研究ノート

水中伝搬音に対する壁体の透過減衰特性*

倉本 和興**

(海上保安大学校)

山口 静馬***

(山口大学工学部)

老松 建成・桑原 信也**

(海上保安大学校)

1. まえがき

特別な通信装置を携帯していないごく一般的な潜水者に対する最も基本的かつ単純な事故防止対策の一つは、その潜水者に対して適当な可聴音響信号を直接伝達することである。この場合、海中における音環境はもちろん、潜水者へ向けて海面付近から放射された可聴音響信号が水中においてどのように伝搬減衰されていくかを予め調べておくことは基本的に重要となる。以上のような観点から、海中における通常の音環境の状態を実験的に調査したり¹⁾、海中音場が自由音場に近い場合や音響伝搬経路の途中に遮音壁が存在する場合の減衰特性について考察してきた^{2), 3)}。

周知のように、壁体の大気中における透過損失については、これまで多くの人々によって考察され、その成果も十分蓄積されている^{4), 5)}。しかし水中における壁体の透過損失についての考察は幾つか見受けられるが^{6), 7)}、例えば、潜水者に対して、直接水中スピーカで音声を伝達するに必要なパワーを求めるための透過減衰値を見積るといった、実用的な観点からの考察は少ないように思われる。そこで本報告では、水中における壁体の透過減衰特性を、可聴周波数領域を中心に詳しく調べるため、水槽による詳細な実験を行っている。具体的には、最も基本的な壁体である一重壁を取り上げ、従来のデータ整理の仕方と同様、壁体の面密度をパラメータとして透過

損失と周波数との関係でまず検討している。しかしこの表現方法では、大気中での場合とは異なり、壁体の面密度の他に壁体の位置する水深・水温・水中の気泡の状態などにも依存することから^{8), 9)}、それぞれのパラメータごとに透過損失特性を描かねばならぬことになる。この点を避ける一方法として、上記の各パラメータに依存しない普遍的な透過減衰曲線を提案している。水中における一重壁の透過損失は、ほぼ可聴周波数領域の範囲内においては、おおむね大気中でのいわゆる質量則に近い特性を示すことが明らかとなった。

2. 水槽実験の概要

水槽中における音源・壁体・受音点の位置関係および測定装置のブロックダイアグラムを図1に示す。具体的な実験方法は次の通りである。

壁体：厚さの異なる3種類の鉄板および1種類のアルミ板を用いた。厚さと面密度を表1に示す。ただし、表中の面密度は水中における値である。

放射音響信号：正弦波信号（周波数は4 kHz～140 kHzの範囲で可変）をパルス変調したものをを用いた。ここに、パルス幅は各正弦波信号の5周期分程度に設定した。

音源・受音点の位置：音源（S）と2つの受音点（P，R）は全て水面から20 cmの位置に固定した。受音点Rは壁体が存在しない場合の参照波を得るために設けたものである。

2つの受音点における音響信号は、水中音圧計およびユニバーサルフィルターを通してオシロスコープ上で計測した。

* Sound insulation characteristics of single wall for underwater sound propagation.

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

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

図1 透過減衰値の測定実験概要

表1 透過損失の測定に利用された一重壁

	材質	厚さ (mm)	面密度 (kg/m^2)
No. 1	鉄	18.91	130.1
No. 2	鉄	6.00	39.97
No. 3	鉄	2.11	14.23
No. 4	アルミ	3.02	5.07

3. 実験結果及び考察

3.1 透過減衰値に関する実測結果

図2は、2つの受音点PとRで同時測定された波形の一例として、周波数が100kHzの場合を示したものである。透過波においては、直接波が観測された後に水槽壁面による反射その他の原因による複雑な波形が現れているが、本実験では直接波のみを用いて透過減衰値を算定した。

各壁体に対する透過減衰特性を、従来と同様の表現方法に従い、周波数を横軸にとって描いたものが図3である。図中の実線は、建築音響分野で良く知られている質量則^{4), 5)}：

図2 受音点における観測波形
(a) 参照波 (b) 透過波

図3 各種一重壁に対する透過損失の測定値

$$TL = 10 \log_{10} \{ 1 + (\omega m \cos \theta / 2 \rho c)^2 \} \quad (1)$$

ρc : 媒質の音響抵抗 ω : 角周波数

m : 壁体の面密度 θ : 入射角

から計算された透過減衰曲線である。ただし、面密度には水中におけるものを採用し、垂直入射を仮定している。また、音速 c の値は水温のみを考慮した近似式⁹⁾：

$$c = 1448.96 + 4.591 t \quad (t: \text{水温 } [^{\circ}\text{C}]) \quad (2)$$

を用いて求めた。図3に見られるように、本実験で得られた透過損失の値は、面密度が小さなきは(1)式よりも若干大きめに現れてはいるが、大略的な傾向は(1)式では捉えられている。一般に、有限の厚みを持った平板には屈曲振動による非対称モード (A_1 波) が現れ、透過損失の低下が考えられる (コインシデンス効果)^{4), 5), 7)}。本実験で使用した壁体のコインシデンス限界周波数は、最も

厚い壁体(鉄, 18.91 mm)で, $\theta = \pi/2$ の時, 13 kHz となるが, 入射波が壁体に対してほぼ垂直に入射していることを考慮すると, 実際に現れる遮断周波数はもっと高周波数領域にあると考えられる。また, 本実験から得られたデータに関する限り, コインシデンス効果などによる透過損失低下の現象は見られない。

3.2 普遍的な透過減衰特性表現

(1)式からも明らかなように, 実海中における透過減衰値は, 壁体の面密度はもちろんのこと壁体の位置する水深, 水温, 海水に含まれる気泡の状態など様々な要因に依存している。従って, 前節で示した図示方法は, 透過損失の周波数特性を調べるには直接的で便利な反面, 上記の各要因ごとに描く必要がある。これらの諸要因に一々影響されず, 各パラメータの値を事前に与えれば壁体の透過減衰値を推定できる普遍的特性曲線を求めておくことは, 特に海洋音響分野においては, 工学的に意味あるものと思われる。そこで一つの方法として, 上記の各物理パラメータを全て含んだ新たな変数 T を次のように導入する。

$$T = \omega m \cos \theta / 2 \rho c \quad (3)$$

図3の全てのデータを, T を横軸としてプロットし直したものが図4である。図中の実線は(1)式による普遍的特性曲線であり, 本実測データの傾向はこの曲線で大略説明されることが分かる。すなわち, 可聴周波数の範囲に限るのであれば, 水中における一重壁の透過減衰特性はおおむね質量則で説明される。

図4 一重壁に対する普遍的な質量則特性曲線と実測値

4. まとめ

可聴周波数領域を中心に, 水中伝搬音に対する一重壁

の透過減衰特性を実験的に考察した後, 普遍的な透過減衰特性表現方法を提案した。その結果, 一重壁の透過減衰値は建築音響分野におけるいわゆる“質量則”に従っていることが分かった。

今後に残された問題点を列挙すれば次の通りである。

(1) 本実験で得られた傾向が実海域においてもそのまま保持されるかどうかを実測データによって確認すること。

(2) 幾つかの材質から成る複合的構造をもつ遮音壁体に対して同様の考察を行うこと。

謝 辞

本実験の実施に当たって多大の援助を戴いた小林正佳, 椎名健一の2氏に感謝の意を表する。また, 有益な助言をいただいたり貴重な文献を送付していただいた防衛大学校菊池年晃教授をはじめ, 種々の建設的な御討論を戴いた日本音響学会研究発表会¹⁰⁾における関係各位に深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 老松建成, 桑原信也, 山口静馬, 倉本和興, “極浅海域での海中雑音に関する実験的考察”, 海洋音響学会誌 17, 37-39 (1990).
- 2) K. Oimatsu, S. Yamaguchi, S. Kuwahara and K. Kuramoto, “An experimental consideration of underwater random noise with audio frequency bandwidth in a shallow water area”, Acoustics Letters, 13, 157-161 (1990).
- 3) 山口静馬, 倉本和興, 桑原信也, 老松建成, “水中伝搬音に対する障壁の回折減衰特性”, 海洋音響学会誌 18, 209-212 (1990).
- 4) 前川純一, 建築音響 (共立出版, 東京, 1976), p. 105.
- 5) 木村 翔, 建築音響と騒音防止計画 (彰国社, 東京, 1977), p. 77.
- 6) 大林一洋, 菊池年晃, 長谷川秋雄, 高橋純夫, 中西俊之, “水中遮音材の圧力特性の測定”, 海洋音響学会平成3年度研究発表会講演論文集, 9-12 (1991. 5).
- 7) W. Madigosky and R. Fiorito, “Modal resonance analysis of acoustic transmission and reflection losses in viscoelastic plates”, J. Acoust. Soc. Am. 65, 1105-1115 (1979).
- 8) 例えば, R. J. Urick, Principles of underwater sound (McGraw-Hill, New York, 1967).
- 9) 海洋音響研究会, 海洋音響—基礎と応用— (海洋音響研究会, 東京, 1984), p. 53.
- 10) 倉本和興, 山口静馬, 老松建成, 桑原信也, “水中伝搬音に対する障壁の透過減衰特性”, 日本音響学会平成4年度秋季研究発表会講演論文集 1119-1120 (1992.10).