

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 27      NO. 3      SEPT. 1988

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第27巻 第3号 (Vol. 27, No. 3), 1988年9月 (Sept. 1988)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model  
in  $1g$  Gravitational Field ..... Susumu IAI ..... 3  
( $1g$  場での地盤—構造物—流体系の模型振動実験の相似則 ..... 井合 進)
2. Large Scale Model Tests and Analyses of Gravel Drains  
..... Susumu IAI ..... 25  
(グラベルドレーンの大型模型振動実験と解析 ..... 井合 進)
3. 現地観測における水圧波形から表面波への換算手法について  
..... 小舟浩治・合田良実・成田 明・佐々木 弘・森田行司... 161  
(Surface Wave Recovery from Wave Pressures Profile Based on  
Field Observation  
..... Koji KOBUNE, Yoshimi GODA,  
Akira NARITA, Hiroshi SASAKI and Yukiji MORITA)
4. 正規圧密地盤上の浅い基礎の支持力 ..... 北誥昌樹・遠藤敏雄・寺師昌明... 185  
(Bearing Capacity of Shallow Foundation on Normally  
Consolidated Ground  
..... Masaki KITAZUME, Toshio ENDOH and Masaaki TERASHI)

### 3. 現地観測における水圧波形から表面波への 換算手法について

小舟浩治\*・合田良実\*\*・成田 明\*\*\*・佐々木弘\*\*\*\*・森田行司\*\*\*\*

#### 要 旨

現地波浪観測機器として、現在では超音波式波高計が最も広く用いられている。しかし、この超音波式波高計は、荒天時に波が砕けるようになると、海面付近に巻き込まれた気泡により音波が散乱されたり吸収されたりするため、正常な波形記録が取得できなくなるという難点を持っている。現地波浪観測の主要な目的の一つは、構造物の設計波浪条件に近いような高波を捉えることであり、高波時に計測不能になることは波浪観測上の大きな問題となっている。

本研究は、こうした超音波式波高計の持つ難点を補う手段として水圧センサーによる圧力変動の同時観測を行った場合、二つの記録を現地で即座に処理する方法としてどのような処理方法が適切であるかを検討したものである。

水圧波形記録から表面波形記録の代表諸元(有義波など)を推定する手法として

- (1) 水圧波形の有義値に換算係数を乗じる従来の方法
- (2) 線型回帰式を用いて表面波形を推定する方法

の2つの方法を取り上げ、那覇港(水深50m)および常陸那珂港(水深30m)における高波記録を実際に解析することにより、これらのデータ処理方法の妥当性を検討している。

観測データを解析した結果、水圧センサーの応答特性は水深50mにおいても7~16秒の周期の波に対してほぼ良好であること、従来の方法における補正係数は来襲波の周波数スペクトル形状によっても大きく変化し、現地用処理手法としては不都合であること、線型回帰式を用いた変換手法の方が現地用波浪データ処理法としては有効な手法であること、などが明らかとなった。

キーワード：波浪観測，データ処理，波高計，現地観測，水圧波形

---

\* 海洋水理部 海象調査研究室長  
\*\* 前所長 現横浜国立大学工学部教授  
\*\*\* 前水工部 海象観測研究室，現第一港湾建設局新潟港工事事務所  
\*\*\*\* 海上電機株式会社，第四技術部

### 3. Surface Wave Recovery from Wave Pressures Profile Based on Field Observation

Koji KOBUNE\*

Yoshimi GODA\*\*

Akira NARITA\*\*\*

Hiroshi SASAKI\*\*\*\*

Yukiji MORITA\*\*\*\*

#### Synopsis

Ultrasonic wave gauges are most common apparatus for field wave measurements in Japanese coastal waters. The disadvantage of the ultrasonic wave gauges is that they are often fail to measure rough seas when water surface is disturbed by strong winds and breaking waves. This is quite inconvenient, because one of the major purpose of field wave observation is to obtain records of extreme seas.

A possible measure to overcome such disadvantage is the simultaneous operation of a pressure gauge as an auxiliary wave gauge. Though it is not sensitive enough for relatively calm seas, i.e., short period waves, the pressure gauge can detect pressure variation during heavy storm waves which have longer wave periods and provide vital wave information.

In this report, two methods are utilized to recover the characteristic wave parameters from pressure records. The one is the conventional method which estimates the characteristic wave parameters on the basis of the linear wave theory and a correction factor. The other is a linear numerical filter which recovers the time series surface wave from pressure records.

The reliability of the two methods are examined for the simultaneous time series records of the surface and the pressure attained at Naha Port (water depth 50 m) and Hitachinaka Port (30 m). The results show that the linear numerical filter is quite reliable and suitable for real-time surface wave recovery during storm waves.

**Key Words:** Wave Observation, Wave Gauge, Field Observation, Data Analysis, Pressure Profile

---

\* Chief, Marine Observation Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

\*\* Ex-director General, Yokohama National University, School of Engineering

\*\*\* Ex-member, Coastal Observation Laboratory, Hydraulic Engineering Division, Niigata Port Construction Office, the First Port Construction Bureau

\*\*\*\* The Fourth Technical Division, Kaijo Denki Co. Ltd.

## 目 次

要 旨	161
1. ま え が き	165
2. 水圧式波高計データの処理方法	165
2.1 有義波諸元を補正する方法	165
2.2 フーリエ級数の変換による表面波形の復元	166
2.3 回帰式を用いる方法	167
3. 現地データの解析	168
3.1 観測地点および観測施設	168
3.2 圧力センサーの応答特性	170
3.3 周波数スペクトルの形状	171
4. 現地演算装置用データ処理手法の検討	172
4.1 補正係数を用いる方法	172
4.2 回帰式を用いる方法	174
5. 結 論	181
6. あ と が き	182
参 考 文 献	182
主要記号一覧表	182

## 1. まえがき

波浪の現地観測に使用される観測機器には、水圧式波高計、ステップ式波高計、超音波式波高計、ブイ式波高計などがあり、現在いずれも実用機として用いられている。中でも超音波式波高計は、海底にセンサーを設置するので観測タワーのような施設を必要としないこと、直接的に海面変動を測定するので比較的小さな波動運動も捉えることができること、などの長所を持っていることから、日本国内においては最も広範囲で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、海面付近が乱れて気泡を混入しているような状態のときには超音波パルスが吸収されたり、散乱したりするため、海底の送受波器に反射音（海面エコーと呼ぶ）が戻らないことがある。このように海面エコーの欠落が発生するような海況では海中雑音のレベルも大きく、波高計回路はこうした雑音を海面エコーと誤認して出力波形記録上にスパイク状のノイズを発生させることもある。また、反射音の欠落が連続して発生すると、その間の波形記録が得られないばかりでなく、その後反射音が送受波器に戻ってくるようになっても、海面からの反射音をうまく判別することができず、海面とは別の所からの反射雑音に追隨した波形記録を出力するような状況が発生することがある。

特に高波が来襲するような場合には、砕波あるいは強風の影響により海面が乱れており、気泡もかなり混入するようになる。こうした状況になると、正常な波形記録を得ることができず、ともすれば「超音波式波高計は波が高くなると記録が取れない」との不評を買っていた。

現地波浪観測の主要な目的の一つは、構造物の設計波浪条件に近いような高波を捉えることであり、この目的を達成するには、上記のような難点が極めて不都合である。このような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<sup>1)</sup>。

しかしながら、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不可能であり、別な手法で波形を推定する必要がある。本報告では、超音波式波高計が計測不能となるような高波時に、

同時に測定した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ている。これは、超音波式波高計と水圧式波高計を併用することにより、互いの難点を補うことを意図したものである。すなわち、水圧式波高計は海底における水圧を計測するので、水深に比べて波長の短い波については応答特性が悪いけれども、高波時に比較的波長の長い波については計測が可能であるのに対し、超音波式波高計は砕波を伴う高波の計測は困難であるけれども、海面にあまり乱れが生じない状況では、比較的波長の短い波も計測できると言う両者の特徴を考慮したものである。

また、観測データの処理法については、現地においてパーソナル・コンピューターにより比較的短時間で処理できる手法を提案することを目的としている。

## 2. 水圧式波高計データの処理方法

### 2.1 有義波諸元を補正する方法

海底において計測した水圧波形をもとに、海面における波浪諸元を推定する手法として、従来用いられていた方法は、次のように有義波高および有義波周期に対する補正係数を用いた換算法である。

$$\hat{H}_{1/3} = n_H H(\omega_p) P_{1/3} \quad \dots\dots(1)$$

$$\hat{T}_{1/3} = n_T T_p \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 $\hat{H}_{1/3}$ 、 $\hat{T}_{1/3}$  はそれぞれ表面波形の有義波高および有義波周期の推定値、 $n_H$ 、 $n_T$  はそれぞれ有義波高および有義波周期に対する補正係数、 $P_{1/3}$  は圧力波形の有義値（ただし、圧力波形記録が静水圧の水頭に換算した時の水位で表示されているものとし、cm あるいは m の単位を持つ）、 $T_p$  は圧力波形の有義波周期である。また、 $H(\omega_p)$  は圧力波形の有義波周期  $T_p$  に対応する応答関数であり、微小振幅波理論に基づき次のように与える。

$$H(\omega_p) = \frac{\cosh k_p h}{\cosh k_p d} \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 $h$  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  $T_p$  に対応する波数であり、次式により与えられる。

$$\omega_p^2 = k_p h \tanh k_p h, \quad (\omega_p = 2\pi/T_p) \quad \dots\dots(4)$$

従来、水圧式波高計により観測した有義波高および有義波周期を換算する場合の補正係数  $n_H$ 、 $n_T$  としては、次のような値が用いられてきた。

$$\left. \begin{aligned} n_H &= 1.1 \sim 1.4 \\ n_T &= 1.0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(5)$$

なお、ここで用いている補正係数  $n_H$ 、 $n_T$  は、式(1)

および(2)からわかるように、水圧波形の有義値  $P_{1/3}$  から表面波の有義波高  $H_{1/3}$  を求める場合の補正係数である。したがって、本間ら<sup>2)</sup>の研究や光易・広本<sup>3)</sup>の研究のように、単一周期の波あるいは不規則波列の中の特定周波数の波について、水中圧力を表面波に換算する場合の補正係数とは性質を異にするものである。

不規則波群の代表値である有義波高や有義波周期について式(1)および(2)のような換算手法を用いる場合、補正係数  $n_H, n_T$  は次のような性質を持つ。

例えば水深30mの地点に、海底から1mの高さに水圧センサーを設置した場合、有義波高1m、有義波周期8秒で、式(6)で与えられる Bretschneider・光易型の周波数スペクトル<sup>4)</sup>を持つ不規則波が来襲する状況を想定する。

$$S_{\eta}(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \times \exp[-0.13 (T_{1/3} f)^4] \quad \dots\dots(6)$$

このときの水中圧力のスペクトル  $S_p(f)$  は、微小振幅波理論により次式で与えられる。

$$S_p(f) = [K(f)]^2 S_{\eta}(f) \quad \dots\dots(7)$$

ここに、 $K(f)$  は伝達関数であり、式(8)で与えられる。

$$K(f) = \frac{\cosh kd}{\cosh kh}, \quad \dots\dots(8)$$

$$\omega^2 = gk \tanh kh, \quad \omega = 2\pi f, \quad \dots\dots(9)$$

図-1 は上記の表面波のスペクトル  $S_{\eta}(f)$ 、圧力波のスペクトル  $S_p(f)$  および伝達関数  $K(f)$  の関係を描いたものである。伝達関数  $K(f)$  は周波数が大きくなるに従って小さくなるという特性を持っており、図-1 に示すように、一般に表面波のスペクトルのピーク周波数  $(f_p)_{\eta}$  に比べて水圧波のスペクトルのピーク周波数  $(f_p)_p$ の方が小さくなる傾向にある。したがって、水圧波形の有義波周期は表面波のそれより長くなる傾向にあり、水圧

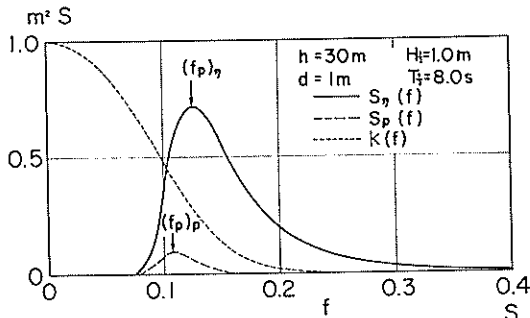


図-1 表面波と圧力波のスペクトルの関係 (微小振幅波理論による)

波の有義波周期に対応する伝達関数  $K(1/T_p)$  は、表面波の有義波周期に対応する伝達関数  $K(1/T_{1/3})$  より大きい値となる傾向を持つ。

このように、水圧波の有義波周期が表面波の有義波周期と異なることにより、有義波高の換算に用いる伝達関数の値が実際よりも大きい値となるため、その逆数(すなわち応答関数)を水圧波の有義波高に乗じて得られる表面波の有義波高は、実際よりも小さくなる傾向を持つ。補正係数  $n_H$  はこうした伝達関数の相違による影響を補正する役割を持っており、一般には式(5)のような値となる。したがって、当然のことながら、文献2), 3)に見られる規則波に対する補正係数の値とは異なった値となっている。

以上、有義波高及び有義波周期を推定する際の補正係数  $n_H, n_T$  の性質を述べたが、本報告ではこれら2つの補正係数の与え方として、次の2つの方法について検討することにする。

(1) 毎観測後、超音波式波高計が正常な波形記録を取得しておれば、水圧波形の波別解析を実行し、両者の有義波高および有義波周期から補正係数  $n_H, n_T$  を逆算して求めておく。もし、超音波式波高計の波形記録に異常があれば、記憶されている最新の  $n_H, n_T$  を用いて、水圧波形の有義波高と有義波周期から式(1), (2)により表面波の有義波高と有義波周期を推定する。

なお、超音波式波高計の記録が正常であるか否かの判断は、現地用データ演算装置<sup>1)</sup>に組み込んだものと同じ手順により行うことができる。

(2) 補正係数  $n_H, n_T$  の値を、超音波式波高計と水圧センサーの同時観測記録をもとに経験的関数として与えておく。すなわち、観測地点ごとに、例えば過去1年間に出現した高波についての平均値を用いて次のようにある関数で近似的に表示することを考える。

$$\left. \begin{aligned} n_H &= n_H(T_p, h) = n_H(k_p, h) \\ n_T &= n_T(T_p, h) = n_T(k_p, h) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(10)$$

## 2.2 フーリエ級数の変換による表面波形の復元

最近ではパーソナル・コンピューターでも、かなり大容量かつ高速の演算が可能となってきている。そのため、波形記録のフーリエ変換を現地用データ演算装置で行うことも実用上可能となっている。こうした背景から考えて、次のように水圧波形の周波数スペクトルを表面波形の周波数スペクトルに変換する方法も可能である。

いま、種々の周波数について伝達関数  $K(f)$  がわかっているなら、次式により水圧スペクトルを表面波形のスペクトルに変換することができる。

$$\hat{S}_\eta(f) = \frac{1}{[K(f)]^2} S_p(f) \quad \dots\dots(11)$$

$$\hat{\epsilon}_\eta(f) = \epsilon_p(f), \quad \dots\dots(12)$$

ここに、

$\hat{S}_\eta(f)$ : 表面波の周波数スペクトルの推定値

$S_p(f)$ : 圧力波の周波数スペクトルの測定値

$\epsilon_\eta(f)$ : 表面波の周波数成分波の位相角の推定値

$\hat{\epsilon}_p(f)$ : 圧力波の周波数成分波の位相角

表面波のスペクトルおよび位相角が求められれば、次のように成分波を合成することにより、表面波形を推定することができる。

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{i_e} \hat{a}_i \cos \{2\pi f_i t + \hat{\epsilon}_\eta(f_i)\} \quad \dots\dots(13)$$

$$\hat{a}_i = [2\hat{S}_\eta(f_i) \Delta f]^{1/2} \quad \dots\dots(14)$$

ここに、 $\hat{a}_i$  は  $i$  番目の周波数成分波の振幅の推定値、 $\Delta f$  は推定スペクトル  $\hat{S}_\eta(f_i)$  が代表する周波数帯の幅、 $i_e$  は成分波の数である。

以上のようにして求めた推定表面波形をゼロアップクロス法を用いて波別解析することにより、表面波の有義波高及び有義波周期を求めることができる。

なお、式(11)における伝達関数の与え方としては、次の2つの方法が考えられる。

(1) 微小振幅波理論による伝達関数(式(8))を用いる。

(2) 表面波形と水圧波形の同時観測記録をもとに、経験的に与える。

なお、この手法による表面波形の復元方法は、一旦スペクトルという周波数の関数に変換してから補正処理を行い、その補正後の周波数スペクトルを波形時系列データに再変換するという、二段階の処理が必要であり、現地用データ処理法としては演算時間と記憶容量の点から不利と考えられる。そのため、この手法については実測データに対する検討は行っていない。

### 2.3 回帰式を用いる方法

水圧と水位は線型の関係を持って変動するものと考え、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 convolution integral で表すことができる。

$$\eta(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) p(t-\tau) d\tau, \quad \dots\dots(15)$$

ここに、

$$h(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) \exp(i\omega\tau) d\omega \quad \dots\dots(16)$$

$H(\omega)$  は応答関数(一般には複素数)で、伝達関数  $K(\omega)$  との間に次の関係式がある。

$$H(\omega) = \frac{1}{K(\omega)} \quad \dots\dots(17)$$

ここに、 $\omega = 2\pi f$ ,  $\tau$  は time lag である。

微小振幅波理論によれば、応答関数  $H(\omega)$  は偶関数であり、また  $\omega$  の増加と共に急速に増加するけれども、3. で示すように実測応答関数は  $\omega$  がある値を越えると(水深50m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(16)の積分において、 $H(\omega)$  が定数であれば  $\cos \omega\tau$  の1周期を積分すると0となるので、結局式(16)は近似的に次のように書き直すことができる。

$$h(\tau) \doteq \frac{1}{\pi} \int_0^A H(\omega) \cos(\omega\tau) d\omega, \quad \dots\dots(18)$$

ここに、 $A$  は適当な積分範囲である。

式(18)における積分範囲の上限値  $A$  をいくらにすれば良いか不明である。しかし、 $h(\tau)$  は特定の time lag  $\tau = m\Delta t$  ( $\Delta t$  はデータ収録時間間隔) に対して定数となるので、(式15)は結局次の線形回帰式の形で表されることになる。

$$\eta(t) = C_0 p(t) + \sum_{m=1}^M C_m [p(t-m\Delta t) + p(t+m\Delta t)] \quad \dots\dots(19)$$

上式(19)における係数  $C_m$  ( $m=0, 1, 2, \dots, M$ ) は回帰係数と呼ばれており、また線型回帰式において各時系列のデータの加重平均における重みを表わすので、重み関数とも呼ばれている。この回帰係数を決定する方法として、次の2つの方法が考えられる。

#### (1) 解析的に係数を与える方法

観測水深が10m程度の比較的浅い場合について Wang<sup>9)</sup> が提案している方法であり、その概要は次のとおりである。

式(18)における応答関数  $H(\omega)$  が次のようにフーリエ級数により近似できるものと仮定する。

$$H(\omega) \doteq H'(\omega) = A_0 + \sum_{m=1}^M A_m \cos(m\omega) \quad \dots\dots(20)$$

さらに、応答関数  $H'(\omega)$  が図-2のように  $-\pi \leq \omega \leq \pi$  の範囲で定義され、 $\omega < -\pi$  及び  $\pi < \omega$  の範囲では  $H'(\omega)$

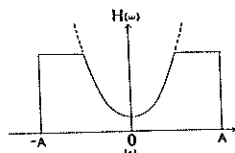


図-2 応答関数の近似



=0 であるものとする。

式(20)を式(18)に代入して積分を実行する。

$$h(\tau) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \{A_0 + \sum_{m=1}^M A_m \cos(m\omega)\} \cos(\omega\tau) d\omega \quad \dots\dots(21)$$

ここで、

$$\tau = nDt \quad \dots\dots(22)$$

と置き、 $Dt=1s$  に固定することにすれば、式(21)は次のようになる。

$$h(n) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \{A_0 + \sum_{m=1}^M A_m \cos(m\omega)\} \cos(n\omega) d\omega \quad \dots\dots(23)$$

さらに、 $\cos(m\omega)$ 、 $(m=0, 1, 2, \dots, M)$  は直交関数であるので、

$$\left. \begin{aligned} \int_0^{\pi} \cos(m\omega) \cos(n\omega) d\omega &= 0, & m \neq n \\ &= \pi/2, & m = n \end{aligned} \right\} \dots\dots(24)$$

ただし、 $m=n=0$  のときは、

$$\int_0^{\pi} \cos(m\omega) \cos(n\omega) d\omega = \int_0^{\pi} d\omega = \pi \quad \dots\dots(25)$$

となる。したがって、結局式(21)の重み関数は次式のように離散型で表される。

$$h(\tau) = [A_0\delta(0) + \sum_{m=1}^M \frac{A_m}{2} \delta(\pm nDt)] \quad \dots\dots(26)$$

ここに、 $\delta(\ )$  はデルタ関数で、 $\tau = nDt$ 、 $Dt=1s$  である。

式(26)を式(15)に代入すれば、表面波形  $\eta(t)$  の推定式として、式(19)の回帰式を得る。ただし、 $C_0=A_0$ 、 $C_m=A_m/2$  である。

以上のように微小振幅波理論が与える周波数応答関数をフーリエ級数により近似した場合、その係数  $A_m$  は観測水深の増大と共に指数関数的に増大するので<sup>9)</sup>、計算機の有効桁数の制約から実用上この方法を用いるのは困

難である。

(2) 経験的に係数を与える方法

水位および水圧の同時観測記録をもとに、両者が式(19)を満たすよう、回帰係数  $C_m$  を決定する方法が考えられる。式(19)のような線型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、次のように求められる<sup>6)</sup>。

式(19)を実際の波形データに適用した場合には、誤差が生じる。この誤差の自乗和  $E^2$  は次式で計算できる。

$$E^2 = \sum_t \{C_0 p(t) + \sum_{m=1}^M C_m [p(t-mDt) + p(t+mDt)] - \eta(t)\}^2 \quad \dots\dots(27)$$

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

誤差の自乗和を最小にするには、次の各式を満足するように係数  $C_m$  を決定すればよい。

$$\frac{\partial E^2}{\partial C_m} = 0, \quad (m=0, 1, 2, \dots, M) \quad \dots\dots(28)$$

式(27)を式(28)に代入して計算すれば、結局次式のようになり、この  $(M+1)$  元連立方程式を解くことにより誤差を最小とする係数  $C_m$  が求められる。

$$\sum_{m=1}^M (\sum_t P_n P_m) C_m = \sum_t \eta_0 P_n \quad \dots\dots(29)$$

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

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \eta_0 &= \eta(t), \\ P_m &= p(t-mDt) + p(t+mDt), \end{aligned} \right\} \dots\dots(30)$$

(ただし、 $P_0 = p(t)$ )

### 3. 現地データの解析

#### 3.1 観測地点および観測施設

##### (1) 概要

本報告における解析の対象とした観測記録は、那覇港

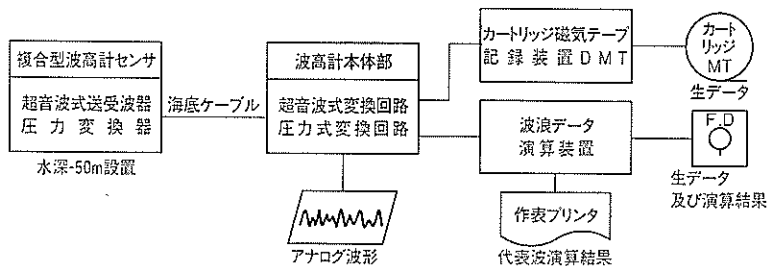


図-3 観測機器の構成

において1987年11月28日から12月6日までの期間、常陸那珂港において1985年1月から8月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、いずれも有義波高が比較的大きい期間を含む観測データを抽出したものである。

那珂港の波高計設置水深は50m、センサーの海底面からの高さは1.75mであり、水圧センサーを超音波式波高計の送受波器内部に組み込んだ複合型波高計を使用している。この複合型波高計は、取り付けや引き上げの際の取扱性・保安性、さらに既設装置との互換性を考慮して、超音波式波高計と水圧式波高計の二つの機能を一体化したものであり、その機器構成は 図-3 に示すとおりである。このセンサーの構造および信号の伝送方法については次の(2)で述べる。

一方、常陸那珂港での波高計設置水深は30mで、海底におかれた方形のコンクリート・ブロック上に、超音波式波高計と超音波式流向流速計を併置することにより、波高・周期・波向を測定している。常陸那珂港における圧力記録は、流向流速計に取り付けてある圧力センサーの出力記録である。

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されており、その解析は港湾技術研究所で行った。

(2) 複合型波高計および信号伝送方法

那珂港の波浪観測に用いた複合型波高計の水中センサー部は、図-4 に示す構造である。この図のように、送受波器部はステンレス製の水密容器で作られており、その上部に超音波振動子を収納するハウジングがあり、海水と接する部分を弾力を持ったゴムカバーで覆って防水構造としている。また、その内部には、脱気したひまし油を充填している。圧力変換器はこの振動子収納ハウジ

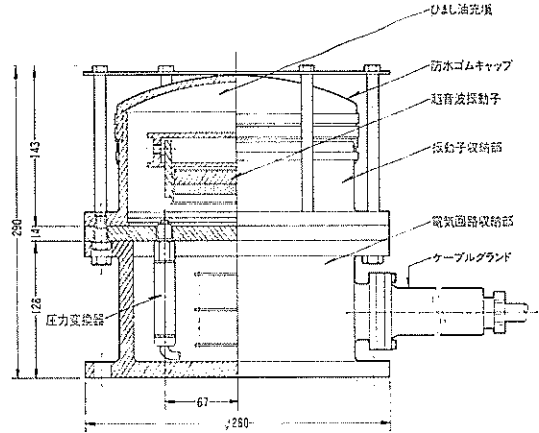


図-4 複合型波高計センサーの構造図

ング部の底面に受圧面を内部に露出して取り付け、ゴムカバー上部に作用した水圧はひまし油を介して圧力変換器に伝達される構造となっている。

センサー部の圧力変換器の取り付けを含め、水圧式波高計用の回路および機構のほとんどは、在来の超音波式波高計の送受波器および本体部に付加回路・機構として組み込まれており、外観上の変更は圧力波形信号の出力端子が増設されているだけである。

複合型波高計の測定回路の構成は 図-5 のブロック系統図に示すとおりである。圧力信号は周波数信号に変換して超音波送信回路のトリガー信号伝送線路を通して伝送され、本体部で電圧信号に変換して出力している。従来、水圧式波高計の多くは、受圧部に機械的構造と流体の粘性を利用したハイドロフィルターを設け、受圧部に作用する圧力変動から潮汐等による長周期変動成分を除去

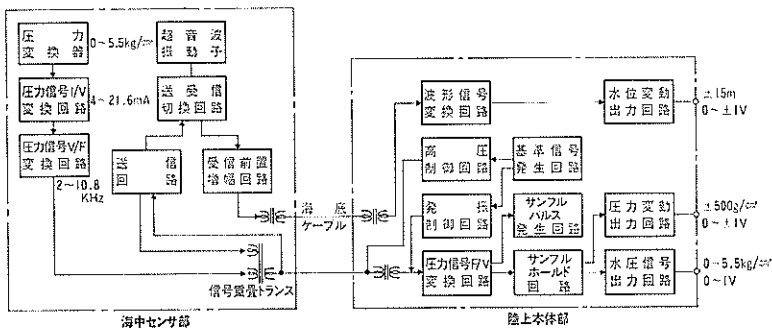


図-5 複合型波高計測定回路系統図

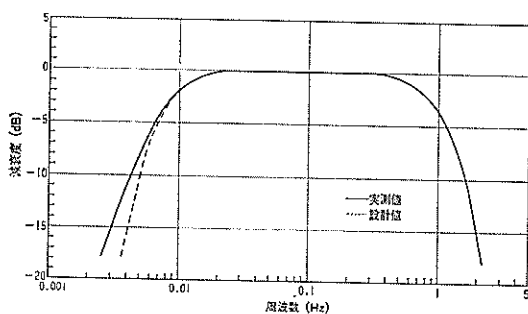


図-6 圧力変動測定回路バンドパスフィルター  
周波数特性

して、波浪による短周期変動成分のみを取り出す構造となっている。しかし、試作した複合型波高計では従来機との互換性を考え、センサー部の改造を極力少なくし、また構造を簡単にするため、本体部の圧力出力回路に組み込んだ電気フィルター回路で構成されるバンドパスフィルターにより、波浪変動成分のみを出力するようにしている。フィルター回路は 図-6 に示す特性を持っている。ここで、バンドパス・フィルターのローパスフィルター部分は入力信号に含まれる周波数雑音成分の除去と、サンプルホールド回路を通して得られる離散的な信号をゼロ次ホールドして得られた波形信号の平滑化を行っており、ハイパスフィルター部分は長周期変動成分を除去している。また、潮位データを得るため、ローパスフィルターを通した信号も出力している。

### 3.2 圧力センサーの応答特性

#### (1) 静的応答特性

試作機の圧力センサーには、感圧素子にシリコン・ストレーンゲージを用いた増幅器内蔵型の工業用圧力変換器を使用した。その要目は 表-1 に示すとおりである。この変換器は工場配管内の油圧や空気圧などの圧力伝送器として作られており、構造および性能から見て、複合型センサーに適合するものとして選定した。

水圧測定系の特性は、理想的には複合型センサーに波浪周波数の変動圧を加え、各周波数毎の加圧力と出力の関係を求めることにより得られるけれども、ここでは試験装置の都合上、加圧力と出力の関係は段階的に圧力を増加する静的試験により行なった。また、周波数特性は圧力変換器の測定出力を電圧信号に変換して測定系に入力する位置に 1Hz~30Hz の電圧を入力する方法で行った。

静的試験の結果は、図-7 に示すとおりである。特性

表-1 圧力センサーの要目

感 圧 素 子	シリコンストレーンゲージ
測 定 レ ン ジ	0~5 kgf/cm <sup>2</sup>
許 容 過 大 圧 力	スパンの200%
測 定 出 力	4~20mADC
精 度	±0.25% F. S
	直線性誤差±0.27% F. S 以内
	ヒステリシス0.05% 以内
使用温度範囲	-30℃~80℃
温 度 特 性	零点変化±0.05% F. S/℃ 以下
	(-10~50℃)
	スパン変化±0.02% F. S/℃ 以下
	(-10~50℃)
応 答 性	1 ms 以下
電 源	DC 24V ±2V, 0.5W
寸 法・重 量	φ20×l125mm, 150g

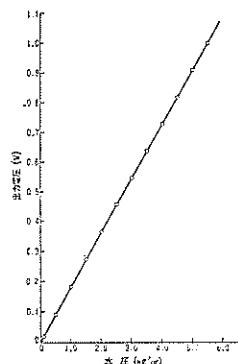


図-7 圧力センサーの静的応答特性

として、直線性・精度とも目標とした誤差1%以内の値が得られた。また、周波数特性については測定系に含まれるバンドパスフィルター回路の特性が支配的であり、結果は上記 図-6 に示したフィルター回路の特性とほぼ同一となった。特性としては 0.33Hz~0.025Hz までは平坦であり、水圧式波高計として周期2秒以上の波の測定には十分なものである。また、圧力センサーとしての動的特性は、圧力変換器の応答性が1msであること、および構造的に水圧変動を伝達する振動子収納部の油圧変化を直接測定していることからみて、上記フィルターを含む回路が示す特性値を満足するものと思われる。

#### (2) 波浪作用時の応答特性

那覇港及び常陸那珂港の観測記録から、有義波高が4.0mを越える例を抽出し、その観測時刻および前後の

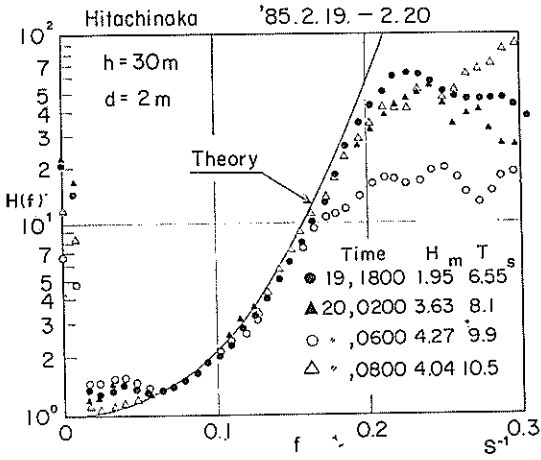


図-8 水圧センサーの応答特性 (常陸那珂港)

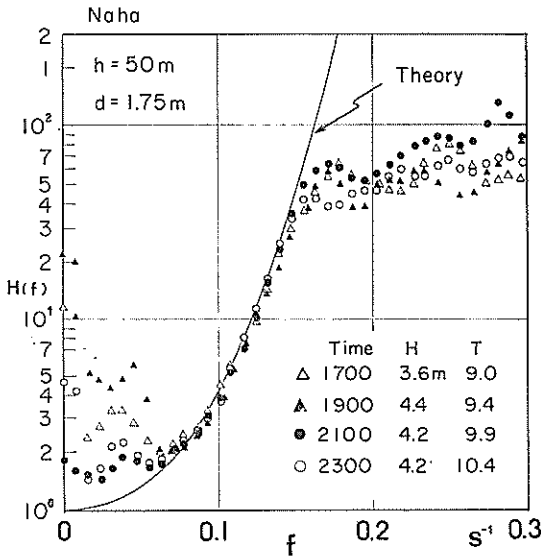


図-9 水圧センサーの応答特性 (那覇港)

水位および水圧波形をスペクトル解析することにより、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-8（常陸那珂港）および図-9（那覇港）である。

図中の△、▲、●、○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を与える次の応答関数である。

$$H(\omega) = \frac{1}{K(f)} = \frac{\cosh kh}{\cosh kd} \quad \dots\dots(31)$$

両観測地点共に、低周波側およ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、すなわち常陸那珂港では  $f=0.06\sim 0.17s^{-1}$  ( $T=6\sim 17s$ )、那覇港では  $f=0.06\sim 0.15s^{-1}$  ( $T=7\sim 17s$ ) の範囲では、実測値と理論値波はほぼ一致している。

このことから、両地点ともに圧力センサーの応答特性はほぼ良好と言える。

### 3.3 周波数スペクトルの形状

図-10 は常陸那珂港において、波がしだいに発達するに伴い、周波数スペクトルがどのように変化してゆくのかを示した図である。3.2 で圧力センサーの応答特性を検討した期間（図-8 参照）と同じ1985年2月19日20時から20日4時までの周波数スペクトルを描いておいたが、19日20時にはうねりと風波がほぼ同程度のエネルギーを持っており、周波数スペクトルは幅の広い形状となって

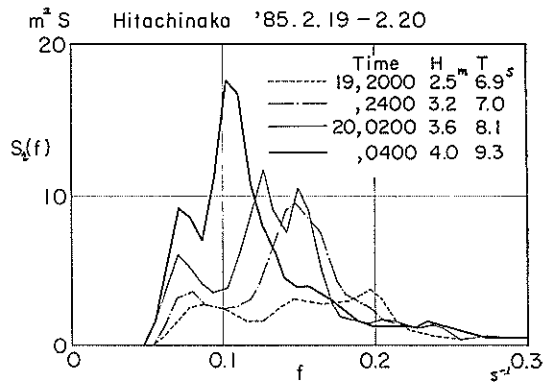


図-10 周波数スペクトルの経時変化

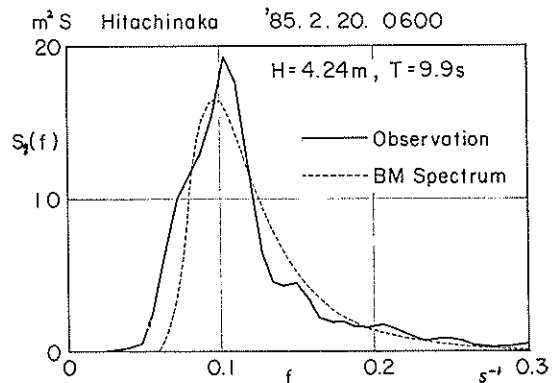


図-11 最盛期の周波数スペクトル

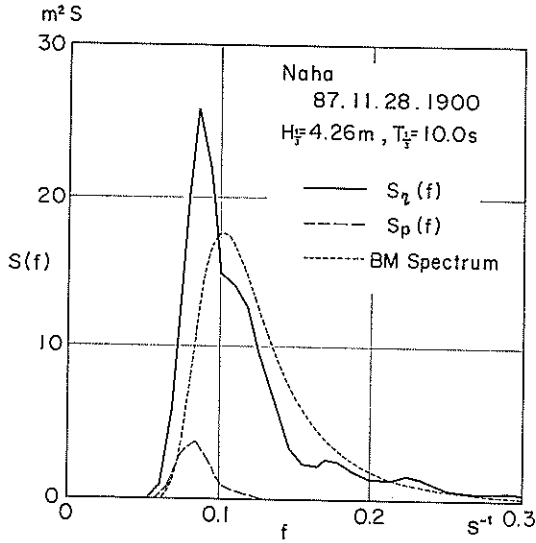


図-12 最盛期の周波数スペクトル

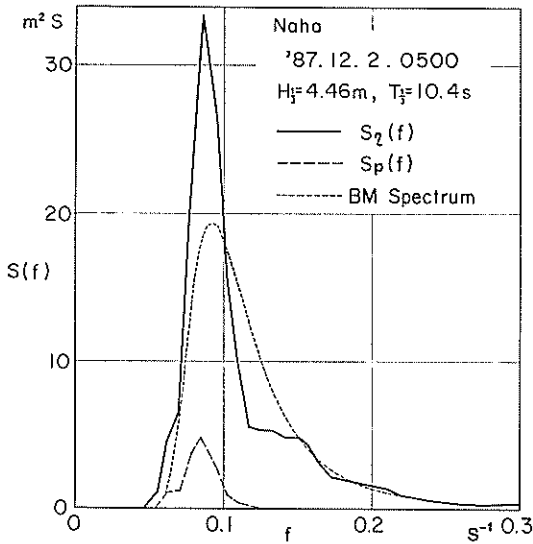


図-13 最盛期の周波数スペクトル

いる。時間の経過と共にしだいに有義波高は大きく有義波周期は長くなって行すが、それとともにうねりと風波の両方のエネルギーが大きくなり、顕著な双峰型の周波数スペクトル形となっている(19日24時、20日2時)。さらに波が発達すると、風波のエネルギーピークの方がうねりのエネルギーピークよりも大きくなる(20日4時)。有義波高が最大となった20日6時の周波数スペクトル

は、図-11に示すように、うねりと風波のスペクトルが一体となった単峰型のスペクトル形となっている。同図には有義波高4.24m、有義波周期に対応する Bretschneider・光易型周波数スペクトルを点線で描いておいたが、観測スペクトルの形はこの Bretschneider・光易型周波数スペクトルに近い形となっていることがわかる。

一方、那覇港において、有義波高の極大値が4.0mをこえた1987年11月28日19時及び12月2日5時の周波数スペクトルはそれぞれ図-12及び図-13に実線で示す形状である。このように最盛期の実測スペクトルは、図中に点線で示した Bretschneider・光易型周波数スペクトルに比べ、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。

このことから、那覇港においては常陸那珂港よりもピークの上がった周波数スペクトル形を持つ波が来襲していることがわかる。

#### 4. 現地演算装置用データ処理手法の検討

本章では、上記常陸那珂港および那覇港の実測データを用いて、2.で提案した種々の水圧波形記録の処理手法の妥当性を検討する。

##### 4.1 補正係数を用いる方法

###### (1) 毎観測時に補正係数 $n_H, n_T$ を求める方法

常陸那珂港における1985年2月28日8時から3月1日10時までの表面波形の有義波諸元、およびこれらと次式により求められる圧力波形からの推定有義波諸元との比は、図-14に示すような経時変化となっている。

$$\left. \begin{aligned} H_{1/3}/\hat{H}_{1/3} &= H_{1/3}H(\omega_p)P_{1/3} = n_H \\ T_{1/3}/\hat{T}_{1/3} &= T_{1/3}/T_p = n_T \end{aligned} \right\} \dots\dots(32)$$

同図の上図が有義波高(○印)と有義波周期(●印)の変化、下図が有義波高の補正係数  $n_H$  と有義波周期の補正係数  $n_T$  の経時変化を示している。この図によれば、特に有義波高補正係数  $n_H$  の変化が他の量に比べて変動が著しいことがわかる。例えば2月28日から同日22時の2時間のうちに  $H_{1/3}/\hat{H}_{1/3}$  は3.3から2.0まで急激に減少している。このことから、超音波式波高計に異常記録が現われたとき、それ以前の観測結果を基に求めた補正係数  $n_H$  を使用するのには、かなり大きな推定誤差をとまうことが予想される。

###### (2) 補正係数を水深・波数の関数として与える場合

3.3で述べたように、常陸那珂港においては波が発達し最盛期になると、周波数スペクトルはBretschneider・光易型の周波数スペクトルに類似したスペクトル形状になる傾向があることがわかったので、このBretschneider

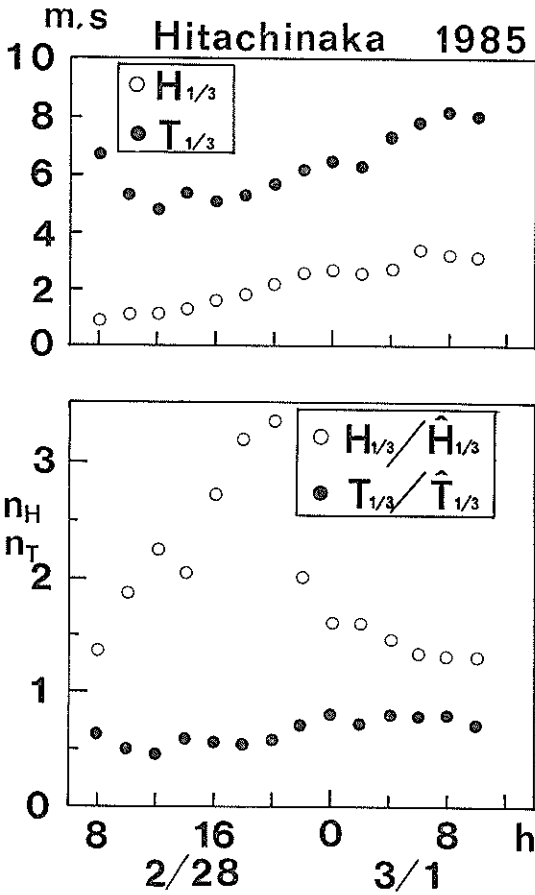


図-14 波高、周期及び補正係数の経時変化 (常陸那珂港)

・光易型周波数スペクトルを持つ不規則波を対象として、数値シミュレーションにより、有義波高補正係数が圧力センサーの設置水深や来襲波の有義波周期の変化と共にどのように変わるかを調べることにした。

図-15 は種々の水深について、有義波周期を様々にかえてシミュレーションを行い、その結果を基に有義波高補正係数  $n_H$  と  $k_p h$  の関係を描いた図である。なお水圧の計測位置は海底面上1mとしている。図中、水深の違いを○(10m)、●(30m)、▽(45m)、△(50m)で区別して示したが、若干ばらつきが見られるものの、水深の違いに関係なく、有義波高補正係数の変化はほぼ一本の曲線で近似することができる。

一方、常陸那珂港における1985年2月～4月の高波3例について、実測有義波高と推定有義波高との比(式(4)により求めた  $n_H$ ) の変化を描くと図-16に示す結果が

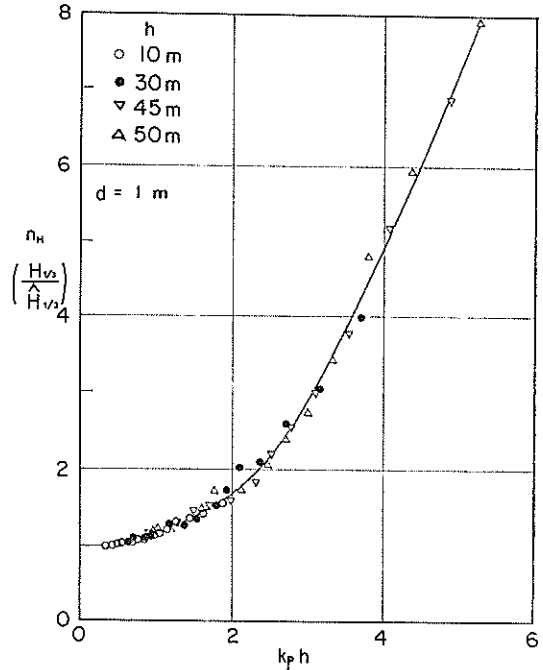


図-15 有義波高補正係数 (シミュレーション)

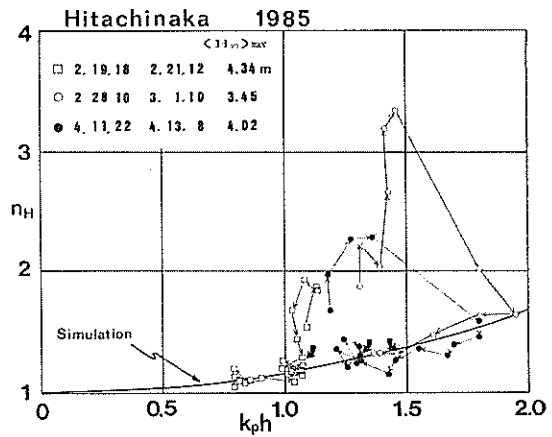


図-16 有義波高補正係数の変動状況推

得られた。図中の実線は図-15で求めたシミュレーションによる補正係数  $n_H$  の値である。実測有義波高と推定有義波高の比は大きく変化しているけれども、有義波が増大するに従って実線に近づいており、矢印で示した有義波高が極大値となる時刻の波高比(補正係数)は実線に近い値となっていることがわかる。

このように、常陸那珂港における高波については Bretschneider・光易型の周波数スペクトルを示す例が

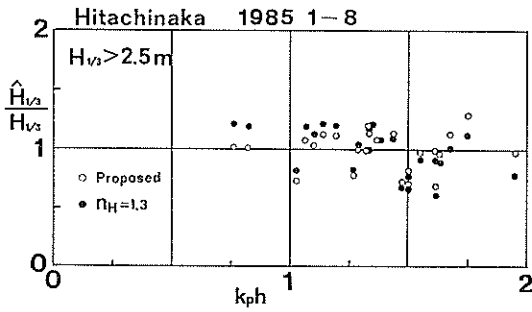


図-17 推定有義波高と実測有義波高の比  
(有義波高補正係数を用いた場合)

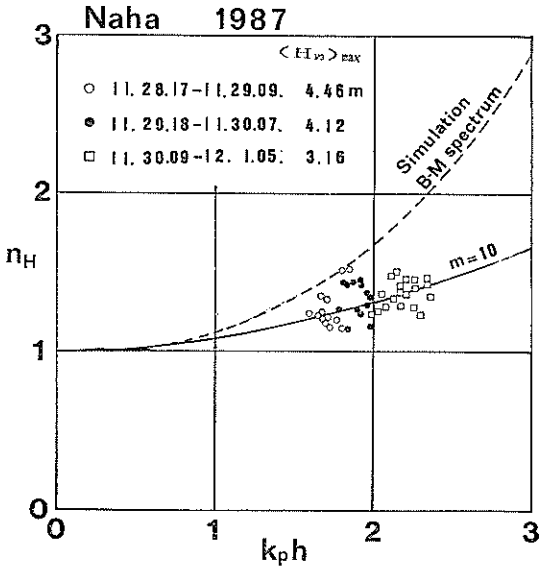


図-18 有義波高補正係数の変動状況 (那覇港)

多く、有義波高補正係数を図-15に示した曲線のように  $kph$  の関数として与えることが可能と思われる。図-17は有義波高補正係数  $n_H(kph)$  としてこの曲線を用いた場合と従来のように定数 ( $n_H=1.3$ ) とした場合とで、有義波高の推定誤差がどのように異なるのかを比較した図である。比較の対象とした例は1985年2月～8月の期間における極大有義波のうち有義波高が2.5mを越えるものを取り上げている。図中白丸が  $n_H$  を  $kph$  の関数として与えた場合、黒丸が  $n_H=1.3$  とした場合の結果である。両者の違いは、この図ではあまり明瞭ではない。白丸について平均値および標準偏差を求めると、それぞれ0.998, 0.165となり、黒丸についてはそれぞれ0.989, 0.192という結果が得られる。前者の補正係数の与え方

の方が若干推定精度がよいといえる。

一方、那覇港において観測された高波3例について、常陸那珂港と同様に有義波高補正係数の値の変化を示すと、図-18のようになり、いずれの期間についても図中点線で示したシミュレーション結果よりかなり小さな値となった。これは3.3の図-12および図-13に示したように、周波数スペクトル形状が異なることによると考えられる。

実際、周波数スペクトルを次式(33)の形で与え、指数  $m$  の値を種々に変化させ、ピークのとがり方を変えてシミュレーションを実施したところ図-19のような結果が得られ、スペクトルのピークが鋭くなるほど補正係数  $n_H$  の値は小さくなることがわかった。

$$S(f) = \alpha H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-m} \times \exp[-(m/4)(T_{1/3} f)^4] \quad \dots\dots(33)$$

ここに、 $\alpha$ は

$$H_{1/3} = 4.004 \sqrt{m_0} \quad \dots\dots(34)$$

( $m_0$ : スペクトルの0次モーメント)

を満足するための比例定数である。

このように、補正係数  $n_H$  は水深・有義波周期に加え、周波数スペクトルの形状によっても異なることがわかる。そのため、 $n_H$  を  $kph$  の関数として与える手法を実用的に用いるには、その海域の高波の持つ周波数スペクトルの形状がわかっていることが重要となる。したがって、補正係数を用いる手法は、実用に供するにあたって波のスペクトル特性を十分に捉えておくことが必要となり、また観測を行う海域毎に種々異なった補正係数を与える必要がある。

4.2 回帰式を用いる方法

2.において、フーリエ級数の変換による表面波形の復

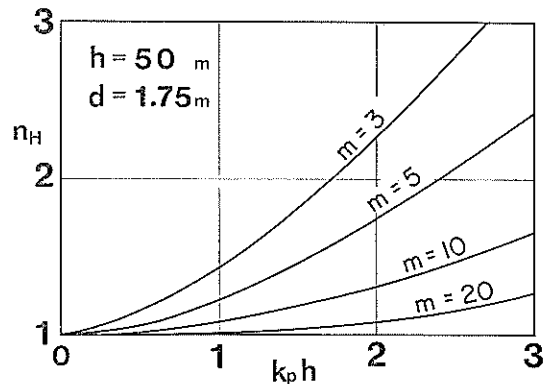


図-19 スペクトル形状の相違による有義波高補正係数  $n_H$  の変化 (シミュレーション)

元方法と回帰式を用いる方法の2つの方法を提案したが、原理的には同じ線型理論に基づいている。ただし、前者が水圧から水位への換算を周波数領域で取り扱い、一旦周波数スペクトルの形に変換して補正計算を行っているのに対し、後者は時間領域で取り扱い、直接波形の時系列データについて補正を行うという違いがある。そのため、前者の方法では、時系列データから周波数スペクトルを推定する過程、および補正後の周波数スペクトルを表面波形に変換する過程において誤差が生じる可能性がある。

また、本報告では観測データを現地において比較的短時間で処理する手法の開発を目指していることから、ここではより直接的に処理演算を行う回帰式を用いた有義波諸元の推定方法について検討を行うことにする。

(1) 回帰式の適用性について

2.3 では、回帰式の係数を解析的に与える方法も考えられることを述べた。観測水深が50mの那覇港について実測応答関数(図-9 参照)を式(20)のようにフーリエ級数により近似したところ、項数を10程度に取れば応答関数の変化をかなりうまく表現できることがわかった。しかし、フーリエ級数の係数の値は項数の増加、すなわち近似度の向上にともなって大きくなり、項数10の場合では10の7乗から9乗といった値となった。そのため、実際の演算では桁落ちが生じ、表面波形を推定することができなかった。

したがって、本節では実測値に基づき経験的に回帰式の係数を求める方法を検討する。

常陸那珂港については1985年2月19日20時~2月21日16時、那覇港については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回帰式を用いて表面波形を推定した。まず最小自乗法により式(27)の係数  $C_m$  を各観測時刻ごとに求め、そ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-20 は常陸那珂港について表面波形、推定波形および水圧波形を比較した例であり、図-21 は那覇港のデータについての比較例である。図中の太い線が実測表面波形(超音波式波高計記録)、点線が水圧波形、細い実線は水圧波形をもとに式(19)により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されていると言える。

(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。解析結果は表-2(常陸那珂港)

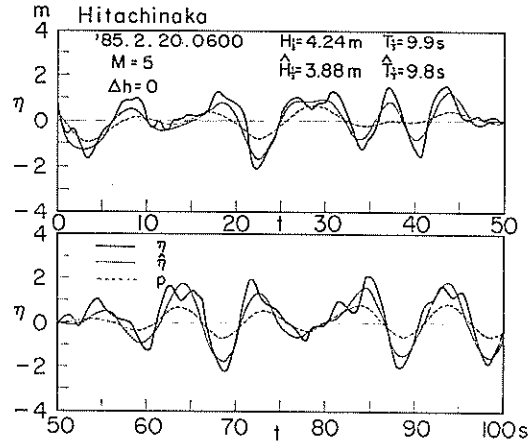


図-20 実測波形と推定波形の比較例(常陸那珂港)

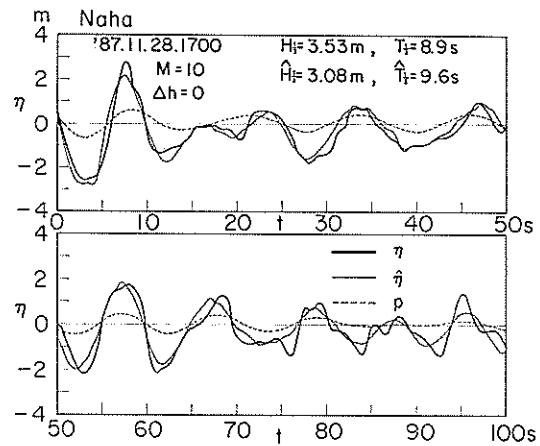


図-21 実測波形と推定波形の比較例(那覇港)

および表-3(那覇港)のとおりであり、各観測時刻ごとに2行に打ち出された結果のうち上段が表面波の代表値(波高はcm, 周期は0.01秒の単位で示している)、下段は推定波形の代表値である。

これらの代表諸元のうち、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示したものが、図-22 および図-23 である。両図の左側の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。なお、図中に示した  $M$  および  $n_p$  は、それぞれ回帰式の項数および係数の決定に用いた波形記録のデータ個数(読み取り間隔  $\Delta t$  は0.5秒)である。



表-2 表面波形と推定波形の代表値の比較（常陸那珂港）

年 月 日 時	波数	平均波		有義波		1/10最大波		最高波	
		H	T	H	T	H	T	H	T
85 2 19 18	192	124	523	194	629	246	767	338	967
	123	124	817	191	946	243	856	333	1,027
95 2 19 20	178	168	565	254	673	303	673	356	593
	143	166	705	252	926	294	779	323	721
85 2 19 22	174	173	575	260	689	314	656	411	654
	115	186	871	268	1,110	315	1,035	360	681
85 2 19 24	171	212	590	325	695	394	725	461	687
	120	228	827	338	1,113	406	1,455	471	1,345
85 2 20 2	157	227	642	358	765	451	701	635	767
	124	231	812	342	931	442	857	547	979
85 2 20 4	132	264	759	411	910	500	930	581	1,004
	112	250	895	375	984	473	923	580	939
85 2 20 6	124	279	804	420	992	514	957	649	806
	106	266	941	394	1,018	501	977	622	832
85 2 20 8	127	250	795	405	1,042	517	1,084	615	947
	102	250	990	385	1,078	516	1,088	642	1,187
85 2 20 10	137	236	733	382	1,014	457	1,022	562	1,033
	103	253	975	375	1,103	441	1,027	480	1,095
85 2 20 12	127	245	788	419	1,077	541	1,086	724	1,107
	90	267	1,110	410	1,202	523	1,032	639	1,156
85 2 20 14	129	241	779	393	1,048	496	1,030	651	1,154
	100	239	1,001	377	1,091	485	1,001	617	1,099
85 2 20 16	113	246	809	393	1,020	499	976	624	983
	100	255	927	391	1,001	479	934	600	954
85 2 20 18	133	184	759	306	1,016	390	997	473	1,170
	103	193	974	304	1,037	373	1,009	447	1,136
85 2 20 20	122	190	827	304	1,038	381	1,033	451	1,022
	100	201	1,009	305	1,085	384	1,016	456	1,067
85 2 20 22	109	205	919	342	1,151	441	1,085	539	1,091
	79	244	1,275	388	1,647	497	1,842	568	1,200
85 2 20 24	109	183	919	313	1,164	406	1,237	565	1,197
	72	239	1,391	363	1,770	472	2,130	636	1,357
85 2 21 2	93	221	1,070	351	1,267	447	1,220	586	1,346
	82	230	1,219	337	1,315	421	1,212	486	1,309
85 2 21 4	92	231	1,085	368	1,408	437	1,311	549	1,349
	82	234	1,218	355	1,380	424	1,309	550	1,364
85 2 21 6	105	186	959	294	1,304	350	1,244	394	1,539
	94	181	1,072	290	1,309	341	1,279	358	1,559

単位：波高 cm, 周期 0.01 s,  $M=20$ ,  $n_p=2,400$

現地観測における水圧波形から表面波への換算手法について

表-3 表面波形と推定波形の代表値の比較 (那覇港)

年 月 日 時	波数	平均波		有義波		1/10最大波		最高波	
		H	T	H	T	H	T	H	T
87 11 28 17	140	225	745	353	889	439	887	536	847
	121	200	861	319	968	397	899	480	854
87 11 28 18	143	236	729	385	927	489	955	614	969
	113	228	922	365	1,012	462	989	565	1,022
87 11 28 19	134	275	782	441	951	538	942	646	1,052
	110	265	944	395	1,012	471	980	572	1,028
87 11 28 20	136	255	763	421	997	540	969	609	1,076
	111	246	933	395	1,018	502	1,012	594	1,220
87 11 28 21	132	259	787	418	1,006	539	1,010	693	1,048
	100	260	1,038	405	1,025	516	991	656	968
87 11 28 22	128	260	816	413	1,041	506	997	561	803
	105	248	994	387	1,066	479	1,016	561	861
87 11 28 23	127	254	818	411	1,033	497	997	611	1,070
	111	239	931	389	1,049	469	1,020	603	1,087
87 11 29 0	130	229	799	348	946	439	992	566	836
	110	221	945	333	1,001	409	979	530	915
87 11 29 1	129	226	803	365	984	457	977	518	1,084
	108	222	967	353	1,036	445	1,049	503	1,115
87 11 29 2	124	225	839	371	1,048	474	1,014	591	990
	110	212	945	356	1,062	443	1,037	512	1,090
87 11 29 3	114	237	910	373	1,087	455	969	508	1,044
	101	228	1,027	351	1,063	434	993	521	1,056
87 11 29 4	132	225	788	356	958	442	1,024	617	1,041
	117	199	894	332	1,045	430	1,015	553	933
87 11 29 5	139	208	750	353	993	443	998	523	989
	110	204	948	332	1,069	406	1,094	496	1,006
87 11 29 6	124	226	839	350	1,022	444	989	517	1,183
	113	198	920	331	1,081	421	1,014	533	1,041
87 11 29 7	126	263	821	426	1,011	550	1,023	701	961
	108	252	959	406	1,091	525	1,019	686	962
87 11 29 8	133	249	784	404	1,020	516	977	649	854
	119	220	877	376	1,072	480	995	582	921
87 11 29 9	133	240	781	395	956	501	997	611	1,044
	112	228	929	367	1,045	455	1,015	554	1,002
87 11 29 10	122	254	852	385	988	480	974	575	1,051
	111	234	938	359	1,002	448	968	519	1,131
87 11 29 11	123	253	850	399	1,012	493	905	569	1,083
	105	245	994	370	1,027	453	936	527	1,090

単位：波高cm, 周期 0.01 s,  $M=20$ ,  $n_p=2,400$

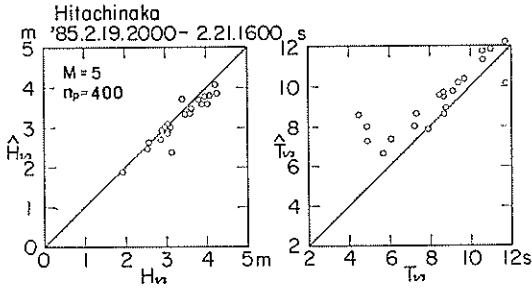


図-22 実測有義波と推定有義波の比較 (常陸那珂港)

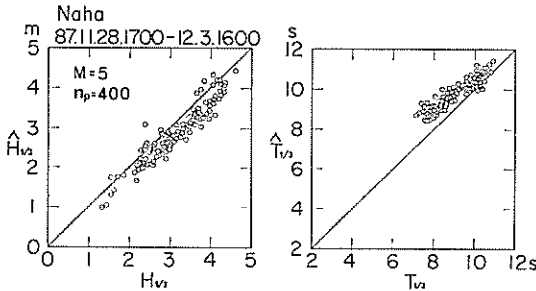


図-23 実測有義波と推定有義波の比較 (那覇港, M=5)

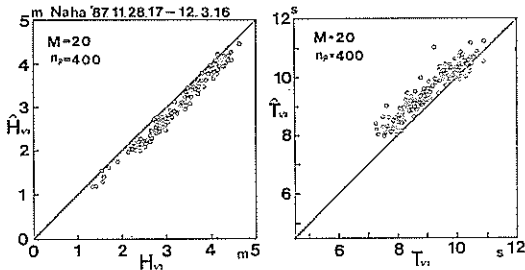


図-24 実測有義波と推定有義波の比較 (那覇港, M=20)

これらの図によれば、推定波形の有義波高(推定有義波高と呼ぶ)は実測有義波高に比べて少し小さく、有義波周期は、推定値の方が少し大きくなる傾向にあるけれども、両者の相関は高い。

また、図-24 は水圧の換算式(回帰式)の項数を20に増したときの推定有義波高と実測有義波高の相関を示したものであり、上記のM=5の場合に比べ、さらに相関は高くなっていることがわかる。しかし、推定有義波高が実測有義波高に比べ一般に小さくなるという傾向は変わらない。

(3) 応答関数および周波数スペクトル形状の比較

応答関数  $H(\omega)$  と重み関数  $h(\tau)$  は互いにフーリエ変換および逆変換の関係にあり、 $H(\omega)$  は次のように重み関数のフーリエ変換により与えられる。

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau \quad \dots\dots(35)$$

式(35)における重み関数  $h(\tau)$  として、式(26)を代入し(ただし  $A_0=C_0$ ,  $A_m/2=C_m$ ),  $\tau=m\Delta t(\Delta t=1s)$  であることおよび  $h(\tau)$  が偶関数であることを考慮して積分を実行するとすると、次式を得る。

$$H(\omega) = C_0 + 2 \sum_{m=1}^M C_m \cos(m\omega) \quad \dots\dots(36)$$

この式(36)で与えられる応答関数の絶対値が 図-8 に示した実測応答関数に対応するので、この両者を比較してみることにする。

図-25 は観測データ全長を用いて決定した係数値(ただし  $M=5$ )を用いて応答関数  $H(f)$  を求め、実測応答関数と比較したものであるが、曲線で示した換算に用いた応答関数は、丸印で示した実測応答関数に比べ、高周波側 ( $f > 0.16$ ) では小さい値となっている。

また、推定波形のスペクトルと表面波のスペクトルを比較した例が 図-26 であるが、 $f > 0.16$  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。こうした違いにより、有義波高は小さめ、有義波

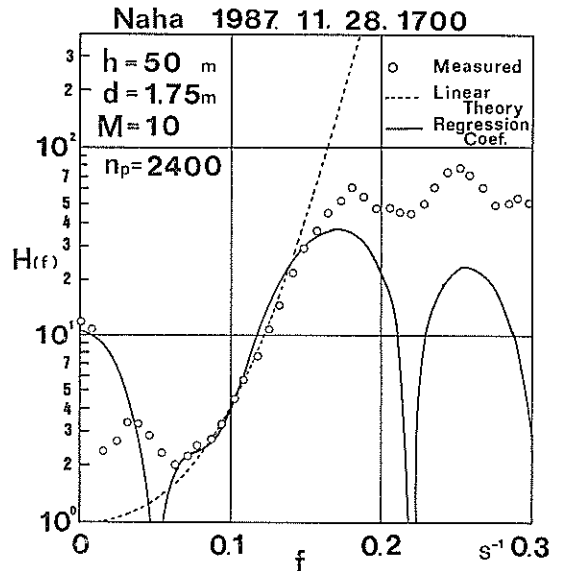


図-25 実測応答関数と回帰式の持つ応答関数の比較

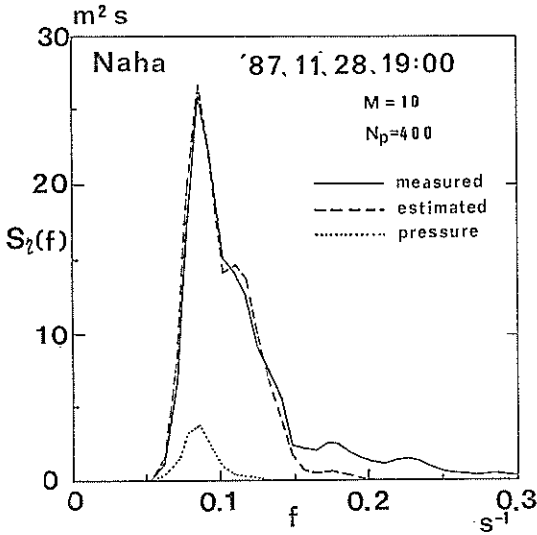


図-26 表面波形と推定波形のスペクトル形状の比較

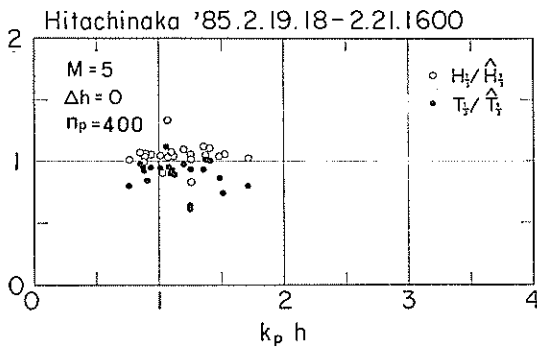


図-27 補正係数の検討 (常陸那珂港)

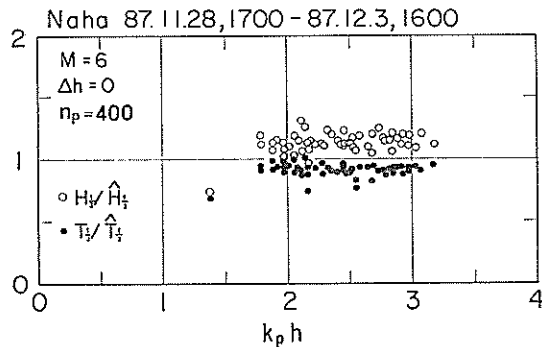


図-28 補正係数の検討 (那覇港)

(4) 補正係数の導入

図-22~24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-27, 28は有義波高の実測値と推定値の比 ( $H_{1/3}/\hat{H}_{1/3}$ )、および有義波周期の実測値と推定値の比 ( $T_{1/3}/\hat{T}_{1/3}$ ) と、 $k_p h$  (ここに  $k_p$  は推定有義波周期に対する波数  $k$ 、 $h$  は水深である) の関係を観測地点別に示した図である。この図からわかるように、 $k_p h \leq 3$  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、 $H_{1/3}/\hat{H}_{1/3}$  は 1.1 程度、 $T_{1/3}/\hat{T}_{1/3}$  は 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。

なお、有義波のほかにも最高波、1/10最大波、平均波についても実測値と推定値の比を求めたところ、同様の結果を得た。

(5) 回帰式の適用範囲

那覇港における観測記録のうち、有義波周期が比較的小さかった12月3日から7日の観測波形についても同様の処理を行い、波高比 ( $H_{1/3}/\hat{H}_{1/3}$ )、周期比 ( $T_{1/3}/\hat{T}_{1/3}$ ) を図示したものが図-29である。この図から  $k_p h > 3$  の範囲では、波高比のばらつきが大きくなっていることがわかる。したがって、ここで用いている換算方式は  $k_p h < 3$  (周期7.5秒以上) の範囲で適用可能と考えられる。

複合型波高計では、高波時に超音波式波高計が異常信号を記録するような場合に、有義波高の変化を捉えるための補間法として水圧記録を利用するものであるから、周期7.5秒以上の範囲で本方式を用いることができるのであれば、実用上かなり有効な手段と考えられる。

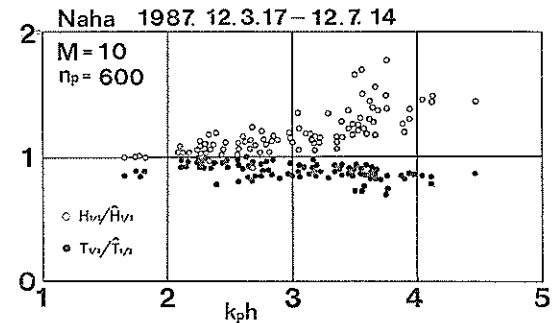


図-29 補正係数の適用範囲

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。

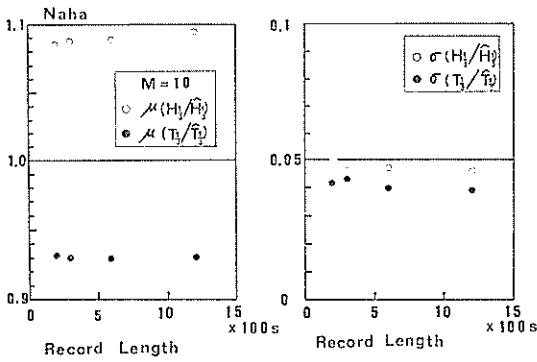


図-30 係数決定に用いた波形記録長の影響

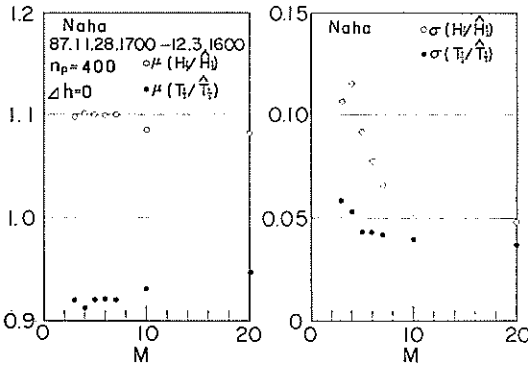


図-31 回帰式の項数の影響

(6) 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および項数

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-30 は那覇港の11月28日17時から12月3日16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, 1,200秒の4種類の長さの記録を抽出して回帰係数を求め、これらの係数を用いて有義波諸元を推定した場合に、波高比およ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。

また、図-31 は回帰式の項数を種々に変化させた場合、波高比およ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。この図から、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けれども、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-32 は那覇港のデータについて11月28日17時から20時までの3時間のうちに重み関数(本報告では  $\Delta t=1s$  としているので、 $C_1, C_2, C_3, \dots, C_M$  がそれぞれ  $h(0), h(1), h(2), \dots, h(M)$  となる)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  $h(\tau)$  の値は少し差がみられるものの、 $\tau$  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。実際に11月28日17時の観測記録から得られた重み関数を1時間後の18時の水圧記録の換算に用いて表面波形を推定し、その時の表面波形と

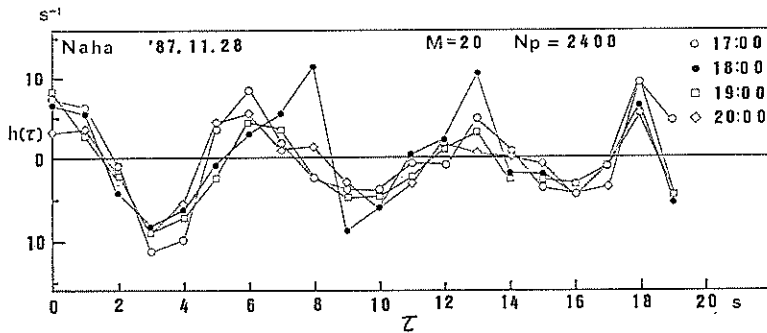


図-32 表面波の推定に用いた重み関数

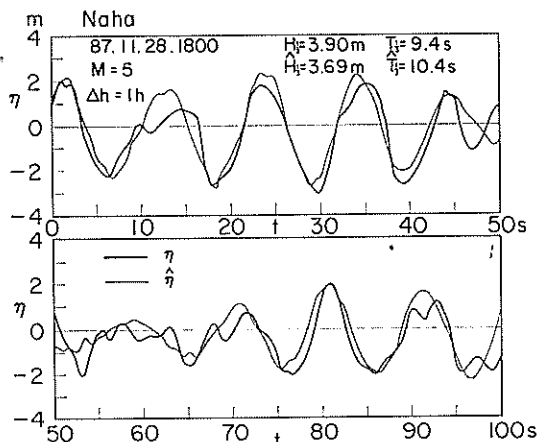


図-33 表面波形と推定波形の比較（那覇港）

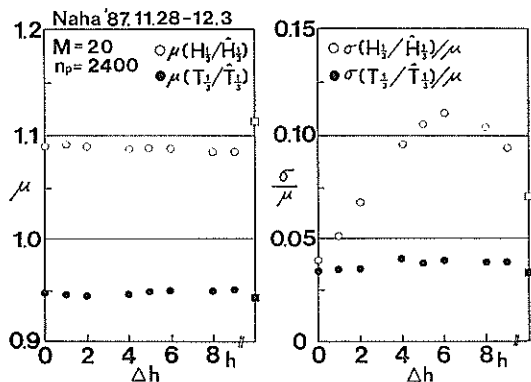


図-34 回帰係数の持続性

比較してみると、図-33のような結果が得られた。この図と前掲の図-21とを比べると、実測波形と推定波形の差はそれほど顕著ではなく、ほぼ妥当な推定波形が得られたと言える。

また、図-34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 $\Delta h$ 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。左図は波高比および周期比の平均値と $\Delta h$ の関係、右図はこれらの平均値と標準偏差の比（すなわち変動係数）と $\Delta h$ の関係を示している。平均値については波高比・周期比共に $\Delta h$ が9時間となってもあまり変化はみられない。一方、波高比の変動係数は $\Delta h$ の増加と共に大きくなり、 $\Delta h=6h$ のときに最大値を示し、 $\Delta h$ がそれより大きくなると減少する傾向が見られる。ま

た、周期比の変動係数は $\Delta h$ が増加してもあまり変化は見られない。

なお、図中の□印及び●印は、参考までに11月28日19時の観測記録から求めた係数値を用いて、11月28日17時～12月3日16時の期間の有義波諸元を推定した場合の平均値及び変動係数を示したものであり、□が有義波高に関する値、●が有義波周期に関する値である。

## 5. 結論

本報告では、水圧波形記録をもとに表面波形の諸特性値を推定する手法として、現時点で考えられるいくつかの方法を取り上げ、これらの手法の信頼性や実用性につき、現地観測データを実際に処理することにより検討を行った。その結果明らかになった事項のうち主なものは次のとおりである。

- 1) 超音波式波高計に組み込んだ水圧センサーの応答特性は、観測水深が50mであっても周波数が0.06～0.15  $s^{-1}$ （周期 7～17s）の範囲で微小振幅波理論の与える応答関数とほぼ一致しており、外海における高波に対してはほぼ良好な応答特性を持っている。
- 2) 従来、水圧記録から表面波の有義波高を推定する際に用いられていた補正係数 $n_H$ は、水深や来襲波の周期によって変化するばかりでなく、来襲波の周波数スペクトル形状によっても大きく変化する。補正係数 $n_H$ の値はスペクトルの形が鋭くなるほど小さくなる。
- 3) 波浪観測を行う海域に出現する高波の持つ周波数スペクトルの形状が想定できる場合には、有義波高の推定に用いる補正係数 $n_H$ を波数 $k_p$ と水深の関数として与えることにより、有義波高の推定精度を高めることが可能である。しかしこの方法を用いるには、ある程度の実測データを蓄積し、高波の周波数スペクトル形状に関する知見を持っていることが必要である。
- 4) 回帰式を用いて表面波形を推定する方法は、回帰係数をうまく定めることができれば、有効な実用的データ処理方法となる。回帰式の係数を解析的に与えることは、観測水深が大きくなるにつれ困難となるので、経験的に与えるのが適当と考えられる。
- 5) 回帰式の各項の係数は、水位と水圧の同時観測記録をもとに最小自乗法により決定することができる。このとき、係数決定に用いる波形記録の長さは、200秒（データ個数400）程度でもほぼ十分な結果が得られる。
- 6) 回帰式の項数 $M$ を増加するにしたがって有義波高の推定誤差のばらつきは次第に減少する。しかし、項数の増加とともに演算に要する時間が長くなるので、項

数 $M$ は10程度とするのが適当と考えられる。

- 7) 回帰式を用いて表面波形を推定する手法は、 $k_p h$ が3.0以下の範囲について適用可能である。この場合、推定有義波高は平均的に10%程度過小に、有義波周期は5%程度過大となる。
- 8) 回帰係数の値は、時間的にはそれほど大きな変化を示さない。数時間程度同じ回帰係数値を用いて有義波諸元を推定すると、推定誤差の変動係数は最大12%程度である。

## 6. あとがき

上記検討結果から回帰式を用いる方法は補正係数を用いて有義波高を換算する従来法に比べ、実用上の利点を持っていることがわかった。しかし、高波(異常波浪時)の記録の数がまだ少なく、係数値 $C_m$ 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可能であろう。

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、複合型波高計の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るとともに、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。

(1988年6月30日受付)

## 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, 1987, 23P.
- 2) 本間 仁・堀川清司・小森修蔵：水圧変動と水面波形の相関性、第12回海岸工学講演会講演集、土木学会、1965, pp. 76-83.
- 3) 光易 恒・広本文泰：波による水中圧力の変動について、第12回海岸工学講演会講演集、土木学会、1965, pp. 84-91.
- 4) 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回海岸工学講演会講演集、土木学会、1970, pp. 1-6.

- 5) Wang, H., D. Lee and A. Garcia: Time series surface-wave recovery from pressure gage, *Coastal Eng.*, 10, Elsevier Science Publishers B. V., Amsterdam, 1986, pp. 379-393.
- 6) たとえば、本間 仁・春日屋伸昌：次元解析・最小2乗法と実験式、応用数学講座第5巻、コロナ社、1973, 327P.
- 7) 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、1985, pp. 65-102.

## 主要記号一覧表

$A$	: 積分区間の上限值
$A_m$	: 回帰式の係数
$\hat{a}_i$	: 推定スペクトル $\hat{S}_\eta$ の成分波の振幅
$C_m$	: 回帰式の係数
$d$	: 海底面から測った水圧センサーの設置高さ
$E^2$	: 自乗誤差
$f$	: 周波数
$(f_p)_\eta$	: 表面波のスペクトル $S_\eta(f)$ のピーク周波数
$(f_p)_p$	: 圧力波のスペクトルのピーク周波数
$g$	: 重力加速度
$H_{1/3}$	: 表面波形の有義波高
$\hat{H}_{1/3}$	: 表面波形の有義波高の推定値
$H(\omega)$	: 表面波形の圧力波形に対する応答関数
$h(\tau)$	: 重み関数
$i$	: 虚数単位
$k$	: 波数 ( $=2\pi/L$ , $L$ : 波長)
$k_p$	: 圧力波形の有義波周期に対応する波数
$K(\omega)$	: 圧力波形の表面波形に対する伝達関数
$M$	: 回帰式の項数
$m$	: 周波数スペクトルにおける $f$ の次数
$m$	: 回帰式における項番号を示す添字
$n_H$	: 有義波高補正係数
$n_T$	: 有義波周期補正係数
$P_{1/3}$	: 圧力波形の有義値
$p(t)$	: 時刻 $t$ における水中圧力
$S_\eta(f)$	: 表面波のスペクトル
$\hat{S}_\eta(f)$	: 推定表面波形のスペクトル
$S_p(f)$	: 圧力の周波数スペクトル
$T_{1/3}$	: 表面波形の有義波周期
$\hat{T}_{1/3}$	: 表面波形の有義波周期の推定値
$T_p$	: 圧力波形の有義波周期
$\alpha$	: 周波数スペクトルにおける比例定数
$\delta(\ )$	: デルタ関数
$\hat{\epsilon}_\eta(f)$	: 表面波の推定スペクトルにおける成分波の位相

現地観測における水圧波形から表面波への換算手法について

角の推定値	$\pi$	: 円周率
$\varepsilon_p(f)$ : 圧力波のスペクトルの成分波の位相角	$\sigma(x)$	: $x$ の標準偏差
$\eta$ : 表面波形に関する量であることを示す添字	$\tau$	: Time Lag
$\eta(t)$ : 時刻 $t$ における水位	$\omega$	: 角周波数
$\mu(x)$ : $x$ の平均値		