研究 (30周年記念論文)

水中聴覚における純音のマスキング効果*

桑原 信也, 老松 建成, 倉本 和興**

(海上保安大学校)
(kuwa@jcg.ac.jp)

山口 静馬***

(山口大学工学部)

(2002年12月23日受付け)

Abstract

Many people now enjoy marine sports such as skin diving and scuba diving in shallow water area. Acoustic signals through an underwater loudspeaker can be used as a simple and effective way of preventing diving accident. At this time, it is fundamentally important to research in advance the masking of objective signals by ambient noises. In our research, measurements of masking effects of auditory ambient noise provide data from which the excitation pattern of the masking stimulus is derived in air and under water, using a pure tone masker and a band-limited noise masker centered at 1200 Hz and 2500 Hz. The present study casts further light on underwater masking results by comparing masking effects in air. The underwater results of masking measured are almost the same as the results in air. Therefore, it can be considered that under water masking effects are obtained on referring to usual experimental masking results in air.

分類: その他 (観測, 計測等)

キーワード: 水中聴覚, マスキング, 水中雑音

1. はしがき

これまで筆者等は, ダイバーに対する安全確保などのため, 音響信号を水中スピーカで直接水中に放射し, ダイバーに情報伝達することを目的として, ヒトの水中における聴覚の基本的な特性について調べてきた¹⁻²⁾。

情報の伝達をうける必要のあるダイバーが実際に潜水する海域においては, 様々な騒音が背景雑音として存在する。船舶雑音など比較的大きな背

景雑音が存在する場合には, これらの雑音によるマスキングは通信の了解性に直接関係することから, 水中聴覚のマスキング効果や臨界帯域についてあらかじめ考察しておくことは重要な課題である。

本研究では, 水中聴覚における純音及び狭帯域雑音による純音のマスキング効果を水槽実験により実測する。この実測結果を, 空気中における実測結果と比較し, 両者の違いについて考察する。

2. 実験の概要

マスキングとは, 一つの刺激音が他の刺激音によってかき消されるため, 聴取対象となる刺激音の聴取能力が低下する現象をいい, つぎのマスキング量によって定量的に表される。マスキング量を, マスクする音 (マスクー) が存在するときの聴取信号音 (マスクされる音) の最小可聴限とマ

* On the underwater masking pattern of pure tones.

** Shin'ya KUWAHARA, Kensei OIMATSU,
Kazuoki KURAMOTO (Japan Coast Guard
Academy)

*** Shizuma YAMAGUCHI (Yamaguchi University)

スカーがない静寂時の最小可聴限との音圧レベル差で表す。これまで空気中における、純音による純音のマスキングについては Wegel と Lane³⁾により、さらに、純音や狭帯域白色雑音による純音のマスキングについては Egan と Hake⁴⁻⁵⁾により詳細に研究されている。しかしながら、水中におけるマスキングについての研究はこれまでなされていないことから、Wegel らや Egan らの実験手法を参考にして、できるだけ同一の手順で水中における聴取実験を行った。本実験においては、マスカーとして純音と狭帯域雑音を採用し、マスクされる音には純音を採用した。

2.1 実験方法

被験者は空気中の聴覚が正常な男性2名である。水中音の聴取には、実験室内に設置した水槽（1 m × 2 m × 1 m）を使用した。被験者は水槽の上部から頭全体を水中に入れ、水中スピーカからの提示音を聴取する。マスカー音は、パワーアンプと水中スピーカを用いて、一定の信号レベルで水中に放射する（狭帯域白色雑音の場合は、ハイパス・フィルタとローパス・フィルタも使用する）。マスクされる信号音はトーンバースト状の純音（正弦波）であり、アッテネータと別のパワーアンプ・水中スピーカを用いて、水中に放射する。聴取音の信号レベルは被験者の耳の近くに配置した2本の水中マイク・水中音圧計（沖電気：SW1020）とレベルレコーダ（リオン：LR04）を使用して計測した。信号レベルはレベルレコーダの記録紙に、記録ペンを用いて連続的に記録させる。マスキングされたときの最小可聴レベル値は、マスカー音を停止させて、レベルレコーダの記録から読取る。一方、空気中におけるマスキング量計測の実験は無響室において、水中における実験と同様に、オーディオ用スピーカ、精密騒音計（リオン：NL14）とレベルレコーダを使用して行った。

2.2 水中と空気中の音圧レベルの関係

水中における聴覚が空気中における聴覚と大きく異なること、また通常用いる音の大きさの物理的基準量が異なることから、水中と空気中における音の大きさの比較を行った。水中の音圧レベル L_w [dB re 1 μ Pa；水中の音圧レベルを dBW と表記する] を適宜に設定し、これと同じ大きさに聞える空気中の音圧レベル L_a [dB re 20 μ Pa；

空気中の音圧レベルを dB 与え表記する] を直接聴き比べることにより測定した。被験者Kについて、以下の関係が得られた：

$$1200 \text{ Hz において } L_w = L_a + 88 \quad (1)$$

$$2500 \text{ Hz において } L_w = L_a + 94 \quad (2)$$

この関係は、これまでの研究¹⁾により明らかになったように、水中の音圧レベルと空気中のそれとが傾き1の線形関係にあることに基づいている。

2.3 マスカーとしての狭帯域雑音の設定

狭帯域雑音のマスカーとして、白色雑音発生器からの出力信号をハイパス・フィルタとローパス・フィルタにより帯域制限した白色雑音を採用する。具体的には、中心周波数 1200 Hz（帯域幅 250 Hz）と中心周波数 2500 Hz（帯域幅 450 Hz）に設定した信号を水中スピーカに供給した。ただし、水中スピーカの周波数特性は必ずしもすべての帯域においてフラットではないため、水中で実測した水中音のスペクトルは帯域が少し広がっている。このため、水中と空気中の帯域雑音を FFT アナライザで実測・比較しながら、空気中のスピーカへ供給する白色雑音はハイパス・フィルタとローパス・フィルタの遮断周波数を適宜に調整して、両者のスペクトル形状ができる限り同じになるように設定した。

また、純音によるマスカー信号の周波数も同じく 1200 Hz と 2500 Hz に設定した。

3. 実験結果と考察

3.1 空気中におけるマスキング量

Fig. 1 は、無響室における 1200 Hz、62 dB 純音のマスカーに対する、被験者Kについてのマスキングオーゾグラムである。縦軸はマスキング量、横軸は周波数を示している。マスキング量は、マスカーが存在するときの聴取信号音の最小可聴限と静寂時の最小可聴限のレベル差から求まる。比較のために、Wegel と Lane³⁾の研究結果を（▲）で示す。1200 Hz、62 dB 与えのマスカーに対し、最大のマスキング量は 1200 Hz 付近で約 45 dB である。また、高い周波数の領域では比較的広い範囲において信号音は大きくマスキングを受けているが、低い周波数の領域ではあまりマスキングを受けていない。1200 Hz と 2400 Hz

Fig. 1 The curve is a masking audiogram in air for subject: K. Masking stimulus is a pure tone of 1200 Hz. Solid triangles ($\blacktriangle$) are data by Wegel and Lane³⁾.

Fig. 2 The curve is a masking audiogram in air for subject: K. Masking stimulus is a band of noise centered at 1200 Hz.

において、マスカーと信号音との“うなり”を生じるため、マスキング量が減少していることがわかる。この実験結果は、Wegel と Lane の研究結果と比較的に良く一致している。

Fig.2 は、無響室における狭帯域雑音のマスカー（中心周波数 1200 Hz、帯域幅 250 Hz、62 dBF）に対する、被験者 K についてのマスキングオーディオグラムである。この狭帯域雑音のマスカーによる最大のマスキング量は 1200 Hz 付近で約 55 dB である。純音によるマスキングと異なり、“うなり”によるマスキング量の減少は生じていない。また、純音によるマスキングに比べ、マスキング量が 10 dB 程度大きくなっている。

これらの測定結果は Egan ら⁴⁻⁵⁾ によりなされた報告とほぼ同じである。

3.2 水中におけるマスキング量

Fig.3 は、被験者 K についての、マスカーが 1200 Hz の純音による、水中における純音のマスキングオーディオグラムである（実線はマスカーが 150 dBW、点線は 130 dBW）。Fig.3 の実線と点線を比較すると、マスキング量の差は約 20 dB となっていて、マスカーのレベル差が 20 dB であることから、空気中の測定結果と一致している⁴⁻⁵⁾。

1200 Hz の純音によるマスキングの場合、水中の音圧レベルと空気中の音圧レベルの関係式 (1) から、水中における 150 dBW のマスカーレベルの音の大きさは、空気中の 62 dBF のマスカーレベルに相当する。この同じマスカーレベルによる空気中と水中のマスキング効果を比較する (Fig. 1 の鎖線を Fig. 3 中にも示す)。Fig. 3 の鎖線（空気中、マスカーレベル 62 dBF）と実線（水中、マスカーレベル 150 dBW）は、同じ大きさに聴えるマスカーレベルに対するマスキング量を示している。両者を比較すると、1200 Hz 付近において水中のマスキング量が 5 dB 程度上昇しており高い周波数においても比較的大きなマスキングを受けているが、オーディオグラムの形状はほぼ同一である。空気中においては、“うなり”によるマスキング量の減少が認められたが、水中においてはこの現象は明確には認められなかった。

Fig. 4 は、中心周波数 2500 Hz の純音マスカーに対する空気中と水中のマスキングの測定結果である。Fig.4 の実線（150 dBW）と鎖線（56 dBF）

Fig. 3 The curves are underwater masking audiograms for subject: K. The parameters for each curve are sound presser levels of the masking pure tone of 1200 Hz (150 dBW, 130 dBW: underwater, dBW re $1 \mu\text{Pa}$; 62 dBF: in air, dBW re $20 \mu\text{Pa}$).

Fig. 4 The curves are masking audiograms for subject K. The parameters for each curve are sound pressure levels of a masking pure tone of 2500 Hz (150, 130 dBW: underwater; 56 dBF: in air).

は水中と空気中で同じ大きさに聴こえるマスカーレベルに対するマスキング量を示している。両者を比較すると、2500 Hz 付近において空気中のマスキング量が 4 dB 程度上昇しているが、オーディオグラムの形状はほぼ同一である。

Fig. 5 は、被験者 K についての、狭帯域雑音 (中心周波数 1200 Hz, 帯域幅 250 Hz) のマスカーによる、水中における純音のマスキングオーディオグラムである (実線はマスカーが 150 dBW, 点線は 130 dBW)。実線と点線を比較すると、マス

Fig. 5 The curves are underwater masking audiograms for subject K. The parameters for each curve are underwater sound pressure levels of a masking band noise centered at 1200 Hz (150, 130 dBW: underwater, and 62 dBF: in air).

キング量の差は約 20 dB となっていて、マスカーのレベル差が 20 dB であることから、純音のマスキナーの場合および空気中の測定結果と一致している。Fig. 2 の鎖線と Fig. 5 の実線は、空気中と水中で同じ大きさに聴えるマスカーレベルに対するマスキング量を示している (狭帯域雑音の中心周波数は 1200 Hz)。水中におけるマスキング量がわずかに増加しているが、同様な形状を示している。

また、Fig. 6 は、中心周波数 2500 Hz, 帯域幅 450 Hz の狭帯域雑音に対する空気中と水中のマスキングの測定結果である。空気中と水中を比較すると、ほぼ同様なオーディオグラムの形状を示している。

別の被験者についても、同様な測定実験を行った。被験者の違いによる差異はわずかに認められるものの、ほぼ同様なマスキング結果が得られた。

マスキングに関する実験から、マスクする音より高い周波数の信号音は広い周波数範囲でマスクされやすく、低い周波数範囲ではマスクされにくい結果となっている。この現象は、内耳の基底膜の振動パターンに基づくモデル化により説明される⁵⁾。一方、空気中では外耳 - 鼓膜 - 耳小骨を経て内耳に伝わる気導が主であり、水中では頭蓋から直接内耳に伝わる骨導が主となっていて、空気中と水中では伝音特性が異なっている²⁾。しかし、気導と骨導の伝音メカニズムの違いによるマスキング効果への影響は、マスキング量をマスク時と静

Fig. 6 The curves are masking audiograms for subject K. The parameters for each curve are sound pressure levels of a masking band noise centered at 2500 Hz (150, 130 dBW: underwater, and 56 dBF: in air).

寂時の最小可聴値のレベル差に基づいて求められていることから伝音特性の違いは打消され、ほとんど無いものと考えられる。水中における測定値のばらつきの大きさを考慮すると、水中におけるマスキング効果は空気中のそれと大きな差異はないと考えられる。

4. あとがき

潜水中のダイバーに対し直接水中スピーカで音声信号を放射して情報伝達するシステムを構築する場合、周囲雑音によるマスキング効果は情報の了解度に大きな影響を及すが、これまで水中のマスキング効果を定量的に考察した例は見当らなかった。その理由は、水中における聴取実験では、周囲雑音（暗騒音）を遮断できる空気中の無響室に相当する施設を実現することは困難であり、加えて、被験者の呼吸を確保する装備や水中作業に対する熟練度あるいは測定器・測定環境といった実験条件などが空気中とは比較にならないほど難しいことが考えられる。このため、本研究においては、これまで良く知られた空気中のマスキング効果評価量と水中のマスキング評価量との関係が明らかになれば、水中におけるマスキング評価量を実験条件を整えることが困難な水中聴取実験を実行することなく推定できるのではないかという立場から、空気中と水中のマスキング量をできるだけ同一の実験条件で、帯域制限された白色雑音と純音をマスキャーに採用して、純音の信号音に対するマスキング量を測定した。その結果、水中と空気中のマスキング量は同一のマスキャーに対して

ほぼ同一のマスキング特性が得られ、実験誤差を考慮すると両者の間に有意差は見当らなかった。このことから、今後水中に直接音声を放射して情報を伝達するシステムを構築する場合、マスキング効果の評価量はこれまで空気中で得られた評価量を準用することが可能であると考えられる。

謝辞

本実験に協力いただいた広島県西部工業技術センターおよび同センターの主任研究員吉野信行氏・長谷川孝治氏に深謝する。

参考文献

- 1) 老松建成, 倉本和興, 桑原信也, 山口静馬, “水中における聴覚の等感曲線,” 海洋音響学会誌, **21**(2), 103-109 (1994).
- 2) 老松建成, 倉本和興, 桑原信也, 山口静馬, “水中における聴覚の伝達メカニズムに関する実験的考察,” 海洋音響学会誌, **23**(2), 108-114 (1996).
- 3) R. L. Wegel and C. E. Lane, “The Auditory Masking of One Pure Tone by Another and Its Probable Relation to the Dynamics of the Inner Ear,” *Phys. Rev.*, **23**, 266-285 (1924).
- 4) J. P. Egan and W. Hake, “On the Masking Pattern of a Simple Auditory Stimulus,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **22**(5), 622-630 (1950).
- 5) 例えば, 境久雄, 中山剛, 聴覚と音響心理 (コロナ社, 東京, 1978), pp.107-113.