

川崎製鉄技報
KAWASAKI STEEL GIHO
Vol.3 (1971) No.3

波浪計について
Ocean Wage Gage

平原 浩(Hiroshi Hirahara)

要旨：

川崎製鉄（株）で製作している MR-MARK Ⅲ型波浪計について原理，構造，性能などを紹介し，さらに設置例について述べた。また波浪計の信号を受けて，波浪エネルギーを解析する上で重要な有義波高を算出する有義波演算装置についても，原理，装置などを述べた。

Synopsis：

Along with the progress of ocean development, various instruments have been used for the ocean observation. With emphasis placed on the importance of the observation of ocean waves, this report describes the ocean wave gage-Model MR-MARK III -manufactured by the Measuring and Weighing Machine Plant of Kawasaki Steel Corporation, with explanations on its principle, structure and specifications. The report also deals with the principle and equipment of the measuring devices of significant waves important to analyze wave energy.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

波浪計について

Ocean Wave Gage

平 原 浩

Hiroshi Hirahara

Synopsis:

Along with the progress of ocean development, various instruments have been used for the ocean observation. With emphasis placed on the importance of the observation of ocean waves, this report describes the ocean wave gage—Model MR-MARK III—manufactured by the Measuring and Weighing Machine Plant of Kawasaki Steel Corporation, with explanations on its principle, structure and specifications.

The report also deals with the principle and equipment of the measuring devices of significant waves important to analyze wave energy.

1. 緒 言

海洋開発の進展に伴ない種々の海洋観測計器が利用されるようになった。波浪観測も重要な観測要素のひとつである。波浪特性を知ることによって高潮などの防災計画や、海上建造物の構造、港湾計画などに利用価値の高い資料を得ることができる。また、各種船舶や沿岸住民に対する気象通報として利用されうことはもちろんである。波浪は、海面上に吹く風の垂直方向圧力と水平方向張力などによって引き起こされるものであり、その姿は、波高と周期によってあらわすことができる。これら波浪観測の手段としては、階段状に並べた電極間の抵抗変化の測定、水中の圧力変化の測定、重力測定、写真撮影による方法などが行なわれている。当社計量器工場では、水中圧力の測定方式によるMR-MARK III 型波浪計を¹⁾製作

し、各所に納入しているので、その概要と設置例について述べ、さらに波浪計からの信号を受けて波浪エネルギーを解析するに必要な有義波演算装置についても簡単に紹介する。

2. 波浪計の原理と構造

2.1 波浪計の概要

MR-MARK III型波浪計は、海水中に据えつけ、表面波高による水中の圧力変化を測定することによって海面の波の状態を観測しようとするものである。すなわち海底面あるいは海水中の定点における圧力変化を連続的に測定すれば $P = \rho h$ (P : 圧力変化, ρ : 海水密度, h : 波高の変化) の関係から表面波高の変化を測定できる。表面波高による水圧の変化は、受圧素子(ペローズ)によ

て検出され、さらにベローズの動きは、差動変圧器によって電気信号に変換される。この信号は、海底ケーブルあるいは、無線によって受信器に伝送される。

波浪計はハイパスフィルターをそなえているので、周波数の面からみると、周期の短い波に対しては十分に応答するが、周期の長い波に対してはいちじるしい減衰特性を示す。周波数特性は1～数十 sec の周期に対し、振幅、位相特性ともにほとんど一定である。この特性によって、潮位変化などにかかわらず短周期波浪を測定することができる。発信器本体は黄銅製で、水深50 m の耐圧と、耐食性を有している。また、海中生物、特にカキなどの付着に対しても構造面で考慮がはらわれている。信号伝送用海底ケーブルは、発信器上部の水密プラグをとおり、内部の端子に接続される。波浪計の設置は、鉄筋コンクリート製の Tripod に固定して海底に沈設するか、海底に鋼管杭を打ち込んで、杭の途中に棚を設け、これに取付する方法でおこなう。設置水深は、3～15m である。

2.2 原 理

MR-MARKⅢ 型波浪計の主要部は、ベローズ、ばね、オリフィスおよび差動変圧器によって構成される。図1において、海面の波浪による水圧変化は、受圧ベローズに伝えられ、その動きはさらに、受圧ベローズおよび測定ベローズによって形成されたチャンバー内に充てんされた非圧縮性流体（シリコン油）を介して測定ベローズに伝達される。測定ベローズには、差動変圧器の鉄心が連結されているので水圧変化を電気信号として取り

出すことができる。測定ベローズには受圧面積に比して十分小さなオリフィスが設けられており、受圧ベローズの動き x_1 が早い変化をするときは、測定ベローズの動き x_2 は、 x_1 に対し比例的に変化するが、 x_1 の変化が遅いときは、シリコン油のオリフィスからのリークによって x_2 には変化があらわれない。つまり2つのベローズ、オリフィスおよびシリコン油によって微分要素が構成されることになる。図1において、次の式がなりたつ。

$$F_1 = K_1 x_1 + P_2 A_1 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$P_2 A_2 = K_2 x_2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$x_1 A_1 = x_2 A_2 + \int Q dt \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$P_2 = RQ \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし

F_1 : 受圧部にかかる荷重 ($= P_1 A_1$)

P_1 : 受圧部にかかる圧力

x_1 : 受圧ベローズの動き

K_1 : 受圧ベローズおよび受圧バネのバネ定数の和

x_2 : 測定ベローズの動き

K_2 : 測定ベローズおよび測定バネのバネ定数の和

A_1 : 受圧ベローズ有効面積

P_2 : ベローズ内圧力

A_2 : 測定ベローズ有効面積

Q : 非圧縮性流体（シリコン油）流量

R : 管路（オリフィス）抵抗

(1)～(4)式をラプラス変換すると、

$$F_1(S) = K_1 \cdot X_1(S) + P_2(S) \cdot A_1 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$P_2(S) \cdot A_2 = K_2 X_2(S) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$X_1(S) \cdot A_1 = X_2(S) \cdot A_2 + 1/S \cdot Q(S) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$P_2(S) = R \cdot Q(S) \quad \dots\dots\dots (8)$$

(5), (6)式より、

$$\begin{aligned} F_1(S) &= K_1 \cdot X_1(S) + A_1/A_2 \cdot K_2 \cdot X_2(S) \\ &= K_1 \cdot X_1(S) + a \cdot K_2 \cdot X_2(S) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし $a = A_1/A_2$

(6), (8)式より

$$R \cdot Q(S) = K_2/A_2 \cdot X_2(S) \quad \dots\dots\dots (10)$$

(7), (10)式より

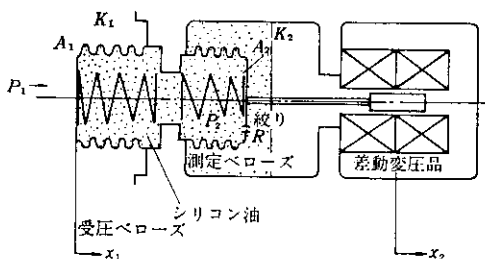
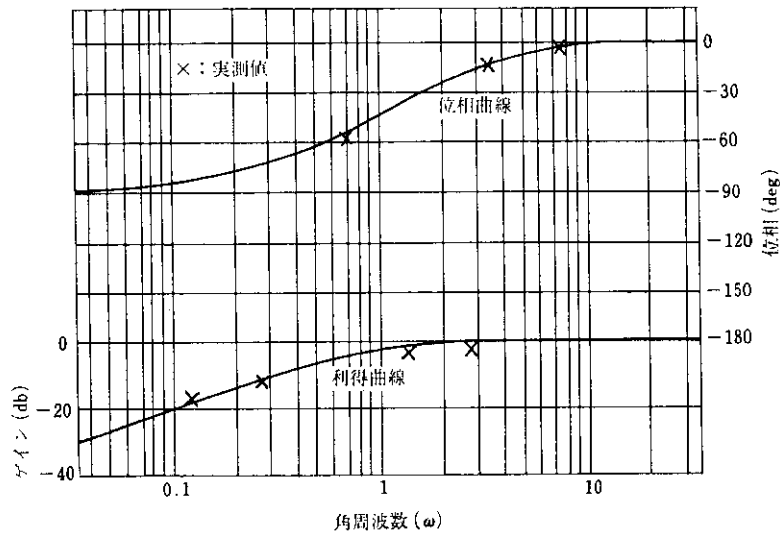


図1 波浪計原理図

図 2 ボード線図 $G(S) = KT'S/(1 + T'S)$

$$X_1(S) \cdot A_1 = X_2(S) \cdot A_2 + K_2/A_2 R \cdot 1/S \cdot X_2(S)$$

$$\text{よって } X_1(S) = 1/a \cdot X_2(S) + K_2/A_1 A_2 R \cdot 1/S \cdot X_2(S) \quad (11)$$

管路の粘性減衰係数を C とすれば, $C = RA_2^2$ であるからこれを(11)式に代入すると,

$$\begin{aligned} X_1(S) &= 1/a \cdot X_2(S) + K_2/aC \cdot 1/S \cdot X_2(S) \\ &= [1/a + K_2/aC \cdot 1/S] X_2(S) \quad (12) \end{aligned}$$

(9), (12)式より,

$$F_1(S) = [K_1/a + K_1 K_2/aC \cdot 1/S] \cdot X_2(S)$$

$$\therefore X_2(S) = 1/[K_1/a + aK_2] + K_1 K_2/aC$$

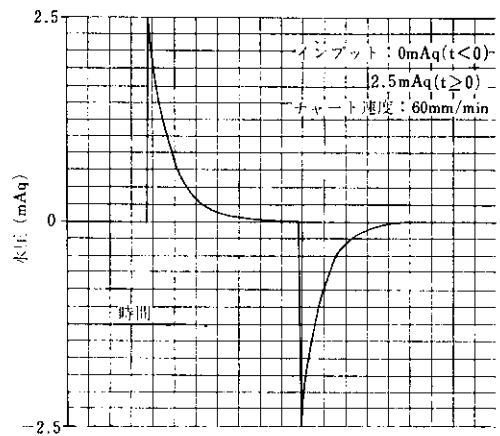


図 3 波浪計のインディシャル応答

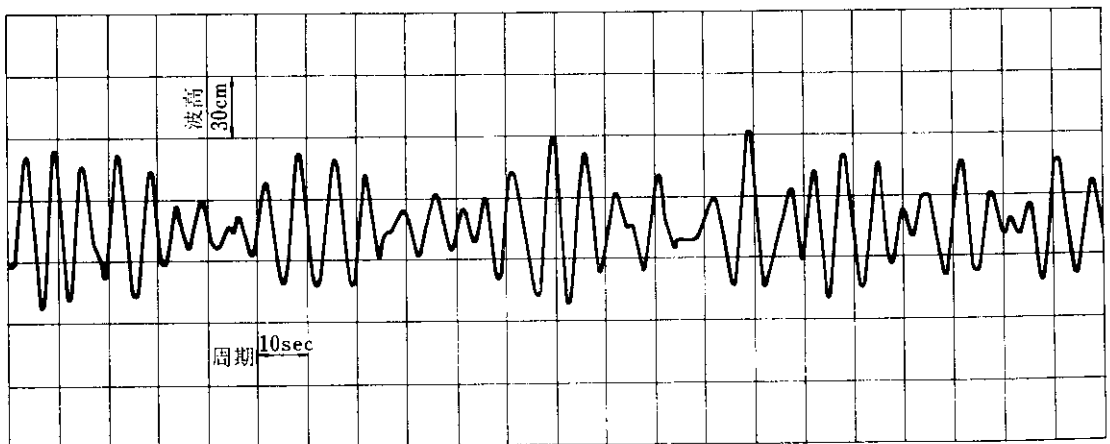


図 4 波浪計の記録例

$$\begin{aligned} & \cdot 1/S] \cdot F_1(S) \\ & = [aC/K_1 \cdot K_2 \cdot S] / [aC/K_1 K_2 \\ & \quad \cdot \{K_1/a + aK_2\} \cdot S + 1] \\ & \quad \cdot F_1(S) \end{aligned}$$

よって

$$G(S) = X_2(S)/F_1(S) = KT'S/1 + T' \cdot S \cdots (13)$$

ただし、 $T' = aC/K_1 K_2 [K_1/a + aK_2]$

$$K = 1/[K_1/a + aK_2]$$

(13)式からあきらかなように、波浪計は、時定数 T なる一次遅れを含む微分要素を構成している。(13)式のような伝達関数の周波数特性を図 2 の、Bode 線図に示す。線図におけるプロットは実測値である。また、インディシャル応答の実測値を図 3 に、波浪記録例を図 4 に示す。

2.3 構造

波浪計の断面図を図 5 に、その外観を写真 1 に示す。図 5 において、波浪による水圧変化は、下



写真 1 MR-MARK III 型波浪計

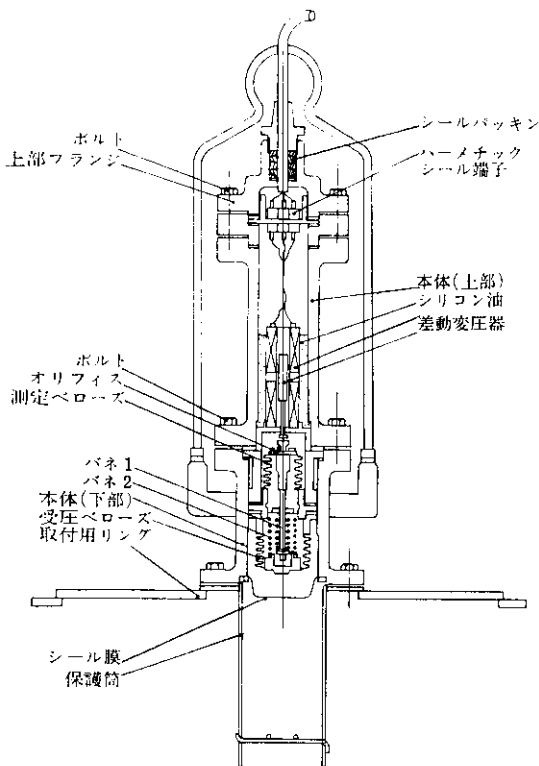


図 5 波浪計の内部構造図

部のシリル膜と受圧ベローズの間に封入されたシリコン油を介して受圧ベローズに伝えられる。シリル膜は、受圧ベローズを保護するだけでなくベローズのひだに海中生物その他が付着するのを防止している。ベローズはりん青銅製であり、腐食の恐れはない。

受圧ベローズは圧力変化を受けると、ベローズおよびバネのバネ定数によってきまる変位を起こす。この変位は、受圧・測定ベローズ間および測定ベローズ受圧面に設けられたオリフィスを通じてその上部の空間部に充てんされたシリコン油によって、測定ベローズに伝えられる。

測定ベローズには差動変圧器の鉄心が連結されているので、測定ベローズの変位は電気信号に変換される。測定ベローズは、与えられる圧力変化に対して、ベローズ、およびオリフィスとシリコン油による粘性減衰係数とによってハイパスフィルター（一次の微分要素）を構成しているの、その変位は、図 2 に示したような周波数特性にしたがう。折点周波数の選たくは、オリフィスの形状と、シリコン油の粘度を変えることによっておこなうことができる。シリコン油は温度による粘性係数の変化が少ないこと、電気的絶えん性が良いこと、種々の粘度のものが比較的容易に入手できることなどの理由で使用した。変位—電気変換要素である差動変圧器は、一次側巻線を商用周波

数の3～5 Vでれい磁し、鉄心の動きによる出力を二次側から取り出す。鉄心ストロークは、ほぼ2 mmである。これらを収納する本体部きょう体は、耐圧、耐食性に富む黄銅鑄物である。フランジ接続部にはすべてOリングを使用し、完全な水密構造となっている。ケーブル取り出し口は、ニトロブチル系のゴムをソロバン玉状に成形したパッキング2個を使用した防水構造になっている。シール膜下部の円筒は、異物による膜の損傷を保護するとともに、カキなどの海中生物が膜に固着しない効果がある。円筒上端部のフランジは、設置取付用のもので、鋼管杭に設けられた棚や、三脚つきコンクリートブロックにボルトによって固定する。

2.2.3 一般仕様

MR-MARK Ⅲ型波浪計の性能は次のとおりである。

- (1) 設置水深 最底潮位面から3～15m
- (2) 測定範囲 $0 \pm 1 \sim 0 \pm 6$ mの波浪
- (3) 周波数特性 周期20～100secの波に対し振幅利得で-3 db, 位相遅れ45°以内
- (4) 静水圧に対する精度 フルスケールの±1%以内
- (5) 出力 $0 \sim 100$ mVAC, 50/60 Hz
- (6) 重量 約27kg

3. MR-MARK Ⅲ型波浪計の特長

MR-MARK Ⅲ型波浪計の特長は次のとおりである。

- (1) 計器が海面下に設置されるので、台風時のような大きな波でも、損傷を受けることが少ない。
- (2) 構造的にみて故障が少ない。
- (3) 差動変圧器を使用しているため、変位を非接触で電気量に変換できる。
- (4) 経年変化する要素がないので、電極式あるいは従来の水圧方式に比べて、寿命が長く、少なくとも1年以上連続使用することができる。

- (5) 引き揚げ時、固着生物などの清そうも簡単に行なうことができる。

しかし本波浪計の使用にあたっては次の2点を考慮しておく必要がある。

- (1) 表面波による水圧の変化は、海面から下にいくほど減衰し、深さが深くなるほど、周期が短くなるほど減衰が大きくなるため、短周期の波は記録されないで、長周期の波のみ記録される。
- (2) 水圧型波浪計で記録された波形から表面波高を計算する場合、微小振幅波の理論によって行なうが、この理論でとりあつかっている波形と実際の波形とが異なるために、計算表面波高と実際の表面波高に相違が生ずる。ただし実用上ほとんど差異はないとされている²⁾。

4. 表面波高の算出

波浪計による観測値から表面波高を算出するには次の式を用いる。

$$H = \frac{P}{\rho} \gamma \frac{\cosh(2\pi D/L)}{\cosh(2\pi h/L)} \quad \text{.....(14)}$$

ただし H : 表面波高

P : 表面波による水圧変化

ρ : 海水の密度

γ : 補正係数

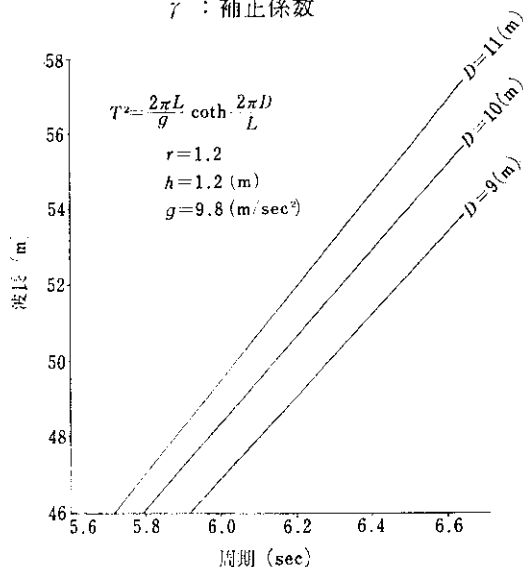


図6 周期—波長関係曲線

D : 観測地点の海の深さ

h : 海底から波浪計受圧部までの高さ

L : 波の波長

(14)式の波長 L は各波高の周期より次式で算出される。

$$T^2 = \frac{2\pi L}{g} \cdot \coth\left(\frac{2\pi D}{L}\right) \dots (15)$$

g : 重力の加速度 (9.8067m/sec²)

(15)式に g と D を与えれば周期 T と波長 L の関係が求まり、したがって周期を測定することによって波長がわかる。(15)式で求めた L を(14)式に入れて H/P すなわち表面波高と受圧部における水圧との比を求めることができる。周期—波長および波長— H/P の関係曲線の一例を図6, 7に示す。

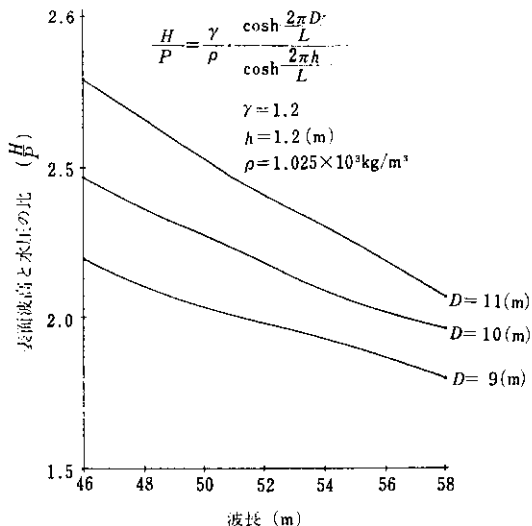


図7 波長— H/P 関係曲線

表1 波浪観測装置仕様例

波 浪 計	設 置 水 深	A.P. --- 3.5m
	設 置 位 置	東京灯標塔脚部 (写真2参照)
	測 定 範 囲	0 ± 2.5m
	周 波 数 特 性	周期60secの波で3db以内の減衰
	伝 送 距 離	約60m (塔脚部より灯標内観測室)
記 録 計	構 造	電子管式自動平衡型
	記 録 速 度	フルスケール走行0.8sec
	記 録 紙	ロールチャート (有効目盛幅120mm)
	記 録 紙 送 り 速 度	20, 40, 80mm/min
自 動 制 御 器	タ イ ム マ ー ク	1回/min (測定中)
	測 定 時 間 整 定	1hrごとに10min
	タ イ ム マ ー ク 発 信	1回/min
タ イ マ ー	構 造	同期電動機による駆動
	時 間 修 正	NHK時報による自動修正

5. 設置例

1968年、東京湾港口部にある東京灯標に据えつけた波浪観測装置例とその設置状況について紹介する。本観測装置は、東京都港湾局の計画によるもので、潮位、波浪、風速、風向などの多要素観測を行なっているがここでは波浪観測のみについて述べる。



写真 2 東京灯標

5.1 仕様

この波浪観測装置は、MR-MARK III型波浪計、KER-11型記録計、CB-12型自動管制器およびタイマー(電波時計)から構成されている。自動管制器は、内部にリレー、時間整定用タイマーなどを内蔵し、測定時間の切替え、停電時の非常電源装置への自動切替を行なうものである。タイマーは、通常の時計と同様に、その時の時間を示すとともに、内部の接点機構により、毎時10min間の測定信号を管制器に与える機能をもっている。

これらの各機器の仕様を表 1に示す。なお本装置は前記の各機器以外に主電源停電にそなえて充電器、バッテリー、インバーターを含む非常電源装置を有している。

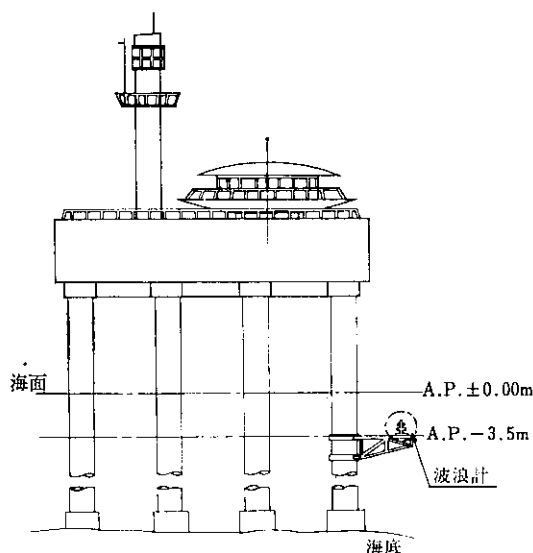


図 8 波浪計設置位置(東京灯標)

5.2 設置状況

東京灯標における、波浪計の設置位置を図 8に示す。この場合は、鋼管杭に棚を設けて計器を取付けている。鋼管杭にあらかじめ棚を設けて海底に杭を打ち込むと、海底地盤のかたさによって、杭の進入度が変わり、計器の設置水深を正確に決めることができない。このため、半円状のバンドを2つ製作しその一方に棚をつけて、杭の外周をはさみ込み、ボルトで締めつける。灯標の場合は海面上で2つのバンドを塔脚部に巻いて、ボルトで仮り締めし計器を棚に取り付け、ガイドロープをゆるめながらバンドを少しずつ海面下におろした。所定の水深の位置で潜水夫がボルトを本締めして固定した。

写真 3は海面下へ沈めるところを示す。伝送用ケーブルはあらかじめ波浪計側には接続しておき、受信器まで布設した。ケーブルは、塔脚部にそって海面上へ出る。さらに上部の室内へ入り、所定の観測室まで約60mの距離である。観測室内には記録計、自動管制器、タイマーなどを含む計器盤が設置されており、測定点の海面上で記録をおこなっているので信号伝送の面からは、非常に



写真3 棚に固定された波浪計

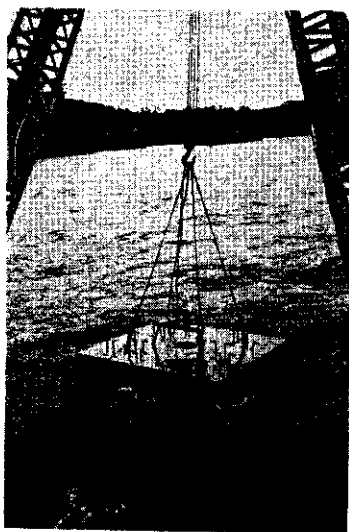


写真4 トライボートに取付けられた波浪計

簡単である。無線伝送の場合には、上記のように海面上に水密構造の部屋を設けて、ここから陸上の受信器へ無線伝送する。また、有線伝送の場合は、海底ケーブルによって陸上の受信器まで伝送する。計器をトライボートに取りつけて沈設する場合は、通常有線伝送で行なう。写真4はトライボートによる沈設作業を示す。電源は、陸上から有線伝送を行なう場合は問題ないが、海上で記録または、無線発信を行なう場合は、バッテリー、発電機、太陽電池などの別電源が必要となる。東京灯標では灯台用その他に強力な発電機をそなえているのでこれを使用した。

6. 有義波演算装置

6.1 「有義波」の定義

海面上にあらわれる波は、不規則な波が合成されたもので、その海域で波高や周期はいくらと決めることができない。これを明確にするために、「有義波」³⁾ (significant wave) が定義されている。すなわち、10min間ないし20min間の連続記録から読み取られる最も大きい波高を示す波からかぞえて、全部の波の数の $\frac{1}{5}$ を、波高の順に並べたとき、それらの波の平均波高をもち、それらの波の平均の周期をもつ波を「有義波」と定義している。有義波は、物理的には、有義波のもつ周期の付近で波のエネルギー密度がもっとも大きいということ、現象面からも、海面の波の性質を良くあらわしていることになる。したがって波の解析をおこなう場合には、波を、有義波の波高を振幅とし、その周期をもった正弦波として取りあつかう。

6.2 演算装置

6.2.1 原理

波浪のパワースペクトルがガウス分布をし、比較的せまい帯域よりなるものとする、観測時間内に得られた波の平均波高は次式であらわされる⁴⁾。

$$H_{mean} = \pi a_0 \quad \dots\dots\dots (16)$$

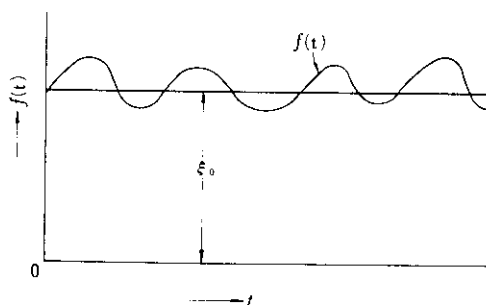


図9 波

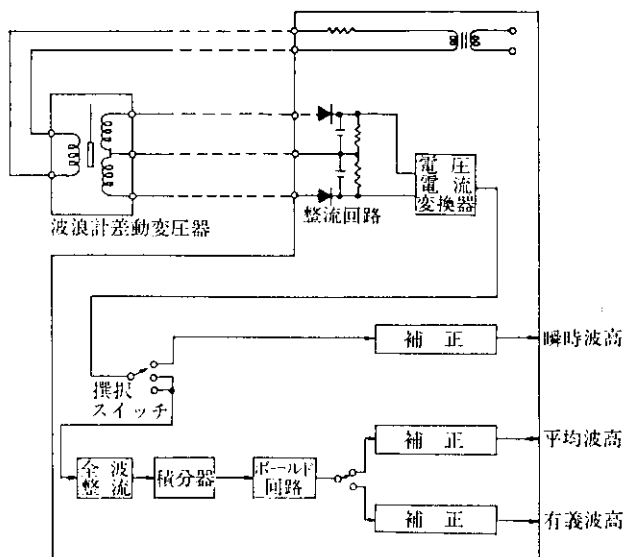


図 10 有義波演算ダイアグラム

ただし a_0 は平均偏差, すなわち $|f(t) - \xi_0|$ の時間的な平均を示す。 $f(t)$ は波浪の時間的な変化を示す関数で ξ_0 は潮位を示す。(図 9 参照) 有義波高 $H_{1/3}$ は, スペクトル分布から

$$H_{1/3} = 1.6 \cdot H_{\text{mean}} = 5.02 a_0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

であらわすことができる。したがって a_0 がわかれば $H_{1/3}$, すなわち有義波高を求めることができる。

a_0 は, $a_0 = 1/T \int_0^T |f(t) - \xi_0| dt$ によって求めることができ, その原理図を 図 10 に示す。

波浪発信器には MR-MARK III を使用しているので潮位変化による発信器取付水深の変動にともなう表面波の減衰率の違いを考えなくてよいので, 原理的にその出力信号は, $\{f(t) - \xi_0\}$ となる。

出力信号は商用周波数の交流電圧信号なので, 図 10 において, 同期整流回路によって, 直流電圧に変換し, さらに電圧・電流変換器 (V/I_{amp}) によって直流電流信号に変換する。この信号は, $\{f(t) - \xi_0\}$ に対応するものであり, これを全波整流回路によって $|f(t) - \xi_0|$ なる信号に変換する。これを積分器によって, $T=10\text{min}$ 間の積分を行ない $\int_0^T |f(t) - \xi_0| dt$ を求める。測定開始 ($T=0$) から積分完了 ($T=600\text{sec}$) までの積分信号は, 次のホールド回路へ送られ, 補正

係数を与えてから出力信号となる。積分値の時間平均 $1/T \int_0^T |f(t) - \xi_0| dt$ は積分時間 T を決めれば定数として取りあつかえるので, 回路定数をあらかじめそのように決めておけばよい。

6.2.2 装置

演算装置は, 電圧-電流変換回路, 積分回路, およびホールド回路は IC およびトランジスタなどの半導体を中心としたプリント板として作られ

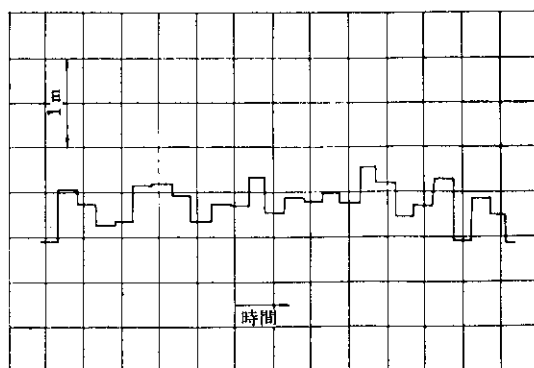


図 11 有義波記録例



写真 5 有義波演算装置

ている。10min間ごとの切替は、同期電動を用いたタイマーによって行ない、回路切替は、ワイヤスプリングリレーおよびリードリレーをもちいている。これらはよこ480mm、高さ249mm、奥行き252mmの標準ラックに収納される。なお本装置は有義波高演算のみで周期の演算は行なわれない。また、内部で選択スイッチによって有義波高、平均波高および瞬時波高の測定選択ができるようになっている(図10参照)。図11に本装置による有義波高の記録例を示す。この記録は、山口県萩市見島において観測したもので、海上保安庁の計画によるものである。

7. むすび

MR-MARK III型波浪計を中心として、原理、

構造、設置例を述べ、有義波高演算器についても紹介した。波浪観測はたんなる気象観測という意味だけでなく、港湾土木における波圧エネルギーの解明などにも寄与するところが大きいので、この分野の方々にも興味を持たれば幸いである。水圧式波浪計は、本文で述べたごとく、長寿命、連続観測ができる半面、表面波と水中圧の非相似性、潮位変化による影響などがあるので、今後はこれらの諸問題の解決をはかりたい。記録された波のデータ解析についてはアナログデータの場合は、非常な労力を要し、一部では Curve Reader などがもちいられている。パワースペクトルの解析には電子計算機をもちいるので、波浪信号を短い時間間かくで分割しデジタル信号に変換すればデータ処理が便利となる。信号伝送の面では、無線によるテレメータリングが増えつつある。この場合もデジタル信号を無線伝送する方が、ノイズなどの点で有利である。このように、発信器としての波浪計の改良のみならず、発信器から得られる信号の補正演算、有義波演算、データ処理などについてもさらに研究を進めたい。おわりに、本稿の執筆にあたって東京都港湾局主幹、寺中啓一郎氏に種々のご助言、ご協力いただいたことを深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 降旗：第7回海岸工学講演会講演集(1960)，81
- 2) 東京都港湾局：東京港波浪観測装置調査報告書，(1966)，66
- 3) 井島：海岸・港湾測量，(1960)，32 [森北出版]
- 4) Frank. E. Snodgrass & Robert. R. Purz : Coastal Engineering, (1958)