研究

海面反射波の変動特性の実験的検討*

蜂屋 弘之**

(千葉大学工学部)

奥島 基良***

(桐蔭横浜大学)

(平成10年12月11日受付)

Abstract

Sound signals are imperfectly reflected and partly scattered by sea surfaces that are randomly rough. Fluctuations of the sound reflected from the sea surface affect the sound propagation characteristics for ocean measurements. In this paper, we present the experimental estimation results on fluctuations of sound reflected from the sea surface. The quadrature components of the received signal were plotted on the complex plane. The relation between the fluctuation and the rough surface statistics was discussed. The distribution of the component vector is asymmetrical on the complex plane. The reflected points below the average height of surface are more than the points above the average surface. The fluctuation of the reflected points below the average surface is smaller than the fluctuation of the reflected points above the average surface.

ランダムな粗面である海面によって音響信号は不完全に反射し一部は散乱する。この海面反射波の変動は海洋観測における音波伝搬特性に影響を与える。本論文では、海面反射音波の変動の実験的検討結果について述べる。受波信号の直交成分を複素平面に表示し、変動と粗面の統計量の関係を検討した。複素平面上の信号ベクトル分布は非対称である。平均水面より下側の反射点の方が上側の反射点よりも多く、下側の反射点の変動は上側に比べ少ない。

1. はじめに

海洋の種々の観測において海面反射波の影響を評価する必要がある場合がしばしばある。例えば、沿岸域や湾のような浅海域の流速分布、水温分布を長期連続的に観測するために、海底・海面で反射しながら伝搬する多経路伝搬音波を利用することが提案されているが、このとき海底、海面で反射する音波の振幅・位相変動特性を把握することは、精密な伝搬時間計測法や信号処理法など

を知るうえで重要である^{1,2,3)}。また、イルカは水深6mほどの浅海域でも、70m先の6.35cmの金属球ターゲットを見つけることができる高性能の生物ソナーをもっており⁴⁾、このような能力の解明が研究されているが⁵⁾、この場合も浅海域での音響信号の変動の原因である海面反射波の状況を明らかにする必要がある。

これまでに、海面反射波の特性については多くの研究があり^{6,7)}、例えば、振幅の確率密度分布は低波高時の正規分布から波高が高くなるにつれレイリー分布へ変化することが知られており、これらをライス分布で統一的に記述することもできる。しかし、精密な時間測定や海洋変動に対する信号変動の把握のためには、振幅の統計的性質だ

* Experimental estimation on fluctuations of sound reflected from the sea surface

** Hiroyuki HACHIYA(Faculty of Engineering, Chiba University)

*** Motoyoshi OKUJIMA(Toin University)

Fig.1 Configuration of transducers.

けでは不十分で振幅、位相を含めた総合的な時間変動特性を把握することが極めて重要である。

本論文では、水槽において行った海面反射音波モデル実験により得られた受波信号の振幅・位相変動を同時に把握するために、信号の振幅位相を複素平面内に表示し、その特徴を考察するとともに、振幅・位相変動と水面の波の実効値、入射角、送波信号の周波数との関係について定量的な評価を行った結果について述べる。

2. 海面反射音波モデル実験

水面の波と水面反射音波の振幅・位相の変動の関係を把握するために、水槽においてモデル実験を行い、結果を元に水面反射音波の変動を把握し評価する。

モデル実験の配置を Fig.1 に示す。送波には、PZT 方形振動子(10mm × 10mm)を、受波にはハイドロホン(B&K8103)を使用した。送波信号としては、ファンクションジェネレーターによって周波数 83kHz、幅 400 μs のパルス波を、繰り返し周期 0.3 s 程度で送り出し、直接波と海面反射波を時間的に分離できるようにした。受波波形はプリアンプを通った後、デジタル化されコンピュータに転送し記録した。送受波器の深度と

Table 1 Configuration of transducers.

入射角 (deg)	送受波器深度 (m)	送受波器間隔 (m)
0	1	0
25	0.91	0.84
37	0.8	1.2
50	0.64	1.53

間隔を Table 1 のように、音波の伝搬距離を 2m で一定としながら、入射角を 0° から 50° まで変化させた。

また、水面の波はモーターに取り付けた羽を回転させることによって起こし、モーターの回転数を変化させることで波高を制御した。水位の変化は水面に浮かべたフロートの変位から計測した。波高分布はほぼ正規分布となるので、水面の波高振幅の実効値 σ を水面の波の評価に用いた。また、送波信号の波数 k 、水面の波高の実効値 σ 、入射角 θ から、音波の伝搬に寄与すると考えられる水面に垂直な方向の位相変動成分 $k \sigma \cos \theta$ を求め、入射角にかかわらずこの値が同等となるデータがとれるように水面の波高を制御した。

3. 結果と考察

水面の波に対して水面反射波がどのように変動するかを把握するために、受波データを解析した。

3.1 複素平面上に表した振幅・位相変動

振幅と位相の変動を同時に把握するために、信号の直交成分を複素平面上に分布を表示し特徴を把握する。

伝搬信号の受波波形 $w(t)$ は式(1)のような振幅 $x(t)$ 、位相 $\phi(t)$ による表示(極座標表示)と式(2)のような直交成分 $a(t)$ 、 $b(t)$ による表示(直交座標表示)で表すことができる。

$$w(t) = x(t) \cos(\omega t + \phi(t)) \quad (1)$$

$$w(t) = a(t) \cos(\omega t) - b(t) \sin(\omega t) \quad (2)$$

まず、デジタル化された受波信号 $w(t)$ は、Fig.2 に示す直交検波により式(2)に示すような

Fig.2 Demodulation processing

Fig.3 Surface reflected signal on complex plane
(incident angle: 25°)

Fig.4 Surface reflected signal on complex plane
(incident angle: 50°)

直交成分 $a(t), b(t)$ を求め、必要に応じて式(3)のように振幅 $x(t)$ 、位相 $\phi(t)$ に変換した。このとき、水面に波がないときの受波信号が $x(t)=1$ 、 $\phi(t)=0$ ($a(t)=1, b(t)=0$) となるように規格化してある。

$$\begin{aligned} x(t) &= \sqrt{a(t)^2 + b(t)^2} \\ \cos(\phi(t)) &= a(t)/x(t) \\ \sin(\phi(t)) &= b(t)/x(t) \end{aligned} \quad (3)$$

送波信号として 0.3 s 間隔で幅 $400 \mu\text{s}$ のパルス波を用いているが、0.3 s ほどの各受波パルス間では大きな変動が観測されるが、各受波パルス内の水面反射波部分は $50 \mu\text{s} \sim 300 \mu\text{s}$ の範囲で振幅 $x(t)$ 、位相 $\phi(t)$ がほとんど変化しないので、この区間での値を解析に用いた。

水面の波高値を変化させたときの、受波波形の直交成分 $a(t), b(t)$ の変動を Fig. 3, 4 に示す。入射角は 25° と 50° である。各点が 0.3 s 間隔の受波信号を示す。送波信号の波数 k 、水面の波の実効値 σ 、入射角 θ から、音波の伝搬に寄与すると考えられる水面に垂直な方向の成分 $k\sigma \cos\theta$ を求め比較すると、Fig. 3(a) と Fig. 4(a), Fig. 3(b) と Fig. 4(b) のように、入射角に関わらずこの値が同等のときは同じような分布を示している。

水面に波がない状態では、 $a(t)=1.0$ 、 $b(t)=0.0$ であるが、入射角がいずれの場合にも、波高の実効値が大きくなるにしたがって、水面反射波の変動が、大きくなっていくのが分かる。波高が小さく、 $k\sigma \cos\theta = 0.2$ [rad] 程度の間は、振幅方向の変動より位相方向の変動が顕著である。この位相方向のゆるやかな変動は、周波数の変化として検出することもでき、ドプラ効果に対応する変動である。水面の波高が次第に増加し、 $k\sigma \cos\theta$ が更に増加すると振幅方向の変動も大きくなっていく。 $k\sigma \cos\theta = 0.6$ [rad] 程度になると複素平面上での分布はほぼ平均値 0 の二次元正規分布となり、振幅 $x(t)$ の分布に関しては、レイリー分布に近づく。

$k\sigma \cos\theta = 0.2 \sim 0.6$ [rad] の間では、信号の複素平面上での分布は $b(t) > 0$ の半平面と $b(t) < 0$ の半平面では分布状況が異なり、非対称な分布となっている。

$b(t) < 0$ の半平面での変動の方が $b(t) > 0$ の半平面での変動より大きい。 $b(t) < 0$ の半平面は水面が

上がった場合に対応しており、波の平均水面より上の部分での反射点の変動が平均水面より下の部分での反射点の変動より大きいことを示している。

入射角 25° と 50° の場合を示したが、入射角 0° 、 37° でも同様の結果であった。

3.2 ライス分布による振幅変動の評価

複素表示上に表した信号の直交成分 $a(t), b(t)$ の変動は Fig. 5 のようにベクトルを用いて表すことができる。波がないときの複素平面上で信号 s は (1, 0) で表されるベクトルである。波高が小さい間は水面のゆるやかな上下に伴ない、水面の反射点が上下するため振幅がほぼ一定のまま位相だけが回転する。

水面が下降した場合が $\phi(t) > 0$ ($b(t) > 0$)、上昇した場合が $\phi(t) < 0$ ($b(t) < 0$) に対応する。

水面の波高が大きくなるにつれ、複数の反射点が存在するようになり、その反射点もランダムに変動する。この結果、規則的な(コヒーレントな)成分 s が小さくなり、不規則な(インコヒーレントな)成分 n がしだいに大きくなっていく。

このようなコヒーレント成分とインコヒーレント成分があるときの振幅確率密度はライス分布で表現できる。ライス分布は、狭帯域正規ランダム過程の雑音と正弦波の和の統計的性質を表した確率密度関数である^{7,8)}。信号のエネルギーを 1 に正規化した場合のライス分布は式(4)で表される。

Fig. 5 Surface reflected signal on complex plane. s : coherent component. n : incoherent component.

Fig.6 Probability density function of signal amplitude(incident angle:50°)

$$p(x) = 2x(1+\gamma) \times \exp(-((1+\gamma)x^2 + \gamma)) I_0(2x\sqrt{\gamma(1+\gamma)}) \quad (4)$$

p は、確率密度、 x は振幅、 I_0 は第1種0次の変形ベッセル関数である。 γ はコヒーレント成分とインコヒーレント成分のエネルギー比で正弦波(コヒーレント成分)の実効値 s と、雑音(インコヒーレント成分)の二乗平均 $\langle n^2 \rangle$ を用いて、

$$\gamma = s^2 / \langle n^2 \rangle \quad (5)$$

となる。 $\gamma=0$ の場合はレイリー分布となり、 γ が大きいときは正規分布となる。

Fig.6 に入射角度が50° の場合の受波信号振幅 x の振幅確率密度を示す。+印が測定結果を示す。振幅 x は二乗平均 $\langle x^2 \rangle$ で規格化してある。水面反射波の振幅変動の頻度分布は水面の波が小さい時は、ほぼ正規分布になり、波が大きくなるとレイリー分布で近似できる。実線は測定結果に最も適合するように求められたライス分布である。

このコヒーレント成分 s とインコヒーレント成分 n のエネルギー比 γ と $k\sigma\cos\theta$ の関係を Fig.7 に示す。 $k\sigma\cos\theta$ の増加するにしたがい、コヒーレント成分が指数的に減少していくことが分かる。

コヒーレント成分とインコヒーレント成分のエネルギー比は振動子の指向特性、水面の波の波高や波長、形状などに関係し、解析的な記述は困難である⁶⁾。しかし、一般に多くのランダム反射点

Fig.7 Relationship between $k \cos \theta$ and energy ratio γ .

が関与すればするほど、 γ は0に近付いていく。ここで示したように、指向特性が同一ならば、 $k \cos \theta$ と γ は一定の関係があることが分かる。

3.3 水面反射点分布の評価

振幅確率密度はライス分布で表現されることを確認したがこれでは、分布の非対称性の検討は十分ではない。そこで、複素平面内で $b>0$ の半平面に信号がある頻度 P_1 と $b<0$ の半平面に信号がある頻度 P_2 の比について検討した。Fig.8に頻度の比 P_1/P_2 と $k \cos \theta$ の関係を示す。

水面の波の振幅が小さいとき、入射角が 0° のときのデータを除いて、ほぼ $b>0$ の半平面に信号がある頻度は $b<0$ の半平面に信号がある頻度の1.5倍と大きい。これは平均水面より下側の反射

Fig.8 Probability ratio, p_1/p_2

点が上側より1.5倍程度多いことを示している。

Fig.3,4とこの結果から、水面反射波は平均水面より下側の反射点が多く、また、下側の反射点に比べ上側の反射点は変動が大きいことがわかった。これらの結果は、信号変動の時間的な性質を議論する場合に重要である。

4. 結論

本論文では、水槽において行った海面反射音波モデル実験により得られた受波信号の振幅・位相変動を同時に把握するために、信号の振幅位相を複素平面内に表示し、その特徴を考察するとともに、振幅位相の時間的な変化について検討した。

これらの検討により、平均水面より上側の反射点と下側の反射点の挙動は異なっており、平均的には下側の反射点の方が多く、またその変動も上側に比べ少ないことがわかった。今後、コンピュータシミュレーションによりこれらの現象をより詳細に検討する予定である。

本研究の一部は、文部省科学研究費補助金「生物ソーナー」(基盤研究(B)(1)09450172)の補助を受けた。

謝辞

基礎実験のデータを収集してくれた川崎守君(現中部電力)に感謝いたします。

参考文献

- 1) 蜂屋弘之, 大槻茂雄, 奥島基良, 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, 海洋音響学会誌, 17, [2]106-113, 1990.
- 2) 蜂屋弘之, 大槻茂雄, 奥島基良, 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, 海洋音響学会誌 17, [1]29-36, 1990.
- 3) Hiroyuki HACHIYA, Shigeo OHTSUKI, Motoyoshi OKUJIMA, An Estimation Method of Vertical Sound Speed Profile in Mid-Deep Water Using Multipath Propagation, Jpn.J.Appl.Phys., 26, [Suppl.26-1]73-75, 1987.
- 4) Whitlow W.L.Au, Sonar of Dolphins, Springer-Verlag(1993).
- 5) 福島正忠, 蜂屋弘之, バイオソーナー, 海洋音響学会(1997).
- 6) H.Medwin, C.S.Clay, Fundamentals of Acoustical Oceanography, Academic Press(1998).
- 7) Timothy K. Stanton and Clarence S.Clay,

Sonar Echo Statistics as a Remote-sensing Tool:
Volume and Seafloor, IEEE J. Ocean.Eng.
Vol.OE-11 No.1 79-96(1986).

- 8) 横山光雄, スペクトル拡散通信システム, 科技
術出版社, 141(1988).