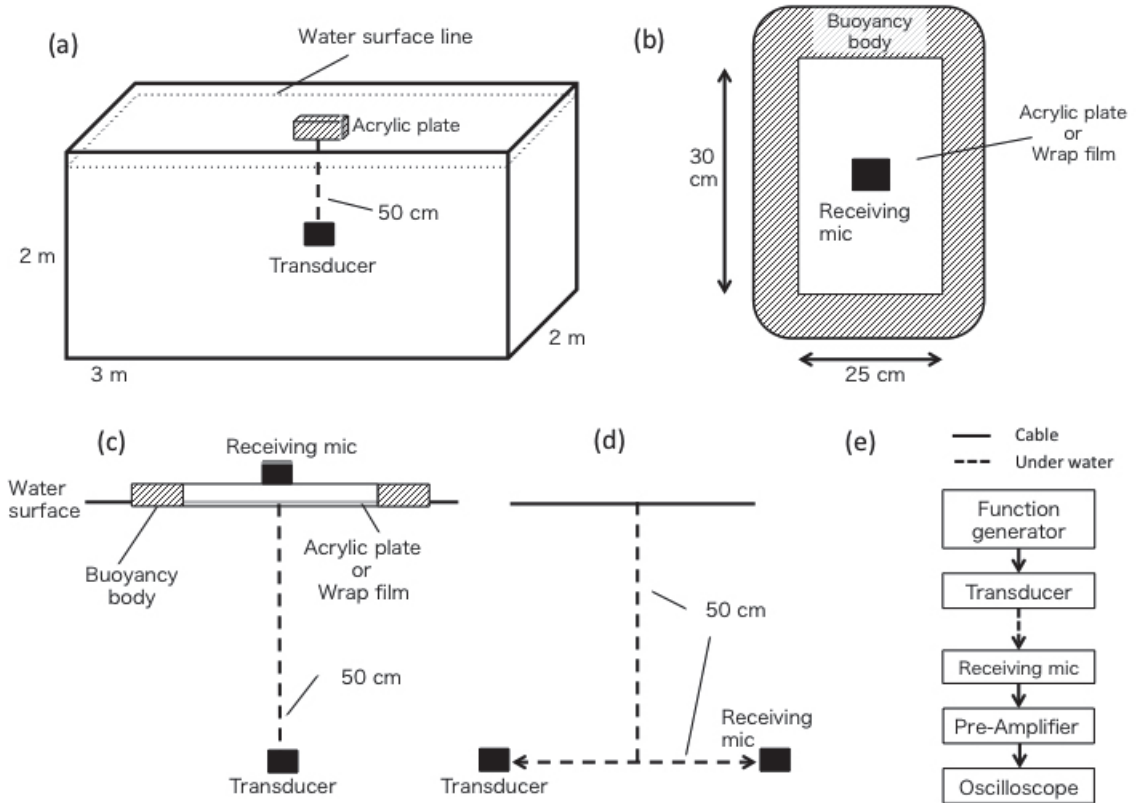


Fig. 1 Experimental system. (a) whole image (b) design of the acrylic plate and buoyancy body (c) Side view of the experiments for acrylic plate and wrap film (d) Side view of the experiment for the receiving sensitivity of the hydrophone (e) flow diagram.

した。周波数は、本水槽内において 3 kHz 以下では測定が不可能であったため、3 ~ 130 kHz を段階的に測定し、オシロスコープ (TBS1064, TEKTRONIX 社製) を用いて計測した。アクリルは浮力体として作られた発泡スチロールの枠にはめることで水面に浮かべた。また、比較のため、食品用ラップフィルムをアクリルと同様に発泡スチロールの枠に固定し浮かべることで、水面 (0 mm) と同様の測定とみなし、アクリルを介さず水面 (0 mm) に置いた測定も行った。浮かべる際に、アクリルまたはラップフィルムと水面に入る空气の泡は取り除いた。

【送信】

水深 50 cm に校正済みトランスデューサ (AQH100k, ㈱アクアサウンド社製) を設置した (Fig. 1)。サウンドジェネレータ (33210A, Agilent

Technologies) をトランスデューサに接続し、周波数を 3 kHz から段階的に 130 kHz まで変えながら水中に音を再生した。再生した音は、繰り返し周期 200 ms で 10 周期のサイン波とした。音源を、基本的に 10 V で駆動したが、受信用アンプのゲインを最小にしても受信音圧が 1 V 以上となる場合にのみ適宜調節 (3.4 ~ 9 V) を行った。

【受信】

アクリル板厚は、15 mm, 20 mm, 30 mm の 3 つを用いた。受信用水中マイクは AQH100k-DTP (㈱アクアサウンド社製) No.1011 を使用した。アクリルの上側 (空气中) にグリスを塗布したマイクをゼロハンテープにて密着・設置した。この際、送信用トランスデューサの真上に設置した (Fig. 1)。水中におけるマイクの感度特性は、トランスデューサから右に 50 cm, 水深 50 cm に置いて測定した。比較の

ため、アクリルを介さず水面 (0 mm) に直接置いた測定も行った。この感度特性は、食品用ラップフィルムの上側 (空気中) に医療用ソノゼリーを塗布しセロハンテープにて密着・設置して測定した。ソノゼリーを用いたのは、 그리스ではラップフィルムに密着させることが困難であったためである。マイクから受信した音をアンプ (Aquafeeler III, 遮断周波数 1 kHz の高域通過フィルタと 0-200 kHz の帯域通過フィルタを搭載, (株)アクアサウンド社

製)を通して、オシロスコープへと入力した。アンプでは、入力が 1 V を超えると出力が飽和するため、ゲインを 40 ~ 70 dB の範囲で適宜調節した。オシロスコープの表示画面にて、受波信号振幅を周波数毎に読み取り、記録した。

#### 【透過損率】

透過損率は、水中におけるマイクの感度特性から、水面およびアクリルを透過させ受信した音圧に

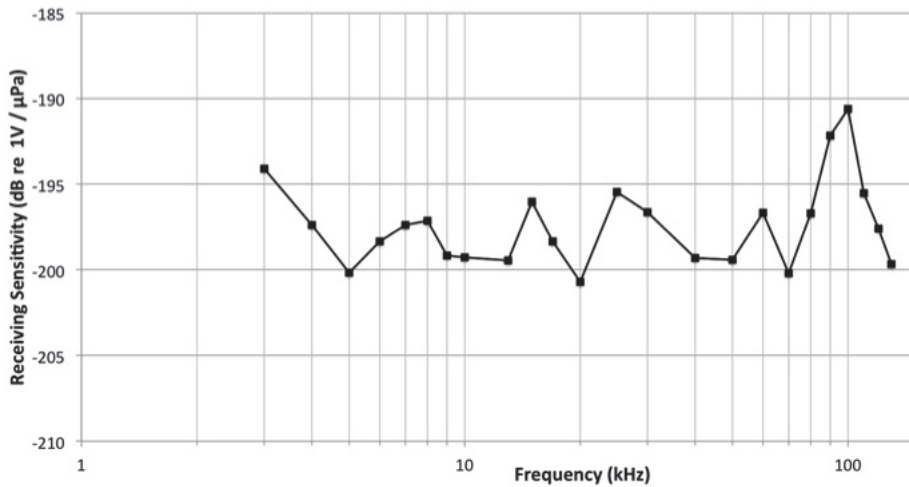


Fig. 2 Measured receiving sensitivity of hydrophones #DTP 1011 at depth of 50 cm. Measured sound frequency were 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 15, 17, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 and 120 kHz.

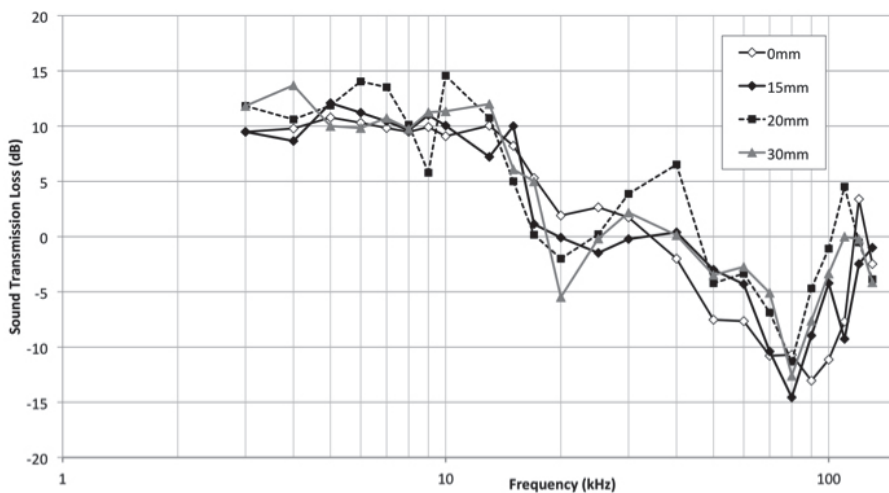


Fig. 3 Transmission losses of sound passing through acrylic plates with various thicknesses. Measured sound frequency were 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 13, 15, 17, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110 and 120 kHz.

より算出したマイクの感度を差し引いた値とした。

## 結 果

マイクの水中における感度特性を Fig. 2 に示す。水面 (0 mm) およびアクリル板厚 15, 20, 30 mm での様々な周波数における透過損率の結果を Fig. 3 に示す。

アクリル板厚の増加に伴う、一定の音圧の減少傾向は示さなかった。一方で、アクリル板厚によらず 3 ~ 40 kHz では透過損率が高く、最大 15 dB (アクリル 20 mm 厚, 10 kHz) の音圧減少が起こっていた。50 ~ 130 kHz (70 kHz を除く) では透過損率が低く、最大 10 dB (アクリル 15 mm 厚, 110 kHz) の音圧の増加が起こっていた。

## 議 論

本実験の結果より、新型水中マイクを用いた水中音録音システムに関して、アクリル板厚の差による、音圧への影響は見られなかった。一方で、アクリル板厚によらず特定の周波数において、音圧への影響が観察された。これらの結果から、アクリルの外 (空気中) へのマイクの設置は、一部の周波数帯域を除いて、水と空気の境界面 (水面 0 mm) への設置とほぼ同じであることがわかった。水と空気の境界面では、受波器周辺の境界面で位相反転した反射波が重畳するために音圧が低くなり、40 kHz 以下の低周波では受波感度が低くなっている。一方、50 ~ 90 kHz で逆に、受波感度が高くなっているのは以下の理由によるものと考えられる。圧電型の受波器は、共振周波数より十分に低く、弾性制御範囲の周波数帯域で開放電圧が受波音圧に比例するようにして用いられる。したがって、使用帯域の上限 (本測定に用いているマイクでは約 100 kHz) では共振のため通常、高感度となる。この高感度の度合いは、受波器の共振尖鋭度  $Q$  によって異なり、 $Q$  が高いほど高感度となる。 $Q$  は受波器の機械的負荷 (音響負荷) が小さいほど高くなるため、水中に置かれた時よりも、空気中におかれた時のほうが高くなる。本研究のように、水槽を囲うアクリルの外側に受波器が設置された場合、前面に音響負荷がかかっている。背面が自由なため、水中に設置した場合よりも高い  $Q$  となり、高周波帯域で受波感度が大きく

なる。

さらに、水とアクリル境界面においても音波の反射が僅かながら起こり、その境界面において音波の向きが変換され横波が発生し、縦波と異なる速度でアクリルを伝搬して受波器に達することが考えられる。本研究により得られた特定周波数の音圧への影響は、これらの複雑な波動の重畳によるものであると考えられる。

以上を総括すると、本システムでは、アクリルを透過させることによる音圧の減少・増加の影響より、アクリル板厚に関わらず、空気やアクリルとの境界面にて起こる反射による影響の方が考慮されるべきであろう。

水族館で飼育されているイルカの鳴音のうちホイッスルの周波数帯域は、例えばハンドウイルカで 800 Hz ~ 28.5 kHz (reviewed in Janik, 2009) であり、アクリルを通した録音の際に記録音圧が減少する可能性があり、音源音圧の測定の際には過小評価となる。一方で、クリックスの周波数帯域は、一般的に 100 kHz 以上 (reviewed in Janik, 2009) となる。その際には、記録音圧が増加し過大評価となる可能性があるため注意が必要である。

評価に使用したマイクは、水中に設置せずに水中の音を録音できる非常に簡易な録音システムである。マイク自体がその共振により、周波数帯域によってその音圧に影響を及ぼす事が本研究により明らかとなったため、音圧の計測には注意が必要であり、開発設計段階において解決すべき課題である。この特性を考慮したマイクの改良を行うことで、本システムは使用可能であり、対象動物への負担の軽量のみならず、実験システムの軽量化・簡略化に大きく寄与するものであると考える。

## ま と め

簡便に動物の鳴音を録音できるシステムを構築することを目的として、3種類の板厚のアクリル (15 mm, 20 mm, 30 mm) に 3 ~ 130 kHz の音を透過させた際の、マイク感度への影響を検証した。アクリル厚の差による感度に違いは見られず、水面に置いた際の感度とほぼ同じである結果が得られた。また、アクリルを空気中に触れた状態で使用することにより、マイク自体や水面による複雑な反射が影響することが明らかとなった。評価に使用したマイ



クを用いて、マイクをアクリルの外側に設置する方法で、イルカが出す多様な音を記録し研究を行う際には、これらの特性を考慮した上での使用が必要である。

音圧への影響はある一方で、音そのものの録音は可能である。本システムの実用化に向けて、今後は受波の際のマイク角度の影響や感度差の軽減に向けた改良を進めたい。また、実際に水族館施設で用いられるアクリル板厚 25 cm 以上での測定や音圧が関与しない音速を用いた音源定位システムへの応用を試みたい。

## 謝 辞

実験所立ち上げにあたり大変お世話になった東海大学海洋学部・煙山政正氏、海洋研究所・竹下洋子氏、(株)アクアサウンド・故新家富雄博士と遠藤保彦氏にお礼を申し上げます。また、査読者には謹んで感謝の意を表します。本研究の一部は科学研究費(基盤S, 代表:友永雅己, 23220006, 15H05709)の助成を受けた。

## 引用文献

- Au, W. (1993). *The sonar of dolphins*. Springer, Vol. 32.
- Blomqvist, C., and Amundin, M. (2004). "High-frequency burst-pulse sounds in agonistic/aggressive interactions in bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*."
- Janik, V. M. (2009). "Chapter 4 Acoustic communication in delphinids," *Adv. Study Behav.*, **40**, 123-157. doi:10.1016/S0065-3454(09)400044
- Janik, V. M., and Sayigh, L. S. (2013). "Communication in bottlenose dolphins: 50 years of signature whistle research," *J. Comp. Physiol. A. Neuroethol. Sens. Neural. Behav. Physiol.*, **199**, 479-89. doi:10.1007/s00359-013-0817-7
- Penner, R. H., and Murchison, A. E. (1970). "Experimentally demonstrated echolocation in the amazon river porpoise, *Inia Geoffrensis* (Blainville)," *Res. Dev. rept.*, Retrieved from <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=AD0719897>
- Tyack, P. (1986). "Whistle repertoires of two bottlenosed dolphins, *Tursiops truncatus*: mimicry of signature whistles?" *Behav. Ecol. Sociobiol.*, **18**, 251-257. doi:10.1007/BF00300001
- Yamamoto, Y., Akamatsu, T., da Silva, V. M. F., Yoshida, Y., and Kohshima, S. (2015). "Acoustic characteristics of biosonar sounds of free-ranging botos (*Inia geoffrensis*) and tucuxis (*Sotalia fluviatilis*) in the negro river, amazon, brazil," *J. Acoust. Soc. Am.*, **138**, 687-693. doi:10.1121/1.4926440