

水中音の減衰*

中村重久**

A note on sound attenuation in sea water*

Shigehisa NAKAMURA**

Abstract: Sound attenuation due to sound absorption in sea water is discussed. A remarkable concern is contributions of magnesium sulphate $MgSO_4$ and of boric acid $B(OH)_3$ to the attenuation rates due to the relaxation processes even for a sound as a plane wave in sea water after the diagram introduced by CLAY and MEDWIN (1977). Attenuation rate of sound propagating as a spherical wave is also considered as a function of radial distance from a source as well as that for case of a plane wave in order to clarify difference of a sound generated by a nuclear bomb under the sea like a point source and a sound as a big tsunami precursor of boom out of a fairly large source area. The previous studies for an acoustic tsunami precursor by NAKAMURA (1986a, b, c) can be understood as some special cases of cylindrical propagation of sound from the epicenter of an earthquake at the sea bed.

1. 緒言

水中を音波が伝わる時、距離とともに音圧は小さくなっていく。これを一般に水中音波の減衰として検討されている。最近、中村(1986a, b, c)は、津波前駆異常音との関連で海底を音源とする場合を論じている。水中音波の減衰は、このような場合にも当然考えられ、それがどのようなパターンを示すかについて可能な限り明らかにする必要がある。本文では、まず、平面波としての海中の音波の減衰特性の要点を総括し、つぎに、淡水中の音波と海水中の音波との減衰特性について、これまでの研究で明らかになったところをとりまとめる。また、海中での核爆発や爆薬などのように小スケールの音源に対する至近距離の音波の減衰と、海底地震のように大スケールの音源に対する音波の減衰との間の現象論的(感覚的)相違を理論的根拠に立脚して明らかにする。さらに、歴史の記述に明記されている巨大地震時の津波前駆異常音(中村, 1986b)の物理的根拠についても説明を加える。

2. 平面波としてみた海中音波の減衰

水中音波は伝播距離とともに音圧は小さくなっていく。このような海中の音波については、たとえば、CLAY and MEDWIN (1977)の著書に記されているところをまづまでもなく、減衰することが知られている。

一般に、音波が平面波として均質な媒質中を伝わる時、音圧の伝播距離に対する減少は、エネルギー損失(あるいは吸収)によるものと考えられ、

$$\frac{dP}{dx} = -(\alpha_e) \cdot P \quad (1)$$

と書ける。ここでは音波の散乱については考えないことにする。ここに、 α_e は定数である。上の(1)を x について積分し、 $x=0$ における音圧を P_i とし、 x における音圧を P とすると、

$$P = P_i \exp(-\alpha_e \cdot x) \quad (2)$$

ここに、 α_e は、 e を底とする指数の一部であり、音圧減衰係数である。実用的には、平面波の減衰を表す式(2)を変形して、次式のようにデシベル(dB)単位の表示法をとることが多い(注: 海洋学で用いるデシベル dbの記号と混同しないよう注意が必要である)。すなわち、

$$\begin{aligned} \text{dB loss} &= 20 \log_{10} \frac{P_i}{P} = (\alpha_e) \cdot x \cdot (20 \log_{10} e) \\ &= 8.686 (\alpha_e) \cdot x. \end{aligned} \quad (3)$$

* 1986年6月16日受理 Received June 16, 1986

** 京都大学防災研究所附属白浜海象観測所,
〒649-22 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田畑崎
Shirahama Oceanographic Observatory, DPRI,
Kyoto University, Katada-Hatasaki, Shirahama,
Wakayama, 649-22 Japan

実際には、10を指数の底として表わした音圧減衰係数 α を用いて、(3) のかわりに、実用式

$$\text{dB loss} = \alpha \cdot x \quad (4)$$

を用いる。

3. 海中音波の減衰の周波数特性

前節に示した減衰係数 α の値は、音の周波数 f (ヘルツ単位) によって異なる。淡水表層の水温が 14°C であるとき、海水の動粘性を考慮にいれた場合は、CLAY and MEDWIN (1977) によれば、Fig. 1 の直線 F のようになる。

ところで、これまでの研究成果によれば、海水中では、淡水中の α に加えて硫酸マグネシウム MgSO_4 の成分による効果 (Fig. 1 の破線 M) およびホウ酸 $\text{B}(\text{OH})_3$ の

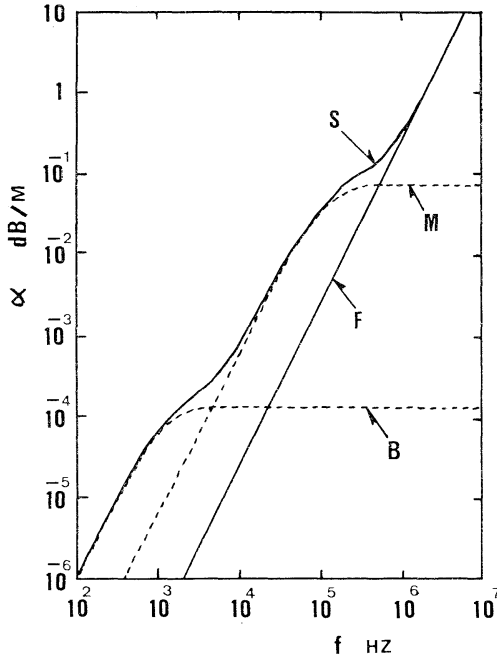


Fig. 1. Attenuation rate α (dB/m) due to absorption in fresh- and sea-waters as functions of frequency f (Hz) at the sea level for 14°C . B (dashed line), contribution of boric acid $\text{B}(\text{OH})_3$ due to relaxation process in sea water; F (straight line), fresh water; M (dashed line), contribution of magnesium sulphate MgSO_4 due to relaxation process in sea water; S (curve of full line), sea water of salinity 35‰ under the water temperature of 14°C at the sea level as a resultant of the contributions due to the relaxation process of MgSO_4 and $\text{B}(\text{OH})_3$. (after CLAY and MEDWIN, 1977).

成分による効果 (Fig. 1 の破線 B) もあわせて考慮にいなければならない。

MgSO_4 分子による音波の減衰は、第2次世界大戦中に、20 KHz を中心とした米国の軍用 SONAR の使用中に明らかになった。その減衰は淡水中よりも海水中で約25倍も大きい (詳細については、CLAY and MEDWIN, 1977 のうち、とくに p. 419-421)。当時、海中音波のこのように異常に大きな減衰率は塩化ナトリウムによるものと解釈されていた。LENARD *et al.* (1949) は、各種塩の水溶液を満した球型の器を用いて、その球体中の液の運動の周波数特性を調べ、とくに、海水中の MgSO_4 が音波の減衰率を異常に大きなものとする原因となっていることをつきとめた。その後、多くの実験的研究が重ねられ、現在までに、 MgSO_4 の効果による減衰率の変化を、水温・塩分・圧力・周波数の関数として与える実用公式も導びかれている。

ところで、問題はなお残っていた。1960年代までに、海水中で 10 KHz 以下の音波の減衰は、 MgSO_4 分子の効果を考慮にいれたとして予測されるよりも 10 倍も減衰率が大きいことがわかってきた (THORP, 1965; SKRETTING and LEROY, 1971)。このような事実を説明できる海水の成分はホウ酸であることが指摘された (YEAGER *et al.*, 1973; FISHER and LEVISON, 1973; SIMMONS, 1975)。しかしながら、 $\text{B}(\text{OH})_3$ の濃度と同様の音波減衰作用は、同じ周波数帯で炭酸塩の存在によってもあらわれることもわかってきている (詳細は、CLAY and MEDWIN, 1977 の p. 422-423)。それでも、このように、海水中の塩のうちでも微量にしか含まれていない成分が、なぜ海中音波の減衰に顕著な効果を示すのか、その機構は現在のところなお明らかにされてはいない。

上述のような事柄を考慮にいれると、海水中の音圧減衰係数 α は、海水表層で塩分 35‰・温度 14°C の場合、Fig. 1 の曲線 S のようになる。なお、ホウ酸の効果に加えて海水中のその他の塩、とくに炭酸塩の成分が減衰係数の値を大きくすることに寄与しているようである (MELLEN and BROWNING, 1975; CLAY and MEDWIN, 1977)。ちなみに、SIMMONS (1975) や YEAGER *et al.* (1973) の室内実験の結果や MELLEN and BROWNING (1975) の海洋のデータによれば、水温 $0-35^\circ\text{C}$ に対して、減衰効果の顕著にあらわれる周波数 f_{rb} は大体 $0.9-2.1$ KHz の範囲で単調に増加する傾向があり、 f_{rb} の対数は水温と線型関係にあるとみてよい。ただし、海洋データのうちでも、地中海および太平洋の例は、上述

の線型関係からかけはなれている。CLAY and MEDWIN (1977) は、これは、海水中の炭酸塩や $B(OH)_3$ の濃度が他の海域と異なっているからであろうと推測している。

4. 球面波としてみた海中音波

海洋は、地球表面の約7割をとりまく水の層である。したがって、広い範囲にわたる海中音波を検討する場合、すでにみたように平面波として考えても十分であるかもしれない。ただし、海中核爆発や爆薬などの水中爆発などのように音源が点源に近いと考えられ、しかも、その至近距離の音波の問題を検討する必要が生じた場合には、音波は球面波として考えなくてはならないであろう。

便宜上、座標の中心から外向きに径方向の距離 R をとる。初期条件・境界条件として、音源に対して $R=R_0$ で $P=P_0$ とすると、球面波に対する解は (2) のかわりに

$$P = P_0 \cdot \frac{R_0}{R} \cdot \exp[-(\alpha_e) \cdot (R - R_0)] \quad (5)$$

と得られる。

海底地震のようにかなり広い範囲が音源とみなせる場合には、初期の R_0 の値がかなり大きい ($R_0 \gg 1$) ことになり、 R が R_0 に比較して少しだけ大きい場合 (R/R_0) は 1 に近い値となる。すなわち、近似的に (2) によって考えても差支えないことになる。

一様な音速場を球面波として音波が伝わる時、音波の伝わる時の減衰 TL (transmission loss) として $20 \log_{10}(P_0/P)$ の負号をとったものを用いることにすると、(5) より、

$$TL = 20 \log_{10} \left(\frac{R}{R_0} \right) + \alpha(R - R_0). \quad (6)$$

したがって、 $R \gg R_0$ ならば $(R - R_0) \approx R$ と考えてよい。また、 $(R/R_0) \sim 1$ ならば (6) の右辺第1項はゼロに近い値となる。

このようにみえてくると、海底地震のように音源のひろがり大きいと考えられる場合と、海中爆発のように点源が音源である場合には、音波の減衰特性に差異があらわれることになる。しかし、これは音波の伝播が物理的にみて異なった機構であるという意味ではない。

5. 考 察

以上の結果にもとづき、簡単な応用例によって、具体的な考察をしたい。

いま、海水中で $f=100$ Hz の音波を考えると、Fig. 1 より海面付近の水温 14°C に対して $\alpha \approx 10^{-6}$ dB/m であ

る。したがって、 $R_0=1$ m, $R=2$ m ならば、球面波としての音波の減衰は (6) 式右辺第1項より 6 dB 程度であるが、第2項の吸収による減衰は Fig. 1 の曲線 S より 10^{-6} dB ということになる。

さらに、 $R=10$ Km のとき ($R_0=1$ m), 吸収による減衰は $(10^{-6} \text{ dB/m}) \cdot (10^4 \text{ m}) = 10^{-2}$ dB の程度である。このとき、(6) 式右辺第1項の球面波としての減衰は 80 dB となる。ただし、平面波の場合には、その減衰は 0 dB となる。これが海洋中では音波があまり減衰することなくかなり遠く (数百キロメートルあるいは数千キロメートル) まで伝わりうるという根拠と考えてもよいであろう。

また、Fig. 1 をみると、淡水の場合 (F) も、海水の場合 (S) も、音波の周波数が高いほど減衰が顕著なことがわかる。したがって、たとえば音波が平面波として伝わる場合を考えたとしても、音源からの距離が遠くなると、高周波側の音ほど強く減衰し、あまり減衰しない低周波側の音によって音質が定まることになる。

この音質については、大内正夫博士から関心が寄せられ、有益なコメントをいただいた。中村 (1986b) は巨大津波の前駆異常音が大地震後あらわれる物理的機構を、海水の水温・塩分・圧力で定まる海中音速場にあらわれる sound channel の効果として説明できるという仮説をたてた。たしかに、南海道沖地震の後、沖合でドンドンと大砲のような音が聞こえてから津波が海岸を襲ったという記録は、史料にも多く明記されている (たとえば、中村, 1986b)。この種の音は、もともと衝撃的な音であったものと考えられる。このように衝撃的な音は周波数スペクトルでは相当に広い範囲にわたる周波数成分をもっている。そして、そのような音が伝播とともに減衰し、とくに高周波帯の音が強く減衰した結果が、たとえば数十ヘルツから数百ヘルツまでの低周波帯にピークをもつ音となり、感覚的にはドンドンと大砲のような音としてとらえられることになったものと推察される。

さきに簡単に述べたことであるが (中村, 1986c), 海底地震の震央を中心とした円筒状に伝わる音波を考えれば、巨大地震後の津波前駆異常音の海洋物理的機構は妥当なものと考えても差支えないであろう。

謝 辞

本文の完成には、大内正夫博士、南井良一郎教授、六田京子氏の御好意ある御配慮をいただき、さらに、査読者の貴重なコメントにより本文の内容をより充実することができた。

文 献

- CLAY, C.S. and H. MEDWIN (1977): Acoustic oceanography. Wiley-Intersci. Publ., N.Y. 544 pp.
- FISHER, F.H. and S.A. LEVINSON (1973): Dependence of the low frequency (1 KHz) relaxation in sea water on bottom concentration. J. Acoust. Soc. Am., **54**, 291.
- LEONARD, R.W., P.C. COMBS and L.R. SKIDMORE (1949): Attenuation of sound in sea water. J. Acoust. Soc. Am., **21**, 63.
- MELLEN, R.H. and D.G. BROWNING (1975): Low frequency attenuation in the Pacific Ocean. J. Acoust. Soc. Am., **57**, Suppl. 1, s65.
- 中村重久 (1986a): 日本南岸の黒潮流域付近における海洋音速場について。La mer, **24**, 42-47.
- 中村重久 (1986b): 巨大津波の前駆異常音について。La mer, **24**, 48-52.
- 中村重久 (1986c): 能代沖の海洋音速場と1983日本海中部地震津波。La mer, **24**, 186-192.
- SIMONS, V.P. (1975): Investigation of the 1 KHz sound absorption in the sea water. Ph. D. thesis, Univ. Calif., San Diego.
- SKRETTING, A. and C.C. LEROY (1971): Sound attenuation between 2,000 Hz and 10 KHz. J. Acoust. Soc. Am., **49**, 276-282.
- THORP, W.H. (1965): Deep-ocean sound attenuation in the sub- and low-kilocycle-per-sec region. J. Acoust. Soc. Am., **38**, 648-654.
- YEAGER, E., F.H. FISHER, J. MICELI and R. BRESSEL (1973): Origin of the low-frequency sound absorption in seawater. J. Acoust. Soc. Am., **53**: 1705-1707.