

水槽実験における水中音圧レベル測定の取り組み

村田政隆、高原英生*、富安 信**、桜井泰憲***

Efforts to Measure Underwater Sound Pressure Level in Aquarium Experiments

Masataka Murata, Hideo Takahara*, Makoto Tomiyasu**, Yasunori Sakurai***

要 旨

魚類は水中音の種類によって誘引や威嚇、もしくは損傷したりする等の聴覚特性をもち、水中音と魚類行動に関する研究は数多く存在する。近年では、再生可能エネルギーとして期待される洋上風力発電に係わる水中音と魚類行動の関連性が注目されている。しかし、一般的に海洋実験は再現性が困難なため、水槽実験で検証すべき事例も多く、水中音響機材は高価な専用機器であるため実験環境整備が難しい。そこで、本報告では電子計測系の基本測定器等を用いて水中音の放射と水中音圧レベル測定を実施した。その結果、水槽内の水中音圧レベル分布を確認でき、水中音圧レベルと魚類行動の関係性について、音圧レベル変換式を用いることによる検証の可能性を示した。

はじめに、本実験では専用の水中音響機材の代わりに工業用電子計測器等を用いた音の放射および測定に関するシステムの現場構成を検討するため、図1の構成と図2のφ2mの水槽を用いた基礎実験を行った。まず、放射側は信号発生器からアンプを通じて水中スピーカから純音（正弦波音）を出す構成とした。一方、測定側は特定周波数を検知するため、FFT機能を装備したオシロ

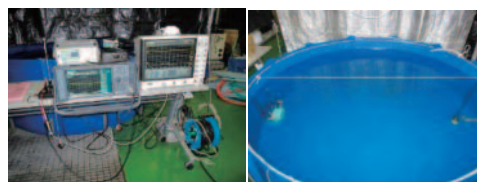


図2 実験環境

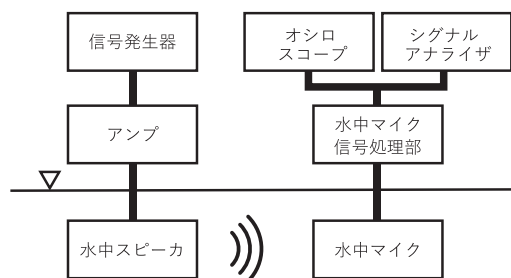


図1 実験システム構成

スコープ (keysight technologies : DSOS204A) とシグナルアナライザ (keysight technologies : N9010B) を用い、出力を確認した。

実験方法は、水中スピーカと水中マイクの距離 L を 0.2m 刻みで 0.8m から 1.6m までとり、音量はアンプボリューム Amp.Vol. を 10 刻みで 10 から 70 まで変化させ、周波数は 100Hz、200Hz、300Hz および 400Hz に設定して音を放射し、オシロスコープの FFT 解析結果とシグナルアナライザの測定値を記録した。その一例として、 $L=0.8m$ の測定

*一般財団法人函館国際水産・海洋都市推進機構

**北海道大学大学院水産科学研究院

***一般財団法人函館国際水産・海洋都市推進機構 函館頭足類科学研究所

責任著者連絡先 (Masataka Murata) : murata@techakodate.or.jp

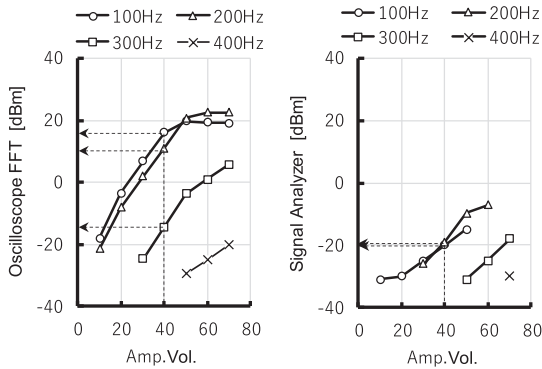


図3 周波数成分測定結果例 (L=0.8m)

結果を図3に示す。本実験では距離Lを5条件、Amp.Vol.を7条件、周波数を4条件の計140条件を実施したが、波形のピークを確認できなかった理由で、オシロスコープでは46条件、シグナルアナライザでは81条件を測定不可と判断した。

図3の左に示すオシロスコープの測定結果と右に示すシグナルアナライザの測定結果を比較すると、どちらも周波数が一定の場合ではAmp.Vol.を大きくすると測定値も大きくなるが、Amp.Vol.が一定の場合では図3の破線矢印に示す様に、周波数によって測定結果が異なることがわかる。スピーカやマイクの材質や構造および電子回路には、周波数特性が存在するため、校正された水中音響の専用機材を用いない場合、音の放射と測定の組合せごとに周波数特性を確認する必要があることがわかる。本実験では測定機器の設定条件についても検証すべきだが、シグナルアナライザは感度が良くピークが変動しやすいため読み取る個人誤差の影響が大きくなること、入力電力制限のため実験条件によってはアッテネータを準備する必要性が認められること等の手間を要する等の特徴から、現場測定ではオシロスコープのFFT解析結果を用いることとした。そして、次式によりオシロスコープのFFT測定強度 W [dBm]を水中音圧レベル[dB re 1 μ Pa]に変換した。

$$\begin{aligned}
 La &= f_f(W) \\
 La &= 20\log(p'/20 [\mu\text{Pa}]) [\text{dB re } 20\mu\text{Pa}] \\
 Lw &= 20\log(p'/1 [\mu\text{Pa}]) [\text{dB re } 1\mu\text{Pa}] \\
 \therefore Lw &\doteq f_f(W) + 26.0
 \end{aligned}$$

ただし、 La :空中音圧レベル、 $f_f(W)$:近似直線式、

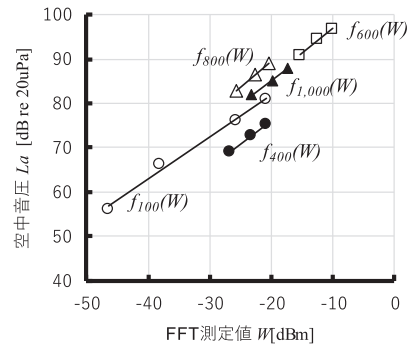


図4 測定強度 W の音圧レベル変換

p' :測定音圧実効値、 Lw :水中音圧レベルおよび添え字 f :周波数とする。

まず、気中においてスピーカから純音を放射し、水中マイクと騒音計で同時に測定することにより、 W [dBm]と空中音圧レベル La [dB re 20 μ Pa]の近似直線式を求めた。空中音圧レベル La と水中音圧レベル Lw は基準の圧力が異なるだけであり、演算だけで変換が可能である。ゆえに、周波数ごとに $f_f(W)$ を求めることで、測定値の水中音圧レベル換算ができると考えた。そこで、100Hz、400Hz、600Hz、800Hz および 1,000Hz について実験した結果を図4に示す。

このような周波数特性を考慮した関係性を確認しながら、本実験では測定値の単位変換を試みることとした。ただし、本変換はオシロスコープのFFT機能を利用しているため、信号が周期的であると仮定していること、設定条件によってFFTの演算結果が変化すること、また、騒音計の測定値は単一周波数に特化していないこと等から、変換した水中音圧レベルは推定値である。ゆえに、今後は精度検証において専用の水中音響機材との比較が必要である。

近年注目されている洋上風力発電にかかわる人工音の周波数帯域は、概ね30Hzから500Hzの範囲とされている。特に洋上風力発電における杭打ち、浚渫、鉦物採掘などの工事騒音および稼働音の音域と海洋生物の可聴域が重複する周波数¹⁾への関心が高く、ほぼ100Hzが基準となっている。そこで、100Hz付近を対象とした測定基本仕様を定め、実験構成を図5に、基本設定条件を表1に示す。この仕様では、放射系の信号発生器とオーディオアンプ間に50 Ω /75 Ω のインピーダンス変

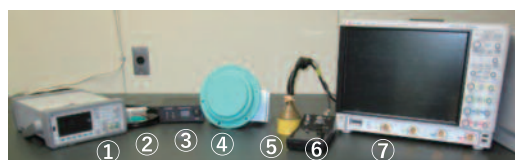
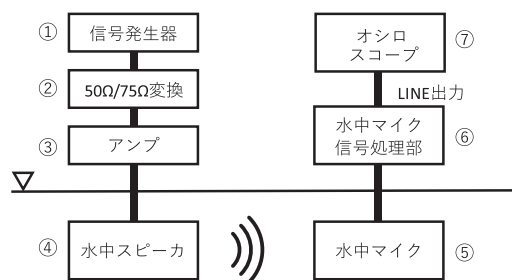


図5 基本システム構成

表1 構成機器および主設定

機器 (型式)	主設定
① 信号発生器 (33622A)	・周波数: 100Hz(任意) ・振幅: 2Vp-p
② 50Ω/75Ω 変換回路(自作)	—
③ アンプ (AL-602H)	・Amp. Vol.: 60
④ 水中スピーカ (US300)	—
⑤ 水中マイク (RH328)	・Output: LINE
⑦ オシロスコープ (DSOS204A)	・input impedance: 1MΩ ・Speed: 1MSa/s, 1Mpts ・TimeRange: ±500ms ・VoltageRange: ±8V -<FFT> ・Start 0Hz - Stop 200Hz ・CF 100Hz, Span 200Hz ・RBW 1.5Hz

換回路を設け、電力伝送の効率化を図った。また、測定系では受信器のボリュームに影響されないLINE信号を用いることで、測定時の人為的ミスを防ぐ方法とした。

本システム構成を用い、函館市国際水産・海洋総合研究センターの大型実験水槽(幅10m、奥行5m、深さ6m、容量300トン)を使用した100Hzの水中音圧レベル分布測定を行った。水平方向については幅方向6区分、奥行方向3区分として水平面を18エリアに分割し、各エリアの中心を測定点とした。水深方向については、水深を3m、スピーカの設置水深を1.5mに定め、測定水深は0.5m、1.5m、2.5mとした。水中スピーカの設置状況を図6に、無音時と放射時における100Hz成分の測定結果から、Microsoft Excel®の等高線機能により求めた水中音圧レベル分布を図7に示す。

実験の結果、無音状態はほぼ100[dB re 1μPa]以下であり、底層ほど高い傾向となった。放射状態

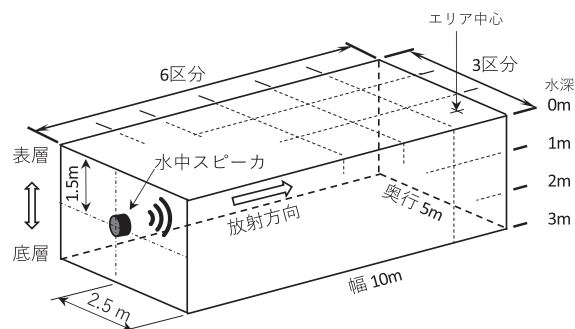


図6 水中スピーカの設置状況

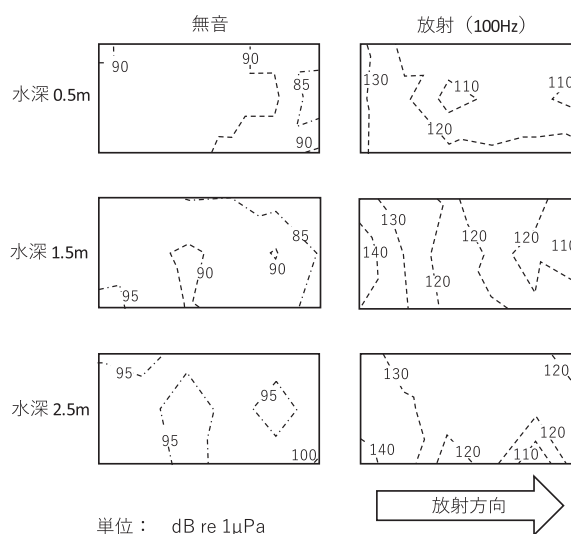


図7 水中音圧レベル分布測定結果

はスピーカ付近が146.8[dB re 1μPa]と最も高く、表層と底層を比べると底層の方が高い傾向となった。無響水槽の暗騒音測定において100Hzで70[dB re 1μPa]以上となっている事例²⁾も報告されている。本実験のように商用電源50Hzで稼働するポンプ等の設備が多い環境を踏まえると、第二高調波が100Hzとなるため、機械振動の影響も考えられることから、測定結果には妥当性があると考えられる。

今後は水中音響機材との比較検証は必要だが、本測定システムを活用しながら、水中音と魚類行動に関する知見を深める予定である。

参考文献

- 1) 海洋音響学会：海中音の計測手法・評価手法ガイド (2021)
- 2) 堤：海洋音響学会誌、18巻、第2号 (1991)、pp.84-97