研究

M系列信号音波を用いた相模湾の 多経路伝搬音波の観測*

(平成元年10月27日受理)

峰屋弘之 大槻茂雄 奥島基良**

In monitoring of water mass structure in mid-deep water using multipath sound propagation, high accuracy measurement of the travel time of rays which propagate reflecting at surface and bottom is required. M-sequence signal with correlation technique, which is one of the pseudorandom sequence, is useful to obtain signal-to-noise enhancement and high temporal resolution. In this paper, we examine travel time estimation error and the stability of multipath propagation using M-sequence signal from sound transmission experiment data at Sagami Bay. Using the carrier frequency of 5 kHz, multipath arrivals up to the range of 25 km are successfully detected and identifiable. Travel time estimation results are stable and high accuracy measurement is achieved. It is considered that from bottom and/or surface reflected rays measurement of the perturbation of travel time corresponding to the ocean fluctuations can be accomplished.

1. はじめに

われわれは、沿岸域や湾のような中浅海域の海洋情報を長期連続的に観測するための新しい観測法の開発を行っている¹⁾。水平伝搬音波を用いて海洋構造を計測する場合、中浅海域では、深海域における計測²⁾と異なり、海底・海面で反射して伝搬する音波を使用することが必要であり、このような伝搬経路の音波の伝搬時間、あるいは伝搬時間差を高い精度で測定することが必要となる。海底・海面で反射して伝搬する音波は、反射の際に大きい減衰を受けることが予想され、伝搬音響信号として超音波パルスを用いる方法では、船や生物などによるパルス性雑音や海面の波浪などによる環境雑音の影響を受け、SN比の劣下により高精度の伝搬時間計測が困難になると考えられる。伝搬音響信号として擬似ランダム信号の一種であるM系列信号を用い相関処理を行うことは、処

理結果が短い時間幅のパルスを送受したのと同等の結果となるうえ、処理利得によりSN比が向上するので、中浅海域の高分解能の音波伝搬時間測定法として有効な方法と考えられる^{3),4)}。しかし、中浅海域を海底・海面で反射しながら伝搬する音波の伝搬時間を、M系列信号音波を用いて測定しようとする場合、反射面の変動のために音波の振幅・位相が変動すると、相関処理による利得が十分に得られず、また、伝搬時間の計測値が安定しないことが考えられる。そこで実際に中浅海域でM系列信号音波の伝搬実験を行い、測定精度、測定安定度などを把握することは、中浅海域の海洋構造計測手法を考えるうえで重要である。本論文では、平均水深が1,200 m程度の相模湾の海洋構造を計測対象とすることを考え、相模湾で行われた水平距離25kmまでのM系列信号音波伝搬実験の結果より、M系列信号音波を用いた場合の、多経路伝搬音波の伝搬時間測定精度、各経路の安定度などについて検討した結果について述べる。

2. M系列信号音波伝搬実験

中浅海域の海洋構造の計測にM系列信号が有効かどうかを評価するため、1988年10月、相模湾においてM系列

* Observation of multipath propagation at Sagami Bay using M-sequence acoustical signal.

** 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).

信号音波伝搬実験が行われた。本伝搬実験は(財)日本水路協会と海上保安庁水路部の協同による「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ものである⁶⁾。実験海域は相模湾中央部の深度1,000~1,500 m程度の海域で、海底の表層堆積層の地層はシルトである。

中浅海域の海洋変動を音波伝搬時間の変動から求めるためには、音波が海底・海面で反射しながら伝搬する条件のもとで、0.2 ms程度の伝搬時間測定精度が必要である³⁾。このような高精度の伝搬時間計測を実現するため、海中を伝搬させる音響信号として、擬似ランダム信号の一種であるM系列により搬送波を変調したM系列信号を用い、受波信号に相関処理を行うことで、十分な信号対雑音比と時間分解能を実現することを考えた。M系列は、0又は1の2値をとる周期的な擬似不規則系列の一つである。 n 段のシフト・レジスタと排他的論理和回路によって周期 $N = 2^n - 1$ の n 次M系列が容易に発生できる。このM系列により搬送波を位相変調する。M系列信号の時間周期を T とすると、信号 $s(t)$ は次式で表される。

$$s(t) = A \cos(2\pi ft + \phi_k(t))$$

$$\phi_k(t) = -\phi \quad b_k = 1 \text{ のとき}$$

$$((k-1)T/N \leq t < kT/N)$$

$$= \phi \quad b_k = 0 \text{ のとき}$$

$b_k (k=1 \sim N)$ はM系列を示す。1 digit 当りの時間長 T/N は送波器の帯域と時間分解能から決められる。今回の実験では、周波数5 kHzの搬送波を7次のM系列により位相変調したM系列信号を送波信号として用いている。M系列の1 digit に対して5 kHzの搬送波を4波(800 μ s)含むようにし、M系列の値が0又は1のとき、変調角 $\pi/2$ または $-\pi/2$ に対応させている。この系列を4周期繰り返すM系列信号(信号長: 800 μ s $\times$ 127 $\times$ 4 = 406 ms)を1ショットとして伝搬実験を行った。M系列信号を用いることで、雑音がガウス性雑音の場合、相関処理によるSN比の改善は、 $\sqrt{N}$ となる。ここで用いた7次のM系列は周期127であるので、海中を伝搬し受波されたM系列信号を相関処理すると、SN比改善度は21 dBとなる。また、処理結果は5 kHzの正弦波4波を送波器に加えたのと同等の結果となる。

送波器は海中に電子回路、電源などと共に係留され、あらかじめ決められた時間スケジュールに従って、自動的に送波を行う。送波レベルは191 dB (re 1 μ Pa at 1 m)である。送波器の海中位置はトランスポンダにより

Fig.1. Location of the sound transmission experiment.

Fig.2. Transmitting procedure of acoustic signal.

測定された。Fig. 1 に実験海域の水深分布と海中に係留された送波器の位置を示す。トランスポンダの測定より求められた送波器の係留位置は北緯 35° 6.856', 東経 139° 19.364' である。

信号長 406 ms の 7 次 M 系列信号を 3 秒間隔で 20 回繰り返し (1 分間) たのち、1 分間の休止期間をとる。送波期間 1 分、休止期間 1 分の繰り返しを 3 回 (計 6 分間) 行ったのち、24 分間の休止期間をとる。全体で 30 分間のこの手順を連続的に繰り返す。Fig. 2 に送波信号の送波手順を示す。送波装置の中の時計装置は 0.1 ppm の精度をもっており、送波時刻は十分な精度で確定できる。

伝搬音波の測定は、受波器を船上より海中に吊下して行われた。受波器で受波された信号はプリアンプで増幅

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

されたのち、水中ケーブルを通して船上に送られた。船上において、受波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 データレコーダに記録された。受波船の船位の測定も同時に行われた。相関処理などの信号処理は、PCM データレコーダに記録されたデジタル信号を、計算機に読み出して行われた。水平伝搬距離は、受波船を移動させることで、送波器のごく近くから最大25km 程度まで変化させた。Fig. 1中に水平距離 6.86 km (R 1) と 25.26 km (R 2) のときの受信船の位置を示した。

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。Fig. 3 に測定された水温鉛直分布と、水温鉛直分布測定値より計算された音速鉛直分布を示す。

3. 多経路伝搬音波の観測

(1) 水平距離 285 m のとき

水平距離 285 m のデータは、送波装置の係留作業時に、送波装置の動作確認と沈降状況のモニターのため取得したものである。送波装置が沈降中の、送波器深度 393 m、受波器深度18m、送受波器の水平距離 285 m のときの受波信号を Fig. 4 (a)に、相関処理結果を Fig. 4 (b)に示す。このときの海面の波高は数十cm であった。また、測定された水温分布から求めた音速鉛直分布を用い、音線理論により予測した音波の経路を Fig. 5 に示す。予測計算によれば最初に直接波 (D) が到着し、その後、海面反射波 (S) が到着する。Fig. 4 (b)には、予測計算により求められた各経路の伝搬時間の位置を矢印で示してある。各ショットの中でM系列信号は4周期繰り返されているの

Fig.4. The received(a) and processed (b) M-sequence acoustic signal (range:285m).

Fig.5. The expected ray paths (range:285m).

で同一の経路の信号が 101.6 ms ごとに 4 回繰り返される。受信信号は直接波と海面反射波が重なりあっているが、相関処理結果では両者は明確に分離されている。受信信号の最初の直接波のみの部分 (10ms 程度) の振幅は、相関処理結果の直接波の振幅とはほぼ一致しており、相関処理による SN 比の改善度は、ほぼ理論的予測値の 21dB

であることを示している。Fig. 6 に3秒ごとに繰り返される10回分(3秒×10回=30秒間)の受波信号の変化を示す。直接波(D)はほとんど変化しないが、海面反射波(S)の振幅は数秒程度とみられる周期でかなり変化している。この変動の原因は海面の波によるものと考えられる。

送波装置の係留作業時に取得されたこれらのデータより音波伝搬時間の計測精度、信号振幅の変動などについて検討する。音波伝搬時間とデータ取得時刻との関係を

Fig.6. Ten consecutive records (3 s spacing) of direct and surface reflected rays (range: 285m).

Fig. 7 に示す。点線は音波の休止期間を示す。伝搬時間の評価は相関処理波形の包絡線を直交検波により求め、包絡線のピークの位置で行っている。図中に示した9時31分は、作業船から吊下した送波装置を切り離す直前の時刻であり、そのときの送波器の深度は、数十mである。送波装置が切り離され、次第に沈下し深度が増加するにつれ直接波、海面反射波の伝搬時間は共に増大していく。伝搬時間の変化から、送波装置の沈降速度は1.3 m/s と計算される。

Fig. 8 に、各ショットの中の4回の直接波(実線)と海面反射波(点で表示)の振幅の時間変動を示す。直接波の振幅はほとんど変化しないが、海面反射波の振幅はFig. 6 の場合と同様に大きく変動している。海面反射波の振幅の振幅頻度分布をFig. 9 に示す。送波装置の沈降と共に伝搬距離が大きくなり、振幅が小さくなるので、送波装置の沈降速度を1.3 m/s として、距離の増加による拡散損失を補正してある。点線はレイリー分布曲線で

Fig.7. Travel time of direct and surface reflected rays.

Fig.8. Signal amplitude of direct and surface reflected rays.

Fig.9. Probability density of amplitude of surface reflected ray.

ある。振幅頻度分布はかなりレイリー分布に近いことが分かる。海面反射波の振幅の平均値と直接波の振幅の比較から、海面での反射損失の平均値は4 dBと計算される。

Fig.10に直接波と海面反射波の伝搬時間の計測値の誤差を示す。音波伝搬時間は送波装置の沈降と共に大きくなるので、送波装置の沈降速度から伝搬時間を算出し、それとの差を誤差として表示してある。直接波の伝搬時間の計測誤差は ± 0.1 ms以内になっており、標準偏差は0.05 msである。海面反射波は直接波よりも変動が大きいがほぼ ± 0.2 ms以内の計測誤差で、標準偏差は0.13 msである。海面反射波の図中 ± 0.5 ms以上の変動は異常値として+印で表示し、標準偏差の計算からは除外してある。異常値のほとんどは伝搬時間が大きくなる方向に存在している。この異常値の原因は、海面の波の影響により受信音波の振幅が非常に小さくなるためと考えられる。この図に示したように海面反射波の伝搬時間の評価値は、振幅変動にもかかわらず、標準偏差0.13 msの精度で測定できている。

水平距離285 mのときの直接波のデータより、7次のM系列信号音波を用いることで、理論的に予測される値とはほぼ同等のSN比改善度を得ることができ、伝搬時間計測誤差の標準偏差も0.05 msと非常に高い精度の時間計測ができることが分かった。また、海面反射波は、海面の波の影響により、振幅は大きく変動するにもかかわらず、伝搬時間測定の測定誤差の標準偏差は0.13 msで、高精度の測定が可能であることが分かった。

(2) 水平距離6.86 km

水平距離6.86 kmのときの受波信号をFig.11(a)に、受波信号の相関処理波形をFig.11(b)に、予測された経路をFig.12に示す。Fig.11(b)には、音速分布からの予測計算により求められた各経路の伝搬時間の位置を矢印で示し

Fig.10. Travel time error of direct and surface reflected ray.

である。送波器の深度は500 mであり、受波器の深度は435 mである。また、受波船の位置は北緯 $35^{\circ}10'$ 、東経 $139^{\circ}14.5'$ 付近である(Fig.1中のR1)。背景雑音が大きいが、この主な原因は受信船の音響的、電氣的雑音である。

予測計算によれば、最初にごく近接した経路を通してやってくる二つの直接波(D)が到着し、その後、海底反射波(B)、海底海面反射波(BS)が到着する。計算結果と実験データの伝搬時間の間には、若干の差があるが、これは受波器の海中での位置と海底形状のデータが不正確なためと考えられる。しかし、伝搬経路の特定は可能である。海底反射波、海底海面反射波も図に示された0.5 sの間では安定に伝搬している。

Fig.13にはFig.11(b)の相関処理波形の直接波部分を拡大したものを示す。M系列信号の相関結果は、周波数5 kHzの正弦波4波のパルスを送受したのと同等となるはずであるが、拡大した波形には、周波数5 kHzのはば4波からなる3組の超音波パルスが含まれており、直接波は、約1 ms間隔で到着する三つの信号(D(1), D(2), D(3))から構成されていることが分かる。このように、M系列信号音波を用いることで、ごく僅かの時間差で到着する経路を詳細に検討することが可能となった。これら三つの直接波は、近接した三つの経路を通ってくと

Fig.11. The received (a) and processed (b) M-sequence acoustic signal (range: 6.86 km).

Fig.12. The expected ray paths (range: 6.86km).

考えられるが、これらの経路は、送波器からの送波角度が小さく、転回点の付近の深度を通過する時間が長いので、この辺りの音速鉛直分布のわずかな変動により大きく変化するので、経路の詳細な特定は困難である。

これら三つの直接波の音波伝搬時間とデータ取得時刻との関係を Fig.14 に示す。点線は音波の休止期間を示す。伝搬時間の評価は相関処理波形の包絡線のピークの位置

Fig.13. Processed signal of direct rays.

Fig.14. Travel time of direct rays.

で行っている。2 番目のピーク (D(2)) が最も安定に伝搬時間が計測できている。3 番目のピーク (D(3)) は、0 ~ 60s の間、伝搬時間計測値がやや不安定であるが、その後は安定な計測が行われている。これらのピークの間隔は若干変化しているが、伝搬時間の変動を精度よく評価できている。しかし、伝搬経路も近接していると考えられるこれらの伝搬音波の伝搬時間が相互にこれ以上接近すると、干渉のため振幅が変動したり振幅ピーク位置が移動し、伝搬時間計測誤差を引き起こす可能性も考えられる。従って、転回点付近の音速鉛直分布の変化に敏感な送波角度の小さな直接波は、伝搬が不安定となり易いので、海洋構造の計測に利用しようとする場合には、相当の注意をすることが必要と考えられる。

Fig.15 には相関処理波形の中から、海底反射波部分を拡大し、3 秒ごとに繰り返される 10 回分 (3 秒 × 10 回 = 30 秒間) の受波信号波形の変化を示した。海底反射波は幾つかの経路を通して到着した信号が含まれているように見えるが、伝搬時間 4.763 s 付近の海底反射波は非常に不安定である。この海底反射波の入射補角 (grazing angle) は 12° である。

海底反射波の音波伝搬時間とデータ取得時刻との関係

Fig.15. Ten consecutive record (3 s spacing) of bottom reflected rays (range:6.86km).

をFig.16に示す。点線は音波の休止期間を示す。伝搬時間の評価は相関処理波形の包絡線のピーク的位置で行っている。伝搬時間の計測誤差の標準偏差は0.07 msであり、伝搬時間の評価結果は非常に安定である。直接波(D(2))と海底反射波(B)の振幅変化をFig.17に示す。振幅変動は直接波の方が大きく、海底反射波が非常に安定であることを示している。

水平距離6.86 kmのときのデータでは、海底反射波は非常に安定であり、海底反射波の音波伝搬時間を安定に計測できる見通しが得られた。また、送波角度の小さな直接波は、転回点付近の音速変化の影響を受け易く、経

Fig.16. Travel time of bottom reflected rays.

Fig.17. Signal amplitude of direct and bottom reflected rays.

路の正確な特定も困難なので、海洋構造の計測に利用しようとする場合には、相当の注意をすることが必要と考えられる。

(3) 水平距離 25.26 km

水平距離25.26 kmのときの受波信号をFig.18(a)に、受波信号の相関処理波形をFig.18(b)に、予測された経路をFig.19に示す。Fig.18(b)には音速分布から予測計算より求められた各経路の伝搬時間の位置を矢印で示してある。送波器の深度は500 mであり、受波器の深度は300 mである。また、受波船の位置は北緯34°56′、東経139°27.6′付近である(Fig.1中のR2)。計算結果より2経路の海底反射波(B)が時間的にほぼ同時に到着することが分かる。海底への入射補角は6°程度である。海底で1回反射し25km伝搬した音波でも、M系列信号音波を用いることで、図のように十分なSN比で高精度の伝搬時間計測が可能である。この送受波器配置の場合には図に示すように、主要な音線はほぼ同時に到着する2経路の海底反射波しかないが、送受波器配置を適当に選んでやれば、観測に必要な音波を伝搬させてやる事が可能と考えられる¹⁾。

Fig.18. The received (a) and processed (b) M-sequence acoustic signal (range:25.26km).

Fig.19. The expected ray paths (range:25.26km).

5. おわりに

中浅海域の海洋構造を計測するための伝搬信号音波としてM系列音波を用い、十分な信号対雑音比と時間分解能を実現することを考え相模湾において水平距離25km程度までの伝搬実験を行った。その結果を以下に示す。

- (1) 周波数5 kHzの7次のM系列信号音波を用いることで、理論的に予測される値とほぼ同等のSN比改善度を得ることができ、時間測定誤差の標準偏差0.05 ms程度の精度を確保することができることが

分かった。

- (2) 海底・海面で反射しながらさまざまな経路を通して伝搬する音波を分離することができ、それぞれの音波経路を特定することができた。
- (3) 海面反射波は、海面の波の影響により、振幅が大きく変動しているが、時間測定誤差の標準偏差0.13 ms程度での時間測定が可能である。
- (4) 海底反射波は非常に安定であり、海底反射波の音波伝搬時間を安定に計測できる見通しが得られた。
- (5) 海底で1回反射し25km伝搬した音波でも、十分なSN比で高精度の伝搬時間計測が可能である。

以上より、M系列信号音波を用いれば、音波伝搬時間あるいは時間差の計測に必要なSN比とms以下の時間分解能を確保することが可能と考えられ、海底反射波(B)、海面海底反射波(SB)、海底海面反射波(BS)を利用することで、中浅海域の海洋構造を計測できる見通しを得た。

謝 辞

本報告の伝搬実験は(財)日本水路協会と海上保安庁水路部の協同による「音響による海洋構造手法に関する研究」の一環として行われたものである。水路協会と水路部の皆様に感謝いたします。

また、本研究の一部は文部省科学研究費重点領域研究「深層海水循環」の補助を受けた。

参考文献

- 1) 蜂屋, 大槻, 奥島: “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 US 86-57, 53-58 (1986)
- 2) 蜂屋, 大槻, 奥島: “水平伝搬時間計測による黒潮海域の音速鉛直分布の推定法”, 音響学会誌 44, 377-381 (1988)
- 3) 蜂屋, 大槻, 奥島: “線形インバース手法を用いた浅海域音速鉛直分布の推定法”, 音響学会秋期講演論文集, 857-858 (1987)
- 4) 大槻, 奥島: “海中における超音波伝搬状況観測のためのM系列2周期信号法”, 音響学会誌 38, 619-623 (1982)
- 5) R. C. Spindel, “An underwater acoustic pulse compression system”, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-27, 723-728 (1979)
- 6) 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)