研究

相模湾における多経路伝搬音波の伝搬損失と 変動の評価*

峰屋 弘之 大槻 茂雄 奥島 基良**

In monitoring of water mass structure in mid-deep water using acoustic multipath propagation, sound propagates reflecting at surface and bottom. In this case, the acoustic reflection characteristics of surface and bottom such as reflection loss and stability are important determinants of sound field. In this paper, we examine the reflection loss of the sea bottom and stability in Sagami Bay from the sound transmission experiment data. The rays which reflect at surface and/or bottom once are identifiable in a predicted sequence and almost stable in 50 ms. Comparing the measured and calculated data, we estimate the average bottom reflection loss to be about 12 dB at 4.1 kHz with grazing angle of 13° . We consider that from these rays measurement of the perturbation of travel time corresponding to the mid-deep ocean fluctuations can be made.

1. はじめに

近年、沿岸域や湾の利用形態が多様化し、それに伴い、このような中浅海域の海洋情報を長期連続的に観測することが望まれている。われわれは、深海域において温度分布などの詳細な海洋構造を、水平伝搬音波を利用し連続観測するための新しい計測法の開発を行ってきた¹⁾。この方法は、水平方向に音波を伝搬させ、その伝搬時間から海域の音速鉛直分布を推定するものである。中浅海域において水平方向の伝搬音波を利用して海洋の構造を計測しようとする場合には、深海域の場合と異なり、音波は海底及び海面で反射しながらさまざまな経路を通過して伝搬する。従って、この多経路伝搬音波の伝搬損失と変動を把握することは、計測方法、送受波器配置、音波伝搬時間の計測誤差などを考えるうえで重要である。本論文では、平均水深が約1200mの相模湾についての観測を行うことを考え、相模湾で音波伝搬実験を行い、多経路伝搬音波の伝搬損失と変動を評価し、検討を加えた結果について述べる。

2. 音波伝搬実験

中浅海域における音波伝搬の状況を把握するため、相模湾において行われた音波伝搬実験の結果より、相模湾の音波伝搬特性を検討した。本伝搬実験は(財)日本水路協会と海上保安庁水路部が協同で行っている「音響による海洋構造調査手法に関する研究」⁵⁾の一環として、相模湾中央部の深度1200m~1400m程度の海域で1986年3月に行われた。この付近の海底の表層堆積層の底質はシルトである²⁾。実験中に水温鉛直分布がXBT (expendable bathy thermograph)で測定され、音波伝搬の予測計算に用いられた。このときの実験海域と水温測定点をFig.1に示す。

伝搬実験は、2隻の観測船からそれぞれ送波器、受波器を吊下し、船位を測定しながら両船の距離を変化させ行われた。送波信号として周波数4.1kHz、パルス幅800ms・200ms・50msのバースト波が用いられた。送波にはPZT円筒振動子が使用され、この振動子と耐圧容器に収められた電子回路・電源が、船上よりワイヤーにより吊下され、あらかじめセットされたスケジュールに従い、海中の装置のみで自動的に送波が行われた。送波レベルは184dB (re 1μPa at 1m)である。信号の送波手順をFig.2に示す。パルス幅は800ms・200ms・50ms・800msの順に変化させ、それぞれのパルス幅の音波の送波を3秒間隔で10回(3秒×10回=30秒)ずつ

* An estimation of the stability and the transmission loss of acoustic multipaths at Sagami Bay.

** 東京工業大学 精密工学研究所

HiroYuki HACHIYA, Shigeo OHTSUKI, Motoyoshi OKUJIMA

(Research Laboratory of Precision Machinery and Electronics, Tokyo Institute of Technology).

Fig. 1. Location of the acoustic transmission experiment and corresponding water depths.

Fig. 2. Transmitting procedure of acoustic signal.

繰り返す、計2分(30秒×4回)の間に信号の送波が行われる。その後、3分間の休止期間を経て、再び2分間の送波期間となる。この送波期間2分間、休止期間3分間の繰り返しが、送波装置の吊下を開始してから回収するまで続けられた。実験に先立ち行われたシュミレーション計算により、パルス幅が50 ms程度であれば主要な音線が分離できることが明らかとなっていたので³⁾、パルス幅50 msの信号は多経路で伝搬する音波の分離・識別のために用いられた。また、パルス幅800 msの信号は時間的な変動の把握と長距離伝搬時の信号識別のために、パルス幅200 msの信号はその中間的な意味で用い

られた。送波装置は長さ500 mのワイヤーにより秒速およそ50 cm/sで下降し、約17分で送波装置の下降が終了する。下降中に4回の送波が行われる。ワイヤーの長さは500 mであるが、潮流などの影響により、送波装置の最大到達深度は約450 mであり、最大深度で2回の送波が行われる。その後、送波装置は秒速50 cm/sで上昇し、この上昇中に4回の送波が行われる。この結果、ある送受波器間距離で、最大50分間、データの取得が行われた。

受波器はもう一隻の船上よりケーブルで海中に吊下された。受波器の信号出力は、前置増幅器(増幅度20 dB)で増幅されたのち、ケーブルを通して船上に送られる。受信信号はサンプリング周波数44.056 kHz・振幅精度16ビットでデジタル化され、PCMレコーダに記録された。PCMレコーダには時刻シグナルも同時に記録されている。また、受波器の直上には圧力センサーと温度センサーが置かれており、受波器の深度と海水温度がモニターされた。受波器は重量が小さいので潮流の影響などを受けやすく、ケーブルの長さは500 mあったが、最も状況の良い時でも到達深度は400 m程度であった。

3. 伝搬経路の識別と海底反射損失の評価

実験中に測定された水温鉛直分布と、水温鉛直分布測定値から求めた音速鉛直分布をFig. 3に示す。音速鉛直分布の計算には、塩分濃度を35‰として、Mackenzieの式⁴⁾より求めている。音波伝搬実験の結果を、Fig. 3の音速鉛直分布から音線理論により予測した結果と比較し、音波伝搬経路を識別し、海底反射損失を評価した。

(1) 送受波器間距離1 kmの場合

Fig. 3. Vertical temperature profile(left) measured by XBT and calculated vertical sound velocity profile(right).

Fig. 4. The measured (a) and predicted (b) wave forms in the acoustic transmission experiment (range: 720m).

Fig. 5. The expected ray paths (range: 720m).

送波器深度 400 m, 受波器深度 170 m, 水平伝搬距離 720 m のときの, 50 ms 幅パルスの受波波形を Fig. 4 (a) に示す。計算により予測した受波波形を Fig. 4 (b) に示す。記号 D は直接波を, 記号 B は海底反射波を, S は海面反射波を示す。今回の実験では, 伝搬特性の把握を主な目的としたので, 送波装置と受波測の時計の同期が完全でないことによる受波信号の伝搬時間のずれについては, 直接波の到着時刻が予測計算の伝搬時間と一致する

ように実験データの時刻を補正して表示した。Fig. 4 (b) に示した受波波形の受波音圧レベルの計算には, 境界面での反射が鏡面反射であるとした場合の拡散損失と海中での吸収損失は考慮してあるが, 海底・海面での反射損失は含めていない。計算結果より, まず最初に海底海面に反射せずに送受波器間を直接伝搬する直接波 (D) が到着し, 次に海面反射波 (S), 海底反射波 (B) の順に到着すると考えられる。伝搬実験においても直接波と海面反射波は明確に受波されている。海底反射波は受波データからは識別できない。他の時刻に受信したデータでも海底反射波は確認できない。予測された伝搬経路を Fig. 5 に示す。海底反射波の入射補角 (Grating Angle) は 70° である。

Fig. 4 (a) の海底反射波 (B) の受波音圧レベルの実測値と Fig. 4 (b) の計算値の比は海底反射損失の値と考えられるが, Fig. 4 (a) に示すように海底反射波は確認できず, その受波音圧レベルはノイズレベル (およそ 0.1 Pa) 以下と思われるので, 入射補角 70° のときの相模湾の海底反射損失は 20dB (4.1 kHz) 以上と推定できる。

(2) 送受波器間距離 5 km の場合

送波器深度 72.5 m, 受波器深度 140 m, 水平伝搬距離 5265 m のときの 50 ms 幅パルスの受波波形を Fig. 6 (a)

Fig. 6. The measured (a) and predicted (b) wave forms in the acoustic transmission experiment (range: 5265m).

Fig. 7. The expected ray paths (range: 5265m).

に示す。計算により予測した受波波形を Fig. 6 (b) に示す。計算結果よりまず最初に直接波 (D) と海面反射波 (S) がほぼ同時に到着し、次に海底反射波 (B)、海面海底反射波 (SB)、海底海面反射波 (BS) の順に到着すると考えられる。伝搬実験においても直接波と思われる波は明確に受波されているが、B・SB・BS波は混在して受波されているように見え、不明確である。予測された伝搬経路を Fig. 7 に示す。海底反射波 (B) の入射補角は 25° である。

海底反射波の観測データと計算データの比較から、入射補角 25° のときの、相模湾の海底反射損失は 10dB 以上と推定できるが、海底反射波の振幅は極めて不安定であり、この入射補角の海底反射波を海洋変動の観測に利用することは困難と考えられる。

(3) 送受波器間距離 10km の場合

送波器深度 110m、受波器深度 420m、水平伝搬距離 9200m のときの 50ms 幅パルスの受波波形を Fig. 8 (a) に示す。受波信号はそのままでは海中及び観測船のノイズにより SN 比が非常に悪く、信号の確認が困難であったので、帯域 100 Hz の狭帯域フィルタを通過させ、海中ノイズの除去を行ってある。実験中に測定された水温鉛直分布から計算により予測した受波波形を Fig. 8 (b) に示す。計算結果よりまず最初に直接波 (D) と海面反射波 (S) がほぼ同時に到着し、次に海底反射波 (B)、海面海底反射波 (SB)、海底海面反射波 (BS) の順に到着すると考えられる。このときの音波の伝搬経路を Fig. 9 に示す。伝搬実験においても対応する位置に D・B・SB・BS 波が受波されている。計算値と実験結果とで時刻に若干のずれがあるがこれは、海中に吊下されている送受波器の位置データが不正確なためと考えられる。しかし、直接波の受波音圧レベルは実測値と計算値がよく一致している。受波振幅波形に SBS 波ではない

Fig. 8. The measured (a) and predicted (b) wave forms in the acoustic transmission experiment (range: 9200m).

Fig. 9. The expected ray paths (range: 9200m).

かと思われる信号があるが、不安定である。

海底反射波 (B) の入射補角は 13° であり、この B 波の観測データと計算データの比較から、入射補角 13° のときの相模湾の海底反射損失は 6dB (4.1 kHz) 程度と評価できる。しかし、実験中にこの海底反射波は大きく変動しておりその変動については次節で議論する。

(4) 送受波器距離 15km の場合

送波器深度 250m、受波器深度 400m、距離 15,000m

Fig.10. The measured (a) and predicted (b) wave forms in the acoustic transmission experiment (range : 15000m).

のときの 50 ms 幅パルスの狭帯域フィルタ通過後の受波波形を Fig.10(a) に示す。実験中に測定された水温鉛直分布から計算により予測した受波波形を Fig.10 (b) に示す。また、このときの音波の伝搬経路を Fig.11に示す。この距離になると送受波器間を海面海底に反射せずに、直接伝搬する直接波は存在しない。計算結果よりまず最初に経路が異なる 2 種類の海底反射波 (B) がほぼ同時に到着し、次に海底海面反射波 (BS), 海面海底海面反射波 (SBS) の順に到着すると考えられる。伝搬実験においても対応する位置に B 波, BS 波, SBS 波と思われる波が観測されており、これらの経路の音波は中浅海域の海洋構造計測に用いることが可能と考えられる。海面海底反射波 (SB) は海底反射波とはほぼ同時に到着しているが、反射する位置の付近の海底面の形状が複雑なため非常に不安定であり、識別は困難と考えられる。

海底反射波の入射補角は 9° であり、この B 波の観測データと計算データの比較からは、入射補角 9° のときの相模湾の海底反射損失は 6dB (4.1kHz) 程度と評価できる。しかし、この海底反射波も変動は大きく、また近接した経路が存在するため、50ms 幅の音響信号では重なりあってしまい、正確な評価は困難である。

Fig.11. The expected ray paths (range : 15000m).

4. 振幅変動の評価

伝搬信号音波の変動を把握するため、相模湾における伝搬実験の結果より、伝搬音波の振幅変動を評価した。変動評価には、各経路の音波が十分に分離されている 50ms 幅信号の受波データを用い、水平伝搬距離が約 1km の直接波、海面反射波、約 10km の海底反射波の振幅変動を求めた。50ms バースト波の受波データを復調し、振幅データを求める。そして、各経路に対応するデータより振幅の頻度分布を計算し、変動を評価する。

水平伝搬距離 720 m のときの直接波・海面反射波の振幅変動の様子を Fig.12 に示す。これらのデータは 3 秒間隔の送波 10 回分のデータである (3 秒 $\times$ 10 回 = 30 秒)。送波器深度は 400 m, 受波器深度は 170 m である。海面反射波の海面への音波の入射補角は 35° から 40° である。直接波は安定であるが海面反射波の振幅の変動は大きい。しかし、海面反射波も 50ms の間では急激な変化はなく、振幅変動の周期は数秒程度と推測されるので、振幅変動の主な原因は海面の波によるものと思われる。この受波データを取得した時に目視により観測された海面の波の波高は 2 ~ 3 m 程度である。

これら 50ms パルスの送波 40 回分のデータから海面反射波と直接波の音圧の振幅の頻度分布を求めた。送波器の深度は 450 m から 350 m 程度まで変化しているが受波器深度は 170 m ではほぼ一定である。海面反射波の振幅確率密度を Fig.13 に示す。振幅データは、海面反射波の受波されている部分より 1.14 ms ごとにサンプリングし、1 パルスにつき約 35 個、総数は 1407 個である。音圧振幅の平均値 P_{avr} は 0.94 Pa である。図中の点線はレイリー分布曲線であり、海面反射波の振幅頻度分布はレイリー分布にほぼ従っていると思われる。図中に縦の破線で示した値は反射損失がないとした計算により予測された海面反射波の振幅値である。測定された海面反射波の平

Fig.12. Ten consecutive records (3 s spacing) of direct and surface reflected rays (range: 720m).

Fig.13. Probability density of amplitude of surface reflected ray (range: 720m).

Fig.14. Probability density of amplitude of direct ray (range: 720m).

均受波音圧は予測受波音圧の40%程度である。

直接波の振幅頻度分布を Fig.14 に示す。図の横軸は平均値で規格化した振幅である。図中に破線で示したのは計算により予測された直接波の振幅値である。直接波の振幅頻度分布はほぼ正規分布に従っており、データ総数 1410 個の平均値 2.42Pa、標準偏差 0.13Pa であり、観測された音圧値は予測された音圧値の80%程度で、両者はかなりよく一致している。直接波の振幅変動がほとんどないことから、この程度の距離では水平方向に安定に音波が伝搬することがわかる。

水平伝搬距離 9200 m のときの直接波・海底反射波の振幅変動の様子を Fig.15 に示す。送波器深度は 400 m、受波器深度も 400 m である。計算によれば直接波とほぼ同時刻に海面反射波が到達する。このため直接波と海面反射波が干渉して大きな変動をしている。海底反射波も

Fig.15. Ten consecutive records(3 s spacing) of direct and bottom reflected rays(range: 9200m).

Fig.16. Probability density of amplitude of bottom reflected ray(range: 9200m).

大きく変動している。しかし、1パルスの50msの間ではそれほど大きな変化はない。この変動を振幅頻度分布を用いて評価する。送波器深度が350mから450mの場合の海底反射波の40回分の1102個のデータが変動の評価に用いられた。海底反射波の振幅確率密度をFig.16に示す。図の横軸は平均値で規格化した振幅である。また、計算結果と実測結果より評価される海底反射損失の値も示してある。振幅の平均値 P_{avr} は36.5 mPaである。このときの海底反射波の入射補角は 11° から 13° 程度である。点線はレイリー分布曲線である。さきほどの海面反射波の振幅頻度分布と比較すると海底反射波の振幅頻度分布はレイリー分布曲線にそれほど一致していない。振幅の小さなところの確率密度が大きくなっているが、これは、ノイズの影響と考えられる。この結果を見ると、平均的な海底反射損失は12dBであるが、振幅の大きなときもかなり存在することがわかり、十分中浅海域の海洋構造計測に利用できると考えられる。

海底反射波の変動の原因としては、送波器深度が変化していることにより反射する海底面の位置が変化すること、海底面での反射波の散乱などが考えられるがその詳細な検討は今後の課題である。

5. おわりに

中浅海域における多経路伝搬音波の伝搬特性を把握するため、相模湾において音波伝搬実験を行い、伝搬損失と安定度の評価を行った。まず、伝搬実験の結果と水温鉛直分布から計算した結果を比較し、伝搬経路の識別を行い、海底反射損失を評価した。この結果、海底入射補

角の大きい海底反射波は、反射損失がかなり大きいため、計測への利用が困難であるが、周波数 4.1 kHz において海底入射補角 13° 程度のときの相模湾の海底反射損失は平均で 12 dB 程度と推定され、海底入射補角がこの角度より小さければ、海底反射波が計測に利用できると考えられる。また、多経路伝搬音波の安定性を把握するため、伝搬音波の振幅変動を評価した。海面反射波・海底反射波の振幅変動は直接波に比べれば大きい、50 ms 程度の時間内ではほぼ安定した振幅で、その変動周期は数秒程度である。この結果、伝搬距離があまり長距離でない十数 km 程度のときには、海底反射波・海面海底反射波・海底海面反射波が、中浅海域の海洋変動観測に比較的稳定に利用できる見通しを得た。

今後、これらの伝搬特性についてさらに検討を進めるとともに、多経路伝搬音波を用いて中浅海域海洋構造を観測する方法について検討する予定である。

謝 辞

本報告の伝搬実験データは（財）日本水路協会と海上保安庁水路部が協同で行っている「音響による海洋構造調査手法に関する研究」の一環として行われた海上伝搬

実験により取得されたものである。（財）日本水路協会と海上保安庁水路部の皆様に感謝致します。また、本研究の一部は文部省科研重点領域研究「深層海水循環」の補助を受けた。

参考文献

- 1) 蜂屋, 大槻, 奥島, “水平伝搬音波の伝搬時間計測による黒潮海域の音速鉛直分布の推定法,” 日本音響学会誌, 44 (5), 377-381 (1988).
- 2) 工業技術院地質調査所, “海洋地質図 4 相模灘及付近 表層堆積図”, 1976.
- 3) 蜂屋, 大槻, 奥島, “多経路伝搬音波を用いた浅海域の音速鉛直分布の推定法,” 信学技報, US86-57 (1986).
- 4) K.Mackenzie, “Nine-term equation for sound speed in the oceans,” J.Acoust. Soc. Am., 70, 807-812 (1981).
- 5) 日本船舶振興会補助事業「音響による海洋構造調査手法に関する研究」報告書, (財)日本水路協会 (1989).