

自給気潜水装置を装着したダイバーから発生する水中呼吸音とイメージングソナー映像

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2023-03-17 キーワード (Ja): キーワード (En): forward looking sonar, underwater search and rescue, SCUBA, underwater respiratory sound 作成者: 倉本, 和興 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15053/0000000039

Copyright © JAPAN COAST GUARD ACADEMY
2020

【論文】

自給気潜水装置を装着したダイバーから発生する水中呼吸音と イメージングソナー映像

倉本 和興¹

The Underwater Respiratory Sound and the Forward Looking Sonar Images Generated from the Diver Equipped with the Self-Contained Underwater Breathing Apparatus

Kazuoki Kuramoto¹

Abstract

When we support the underwater search and rescue activity of Japan Coast Guard (JCG) divers from behind a surface ship by utilizing the Forward Looking Sonar (FLS), strong interference lines from the sonar head toward the divers occasionally appear on the sonar image in response to the breathing of divers. It is considered that a high-frequency component is included in the underwater respiratory sound of divers and is overlapped with the carrier signal from the sonar projector and has been observed all together by the receiver consequently.

In this study, we measured the underwater respiratory sound when the diver uses the self-contained underwater breathing apparatus (SCUBA) in the pool or in the real sea and examined what kind of frequency elements were included in this respiratory sound. Furthermore, we discussed the mechanism how the strong interference line comes into the sonar image and considered a method of utilization and possibility to the field services of JCG.

Keywords: forward looking sonar, underwater search and rescue, SCUBA, underwater respiratory sound

1 はじめに

現在、前方監視型のイメージングソナー (Forward Looking Sonar, FLS) を有効に活用し、海上保安庁の重要な業務の一つである潜水士による海中捜索・救難活動を海上の支援船から後方支援するための技術開発を行っている^{1,2,3)}。その際、Figure 1 に示すようにソナー

映像に表示されるダイバー自身からの反射や岸壁等の対象物からの反射と共に、時折ダイバーの呼吸に合わせてソナーヘッドからダイバーに向けて強い干渉線が現れることがある。これは、自給気潜水時にダイバーから発生する呼吸音の中に周波数の高い成分が含まれており、それがソナーの送波の際に出すバースト波状の

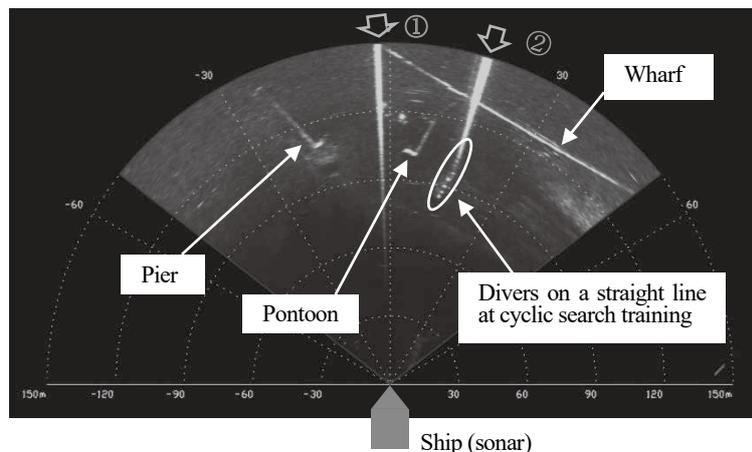


Figure 1 Strong interference lines (denoted by ① and ②) on the sonar image derived from the underwater respiratory sound of divers during the cyclic search training in the front sea area of Japan Coast Guard Academy (JCGA)⁴⁾.

Received November 13, 2020

¹海上保安大学校 kuramoto-c3u6@jcga.ac.jp

400 kHzの高周波信号（以下、この信号をキャリア信号およびこの周波数をキャリア周波数と言う）と重なり、受波器と一緒に計測されたためと考えられる⁴⁾。

本稿では、このことを確かめるため、大学校潜水プールおよび前面海域において自給気潜水時のダイバーからの呼吸音を音響計測し、①ソーナーのキャリア信号に近い高い周波数の呼吸音を本当に出しているのか、その際、②どのような場合に高い周波数の音が発せられるのか、③どの潜水機材から発せられるのかを調べ、ソーナー映像に現れる干渉線ができるメカニズムや水中搜索の現場業務への活用方法や可能性について考察する。

2 実験方法

Figure 2のように、大学校潜水プール（水深 2 m 地点）において、被験者（潜水教官2名および本科学学生2名の合計4名）が1名ずつ自給気潜水を行い、その時の水中呼吸音を水中音圧計(OKI SW1020)により計測し、データレコーダー(NF EZ7510)で2~3分間のサンプリングを行った。使用したマイクロホン(OKI ST-1020)は、水平方向は完全無指向性で100 kHzまで平坦な周波数特性を有し、受感度は -178 [dB re1V/ μ P]である。又、低周波成分を除去するため、水中音圧計のハイパスフィルターを 1 kHzに設定し、データレコーダのサンプリング周波数は1 MHzとした。

次に、ソーナー映像に強い干渉線が観測されたとき (Figure 1) と同じ状況の、大学校前面海域で実施される潜水研修の慣海実習時においても水中呼吸音の測定を行った。大学校浮き桟橋（水深約6 [m]地点）から水中音圧計のマイクロフオンを水面下約1 [m]の位置に設置し、その周辺を一周して環状搜索訓練を行う潜水研修生ダイバーの水中呼吸音を潜水プールと同様の方法で計測した。

尚、本実験で使用した潜水器具は、本校で所有するAQUA LUNG社のレジェンドシュープリーム（教官用）およびタイタンクラシック（学生および潜水研修生用）で、いずれも基本構造は同じものである。

3 実験結果

3.1 潜水プールでの計測結果

潜水プールにおいて、ゆっくり深く呼吸した場合の音響データの時間波形の一例をFigure 3 に示す。排気と吸気をそれぞれ1回ずつ行ったもので、一呼吸当たり約 6 [sec]である。さらに排気と吸気のそれぞれの部分について、4096点の方形窓を施して200 kHzまでの周波数分析を行った結果をFigure 4 に示す。排気時の周波数分析結果 (Figure 4(a)) は、50 kHz以上の周波数成分は殆ど存在せず、潜水プールでの暗騒音の場合とほぼ同じである。一方、吸気時には、全体の音圧レベルが大きくなってい

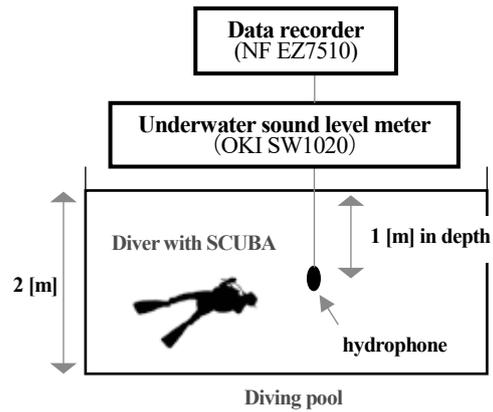


Figure 2 Measurement conditions of underwater respiratory sound from the diver with SCUBA in the diving pool of JCGA.

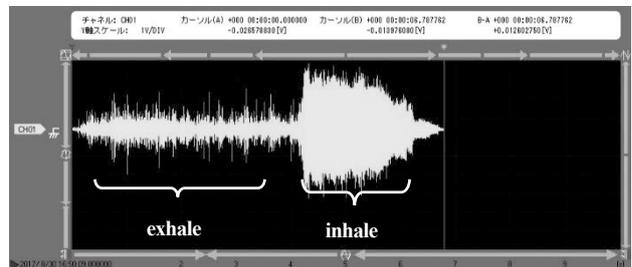


Figure 3 Time dependence of the underwater respiratory sound of a diver in the case of slow breathing. (Vertical axis: 1 [V/DIV], horizontal axis: 1 [sec/DIV])

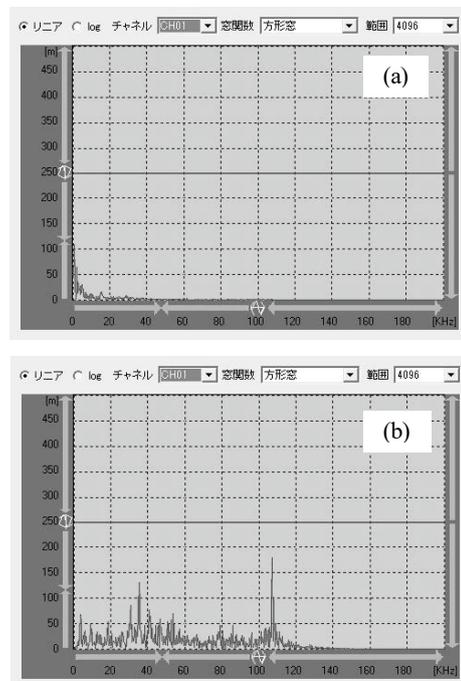


Figure 4 Results of frequency analysis up to 200 kHz in the case of slow breathing. ((a): ex-hale, (b): inhale)

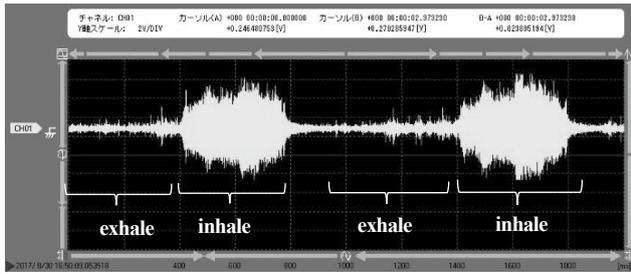


Figure 5 Time dependence of the underwater respiratory sound of a diver in the case of rapid breathing. (Vertical axis: 2 [V/DIV], horizontal axis: 200 [msec/DIV])

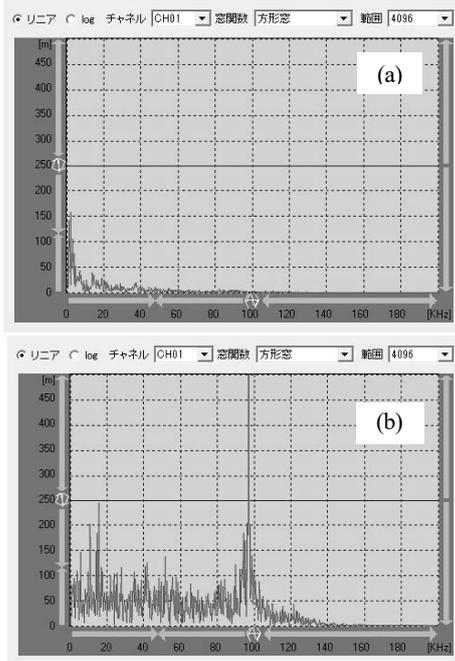


Figure 6 Results of frequency analysis up to 200 kHz in the case of rapid breathing. ((a): exhale, (b): inhale)

ることもあるが、高周波成分が幾つか出現しているのが分かる (Figure 4(b)) . 次に、同じ被験者で急速に呼吸した場合の音響データの時間波形をFigure 5 に示す。図には排気と吸気をそれぞれ2回ずつ行ったものを表しており、一呼吸当たり約1 [sec]である。ゆっくり呼吸した場合と同様、周波数分析を行った結果をFigure 6 に示す。早く呼吸した場合は、排気時にはゆっくりの場合と同様、高周波成分は殆ど現れていないが (Figure 6(a)) , 吸気時には100 kHzを中心とした周波数成分が出現しているのがわかる (Figure 6(b)) .

他の3名の被験者についても同様の実験を行った結果、Figure 6(b) に示したような吸気時の高周波成分については、ゆっくりと呼吸した場合に比べて、急速に呼吸した場合に出現しやすいことが分かった。急速に吸気した場合の4名の被験者の周波数分析の結果を纏めたものをFigure 7 に示す。同図より、急速吸気時には40 kHzから150 kHzの範囲で高周波成分が出現しているのは明らか

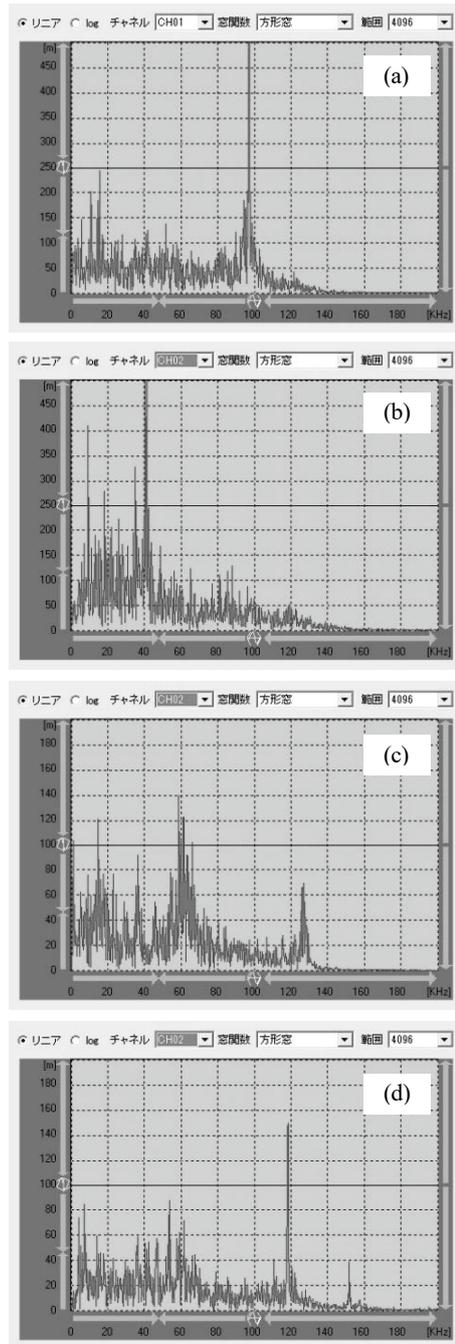


Figure 7 The summary of frequency analysis up to 200 kHz in the case of rapid inhale. ((a): student K, (b): student B, (c): instructor I, (d): instructor Y)

であるが、現れる周波数については被験者によって異なっている。この高周波成分は、ダイバーがエアを勢よく吸い込む際の自給気式潜水器⁵⁾の口に咥えたレギュレータ (圧力調整器) から誘発された発生音と思われる。これは、いわゆるガルトンの超音波笛 (大笛) と同様の状況が再現され、高周波音が発生したものと考えられる。また、ダイバーのエアの吸い方によってポンベ (第一減圧部) からレギュレータ (第二減圧部) へのエアの流れの状況が変化し、出現する周波数も異なると思われる。

3.2 実海域での計測結果

環状搜索訓練を行っている研修生ダイバーの呼吸音から計測された音響データの時間波形をFigure 8 に示す. 同図は, 実際に水中音を再生, 聴取して確認し, 訓練中の一人の研修生から発生された排気と吸気と思われる部分 (一呼吸当たり1.4 [sec]) について示したものである. また図中には, 呉湾のような沿岸域に多く生息するテッポウエビによるパルス性ノイズが呼吸音に重なるように頻繁に現れている. 3.1と同様, 排気と吸気のそれぞれの部分について200 kHzまでの周波数分析を行った結果をFigure 9 に示す. 排気時の周波数分析結果

(Figure 9(a)) は, 実海域の暗騒音の結果とほぼ同じで, 潜水プールの場合と比べてパルス性ノイズや遠方からの船舶ノイズに起因する40 kHz以下の低周波数成分が多少出現しているのが分かる. 一方, 吸気時の結果

(Figure 9(b)) には, 潜水プールでの急速吸気の場合と同様, 100 kHz近傍を中心とする周波数成分が著しく出現している.

4 考察

以下では, 本実験で検出されたダイバー呼吸時の高周波成分とソナー映像に現れる干渉線の関係について考察する.

4.1 ダイバーが高周波成分を発していない場合

ソナーの送波器から発射されたパルス波 (ピングレート 2 Hz, キャリア周波数 400 kHz のバースト波) は, ダイバーや岸壁に反射してソナー本体へと帰還する. 一方で, ソナーの受波器によりフェーズドアレイ方式の並列回路の数に対応する受波スリット (水平幅 0.5° の薄く縦長の扇状のスリット) が 256 通り形成され, 1つの受波スリットから1本の走査線 (受波ビーム) が得られる. ここで, ダイバーが高周波成分を発していない場合には, 海中の物体 (ダイバーや岸壁など) からのみの反射エコーが得られ, 到達時間がソナーからの距離に対応し, 反射強度の強弱が各走査線の濃淡としてそのまま表示される. この走査線を 256 本すべて張り合わせることで1枚の扇状のソナー画像が作成され, 干渉線のない時の岸壁やダイバーの映像が得られることになる⁶⁾.

4.2 ダイバーの呼吸により高周波成分が発生している場合

ソナーの送波器から発するパルス波は4.1の場合と同様にダイバーや岸壁から反射されるが, ダイバーの呼吸 (特に激しい吸気) により高周波成分が発生している場合には, 反射波はダイバーの発する高周波成分と重なり, この2種類の信号が混在した状態で受信される. ある1本の走査線 (受波ビーム) 上にたまた

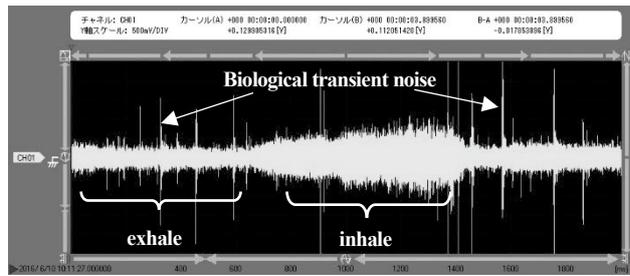


Figure 8 Time dependence of the underwater respiratory sound from a training diver in the actual sea. (Vertical axis: 500 [mV/DIV], horizontal axis: 200 [msec/DIV])

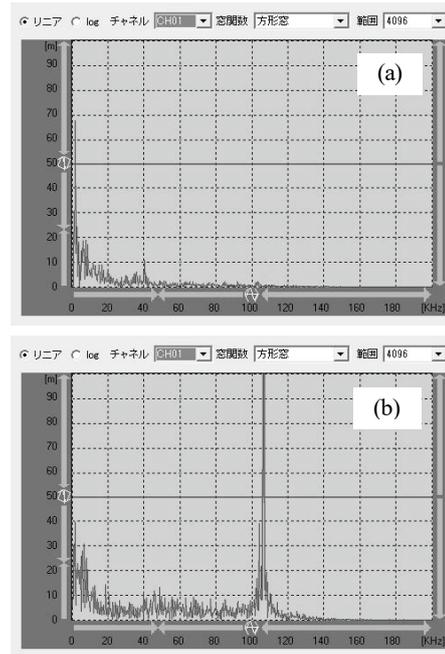


Figure 9 Results of frequency analysis up to 200 kHz from a training diver in the actual sea. ((a): exhale, (b): inhale)

ま高周波成分を出しているダイバーがいる場合, これらの混在した信号を受波器が受波スリットを通して受信し, その結果として走査線上には強い信号が現れることになる. しかしながら, 一般にソナーにはキャリア周波数前後でバンドパスフィルター (帯域制限) が設定されており, Figure 6(b)で示されたような急速吸気時に現れる 100 kHz 付近の高周波成分はバンドパスフィルターで排除されるはずである. それではソナー映像に干渉線が出現するメカニズムはどのように考えたらよいのだろうか.

4.3 ソナー映像に現れる干渉線の出現メカニズム

ダイバーが出す 100 kHz 前後の周波数成分はソナーに設定されたフィルターで帯域制限され, 反射強度には直接反映されないことがソナーの帯域制限の試験により確認されている⁷⁾. そこでダイバーの急速吸気時の呼吸音を改めて 500 kHz まで周波数分析

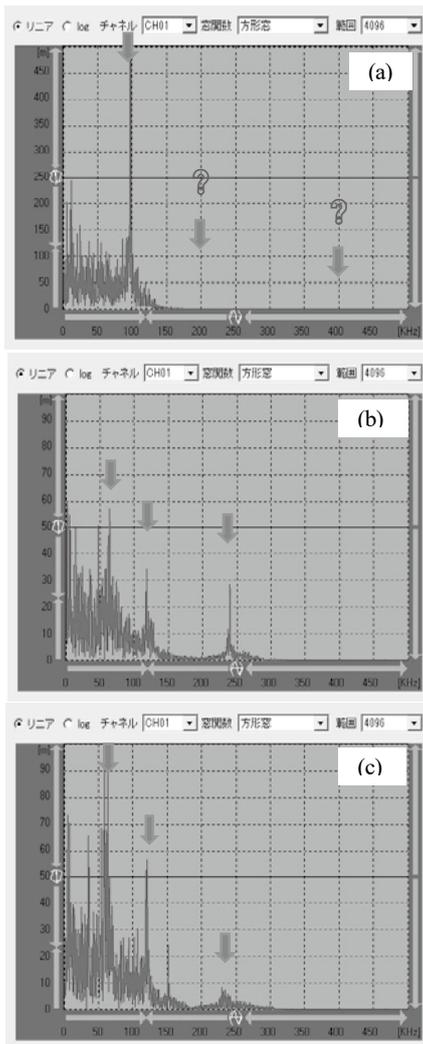


Figure 10 Results of frequency analysis up to 500 kHz in the case of rapid inhale. ((a): student K, (b): instructor I, (c): instructor Y). It is proven that higher harmonic components were occasionally generated in the higher frequency region in addition to the main respiratory sound.

したものを Figure 10 に示す。ハイドロフォンの受波感度が 100 kHz 以上で急激に減少することから高周波成分の定量的な議論はできないものの (100 kHz 以上の周波数分析がどこまで可能であるかは付録を参照のこと)、同図から推察するに、被験者の違い、呼吸の状況の違いにもよるが強く速い呼吸をした場合には 60 kHz から 100 kHz 近傍の主となる呼吸音に加えて、非線形性を反映して高周波領域に時折、整数倍の高調波成分が現れてきていると考えられる。つまり、ダイバーの呼吸音が存在する場合、その主な成分はソーナーのキャリア周波数より低い周波数で、その信号そのものはソーナーの帯域制限により受信されない。しかしながら、激しく吸気した場合など、時折高調波成分が発生することがあり、それらがソーナー

のキャリア周波数 (400 kHz) 近くまでたまたま到達し、受波器によって受信されたと推察される。その結果として、ソーナー画像上には Figure 1 に示すようなソーナーヘッドからダイバーに向けて特徴的な線状の強い干渉線として現れたものと考えられる。

4.4 ダイバーの呼吸のタイミングについて

Figure 1 のソーナー画像をさらに詳細に見る事によって、ダイバーの呼吸のタイミングについて以下のようなことが分かる。例えば、Figure 1 に示された干渉線①の場合、ダイバーの吸気は送波器からのパルスがダイバーへ到達する前から始まっており、ダイバーや岸壁からのソーナーの反射波は吸気による高周波信号に埋もれていると考えられる。その結果、ソーナー画像上にはダイバーの居る位置よりずっと手前から後方まで長く強い干渉線として現れている。一方、干渉線②の場合では、ダイバーの吸気は送波器からパルスが発生された後、ダイバーに達すると同時に始まったと考えられる。その結果として、ソーナー画像上の干渉線はダイバーから後方に向けて、更に岸壁を越えて強く現れている。このように干渉線の出現の仕方によって、ソーナーの送波のピング間 (0.5 sec) に行われるダイバーの呼吸のタイミングについてもある程度推測することが出来る。

5 終わりに

本研究で行ったことを纏めると以下の通りである。

- ① ダイバーの自給気潜水時の水中呼吸音を水中音圧計で計測し、周波数分析を行った。
- ② 速い呼吸の際の吸気時に、150 kHz までの高周波成分が頻繁に出現していることが分かった。
- ③ 出現する高周波成分の周波数は、被験者やその時の状況によって異なっており、これはダイバーがエアを急速に吸い込む際の自給気潜水器のレギュレータからの発生音であると思われる。
- ④ 本研究で使用した計測器では、ハイドロフォンの受波感度の限界から 250 kHz 以上の高周波数の水中音は正確に記録することはできなかったが、実際には 400 kHz の高周波範囲までダイバー呼吸音の高調波成分が出ていると予想される。
- ⑤ この吸気時の高周波成分がソーナーのキャリア周波数 (400 kHz) 近くまで到達した時、受波器がこれを受信することでソーナー画像上に特徴的な強い干渉線として出現したと考えられる。

これまでソーナー映像に現れる強い干渉線は画像上のノイズとして考えてきたが、これを積極的に有効に活用する方法として以下のようなことが考えられ

る。干渉線の出ている方向に必ずダイバーがいる事から、水中ダイバーの確実な位置把握に利用できる。また、速い呼吸時に干渉線が出やすい事から、ダイバーの呼吸状態、緊張状態の把握に利用できる。つまり、ダイバーが海中搜索活動を行うなかで FLS を有効に利用することで、海中にいるダイバーの正確な位置やリアルタイムの動きだけでなく、ダイバー自身の呼吸状態も把握でき、ダイバーの安全・安心を確保しながらより高度な支援体制を構築できると考えられる。

謝辞

本研究を実施するにおいて全面的な協力を頂いた大学校訓練部、並びに被験者として自給気潜水を行ってくれた吉田健二、伊藤拓也の潜水教官および小村健太、馬場遼平の学生諸氏に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 倉本和興, 浅田昭, 半谷和祐, *Sonic2024* および 2022 を用いた海中搜索支援技術の開発, 海洋音響学会 2015 年度研究発表会講演論文集, (2015) 49-52.
- 2) 倉本和興, 浅田昭, 半谷和祐, 前方監視ソナーによる潜水搜索ダイバーのための後方支援技術, 海洋音響学会 2016 年度研究発表会講演論文集, (2016) 1-4.
- 3) 倉本和興, 浅田昭, 半谷和祐, 前方監視ソナーを用いた海中搜索支援技術の試作, 海洋音響学会誌, 43(4), (2016) 276-285.
- 4) 倉本和興, 小村健太, 馬場遼平, ダイバーの自給気潜水時に発生する水中呼吸音とソナー映像, 海洋音響学会 2018 年度研究発表会講演論文集, (2018) 79-80.
- 5) 中央労働災害防止協会, 「潜水士テキスト」, (新日本印刷株式会社, 2016, p. 57-90.
- 6) 倉本和興, ナローマルチビームソナーによる水中イメージング - 測深機と前方監視ソナーの違い -, 海洋音響学会誌, 43(1), (2016) 1-11.
- 7) 倉本和興, 横田裕輔, 吉田善吾, 柴田耕治, ワイドバンドマルチビーム測深機 (R2Sonic2024) の帯域制限確認試験, 海上保安大学校研究報告, 第 63 巻 第 1・2 号 第 2 部, (2021) 29-33.

付録: 水中音圧計のシミュレーション実験

本実験で使用した水中音圧計のハイドロフォンは、100 kHz まで平坦な受波感度周波数特性を有しているが、それ以上の高周波信号が実際にどこまで受信できるか不明である。そこで、ダイバー呼吸音の高周波信号を検討するにあたり、以下のようなシミュレーション

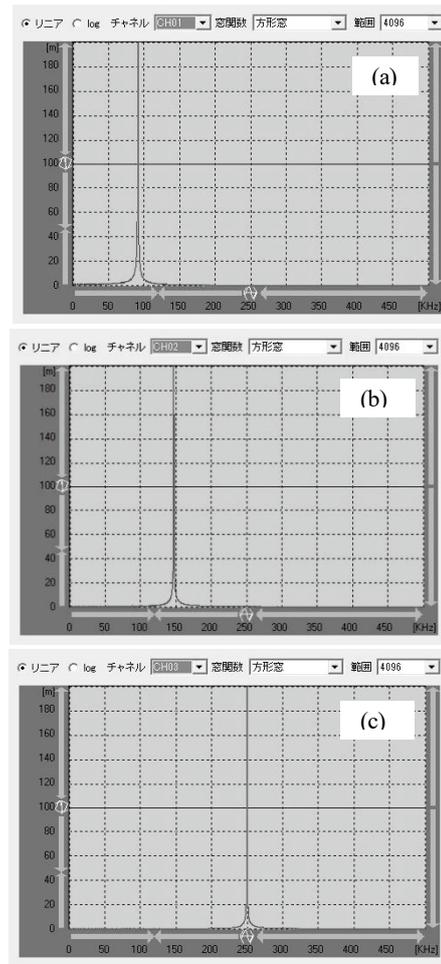


Figure A-1 Results of frequency analysis up to 500 kHz for the simulation signals in the water tank. Frequency of the sine wave is (a) 90 kHz (@ 160 dB), (b) 150 kHz (@ 150 dB) and (c) 250 kHz (@120 dB).

ン実験を行い、水中音圧計の受波感度の検証を行った。信号発生器で既知の正弦波信号を発信させ、さらに水中スピーカにより水槽中に水中信号を送波する。ここで、同じ水槽に設置したハイドロフォンを通して水中音圧計で計測した際、オシロスコープで表示される正弦波の出力信号が水中スピーカの共振周波数に一致するよう周波数：90 kHz, 150 kHz, 250 kHz とし、振幅： ± 1 V の比較的歪のない正弦波になるよう信号発生器の調整を行った。ただし、100 kHz 以上はハイドロフォンの受波感度は著しく減少することから、測定に合わせて音圧計の利得を 160 dB から 120 dB まで調整 (gain を増大) している。このようにして 100 kHz 以上の周波数分析がどこまで可能であることを検証した。本試験と同様、データレコーダー (NF EZ7510) により 1 MHz でサンプリングを行い、同様の周波数分析を行った。その結果、Figure A-1 に示すように、受波信号としての感度は著しく落ちるものの、一応 250 kHz までの高周波の正弦波信号に対して確実に受波信号が得られているのを確認している。