

九州大学工学部 正員 井島 武士
同 学生員 ○富吉 従夫
同 学生員 山 根 信

1. まえがき

主要な波浪観測法として、水圧式波高計を用いる方法がある。この方法は、水面変動による水中の圧力変動を測定することにより、水面変動を求めるものである。微小振幅波理論によると、海面上の一点の水面変動 $\eta(t)$ とそれによる圧力変動 $P(t)$ との間には次の関係がある。

$$P(t) = \rho g \eta(t) \frac{\cosh k_p h}{\cosh k_p h} \quad (1)$$

ここで、 ρ は海水の密度、 g は重力の加速度、 $k_p = 2\pi/L$; L は波長、 h は水深、 h_p は水底からの高さで、波長 L と周期 T の間には次の関係がある。

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (2)$$

実際の観測では、次の手順によっている。i) 水圧波形の有義波高 $H_{p/3}$ 及び有義波周期 $T_{p/3}$ を求める。ii) 2)式において、 $T = T_{p/3}$ において対応する波長 $L_{p/3}$ を計算する。iii) 1)式において、 $P(t)/\rho g = H_{p/3}$ 、 $k_p = k_{p/3} (= 2\pi/L_{p/3})$ として水面波の有義波高を求める。この方法によって求められる水面波は、直接観測によるものよりも波高は小さく、周期は大きく出てくる傾向にある。これを補正するために、補正係数 η_H , η_T なる値が用いられ、

$$H_{1/3} = \eta_H H_{p/3} / \frac{\cosh k_p h}{\cosh k_{p/3} h} \quad T_{1/3} = \eta_T T_{p/3} \quad (3)$$

としている。この補正係数の値に関しては、規則波及び不規則波を用いた室内実験、現地観測によるものなど多くの研究がなされているが、観測による決定は不可能で、一般には 1.3 ~ 1.35 程度を用いている。

著者等は、不規則波に対する補正係数の値を明らかにするため、観測に代る方法として電子計算機による水面波及び圧力波のシュミレーションを行なった。結果は一部のケースについてのみ得られているので、その範囲内で報告する。

2. 水面波形及び圧力波形のシュミレーション

一般に、海面上の一点での水面変動は、多くの周波数とそれに対応する微小な振幅とランダムな位相をもつ成分波の重畳からなるものとしている。従って、シュミレートする水面波形は次のように表わされる。

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{\Phi(\sigma_n) \Delta \sigma_n} \cos(\sigma_n t + E_n) \quad (4)$$

ここで、 $n=1, 2, 3, \dots, N$ で、 σ_n は成分波の周波数、 $\Phi(\sigma_n)$ は周波数 σ_n のスペクトル密度であり、 $\sqrt{\Phi(\sigma_n) \Delta \sigma_n}$ は周波数 σ_n の成分波のスペクトル振幅を表わす。成分波の周波数 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N$ は互いに相関がないことが必要であり、またそれぞれの成分波の振幅の大きさは近似的に等しいことが望ましい。ここでは、与えられたスペクトルを数値積分して、その面積を等分割するような周波数を選んでいく。 E_n は周波数 σ_n の成分波の位相で、 $(0 \sim 2\pi)$ の区間で一様確率をもって分布する独立変数である。圧力波形については、次式のように表わされる。

$$\eta_p(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{\Phi(\sigma_n) \Delta \sigma_n} \frac{\cosh k_n h_1}{\cosh k_n h} \cos(\sigma_n t + \varepsilon_n) \quad (5)$$

ここで、 k_n は、 $\sigma_n^2 = g k_n \tanh k_n h$ ($n=1, 2, 3, \dots, N$) で与えられる。

3. 計算及び結果

計算にあたって、重ね合わせる成分波の数 $N=50$ 、スペクトルの最大の周波数 2π (sec⁻¹)、波形記録の時間間隔 $\Delta t = 0.25$ (sec) 及びその個数を 2000 とした。周波数スペクトルとしては、6)式に示す見易のスペクトルを用いた。

$$\begin{aligned} \text{低周波側} \quad \Phi(\sigma) &= 9.13 \times 10^{-10} g^2 \sigma^{-5} \exp \left\{ 3.52 \left(\frac{gF}{U_*^2} \right)^{0.312} \frac{U_* \sigma}{g} \right\} \\ \text{高周波側} \quad \Phi(\sigma) &= 0.589 g^2 \sigma^{-5} \left(\frac{gF}{U_*^2} \right)^{-0.308} \end{aligned} \quad (6)$$

スペクトル密度が最大となるところの周波数 σ_m は上の2式に等しいとおいて、7)式で与えられる。

$$\sigma_m = 2\pi \times \left\{ 0.917 - 0.014 \log \left(\frac{gF}{U_*^2} \right) \right\} \left(\frac{gF}{U_*^2} \right)^{-0.312} \frac{g}{U_*} \quad (7)$$

ここで、 F は吹送距離、 U_* は摩擦速度で、海面上 10^m における風速 U_{10} との間の関係式として、 $U_{10} = 25 U_*$ を用いた。一般に、海面波はスペクトル密度が最大となるところの周波数 σ_m に対応する周期 $T_m (= 2\pi/\sigma_m)$ が有義波の周期に近似されるものとしている。補正係数 n_H, n_T に対する σ_m の影響を明らかにするため、 U_{10} を一定 ($=15$ m/s) にして、吹送距離を変えて種々の σ_m について計算を行なった。水深については、 $h_1/h = 1/6$ として、水深 $h = 4^m, 6^m, 12^m$ のケースについて行なった。

Fig. 1 にシミュレートした水面波形及び圧力波形の一部を示している。実線が水面波形、破線がそれによる圧力波形を表わしている。これを見ると、両波形の山と谷はよく対応しているが、圧力波形がなめらかなのに対し、水面波形は複雑に変化している。

シミュレートして得られた波形記録より再生したスペクトルと初めに与えたスペクトルとの比較例を Fig. 2 に示している。

更に、その波形記録から、ゼロアップクロス法によって波高、周期を読み取り、3)式を用いて算出した補正係数 n_H, n_T の値をプロットしたのが Fig. 3 である。横軸には水深と圧力波の周期から決まる波長の比 h/L をとっている。

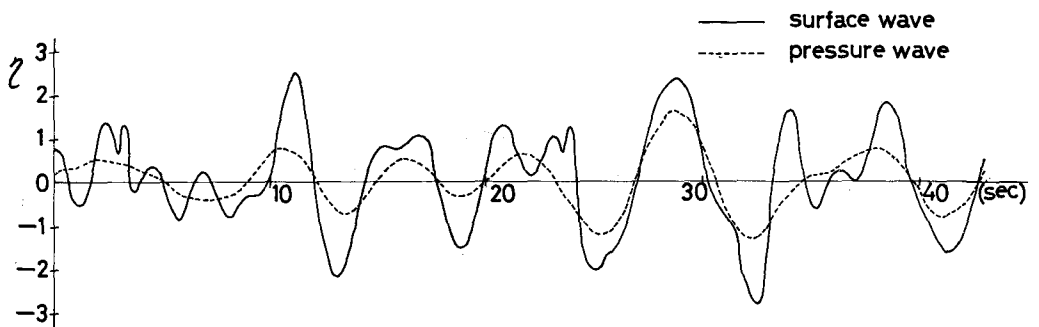


Fig.1 Example of simulated wave profile

Fig. 3を見ると、ちらばりが大きい、次のことが言える。

- i) 波高補正係数 n_H の値は 1.0 ~ 1.5 の範囲にあり、 R/L が小さくなる程 1 に近づく傾向がある。
- ii) 周期補正係数 n_T の値は 1 より小さい範囲にあり、 n_H と同様に、 R/L が小さくなる程、1 に近づく傾向がある。
- iii) 同じ R/L の値に対しては、水深が大きい方が n_H は大きく、 n_T は小さい傾向にある。

また、ちらばりの原因としては、

- i) R/L を決めるとき、圧力波のみかけの周期を用いているため。
- ii) 補正係数 n_H, n_T は R/L だけの関数ではない。
- iii) 波形記録の個数を一定としたので R/L が小さい範囲では過出した波数が少ないため。

などが考えられる。

4. あとがき

計算ケースが限定されているが、 R/L 及び水深 R に対する大体の傾向が分かったので、今後、 U_{10} 、 R/L を変えて計算を行ない、更に、水面波形、圧力波形及びガスパトルを無次元化して計算を行なう予定である。

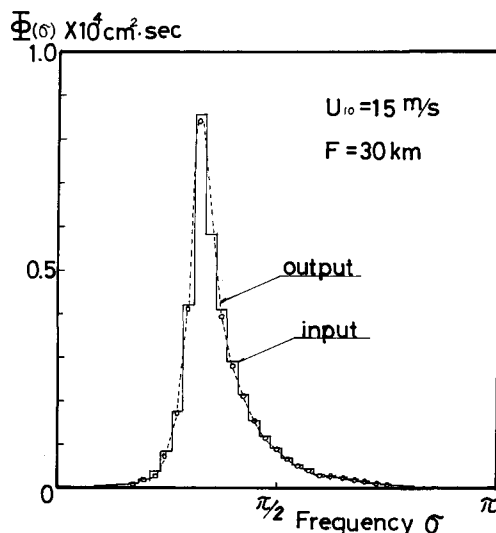


Fig.2 Example of input spectrum & output spectrum

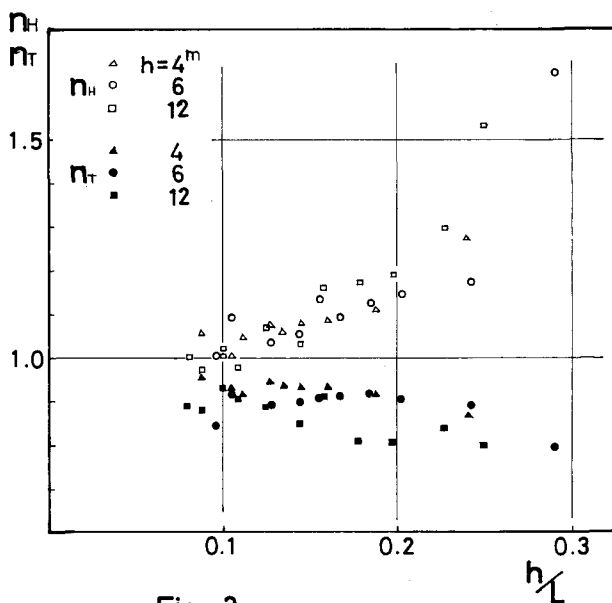


Fig. 3

参考文献

Borgman, L.E. (1969); Ocean wave simulation for engineering design, Jour. Waterways and Harbors Division Vol. 95, No. WW4.

白田良実 (1970); 波浪の統計的性質に関する数値実験 Vol. 9, No. 3.