 研 究

水中における聴覚の等感曲線*

老松建成・倉本和興・桑原信也**

(海上保安大学校)

山口静馬***

(山口大学工学部)

Abstract

One of the most simple and effective ways for preventing the diving accidents is to transmit an underwater acoustic signal directly to divers. The use of an audio signals is very efficient since divers usually have no communication apparatus. Although it is well known that we have auditory sensation in the water, the appropriate expression of loudness are not well studied. In this paper, for the sake of appropriate assessment of underwater acoustical environment for the divers, the result of equal-loudness level of auditory sensation and minimum audible level in the water are summarized as an equal-loudness contours in the water. Then, after two additional experiments, we discussed the relation of contours between in air and in water.

ダイバーに対する事故防止の最も単純で且つ有効な手段の一つに、音響信号を直接伝達する方法がある。通常ダイバーは特別な通信装置を所持していないので、音響信号を用いる方法は非常に有効である。人間が水中でも聴感能力を有していることは良く知られているが、聴感に対する音の大きさを適切に表現するための研究はあまり見当たらない。本論文は、ダイバーに対する音環境を適切に評価するために、水中における聴覚に対する等感レベルと最小可聴値を実験的に求め、水中における等感曲線としてまとめて示した。次いで、いくつかの追加実験を行い、既に知られた大気中の等感曲線との関連について考察した。

1. まえがき

特別な通信装置を持たない一般ダイバーへの安全確保、あるいは水中作業への指令のための情報を伝達する最も単純かつ基本的な方法の一つとして、水中スピーカで可聴音響信号を潜水者へ直接伝達することが考えられる。人は水中でも聴感能力を有し、それが水中での音響情報伝達に有効であることは経験的に良く知られているが、人間の水中における聴感特性を定量的に考察した研究はほとんど見当たらない。また、例えば図1に示すような、水中での

音環境において、人間の聴覚を配慮した音の大きさを計測したり評価するためには、音の基本的な心理的属性の一つである水中における音の大きさを定量的に定めておくことがまず基本的に必要となるが、現在のところそのような検討もほとんど行われてい

図1 研究目的の概念図

* A consideration on equal-loudness contours for underwater acoustic signal.

** Kensei OIMATSU, Kazuoki KURAMOTO, Shin'ya KUWAHARA (Maritime Safety Academy)

*** Shizuma YAMAGUCHI (Faculty of Engineering, Yamaguchi University)

図2 ロビンソン・ダッドソンの等感曲線

ないように思われる。一方、空気中では周知のように、音の大きさ (loudness) の定義として、“ある音について、正常な聴覚をもつ人が、その音と同じ大きさに聴えると判断した 1000Hz 純音の音圧レベルの数値”をいい¹⁾その単位として phon を用いている。各周波数について等感曲線をまとめたものとして、現在では、ロビンソン・ダッドソンの等感曲線 (図2)²⁾が国際規格³⁾として採用されている。水中においても空気中の phon に対応する音の大きさの測定量が求められれば、水中における人の聴感を考慮した音の大きさをより定量的に考察することが可能となる。

本論文は、以上のような観点から、水中での聴覚の等感曲線及び最小可聴値を実験的立場から算定し、次いで、既によく知られた大気中の等感曲線との関連性について考察する。

2. 実験の概要

実験の構成は、等感曲線を得るための実験、最小可聴値を得るための実験、及び大気中の等感曲線との関連を考察するための追加実験から成り立っている。我々の研究目的が、水中と大気中の等感曲線との比較にあることから、等感曲線を得るための水中での実験も大気中とできるだけ同じ実験方法となるように心掛けた。そのため、実験方法は ISO TC43/WG1 に提案された、ロビンソン・ダッドソン曲線を再測定するための実験指針⁴⁾を準用した。それによると、(1) 実験は恒常法で行うこと、(2) 刺激音の継続時間は 1 秒を標準とすること、(3) 刺激音の周波数は ISO266 (音響測定用標準周波数) に示されている 1/3 オクターブの内から適当に選ぶこと、その他許容できる歪の範囲などについての目安

図3 刺激信号対のタイムパターン

図4 試験信号のレベル設定手順

が定められている。

2.1 等感曲線を得るための実験

(a) 刺激音

図3は提示する刺激信号のタイムパターンである。基準信号と試験信号は 0.5 秒の間隔を空けて、それぞれ 1 秒の継続時間とした。これを一対の提示信号とし、次の対とは 2 秒の間隔がある。それぞれの対での基準信号と試験信号の提示の順序はランダムとする。提示する基準信号はある一定のレベル値に固定し、試験信号の方は、予め図4に示す予備試験で基準音とほぼ等しく聴える等感レベルの概略値をまず求めた。次に、この概略レベル値を中心に ± 10 dB の区間を 2 dB 間隔に区切って 11 水準のレベルを設定し、11 水準がランダムに各 1 回出現する 11 対の音響刺激系列を 1 セッションとし、10 セッションの刺激系列を連続的に提示して正確な等感曲線レベル値を求めた。

(b) 実験場所

可聴周波数帯域で空気中の無響室に相当するものを実現することは極めて困難であり、等感曲線の聴取実験には 25×15 m のプールを用いた。プールの基礎的な音響特性として、中央線の一端に 1 kHz,

図5 (a) プール中央線上での音圧分布
(b) 20Hz - 20kHz 帯域内の背景雑音分布

142dBの音源を置いたときの中央線上の水深30cmにおける音圧分布と、特別な音源が存在しないときのプール内の背景雑音(20Hz - 20kHz内の帯域雑音)の音圧レベルの空間分布を図5(a), (b)に示す。同図から、音源の近傍では自由音場に比較的近い距離減衰特性となっており、また可聴周波数帯域内の背景雑音は約87dBであることが分かる。

(c) 聴取実験法

水中での等感曲線を得るための実験を実施するに先立って、実験手続の妥当性と被験者に実験の要領を会得させるため、実験室において、水中実験で予定している被験者2名に対して前述の刺激音を提示し、大気中での聴取実験を行った。1kHz, 70dBの音と同じ大きさに聴える各周波数毎の音圧レベルを求め、最尤推定法により処理した。その結果を、これに対応するロビンソン・ダッドソンの等感曲線と合わせて示したものが図6である。両者の間にはほぼよい一致が認められることから、本実験手続は妥当なものであると判断し、水中での等感曲線を得るための実験も同一手順で行った

実験配置を図7に示す。大気中での聴覚が正常な2名の専門潜水士(29歳, 26歳)に自給気装置を装

図6 空気中の等感曲線と実験値(予備実験)

図7 プールにおける実験概念図

着して潜水させ、音源と被験者の距離は280cm、耳の位置は水深32cmとし、1mの間隔に配置して同時に聴取させた。定在波に起因した耳の位置による聴取音圧レベルの変動をできる限り避けるため、頭の位置を固定した聴取状態で、耳の極近傍にマイクロホンを置き、音圧レベルを常時測定して、その値をにおいても全く同様である。

前述の刺激音の対を連続提示し、何れが大きく聴こえたかを押しボタンによって判断させ、判断不能は許さないとした。被験者の判断は図8に示すモニター用レベルレコーダの出力シート上に逐次記録した。設定したレベル値が各1回出現する11組の判断結果を最尤推定法で処理し、この実験を10回繰り返して平均したものを1つの周波数に対する被験者1名の判断とした。すなわち1つの周波数に対する判断を下すための刺激の組合せは11×10組である。測定周波数範囲は200Hzから4kHzまでの1/3オクターブバンドの中心周波数で、測定対象は1kHzの

図 8 データシートと実験データの採取

図 10 予測された最小可聴値と提示レベル

図 9 水槽における実験概念図

142dB と 122dB に対する等ラウドネスレベルである。

2.2 最小可聴値を得るための実験

水中音に対する最小可聴値の測定した報告が一例ある⁵⁾。これは片耳を水中に入れて聴くという方法聴取音圧レベルとした。次節の水槽による聴取実験である。今回我々が用いるプールにおいては、その暗騒音レベルが最小可聴値の予想値 (70dB 付近) よりかなり大きな値 (87dB) を示したため、実験室内に設置してある水槽 (1 × 1 × 2m; 可聴周波数帯域内暗騒音は 73dB) で極限法により行った。具体的には、水槽の上から、シュノーケルを装着して頭を約 20cm 入れた状態で提示音を聴かせた。実験の概念図を図 9 に示す。提示音は、図 10 に示すように、予め予備実験で予測された音圧の 20dB 上又は下から 1dB をステップとする上昇系列 5 回、下降系列 5 回の計 10 回判断させ、その結果を平均して最小可聴値と

図 11 水中における等感曲線と最小可聴値 (実験値)

(○ : 142dB, ● : 122dB, □ : 最小可聴値)

した。

3. 実験結果

周波数が 1kHz で音圧レベルが 142dB と 122dB の 2 種類の音について、水中における等ラウドネスレベルに対する実測値を図 11 に、また同図には最小可聴値に対する実測値も合せ示している。これらの結果から、次の事柄を読み取ることができる。周波数 1kHz、音圧レベル 142dB の音は、4kHz で約 153dB、250Hz では 132dB の音と同じ大きさに聴えており、また、周波数 1kHz、音圧レベル 122dB の音は、4kHz では約 137dB、250Hz では 108dB の音と同じ大きさに聴こえている。すなわち、何れにおいても、1kHz に対して 4kHz では 10 数 dB 大きい音

が、250Hzでは約10dB小さい音が感覚量として同じ大きさに聴こえていることが分かる。実験値のほぼ中央を結んだコンターを水中での等感曲線と呼ぶことにすると、空気中のロビンソン・ダッドソンの等感曲線とは明らかに異なっており、右上がりの特徴的傾向が明確に認められる。すなわち、水中においては、周波数が高くなるほど聴こえにくく、周波数が低いほど聴こえ易くなっていることが分かる。他方、水中における最少可聴値は1kHzで約84dBであり、また5kHzでは約101dBである。全体的には等感曲線と同様の傾向がみられ、周波数が大きくなるに従い最小可聴値も上昇している。但し、既に述べたように、かなり静かだと判断される場所に設置した水槽においても、なお約73dB程度の暗騒音が存在している。このため、1kHz以下の周波数については更に暗騒音の少ない音環境での再測定が必要であると考えられる。

4. 考 察

4.1 水中と大気中の等感曲線の関係

大気中におけるロビンソン・ダッドソンの等感曲線(図2)と今回得られた水中の等感曲線(図11)を比較すると、先にも触れたように、全体として水中の等感曲線が右上がりの傾向をもっている。このように大気中と水中では特徴的差異が明らかに認められるが、本節ではこれらの関連について考察する。大気中(0dB = 20 μ Pa)と水中(0dB = 1 μ Pa)とは異なった基準で音圧レベルを表現していること、音場の音響インピーダンスが異なること、音場のエネルギーが内耳に至るまでの伝達経路が異なること等から水中と大気中の等感曲線の関係を明らかにするためには、少なくとも以下の2つの関係を明らかにしておくことが必要があると考え、追加実験を行った。

- (1) 周波数を種々変更したとき、水中の音圧レベル(一定値)と同じ大きさに聴える大気中の音圧レベルの関係。
- (2) 周波数を一定としたとき、水中の音圧レベルと同じ大きさに聴える空気中の音圧レベルの関係。

追加実験(1)では、各周波数において水中の音圧レベル142dBの純音が、同じ周波数の大気中のいかなる音圧レベルの音と同じ大きさに聴こえるかを考察した。水中の等感曲線を求めるための被験者とは異なる正常な聴覚を持つ22歳の男性2名を被験者とし、室内に設置した1×1×2mの水槽で自己調整法で行った。実験状況は図9と同じである。すなわち、

図12 水中音と同じ大きさに聴える大気中の音圧レベル(周波数依存性)

図13 水中における音響伝達経路の単純化モデル

水槽の上から頭を約20cm水中に入れ、いわゆる耳抜き(中耳と外耳の圧力を平衡させる行為)をして水中音(142dB)を聴いた後、頭を空気中に出して大気中の音を聴き、水中音と同じ大きさになるように自己調整して、そのときの音圧レベル値を測定した。この操作を10回繰り返して平均値を求め被験者1名の測定値とした結果が図12である。実験結果は、1kHz、142dBの水中の音は大気中では約63dBの音と同じ大きさに聴えるが、2kHz、142dBの水中の音は大気中では約57dBの音と同じ大きさにしか聴えないことを示している。

水中における聴覚の内耳へ至る音響伝達経路のモデルを、図13に示すように(水-外耳道の空気-鼓膜)と単純化すると、(水-大気)の垂直入射に対するエネルギーの透過損失は約30dBである⁶⁾。また、大気中と水中におけるの音圧レベルの基準値はそれぞれ20 μ Pa (10^{-12} W/m²)及び1 μ Pa ($0.64 \times$

10^{-18} W/m^2) であるから、同じエネルギーに対して、水中での音圧レベル値から約62dB減じた値が大気中での音圧レベル値に相当する。従って、水中で表現されたエネルギー (dB) から約92dB減じた値が、大気中で表現されたエネルギー (dB) として外耳道の空気に伝わるものと考えられる。しかし、実験結果では、水中の1kHz, 142dBの音は79dB減じた63dBの大気中の音と同じ大きさに聴こえたことを示しており、この13dB程度の差 (周波数によって異なる) は音波が水中から内耳へ至る音響伝達経路の特性 (例えば骨伝導による利得や外耳道の共振特性の変化) に起因するものと思われる。更に図12は、水中では周波数が高くなるほど聴こえにくく、周波数が低い領域では聴こえ易いことを示している。同図から、多少のバラツキが認められるが、水中の音圧値142dBに対しては、大気中でこれと同じ大きさに聴える音圧レベル値 A [dB] と周波数 f [Hz] との間には、

$$A = -24.6 \log(f/1000) + 63.0 \quad (1)$$

なる回帰関係にあることが推測される (図中の実線)。

追加実験 (1) から、水中において音圧レベル142dBの音は基準値の換算と、透過損失を考慮して92dB減じたレベル値50dBより13dB程度大きい63dBの大気中の音と同じ大きさに聴えることが明らかになった。

追加実験 (2) の目的は、上記の値13dBが他の音圧レベルに対してどの程度不変に保たれるかを考察することである。実験方法は (1) の実験と同じく、水槽において各レベルの水中の音と同じ大きさに聴える大気中の音圧レベル値を自己調整法で求めた。実験室の大気中の暗騒音が約50dB程度あること及び水中スピーカの特性を考慮して水中の音圧レベルが132dBから159dBまでの5点について行った。被験者2名について各点10回の判断結果を平均して得た値を図14に示す。同図から同じ大きさに聴える水中音圧レベル W [dB] と大気中での音圧レベル A [dB] の関係は、大略次の直線で表すことができる。

$$W = A + 79.0 \quad (2)$$

この事実は、あるレベルの水中の音と同じ大きさに聴える空気中の音のレベル差は、水中音の音圧レベルには依存しないことを示している。また、回帰直線を延長すると大気中の最小可聴値である4dBは水

図14 水中音と同じ大きさに聴える大気中の音圧レベル (レベル依存性)

図15 修正されたロビンソン・グッドソンの等感曲線 (水中における等感曲線) と実験値

中の83dBに相当し、今回得られた水中の最小可聴値84dBと大略一致することが示される。この事実は重要な意味をもっているものと思われる。

以上2つの予備実験で得られた結果を基に、水中の等感曲線と大気中の等感曲線の関係について考察する。水中から内耳に至る音の伝達が水と外耳道の透過損失のみでは説明できないこと、外耳道のモデルも正確に設定できていない現在、音響伝達に関する内的物理メカニズムに立脚した考察は今後の検討課題として残し、本論文では実験結果からの外見的手法によって検討を加えることにする。1kHz, 142dBの水中の音圧をパラメータにしたとき、これと同じ大きさに聴える大気中の音圧レベルと周波数には (1) 式の関係があり、しかも、水中と大気中での音圧レベルの関係は、(2) 式の直線関係で与えら

れることが分かった。従って、(1) 式の回帰直線の傾きが 0 になるように、ロビンソン・ダッドソンの等感曲線を回転し、音圧レベルを (2) 式の結果を用いて大気中の音圧レベルに 79dB 加えると、水中における等感曲線が作図できる。これが図 15 の実線である。同図には本実験で得られた値を合せ示してある。両者の間には極めて良い一致が認められ、このことは本節での検討結果の妥当性の一端を裏付けているものと思われる。

4. まとめ

水中での人の聴感特性を考慮した音の大きさを計測・評価するための基礎的な考察として、まず等感曲線と最小可聴値を実験的に求めた。これらの結果と既に知られた大気中でのロビンソン・ダッドソンの等感曲線との関連について考察した。その結果、次のことが明らかになった。(1) 水中では周波数が高くなるほど聴こえにくく、周波数が低くなると聴こえ易くなる。また、音圧をパラメータとしたとき同じ大きさに聴える大気中の音圧レベル A [dB] と周波数 f [Hz] の間には、単純な回帰関係にある。(2) あるレベル値を示す水中の音と同じ大きさに聴える大気中の音のレベル差は、水中音のレベル値には依存しない。この関係を用いて大気中の等感曲線を補正すると水中の実験値とかなり良い一致が見られた。本研究は未だ水中における聴覚の研究の初期的な段階にあり、従って今後検討すべき問題点も数多く残されている。その主なものを列挙すると次のようになる。

- (1) 聴覚は一般に個人差が大きいので、実験データにはかなりばらつきがある。同一実験を数多く繰り返して、データを蓄積して精度を上げること。
- (4) 水圧 (水深) によって等感曲線がどのように変化するかを調べる。
- (5) 水中と大気中では、異なる周波数特性をもつ原因を調べる。
- (6) 水-外耳道あるいは骨伝導など伝達経路の特定と損失との関係を明らかにすること。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、多大な援助を戴いた海上保安大学校訓練部の方々をはじめ貴重な助言と文献を御教示戴いた鎌田弘志氏 (沖電気株式会社)、日本音響学会研究発表会^{7) 8)}並びに海洋音響学会研究発表会⁹⁾において有益な討論をして戴いた関係各位に深謝の意を表する。

文 献

- 1) 境久雄他, “聴覚と音声,” (コロナ社, 東京, 1978)。
- 2) D. W. Robinson and R. S. Dadson, “Threshold of Hearing and Equal-Loudness Relations for Pure Tones, and the Loudness Function,” J. A. S. A., 29, pp. 1284 - 1288 (1957)。
- 3) ISO Recommendation R226 - 1961。
- 4) 鈴木陽一, 曾根敏夫, 竹島久志, 熊谷正純, 三浦甫, “等ラウドネス曲線の見直しについて,” 日本音響学会誌 46 (5), 420 - 426 (1990)。
- 5) 鎌田弘志, “水中音に対する最小可聴限の測定,” 日本音響学会講演論文集, 725 - 726 (1982. 10)。
- 6) 実吉純一他, “超音波技術便覧,” p.18 (日刊工業新聞社, 東京, 1978)。
- 7) 老松建成, 倉本和興, 山口静馬, 桑原信也, 増田克樹, 濱平清志, “水中における聴覚の等感曲線について,” 日本音響学会講演論文集, 1042 - 1044 (1992.3)。
- 8) 老松建成, 倉本和興, 山口静馬, 桑原信也, 濱平清志, 筒井直樹, “水中における聴感特性 (その2),” 日本音響学会講演論文集, 1042 - 1044 (1993.3)。
- 9) 老松建成, 倉本和興, 山口静馬, 桑原信也, “水中における聴覚の等感曲線-ロビンソン・ダッドソン曲線との比較-,” 海洋音響学会講演論文集, 87 - 90 (1993.5)。