

## バイプロトン式波高計について

富永正照・松村圭二・橋本宏

土木研究所海岸研究室

### On the Vibrotron Surface Wave Transducer

By M. Tominaga, K. Matumura and H. Hashimoto

Public Works Research Institute, Tokyo

#### Abstract

In order to study the variation of waves in shallow water, a vibrotron wave meter was designed. Its principal component is a vibrotron pressure transducer, which was originally invented by Poindexter. This transducer converts pressure variation into frequency. The present paper reports on the characteristics of the wave meter and the result of field observation which was carried out at Yuigahama coast by use of the vibrotron wave meter.

#### まえがき

浅海における波の変形を調べる目的で、これに使用する計器としてバイプロトン式波高計が試作された。これは水中における圧力変動を周波数の変化に変換するバイプロトンを使用するものであってとくに精度と安定性の向上を目的としてつくられた。ここではこのバイプロトン式波高計についてその概略について説明すると同時に、静岡県由比海岸において行なわれた現地実験の結果について報告する。

#### 1. バイプロトン式波高計

バイプロトン式波高計は水中における圧力変化をバイプロトン（振動線型圧力・周波数変換器）によって取り出すもので水圧式波高計の一種である。このバイプロトンは約10年前アメリカのPoindexterによって発明された圧力・周波数変換器である。アメリカではその高信頼度、長寿命、高精度などの長所によって、特に海洋測器に応用され津波計<sup>1)</sup>、水位計、深度計などが製作されているが、我が国ではこれまでバイプロトン応用測器の実現をみなかった。本器の発信部はダイアフラムに加わる水圧に応じてタングステン線の固有振動数の変化

を電氣的に検出して計測する構造であり、特に沿岸における短周期の波浪をも観測することができるように設計されたものである。

#### 1-1 計器の特長

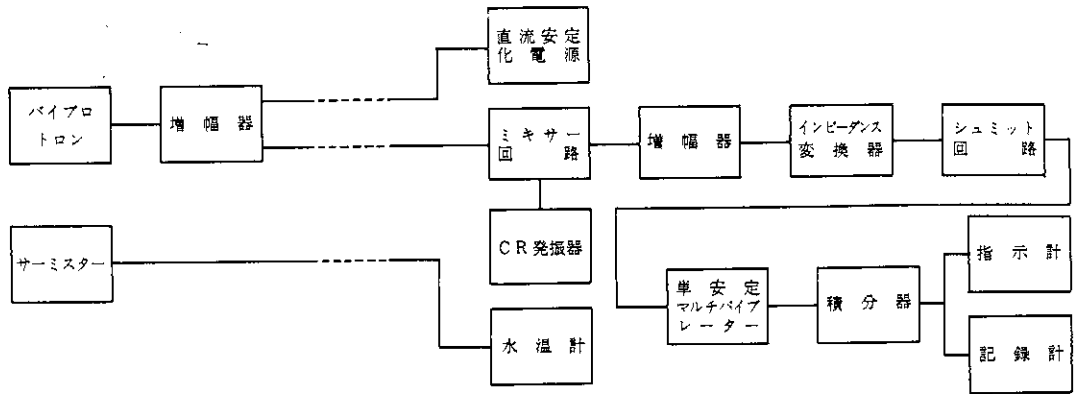
バイプロトン式波高計の特長は水圧を直接周波数に変換するために、その応答が早く動特性が良いことがあげられる。このため感度、精度とも非常に高く、また出力が周波数であるために遠隔測定に有利である。このほか装置が小型で強固であるために設置や回収なども容易に出来ることである。

#### 1-2 計器の概要

計器の接続概要は図-1のとおりであり、圧力変化による周波数の変化の割合を大きくとりだすため、波高計の設置水深に応じてCR発振器によって発振周波数を変化させてその差をとりだしている。なお出力は周波数の差を積分器によって積分しアナログ量に変換している。

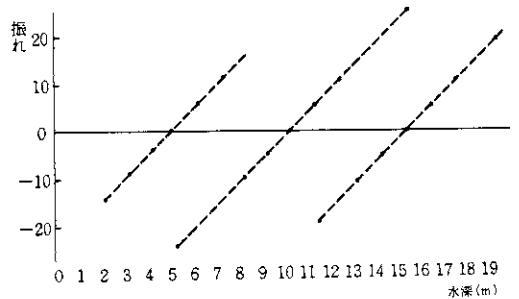
計器の仕様は次のとおりである。

性能 測定範囲 波高：最大20m、周期：2～20秒  
感度 5 cm



第1図 ブロックダイアグラム

受感部 特性 直線性1%以下，再現性：±0.1%  
 ヒステリシス0.1%，時定数0.01sec  
 寸法・形状 直径75mm，長さ：350mm  
 重量：4.5kg，外筒材質：ステンレス鋼  
 記録部 電源 AC85～110V，50.60%，約30W  
 （定電圧装置付属）  
 測定範囲切換3段 5m，10m，20m  
 零調整可能

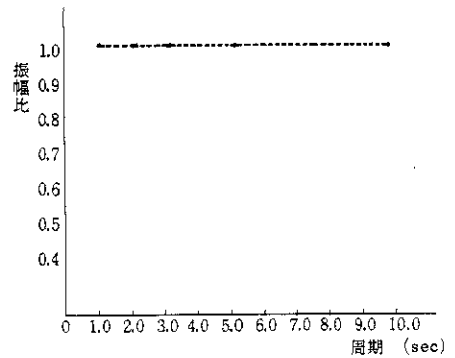


第3図 検定図(2)

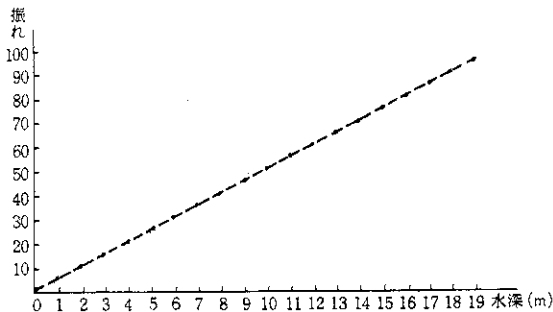
### 1-3 計器の試験結果

計器の水圧に対する振れによって静特性について試験を行った。この結果を第2図，第3図に示す。第3図は設置水深に対して振れの差を調べたものでありほとんど差は見出されなかった。

計器の設置水深を時間的に正弦波状に変化させてその動特性を調べた結果周期 1.0sec までは振幅比（静的なものに対する振幅比）は 1.0 であった。この結果を第4図に示す。1.0sec 以下については試験装置の関係上行なえなかった。



第4図 応答図



第2図 検定図(1)

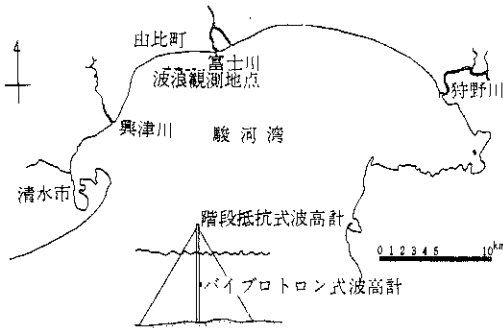
この計器の欠点としては温度変化によって出力が変化する恐れのあることで実際に使用する際には温度補正を行なう必要もあると考えられるがこの点については現在検討中である。

## 2. バイプロトロン波高計による現地観測

実際にバイプロトロン式波高計を相模灘に設置して、浅海での波の変形を調べる前に由比海岸において予備観

測を行ったのでこれについて報告する。この観測は宇田居式波高計と水圧式波高計をパイプロトン式波高計と同時に設置して波高計の特性を調べると同時に、波高補正係数についても検討を行った。

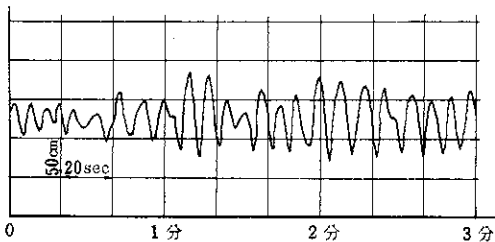
観測地点は第5図に示すように静岡県由比海岸の神沢川沖 200m であり水底は玉石まじりの砂である。ここには建設省静岡工事事務所の階段抵抗式波高計が設けられており、パイプロトン式波高計はこの階段抵抗式波高計の支柱に取り付けられた。波高計の設置位置における水深は8m であり、設置水深は4m である。(第5図参照) 表面波形は宇田居式波高計によって記録した。この波高計はトランシットによって波高観測地点におかれた目標物の水面の上下動を視準し、手動によりトランシットの振れ角とペンの振れを連動させて波形を記録するようになっている。実際の観測は階段抵抗式波高計の支柱にそった水面の上下動を 250m 離れた地点より観測し



第5図 設置地点

た。なお階段抵抗式波高計は水面付近で接点が故障していたためかよい記録が得られなかったのでここでは使用しなかった。

観測は1965年5月18日～21日の3日間行なわれ、このうち21日には低気圧によって発生したうねりが来襲した



第6図 記録例

ためによりよい記録が得られた。観測期間の最大有義波高は5月21日の9時45分～10時05分の20分間の  $H_{1/3} = 1.75\text{m}$ ,  $T = 8.8\text{sec}$  (宇田居式波高計による値) である。ここで述べるのは5月21日の9時20分～10時28分までの3回の観測結果であるが他の時刻においてもほぼ同様の波高と周期をもった波が観測されている。記録例を第6図に示す。

### 2-1 波のスペクトル

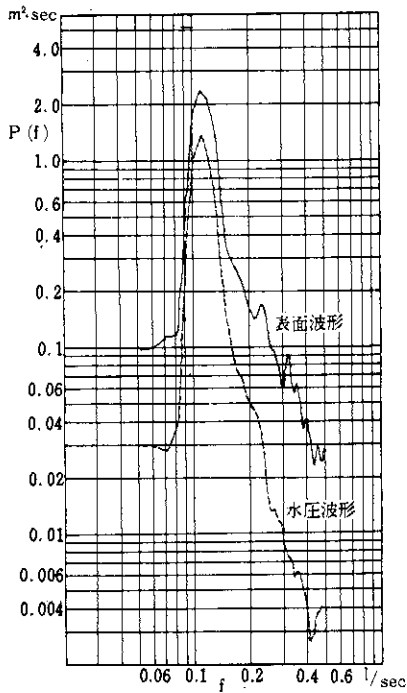
宇田居式波高計による表面波形およびパイプロトンによる水圧波形のスペクトルを第7図～第8図に示す。ここでは水圧を水頭へ換算して示してある。ただし海水の単位体積重量は  $1.03\text{ ton/m}^3$  として計算してある。このスペクトルによれば波のエネルギーはほぼ12sec～6secの間に集中しておりうねりと考えられる。また表面波形のスペクトルには2次・3次の成分波のエネルギーが少し含まれていることが示されている。一方水圧波形によるスペクトルは周波数が  $0.2$  (5sec) 以上で表面波形のものに比較して大きく減衰している。なお波のエネルギーと有義波高の関係を調べてみると第1表のように示される。ここに  $\bar{\eta}^2$  は波の全エネルギー (位置エネルギーの2倍) であり、Longuet-Higgins<sup>3)</sup> による  $E$  とは  $= 2\bar{\eta}^2$  の関係にある。有義波高と  $E$  との比は Longuet-Higgins によれば2.83とされているがこの観測でもこれに近い値をとっており、うねりのようなせまい周波数帯にエネルギーが集中している場合には理論計算によって導く際の仮定を満足しているためと考えられる。

第1表

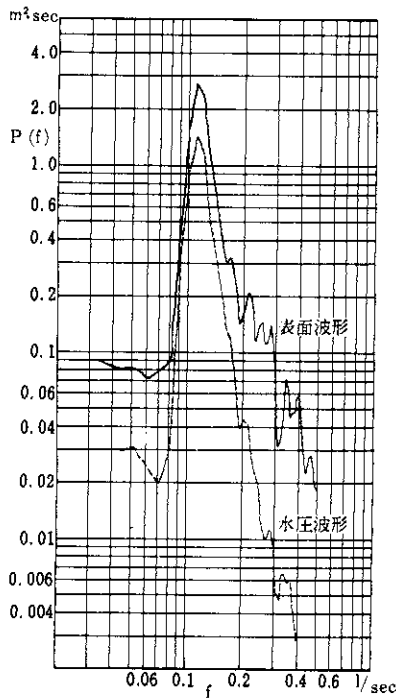
$H_{1/3}$	$T_{1/3}$	$\eta^2$	$\sqrt{E} = \sqrt{2\eta^2}$	$H_{1/3}/\sqrt{E}$	
9.20～9.40	1.51m	9.2sec	$1.48 \times 10^{-1}$	0.544	2.77
9.45～10.05	1.75	8.8	$1.72 \times 10^{-1}$	0.586	2.99
10.18～10.28	1.60	8.4	$1.33 \times 10^{-1}$	0.516	3.10
			theoretical		2.83

### 2-2 周波数応答

表面波形と水圧波形の応答および計器の周波数特性についてはスペクトル解析による方法が可能ではあるがここでは波の周期が長かったために計器の応答はさして問題にはならず表面波形と水圧波形の応答が問題であると考えられる。表面波形から水圧波形への応答関数は線形

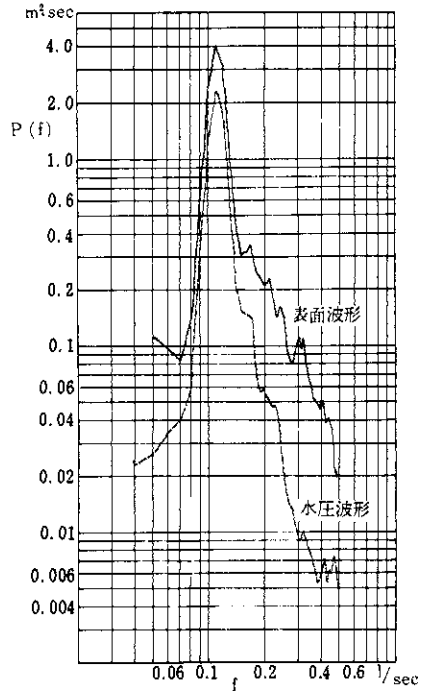


0920—0940I, 21 May 1965



第8図 波浪スペクトル

0945—1005I, 21 May 1965



第9図 波浪スペクトル

1018—1028I, 21 May 1965

理論では次のように表わされる。

$$A(f) = \frac{\cosh \frac{2\pi(h-z)}{L}}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \quad (1)$$

ここで  $h$  : 波高計の設置水深,  $z$  : 水底から波高計までの高さ

$$L : \text{波長} \quad L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}$$

$$T = \frac{1}{f} : \text{周期}, g : \text{重力の加速度}$$

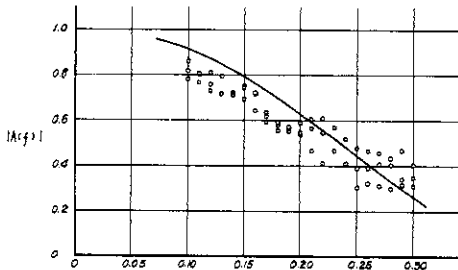
である。

一方表面波形のスペクトル  $P_s(f)$  と水圧波形のスペクトル  $P_p(f)$  および応答関数の間には次の関係がある。

$$|A(f)| = \sqrt{\frac{P_p(f)}{P_s(f)}} \quad (2)$$

以上の関係を示したものが第10図である。これには9時20分~40分, 9時45分~10時5分, 10時18分~28分の観測値を合せて示した。また図の実線は式(1)において  $h=8\text{m}$ ,  $z=4\text{m}$  として計算したものである。周波数が0.1より小さいもの, また0.3より大きいものにつ

いてはその中に雑音が相当含まれると考えられるためにここには示していない。第9図の結果によれば周波数が0.1~0.2の範囲であれば式(1)の80%程度であるがこれより周波数が大きくなるとほぼ等しい値をとるようになる。このことは周波数が0.2以上ではスペクトルの密度はピークの値の $10^{-1} \sim 10^{-2}$ でありスペクトルを計算する際に雑音成分が相当含まれると考えられる。またこのことは周波数が0.3以上についても $|a(f)|$ を計算するとほぼ0.3程度であってあまり小さくならないことか



第10図 圧力応答図(1)

らも推定される。この点についてさらにくわしく調べるためにクロススペクトルより応答関数を求めた、クロススペクトルは表面、水圧の両波形のクロスコログラムより求められるもので出力に雑音が含まれていても入力と雑音が無相関であれば応答関数は雑音の影響を受けずに次式で計算される。

$$A(f) = \frac{P_c(f)}{P_s(f)} \quad (3)$$

これによって計算したものを第11図の黒円で示す。これによると式(2)による値と傾向は同じであるが値は小さく雑音の影響が大きいことを示している。この計算では位相のおくれによる $|A(f)|$ のかたよりにについての補正は行っていないため、この点については現在検討中ではあるが雑音成分がかなりの割合をしめることはたしかであろう。また $A(f)$ 推定の際の相対誤差は相等大きくなっている。ここで観測されたようなうねりによってはエネルギーの集中している部分ではよいが他の周波数では雑音の影響が大きいため周波数全体についての応答を知ることは困難である。

### 2-3 補正係数

一般に水圧波形を表面波形に換算するには微小振幅

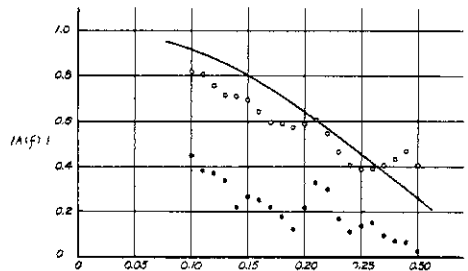
波理論では次式が用いられている。

$$\eta = \frac{n P}{w} \frac{\cosh \frac{2\pi h}{L}}{\cosh \frac{2\pi(h-z)}{L}} \quad (4)$$

ここで $\eta$ : 表面波形,  $P$ : 水圧波形,  $w$ : 水の単位体積重量,  $n$ : 波高補正係数

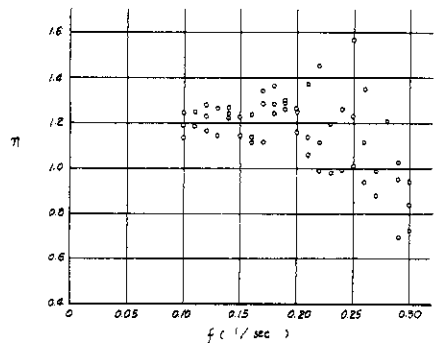
もし線形であればそれぞれのスペクトルの間には

$$A(f) = n \frac{\cosh \frac{2\pi(h-z)}{L}}{\cosh \frac{2\pi h}{L}} \quad (5)$$



第11図 圧力応答図(2)

なる関係が得られる。ここで $n$ は波の非線形性、波高計の設置方法などの原因によるといわれている。この場合にこの値を計算して示すと第12図のように示される。この結果によれば周波数が0.10~0.20の範囲では $n$ は1.1~1.3の値をとり、周波数が0.2以上では減少する傾向が見られ、またばらつきが相等大きい。このばらつきは雑音の影響の大きいことを示している。



第12図 係数nと周波数との関係

以上述べた波のスペクトル、周波数応答関数の計算には記録の読み取りをデジタルトレーサーで 1.0sec 間隔で読み取り、OKITAC 5090H によって計算を行なった。データ数は1200又は600 であり lag の数は50で計算している。計算方法は赤池の方法<sup>(4)</sup>によって行ない、スペクトルを平均するのに用いた window は  $a_0 = 0.5132$ ,  $a_1 = a_{-1} = 0.2434$  である。

### む す び

パイプロトン式波高計についてその特長、および性能、またこれを使用した現地観測の結果について述べてきたがこれらの結果をまとめると次のようになる。

パイプロトン式波高計は精度、応答の特性がよく、また取扱いも簡単であるため、温度に対する安定性の問題が解決されれば十分実用になると考えられる。

なおパイプロトン式波高計の試作は鶴見精機工作所が行った。現地観測に際しては中部地建、静岡工事々務

所、由比出張所の各位にご協力を得るとともに、宇田居式波高計については協和商工KKのご助力を受けたことを記し、深く謝意を表するものである。

### 参考文献

- 1) Snodgrass, F., W. Munk and M. J. Tucker: Offshore Recording of Low Frequency Ocean Waves. Trans. A. G. U., Vol. 39 No.1 (1958)
- 2) 宇田居吾一: トランシットによる波浪の記録観測法. 第2回海岸工学講演集 (1955)
- 3) Longuet-Higgins, M. S.: On the statistical distribution of height of sea waves. J. Mar. Res., Vol. 11, No. 13 (1952)
- 4) 赤池弘次: スペクトル推定の統計理論, スペクトル推定の実際 (1964年度講習会テキスト), 統計数理研究所.