

複合型波高計用データ処理手法の開発について

小舟 浩治*・合田 良実**・佐々木 弘***・森田 行司***

1. ま え が き

波浪の現地観測の使用される観測機器には、様々なものがあるが、中でも超音波式波高計は、現在日本国内においては、最も広範囲に使用されている機器である。

この超音波式波高計は、海底に設置されたセンサー(送受波器と呼ぶ)から発射された超音波パルスが海面で反射され再び海底の送受波器に戻ってくるまでの所要時間を計測することにより、時々刻々変動する海面の位置を捉えるという原理を用いている。そのため、海面付近が乱れている場合には超音波パルスが散乱・吸収されるため、海底の送受波器が反射音を捉えられなくなる。特に高波が来襲するような場合には、碎波あるいは強風の影響により海面が乱れることによって、気泡がかなり混入するようになり、正常な波形記録を得ることができなくなる。

こうした超音波式波高計の持つ難点の改善方法として、比較的発生頻度の高いスパイク状のノイズを自動的に判別して除去する機能を有するデータ演算装置が開発されている¹⁾。しかし、高波時の連続的な反射音の欠落については、波形記録の処理のみでは対処することは困難であり、別な手法で波形を推定する必要がある。

本報告は、超音波式波高計が計測不能となるような高波時に、水圧センサーによる海底の圧力変動記録をもとに、海面における波浪諸元を推定する手法を検討したのであり、超音波式波高計と水圧式波高計を併用することによって互いの難点を補い、欠測のない観測データを取得することを目的としている。

2. 水圧波形記録の処理方法

(1) 従来の方法における問題点

水圧波形記録から表面波の有義波諸元の代表値を求める方法として、従来から用いられている方法は、水圧波形をゼロ・アップクロス法により波別解析し、水圧波の波高の有義値 $P_{1/3}$ (静水圧の水頭で表示、単位は m また

は cm) 及び有義波周期 T_p を求め、次式により表面波の有義波高を計算する方法であり、現地不規則波をその有義波高及び有義波周期に相当する波高・周期を持つ単一の正弦波として扱う、いわば便宜的な方法である。

$$\hat{H}_{1/3} = n_H \frac{\cosh k_p h}{\cosh k_p d} P_{1/3} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\hat{H}_{1/3}$ は表面波形の有義波高の推定値、 n_H は補正係数(従来 1.1~1.4 が用いられている)、 h は水圧センサーの設置水深、 d は海底面から測った水圧センサーの高さ、また k_p は水圧波形の有義波周期 T_p に対応する波数 k である。

以上のような方法で表面波の有義波高を推定する場合、補正係数 n_H は、表面波形の有義波周期よりも長い水圧波形の有義波周期を用いて応答関数 $H(\omega)$ ($=\cosh kh / \cosh kd$) を求めることによる誤差を補正する働きを持つ。すなわち、水中圧力の表面波形に対する応答関数は周波数が低く(周期が長く)なるほど小さくなるという特性を持っており、表面波形の有義波周期よりも長い水圧波形の有義波周期を用いることにより、実際よりも小さな応答関数が得られることになり、これに乗じて推定した表面波の有義波高は一般に実際よりも小さい値となるためである。したがって、補正係数 n_H は、表面波の有義波周期 $T_{1/3}$ と水圧波形の有義波周期 T_p の差がどの程度であるかによって変化し、その結果、その値は観測地点の水深、センサー設置高さ、来襲波の周期などによって変化するばかりでなく、来襲波の持つスペクトル形状のよっても様々に変化する。

図-1 は周波数スペクトルを式(2)で与え、指数 m の値が 3, 5, 10, 20 の 4 種類のスペクトル形についてシミュレーション²⁾により補正係数 n_H がどのように変化するかを求めた結果を示したものである。

$$S_n(f) = \alpha H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-m} \times \exp[-(m/4)(T_{1/3} f)^{-4}] \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 α は式(3)を満足するための比例定数である。

$$H_{1/3} = 4.0 \sqrt{m_0} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(m_0 : スペクトルの 0 次モーメント)

この図からわかるように、来襲波のスペクトルが幅広である $m=3$ の場合には n_H は $k_p h$ の増加と共に急速

* 正会員 工修 運輸省 港湾技術研究所 海象調査研究室長

** 正会員 工博 横浜国立大学教授 工学部建設学科

*** 海上電機(株) 第四技術部

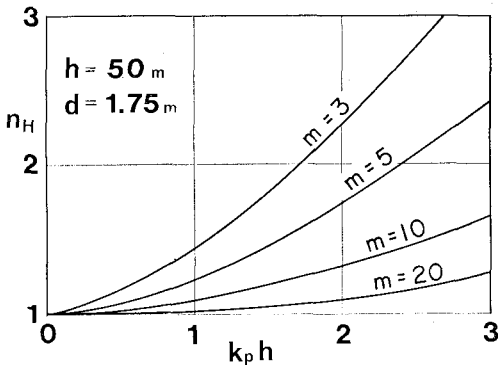


図-1 スペクトル形の違いによる補正係数の変化

に増大するが、鋭いスペクトル形状である $m=20$ の場合には n_H の変化は少ない。

このように、 u_H の値は来襲波のスペクトル形状によって大きく変化するので、 n_H を適切に与えるには、観測海域に出現する波のスペクトル特性が十分にわかっている必要があり、さらに、観測を行う海域毎にスペクトル形状に応じて異なる補正係数を設定する必要がある。

(2) 回帰式による推定

上記(1)に示したように、従来の便宜的換算法における補正係数は、来襲波の周波数スペクトル形により大きく変動し、実用上不都合であることがわかったので、来襲波のスペクトル形状を考慮に入れた換算法を考えることにする。

海面の水位と水圧が線型の関係を持って変動するものとする、ある時刻における水位 $\eta(t)$ は重み関数 $h(\tau)$ を用いて、次のように Convolution Integral で表示できる。

$$\eta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) p(t-\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$$h(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) \exp(i\omega\tau) d\omega, \quad \dots\dots\dots (5)$$

$\omega = 2\pi f$, f は周波数, τ は time lag である。また、微小振幅波理論によれば、応答関数 $H(\omega)$ は偶関数であるので、これを考慮して式(5)は次のように変形できる。

$$h(\tau) = 2 \int_0^{\infty} H(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega \quad \dots\dots\dots (6)$$

微小振幅波理論によれば、応答関数 $H(\omega)$ は ω の増加と共に急速に増加するが、3. で示すように実測応答関数は ω がある値を越えると(水深 50 m では $\omega > 1.0$ ラジアン s^{-1}) 若干振動するもののほぼ一定値となっている。したがって式(6)の積分において、 $H(\omega)$ が定数であれば $\cos \omega\tau$ の1周期を積分とすると0となるので、結局式(6)は近似的に次のように書き直すことができる。

$$h(\tau) \doteq 2 \int_0^A H(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 A は適当な積分範囲を示す。

式(7)における積分範囲の上限値をいくらにすれば良いか不明であるが、 $h(\tau)$ は特定の time lag $\tau = m\Delta t$ (Δt はデータ収録時間間隔)に対して定数となるので、式(7)は結局次の線形回帰式の形で表されることに着目し、表面波形と水圧波形の同時観測記録から逆に係数 C_m を求めることを考える。

$$\eta(t) = C_0 p(t) + \sum_{m=1}^M C_m [p(t-m\Delta t) + p(t+m\Delta t)] \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(8)のような線形回帰式の係数を観測値から決定する方法として一般によく用いられるのは最小自乗法であり、回帰式の項数を M とすると、係数 C_m の値は次の連立方程式を解くことにより求められる。

$$\sum_{m=0}^M (\sum_t P_n P_m) C_m = \sum_t \eta_0 P_n \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$(n=0, 1, 2, \dots, M)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \eta_0 &= \eta(t), & P_0 &= p(t), \\ P_m &= p(t-m\Delta t) + p(t+m\Delta t). \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

また、 $\sum_t$ は時間に関する総和 ($t=i\Delta t$, $i=1, 2, \dots$) を表す。

3. 現地データの解析

(1) 観測地点及び観測施設

本報告において、解析の対象とした観測記録は、那覇港において、1987年11月28日から12月6日までの期間に取得した水位と水圧の同時観測記録である。複合型波高計の開発目的が高波時の波浪観測であることを考慮し、有義波高が比較的大きい期間の観測データを抽出したものである。

波高計設置水深は -50 m であり、水圧センサーは超音波式波高計の送受波器内部に取り付けられている。また、観測記録は 0.5 秒間隔でデジタルデータに変換され、カートリッジ式磁気テープに収録している。

(2) 圧力センサーの応答特性

有義波高が 4.0 m を超える例を抽出し、その観測時刻及び前後の水位及び水圧波形をスペクトル解析し、圧力センサーの応答特性(周波数毎の水位と圧力両スペクトルの比)を求めた。その結果を図示したものが図-2 である。図中の Δ , $\blacktriangle$, $\bullet$, $\circ$ は、各々の観測時刻における実測応答関数を示しており、実線は微小振幅波理論が与える応答関数である。低周波側及び高周波側では理論曲線とは差が見られるものの、来襲波のエネルギーの大部分が集まっている周波数範囲、すなわち $f=0.06 \sim 0.15 s^{-1}$ ($T=7 \sim 17 s$) の範囲では、実測値と理論値はほぼ一致している。

このことから、圧力センサーの応答特性はほぼ良好と

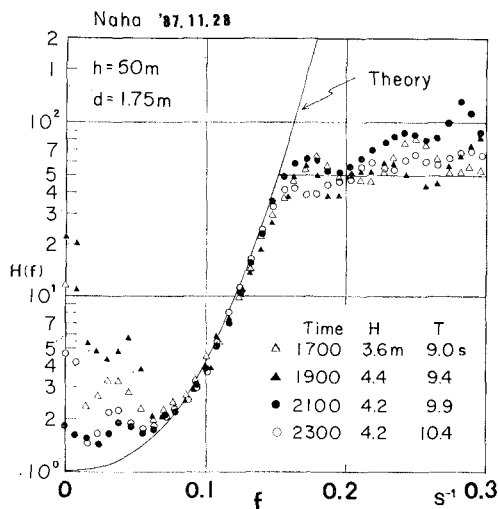


図-2 水圧センサーの応答特性

言える。

(3) 周波数スペクトルの形状

観測期間中の最大有義波高を記録した1987年12月2日5時の周波数スペクトルは図-3に実線で示す形状である。この時刻の実測スペクトルは、同図の中に点線で示した Bretschneider・光易型周波数スペクトル³⁾とは異なり、ピーク付近に波のエネルギーが集中した鋭いスペクトル形状となっている。

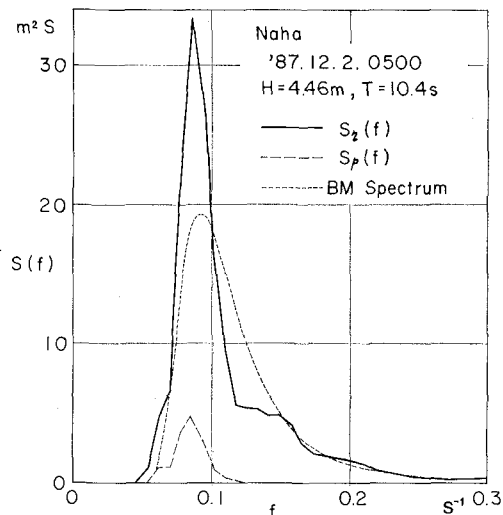


図-3 周波数スペクトルの観測例

4. 現地演算装置用データ処理手法の検討

(1) 回帰式の適用性について

11月28日17時～12月3日16時までの期間、毎時の表面波形と水圧波形の実測値をもとに最小自乗法(式

(9))により式(8)の係数 C_m を各時刻ごとに求め、この係数を用いて各々の観測時刻の表面波形を推定した。図-4は表面波形、推定波形および水圧波形の比較例であり、図中の太い線が実測表面波形、点線が水圧波形である。また、細い実線は水圧波形をもとに換算した推定波形である。表面波形に見られるような細かい振動は、推定波形には見られないが、大きな変動についてはうまく推定していると言える。

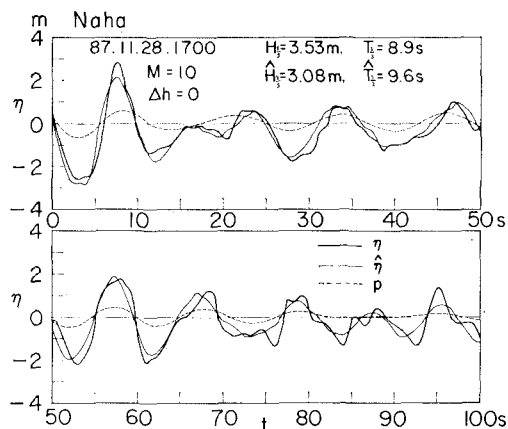


図-4 実測波形と推定波形の比較

(2) 有義波諸元の比較

上記(1)のようにして求めた推定波形をゼロ・アップクロス法により波別解析し、代表波諸元を求め、表面波のそれとの比較を行った。有義波の諸元について、表面波の値と推定波の値の相関を求めると図-5のようになる。図-5の左図は有義波高の相関を示しており、横軸は表面波の有義波高、縦軸は推定波形の有義波高を示している。また右側の図は、同様にして有義波周期の相関を示した図である。このように、推定波形の有義波高は実測有義波高に比べて少し小さいようであるが、両者の相関は極めて高い。一方有義波周期については、推定値の方が少し大きいようであるが、両者の相関は高い。

(3) 周波数スペクトルの比較

推定波形のスペクトルと表面波の実測スペクトルを比

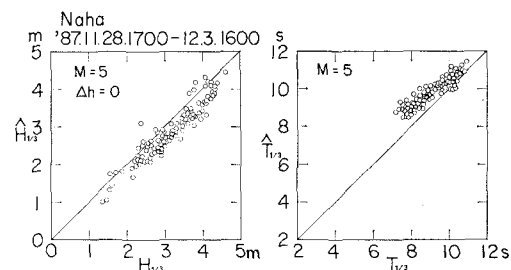


図-5 表面波形と推定波形の有義波諸元の相関

較した例が図-6であるが、 $f > 0.16 \text{ s}^{-1}$ の高周波側では推定波形のスペクトル密度が小さくなっていることがわかる。このようなスペクトル形状の差は、式(8)の回帰係数 C_m が表面波と水圧波の両波形の関係を最もよく近似するよう最小自乗法により決定されているため、波のエネルギーが最も大きくなる周波数帯の応答特性をうまく表現するような係数が得られることによると考えられる。

こうした違いにより、有義波高は小さめ、有義波周期は大きめに推定されるという結果になったものと考えられる。

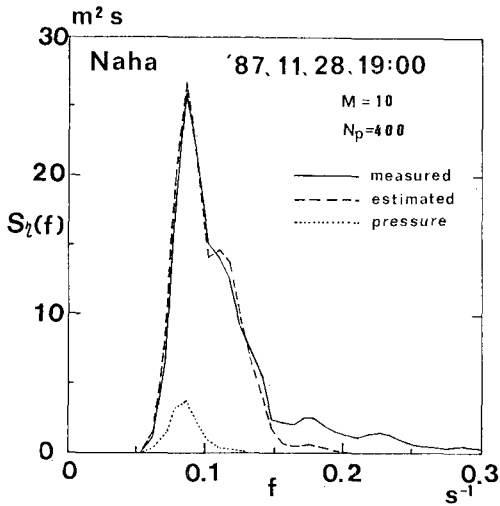


図-6 周波数スペクトル形状の比較

(4) 補正係数の導入

図-5に見られるように、有義波高の推定値は実測値より小さく、有義波周期の推定値は実測値より大きいという傾向があるけれども、両者の相関が高いことから、補正係数を導入することにより対処することを考える。

図-7は有義波高の実測値と推定値の比 ($H_{1/3}/\hat{H}_{1/3}$) 及び有義波周期の実測値と推定値の比 ($T_{1/3}/\hat{T}_{1/3}$) と、 kph (ここに k_p は推定有義波周期に対する波数 k , h は

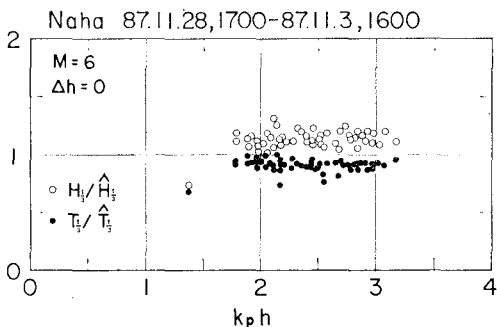


図-7 補正係数の検討

水深である) の関係を示した図である。 $k_p h \leq 3$ の範囲周期 ($T_{1/3} > 7.5$ 秒程度) では、これらの比はほぼ一定であり、波高比は 1.1 程度、周期比 0.95 程度の値となっている。したがって、推定有義波諸元にこれらの補正係数を乗じることにより、平均的にはほぼ妥当な有義波諸元の推定値が得られるものと考えられる。

(5) 実用上の問題点の検討

a) 回帰式の係数決定に用いる波形記録長及び項数

データ処理に要する時間を短縮するためには、回帰式の係数を決定するのに用いる波形記録長や回帰式の項数が少ない方が望ましい。

図-8は11月28日17時から12月3日17時までの120観測について、各観測時刻の波形記録から、200, 300, 600, 1200秒の4種類の長さの記録をもとに回帰係数を求め、これらの係数を用いて有義波諸元を推定した場合に、波高比及び周期比の平均値や標準偏差がどのように異なるかを調べた図である。左図は平均値、右図は標準偏差を示している。この図から、係数決定に用いる波形記録長の差はほとんど結果に影響を及ぼさないことがわかる。したがって、20分観測記録のうちわずか200秒程度の記録が正常であれば表面波の有義波諸元を推定できるものと考えられる。

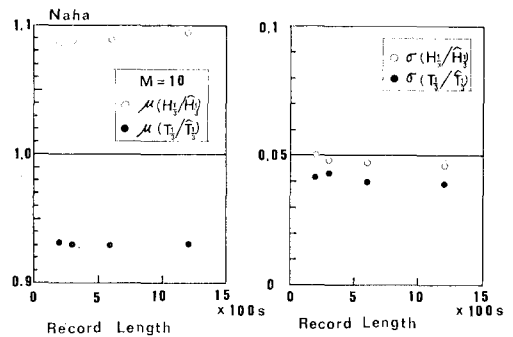


図-8 回帰係数決定に用いる波形記録長の影響

また、図-9は回帰式の項数を種々に変化させた場合、波高比及び周期比の平均値や標準偏差がどのように変化するかを示した図である。このように、項数 M を増加しても平均値にはあまり改善がみられないが、標準偏差については $M=10$ 程度まで増すことにより、かなり改善されることがわかる。したがって、項数 M としては 10 程度を用いるのが適当と考えられる。

b) 重み関数の持続性

実際に超音波式波高計に異常信号が現れた場合、その時刻の記録からは回帰係数 C_m を求めることができず、1観測前、あるいはそれ以前に求めた係数値を用いて表面波への換算を行うことになる。

図-10は11月28日17時から20時までの3時間の

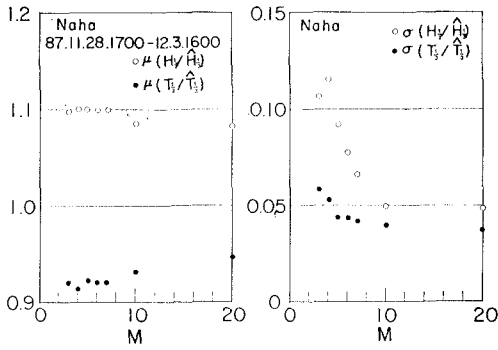


図-9 回帰式の項数の影響

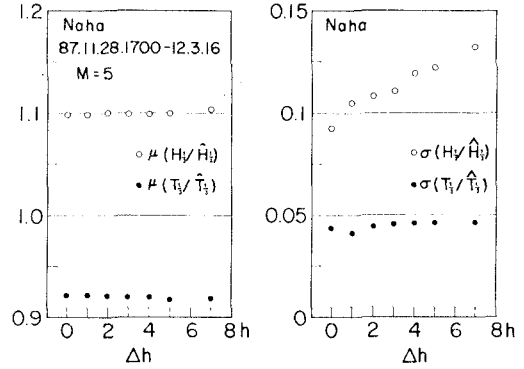


図-11 回帰係数の持続性の検討

うちに重み関数（回帰式の係数 C_m ）がどのように変化するかを図示したものである。もちろん観測時刻毎に重み関数 $h(\tau)$ の値は少し差が見られるものの、 τ の変化に伴う全体的な変動状況はそれほど大きな差異はなく、類似した変動特性を示している。

また、図-11 は、ある時刻の観測記録から求めた係数の値が、何時間後まで使用可能であるのかを調べたものである。横軸の Δh は、回帰係数を決定した時刻と、その係数を用いて水圧波形の換算を行った時刻のずれを示している。右図は平均値と Δh の関係、左図は標準偏差と Δh の関係を示しているが、平均値については Δh が7時間となってもあまり変化はみられない。しかし、標準偏差は Δh の増加と共に大きくなる傾向が見られ、特に波高比の標準偏差が大きくなることがわかる。

5. あとがき

上に述べたような検討は、常陸那珂港（水深 30 cm）の観測データに対しても行っており、本方式が適用可能であることを確かめている。しかし、高波（異常波浪時）の記録の数がまだ少なく、係数値の値としてどのような値を用いれば良いかを提案するには至っておらず、今後高波データを蓄積した上で判断する必要がある。そのた

め、現時点では毎観測後、通常の解析により有義波やその他の代表値を計算した後、表面波形記録が正常であればその表面波形記録と水圧波形記録から回帰係数の値を求め、逐次新しい係数値を記憶しておくという方法が考えられる。そして、超音波式波高計の記録が異常と判断されたときには、記憶されている最新の係数値を用いて水圧波形を表面波形に換算することにより、代表波の諸元を推定することができる。

最後に、本研究は港湾技術研究所と海上電機（株）の共同研究により実施されたものであることを付記しておく。また、現地試験を快くお引受け頂いた沖縄総合事務局那覇港工事事務所の関係者の方々にお礼申し上げますとともに、現地観測の実施期間中始終御尽力頂いた同工事事務所の棚田建設専門官に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐々木 弘・合田良実・小長井 孝： 現地用波浪データ演算装置の開発について、港湾技研資料 No. 580, 23 p., 1987.
- 2) 合田良実： 波浪の統計的性質に関する二・三の数値的検討、港湾技術研究所報告，第24巻第4号，pp. 65～102, 1985.
- 3) 光易 恒： 風波のスペクトルの発達 (2) 一有限な吹送距離における風波のスペクトルの形について、第17回海岸工学講演会論文集，土木学会，pp. 1～7, 1970.

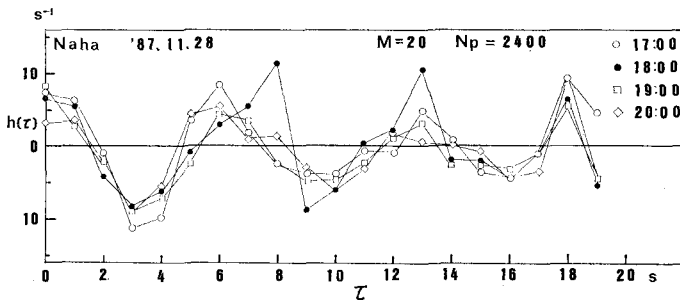


図-10 重み関数の持続性