

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 238 June 1976

有義波高指示計の理論およびその実用化について

合 田 良 実
高 山 知 司
岸 良 安 治

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	3
2. 有義波高指示計の理論	3
2.1 η_{rms} による $H_{1/3}$ の表示法	3
2.2 η_{rms} および $H_{1/3}$ の統計的安定性	4
2.3 $ \overline{\eta} $ による表示法との比較	6
2.4 規則波の計測用としての可能性	7
3. 有義波高指示計の構成および使用法	8
4. 使用実績について	10
5. あとがき	11
参考文献	12

Theory and Example of Digital Significant Wave Height Indicator

Yoshimi GODA*

Tomotsuka TAKAYAMA**

Yasuharu KISHIRA***

Synopsis

A digital meter which displays the significant height and mean period of irregular waves on real time was developed for convenience of random wave experiments in laboratory. The significant wave height is calculated as $4.0\eta_{\text{rms}}$ after computing the root-mean-square value of wave profile, η_{rms} , while the mean wave period is calculated by dividing the measuring time with the number of zero-up-crossings. Calculation is performed on digital basis.

A numerical simulation of irregular waves with varying durations has shown that the wave height by this method is statistically stabler than the wave height by the conventional mean wave method; the ratio of standard deviation to the mean value of η_{rms} is estimated to be less than 2 per cent for trains of 50 waves long. Influence of the deviation of mean water level from the initial value upon η_{rms} and its correction have been examined. A comparison is made with another method of wave height estimation by means of the average absolute amplitude of wave profile, $|\overline{\eta}|$.

Tests with a newly-developed digital indicator for laboratory irregular waves have confirmed that the indicated values of heights and periods agree within an allowable error with the values directly obtained from wave profiles by the electronic digital computer.

The present digital indicator can be easily adapted for use in the field. It can also be utilized for laboratory tests with regular waves by changing the conversion factor of 4.0 to 2.83.

*Chief of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

**Senior Research Engineer, Marine Hydrodynamics Division

***Member of the Wave Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

有義波高指示計の理論およびその実用化について

合 田 良 実 *
高 山 知 司 **
岸 良 安 治 ***

要 旨

不規則波実験に際して有義波高および平均周期をリアルタイムでデジタル表示する計器を試作した。有義波高は、波形の標準偏差値を計算してこれを4.0倍したものと求められ、平均周期は測定時間をその間のゼロアップクロス点の数で割って求められる。計算はデジタル演算である。

この方式による波高値は、数値シミュレーションの結果によれば、通常の1波ごとの計算による値よりも統計的な変動が少く、波数50程度で相対標準偏差2%以下となるものと推定される。また、平均水位の初期設定誤差の影響についても吟味され、波形の絶対値の平均値から有義波高を推定する方式と比較された。

使用実績によれば、この計器による波高および周期の表示値は、波形記録を電子計算機で処理して得られた結果と、実用上十分の精度内で一致した。

この指示計は、若干の変更を行うことによって波浪観測用の指示・記録計器として使用可能である。また、周期一定の規則波実験には換算係数を2.83とすることによってそのまま利用することができる。

1. ま え が き

海の波の観測あるいは不規則波の室内実験に際して困惑を覚えることは、波高たとえば有義波高の値が簡単にはわからないことである。現場で波を見ながら目測することがむずかしいのはもちろん、オシログラフに波形記録が取れていても、それをいちべつして有義波高の値をいいては不可能に近い。このため、有義波高をリアルタイムで表示できる計器が以前から要望されていた。特に不規則波実験では発生波の波高レベルを微調整する必要があり、従来は一度記録を取って解析した上で再び実験を繰り返すなど、所要の実験波を発生できるようになるまでの手間が大変であった。

こうした要望に応える一つの方法は、波形の標準偏差値、あるいは波高の絶対値の平均値を電気回路等で計算し、これを有義波高に換算することである。後者の方法は、既にSnodgrassとPutz¹⁾によって示唆され、Blair²⁾が現地での使用例を報告している。また、降籙ほか³⁾は自動平均回路と組み合わせて波高を連続的に表示する計器を開発し、これによる観測例を報告している。また、前者の方法による計器については高橋・鈴木・中井⁴⁾が述べており、実験用計器としては敗米の一部の水理研究所で使用されている。

このようなところから、著者らは波形の標準偏差値に基づく有義波高指示計を試作させ、若干の使用実績を得たので、その基礎理論と合せてここに報告する次第である。

2. 有義波高指示計の理論

2.1 η_{rms} による $H_{1/3}$ の表示法

良く知られているように、不規則な波群中の個々の波の波高は、そのひん度分布がレーリー分布で表示できる。これは厳密にはスペクトルが非常に尖った波に対してのみ成立するもの⁵⁾であるが、波をゼロアップクロス法で定義する限り、スペクトルが広がった海の波に対してもほぼ成立することが多数の観測例で確認されている⁶⁾。

レーリー分布の理論⁵⁾によれば、有義波高 $H_{1/3}$ および平均波高 H は、波形の標準偏差値と次の関係にある。

$$H_{1/3} = 4.004 \eta_{rms} \quad (1)$$

$$\bar{H} = 2.507 \eta_{rms} \quad (2)$$

ここに、

$$\eta_{rms} = \sqrt{\lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \eta^2 dt} \quad (3)$$

* 海洋水理部 波浪研究室長

** 海洋水理部 主任研究官

*** 海洋水理部 波浪研究室

ただし,

$$\overline{\eta} \equiv 0 \quad (4)$$

と仮定する。

式(1)の関係を現地の表面波形の観測データで調べたのが図-1, 2である。図-1は名古屋港内の観測データ92例⁷⁾であり, 図中の白丸はスペクトルのピークが1個

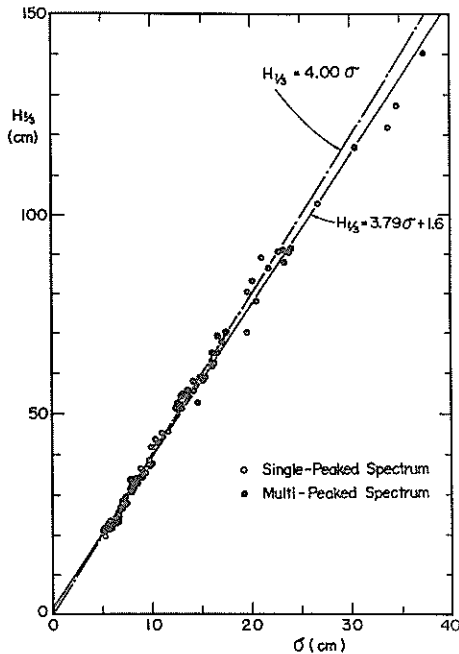


図-1 名古屋港のデータにおける $H_{1/3}$ と η_{rms} の関係 ($\sigma = \eta_{rms}$)

のもの, 黒丸はピークが複数個(うねりと風波が重畳した場合)のデータである。また, 図-2は留萌, 苫小牧, 山背泊, および金沢の諸港の観測データ79例に名古屋港のデータの集合を加えたもの⁶⁾である。この両図から明らかなように, $H_{1/3}$ と η_{rms} の相関は極めて高く, 相関係数の値は図-1で0.996, 図-2のうちの沿岸波浪のデータのみで0.988, 全体では0.998に達している。

また, $H_{1/3}$ と η_{rms} の比を計算し, [平均値 ± 標準偏差値] の形で表示すると,

$$\text{名古屋港データ: } H_{1/3} / \eta_{rms} = 3.94 \pm 0.18 \quad (5)$$

$$\text{沿岸波浪データ: } H_{1/3} / \eta_{rms} = 4.00 \pm 0.18 \quad (6)$$

$$\text{全 171 データ: } H_{1/3} / \eta_{rms} = 3.97 \pm 0.18 \quad (7)$$

となり, 平均値は式(1)の 4.0 の値に極めて近い。

さらに, 副島・高橋・佐々木⁸⁾は鹿島港および金沢港の表面波の定常観測値を解析し, $H_{1/3}$ と η_{rms} の相関が非常に高くても比例係数が約 3.8 であることを報告している。また Wilson と Baird⁹⁾ もカナダの観測結果について同様に比例係数が約 3.8 であるデータ

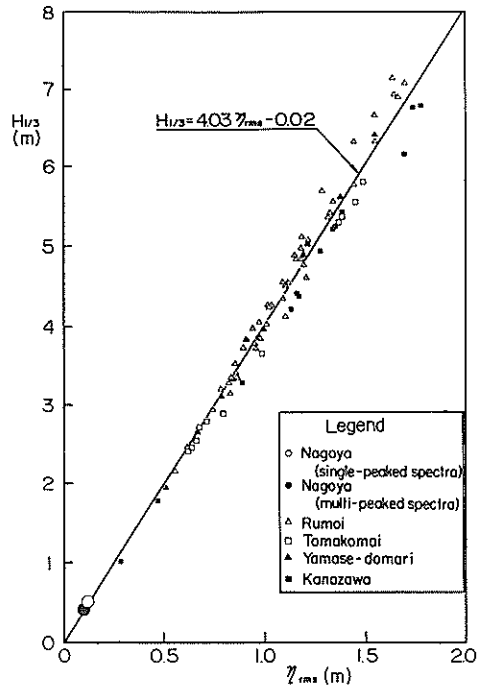


図-2 沿岸波浪のデータにおける $H_{1/3}$ と η_{rms} の関係

を示している。

このような種々の観測報告から判断して $H_{1/3}$ と η_{rms} の相関関係に疑問の余地はなく, η_{rms} を計算すればかなりの精度で $H_{1/3}$ が推定できることになる。ただし, 比例係数については 4.0 よりも小さ目の値の方が適合性が高まる可能性がある。

2.2 η_{rms} および $H_{1/3}$ の統計的安定性

図-1, 2 に示されるように η_{rms} と $H_{1/3}$ の対応は完全な 1 対 1 ではなく, 平均値の回りに若干の変動が見られ, これが η_{rms} 方式の採用をためらわせる理由の一つになっている。しかし, この変動が η_{rms} の誤差なのか, あるいは $H_{1/3}$ 自身の統計的変動によるものかを実測データのみで判断することは困難である。そこで, これを不規則波形のシミュレーションによって検討してみた。

不規則波形のシミュレーションとしては, 多数の正弦波の合成方式¹⁰⁾を用いた。すなわち,

$$\eta = \sum_{i=1}^K A_i \cos(2\pi f_i t + \phi_i) \quad (8)$$

ここに,

$$A_i = \sqrt{2S(f_i) \Delta f_i} \quad (9)$$

周波数スペクトル $S(f)$ としては、次式の標準形を用いた。

$$S(f) = \frac{1}{S_0} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} f^{-4} \right] \quad (10)$$

ここに、

$$S_0 = \int_{f_{min}}^{f_{max}} f^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} f^{-4} \right] df \quad (11)$$

したがって、周波数スペクトルの積分値は常に1である。

すなわち、

$$m_0 = \int_{f_{min}}^{f_{max}} S(f) df = 1 \quad (12)$$

また、式(10)の関数形から知られるように、スペクトルのピークの周波数は $f_p = 1$ である。

計算は、成分波の数を $K=50$ 、周波数範囲を $f_{min} = 0.5$ 、 $f_{max} = 4.0$ 、サンプリング周期を $\Delta t = 1/20$ / $f_p = 0.05$ で行った。周波数 f_i 、位相角 ϕ_i は乱数を用いて選定した。不規則波形の長さは表-1のようにデ

表-1 不規則波形のシミュレーションのデータ

ケース No	データ個数 L	継続時間 $t_0 f_p$	平均波数 N_0	試行回数
1	300	15	196	20
2	500	25	332	20
3	900	45	599	20
4	1,500	75	1003	20
5	3,000	1,500	1999	20
6	5,000	2,500	3343	20

ータ個数を300～5,000で変化させた。各ケースとも周波数の組合せ $[f_i]$ および位相角の組合せ $[\phi_i]$ を選び直した20種類の波形をシミュレートし、解析した。ただし、ケースNoが異なっても、同一の Run No のものは $[f_i]$ および $[\phi_i]$ が同一であり、したがって波形の最初の部分が共通となっている。

シミュレーションの結果によると、波形の各種統計量は次のような平均値を示す。

$$\left. \begin{aligned} \frac{H}{1/3} &= 3.83 \sqrt{m_0}, & \frac{T}{1/3} &= 0.882 / f_p \\ \frac{H}{\bar{H}} &= 2.47 \sqrt{m_0}, & \frac{T}{\bar{T}} &= 0.747 / f_p \\ \eta_{rms} &= 1.001 \sqrt{m_0} \end{aligned} \right\} (13)$$

このうちの $H/1/3$ の係数はむしろ現地観測値に近い。しかし、 $T/1/3$ の係数は現地観測値では0.95程度が普通である。これは、海の波が式(10)の形の標準スペクトルに加えて低周波部分にもある程度のエネルギーを保有して

いるためと考えられる。

問題はこうした平均値ではなく、各試行ごとに各種統計量 x_i が平均値からどの程度ばらつくかである。このため、各20回の結果から標準偏差値を次式で計算した。

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

ここに、 x_i は各試行ごとの値、 \bar{x} は平均値である。そして、平均値に対する比、すなわち、相対偏差量を波形の長さに対して図示したのが図-3、4である。図-3は波高、図-4は周期に対する量を示すもので、前者には平均水位の計算値の変動量も記載してある。

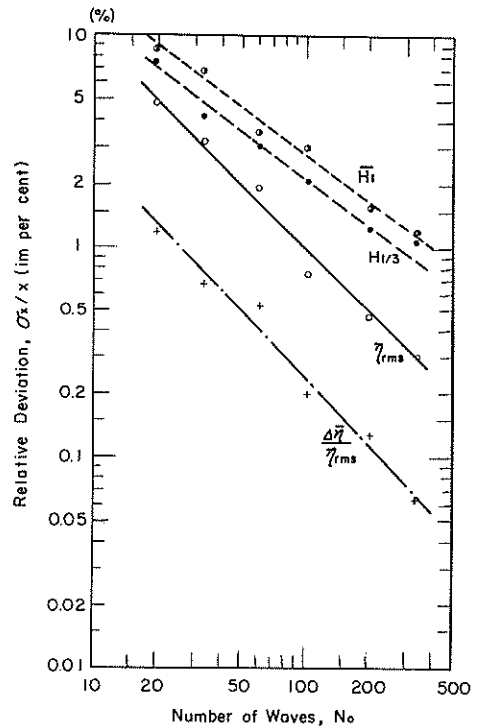
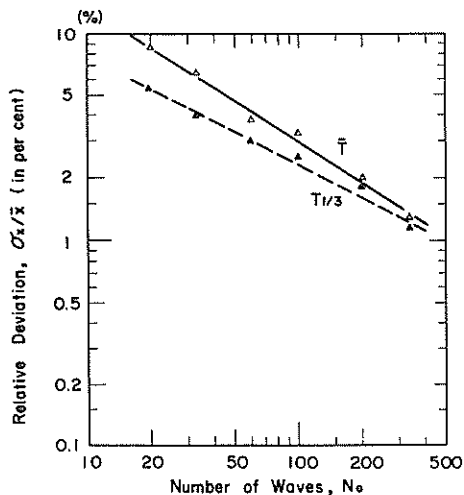


図-3 波高の統計値の相対偏差と波数の関係

図-3、4の結果では、試行回数が不足であったため各データが奇麗に揃ってはいないけれども、波数の増大につれて相対偏差量が両対数紙上でほぼ直線的に減少している。記録が長いほど統計量が安定するのは当然であり、シミュレーションの結果もこれを裏付けている。しかしながら、図-3で注目すべきことは η_{rms} が統計的に最も安定していることで、波浪観測で標準とされる100波程度の記録では η_{rms} の標準偏差が約1.0%であ



図一四 周期の統計値の相対偏差と波数の関係

のに対し、 $H 1/3$ は約 2.1% の標準偏差を示している。したがって、現地観測において $H 1/3$ と η_{rms} の相関関係に若干の分散が見られるのは、 η_{rms} よりも $H 1/3$ の統計的変動性に起因すると推定せざるを得ない。また、図一三の関係によれば、 η_{rms} に対しても2%程度の標準偏差を許容するのであれば、測定時間を50波相当にまで縮めてよいことになる。

また、平均波の諸元が有義波の諸元よりも統計的に変動が大きいかとも注目すべき点である。これは、平均波の場合にはゼロ線を僅かに越えてまた下る微小な波も計算に含むため、変動が大きくなるものと思われる。

さらに、図一三、四の結果は、観測で得られる有義波の諸元も確定的なものではなく、標準偏差にして $\pm 2 \sim 3$ %程度の変動を含むことを示唆している。若し、95%信頼限界を用いれば、偏差の範囲は ± 5 %にまで広がる。たとえば、隣接した2点で同時に波を観測した場合、2点の観測値の差が10%程度まではそれが現象の本質的な差か、あるいは統計的変動性による見掛けのものかを究明することが困難である。実際の海の波では、ここで用いた線型シミュレーションの波形よりも一層複雑であり、また現象そのものが時間的・空間的に変動しているため、観測値の変動性はさらに大きいと推測される。

いずれにしても、図一三の結果は $H 1/3$ よりも η_{rms} の方が統計量として安定していることを示しており、平均時間が同じであれば η_{rms} から換算した波高の方がより信頼できるといえよう。

2.3 $\overline{|\eta|}$ による表示法との比較

ここで、波形の絶対値の平均値 $\overline{|\eta|}$ から $H 1/3$ を推定する方式について考えてみる。 η_{rms} と $H 1/3$ との相関

は既に確認されているので、ここでは $\overline{|\eta|}$ と η_{rms} との関係を調べればよい。

一般に不規則な海の波では、波形すなわち平均水面からの水位変動のサンプリング値が正規分布すると仮定される。厳密には波の非線型性のために水位変動の分布は若干の正のひずみを持ち、また正規分布よりもピークの尖りの度合いが強い。したがって、より精密な解析ではグラム・シャリエー分布が用いられる。^{11), 12)}しかし、ここでは第1近似として次の正規分布について検討する。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} \quad (15)$$

ここに、 $p(x)$: 確率密度関数

$$x = \eta / \eta_{rms}$$

波形の絶対値の平均値は次のようにして計算できる。

$$\begin{aligned} \overline{|\eta|} &= \frac{\overline{|\eta|}}{\eta_{rms}} = 2 \int_0^{\infty} x p(x) dx \\ &= 2 \int_0^{\infty} \frac{x}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2} dx = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \end{aligned}$$

$$\therefore \overline{|\eta|} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \eta_{rms} = 0.7979 \eta_{rms} \quad (16)$$

したがって、式(1)の関係は次のように $H 1/3$ と $\overline{|\eta|}$ の関係に書き改めることができる。

$$H 1/3 = 50.18 \overline{|\eta|} \quad (17)$$

この意味で、 $H 1/3$ を推定する上での η_{rms} と $\overline{|\eta|}$ の優劣の差は原理的には存在しない。

なお、実際の計測においては潮汐による平均水位の変化その他によって式(4)の $\overline{\eta} \equiv 0$ の前提が必ずしも満足されない。 η_{rms} および $\overline{|\eta|}$ に対するこの影響は次のとおりである。

今、平均水位の設定値の誤差を $\Delta \overline{\eta}$ とおき、 η_{rms} に対する比を ε で表わす。すなわち、

$$\varepsilon = \Delta \overline{\eta} / \eta_{rms} \quad (18)$$

また、水位の入力値を η^* 、平均水位を正しく補正した水位を η で表わす。

まず、 η_{rms} に及ぼす ε の影響を計算すると、

$$(\eta_{rms}^*)^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \varepsilon)^2 p(x) dx$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x) dx - 2\varepsilon \int_{-\infty}^{\infty} x p(x) dx \\
&\quad + \varepsilon^2 \int_{-\infty}^{\infty} p(x) dx \\
&= 1 + \varepsilon^2 \tag{19}
\end{aligned}$$

となる。上記の演算においては、 $p(x) = p(-x)$ の関係によって積分の第2項が0となる。式(19)により、

$$\begin{aligned}
\eta_{rms}^* &= \eta_{rms} \sqrt{1 + \left(\frac{\Delta \bar{\eta}}{\eta_{rms}}\right)^2} \\
&= \eta_{rms} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \bar{\eta}}{\eta_{rms}}\right)^2 \right] \tag{20}
\end{aligned}$$

式(20)で明らかのように、平均水位で $\Delta \bar{\eta}$ だけ誤設定すると、 η_{rms} の値が見掛け上大きく現われる。ただし、 $\Delta \bar{\eta} \ll \eta_{rms}$ であればその影響は小さく、 $\Delta \bar{\eta} = 0.3 \times \eta_{rms}$ では4%増、 $\Delta \bar{\eta} = 0.5 \eta_{rms}$ で約12%増の程度である。

次に、 $|\bar{\eta}|$ に対する影響は次のように計算される。

$$\begin{aligned}
|\bar{\eta}^*| &= \int_{-\infty}^{\infty} |x - \varepsilon| p(x) dx \\
&= \int_{-\infty}^{\varepsilon} (\varepsilon - x) p(x) dx + \int_{\varepsilon}^{\infty} (x - \varepsilon) p(x) dx \\
&= \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} x p(x) dx + 2 \int_{\varepsilon}^{\infty} x p(x) dx \\
&\quad + \varepsilon \int_{-\varepsilon}^{\infty} p(x) dx - \varepsilon \int_{\varepsilon}^{\infty} p(x) dx \\
&= 2 \int_{\varepsilon}^{\infty} x p(x) dx + 2 \varepsilon \int_0^{\varepsilon} p(x) dx \\
&= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(1 + \frac{1}{2} \varepsilon^2\right) \tag{21}
\end{aligned}$$

$$\therefore |\bar{\eta}^*| = |\bar{\eta}| \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta \bar{\eta}}{\eta_{rms}}\right)^2 \right] \tag{22}$$

したがって、 $\Delta \bar{\eta}$ の影響は $\Delta \bar{\eta} \ll \eta_{rms}$ である限り η_{rms} 方式の場合とほぼ同じである。しかし、 $\Delta \bar{\eta} \gtrsim \eta_{rms}$ であれば η_{rms} 方式の場合よりも誤差が大きくな

る。また、計測手法として η_{rms} 方式の場合には η_{rms} と同時に平均水位を計算し、計測後に補正を行うことが可能である。

すなわち、

$$\begin{aligned}
\sum_{i=1}^N \eta^2 &= \sum_{i=1}^N (\eta^* - \Delta \bar{\eta})^2 \\
&= \sum_{i=1}^N (\eta^*)^2 - N (\Delta \bar{\eta})^2 \\
\therefore \overline{\eta^2} &= \overline{(\eta^*)^2} - (\Delta \bar{\eta})^2 \tag{23}
\end{aligned}$$

式(23)の補正は η の分布関数に無関係であり、正規分布からずれている場合でも正しい値を与える。これに対して $|\bar{\eta}|$ 方式では、一般に計測後の平均水位の補正がむずかしいといえる。

要するに、 η_{rms} 方式と $|\bar{\eta}|$ 方式は原理的に同等である。計算回路の簡単さからは $|\bar{\eta}|$ 方式が有利であるが、 $H 1/3$ との相関関係の実証の上では η_{rms} の方が実績がある。

また、計算回路がやや複雑になるけれども、 η_{rms} 方式では平均水位の補正が可能である。著者らは $H 1/3$ との相関データの豊富な点に重きを置き、 η_{rms} 方式によって指示計を試作することとした。

2.4 規則波の計測用としての可能性

こうした η_{rms} による波高の計測は、不規則波に対してだけでなく規則波に対しても可能である。たとえば、規則波の波形が若干の2倍周波数成分を含む非線型なものとして、次式で表示されると仮定する。

$$\eta = a_1 \cos \sigma t + a_2 \cos 2\sigma t \tag{24}$$

$$\text{ただし、} 0 < a_2 < a_1 / 4 \tag{25}$$

なお、 σ は波の周期を T として $\sigma = 2\pi / T$ である。

この波形における波高は、2次波峯が発生しないための式(24)を条件として、

$$H = 2 a_1 \tag{26}$$

である。

一方、 η_{rms} は次のように計算される。

$$\begin{aligned}
\overline{\eta^2} &= \lim_{t_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{t_0} \int_0^{t_0} \eta^2 dt \\
&= \frac{1}{2} a_1^2 \left[1 + \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 \right]
\end{aligned}$$

$$\therefore \eta_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} a_1 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{a_2}{a_1}\right)^2 \right] \tag{27}$$

したがって、波高と η_{rms} の関係は、

$$\frac{H}{\eta_{rms}} \approx 2\sqrt{2} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{a_2}{a_1} \right)^2 \right] \quad (28)$$

であり、式(28)の条件が満足されていれば式(28)の括弧内の第2項は3%以下と無視可能な量である。したがって、規則波実験の場合には不規則波に対する式(1)の係数4.0の代わりに $2\sqrt{2} \approx 2.83$ を用いれば良いことになる。

また、規則波を用いていてもしゃへい実験などでは港内の多重反射その他のために記録波形がビート状になり、読取解析が困難になることが少なくない。この状態の波形はたとえば次式で表示できる。

$$\eta = a \cos \sigma t + b \cos (\sigma + \Delta \sigma) t$$

$$\approx \left[a + b \left(2 \cos \frac{\Delta \sigma}{2} t - 1 \right) \right] \cos \sigma t \quad (29)$$

ただし、 $\Delta \sigma \approx 0$ 、 $a \geq b$ とする。

このときの波高は、

$$H = 2 \left| a + b \left(2 \cos \frac{\Delta \sigma}{2} t - 1 \right) \right| \quad (30)$$

となり、時間的にゆるやかに変動する。

こうしたビート状の波高変化に対して波高をどのように定義するかについては定説がない。実験手法としては、連続する数十波の波高をすべて読みとってその平均を求めたり、あるいはビート状の山と谷を数個求めて平均値を計算したりしている。今、波のエネルギーの観点から自乗平均平方根値で波高の代表値を定義することによれば、式(30)により

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2} = 2\sqrt{a^2 - 2ab + 3b^2} \quad (31)$$

である。この値は二つの波のエネルギー和よりも最大で25%程度小さいけれども、単純平均値 $(a) > b$ では $\bar{H} = 2a$ よりはエネルギー和に近い。

一方、 η_{rms} は次のように計算される。

$$\overline{\eta^2} = \lim_{t_0 \rightarrow 0} \int_0^{t_0} \left[a + b \left(2 \cos \frac{\Delta \sigma}{2} t - 1 \right) \right]^2$$

$$\times \cos^2 \sigma t dt$$

$$= \frac{1}{2} (a^2 - 2ab + 3b^2)$$

$$\therefore \eta_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{a^2 - 2ab + 3b^2} \quad (32)$$

したがって、

$$H_{rms} / \eta_{rms} = 2\sqrt{2} \quad (33)$$

となり、波高一定の場合と同一の関係が導かれる。

結局、規則波の場合は波高がビート状に変動する場合も含め、 $H = 2\sqrt{2} \eta_{rms}$ の関係が成立する。したがって、不規則波の係数4.0の代わりに $2\sqrt{2} \approx 2.83$ を用いれば、 η_{rms} 方式によって規則波の波高を求めることが可能であり、これは η_{rms} 方式の極めて有意義な応用法である。

3. 有義波高指示計の構成および 使用法

以上の理論的考察に基づき、 η_{rms} 方式による有義波高の自動表示計を試作した。計器の基本構成をフローチャートで示すと図-5のようになる。まず、波高計からのアナログ出力 η は増幅回路を通して10倍に増幅する。

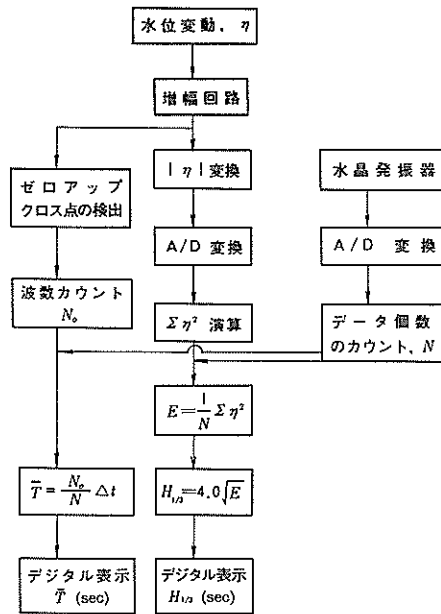


図-5 有義波高指示計の構成

次にA/D変換を容易にするため絶対値に変換し、それをデジタル量に変換する。変換は10 bit binaryである。この際、サンプリングはある一定時間ごとに行ない、データは離散量として取り扱われる。演算時間を t_0 、その間のサンプリング個数を N とすると、 η_{rms} は次式によって計算される。

$$\eta_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i^2} \quad (34)$$

この結果を4.0倍すれば $H 1/3$ が求められる。データ

個数 N は水晶発振器のパルスを連続して計数しておき、これをサンプリング周期内のパルス数(一定値)で割って求められる。

指示計としては波高ばかりでなく周期のデータも表示することが望ましい。図-4のシミュレーション結果によれば、 \bar{T} よりも $T_{1/3}$ の方が統計的に安定しているけれども、 $T_{1/3}$ の演算を行うためには多数のメモリーを必要とする。また、 $T_{1/3}$ と \bar{T} の変動の差は $N=50\sim 100$ 波において $0.3\sim 0.4$ 倍程度でそれほど大きなもの

ではない。したがって、試作にあたっては \bar{T} を表示させることにした。具体的にはアナログ波形についてゼロアップクロス点を検出してこれをカウントする。一方、サンプリング個数 N にサンプリング間隔 Δt を掛けて演算時間 $t_0=N\Delta t$ を計算し、これをゼロアップクロス点の総個数 N_0 で割れば平均周期が $\bar{T}=t_0/N_0$ として求められる。

以上の方式によって試作した有義波高指示計の外観を写真-1に示す。 $H_{1/3}$ および \bar{T} はそれぞれcmとsec

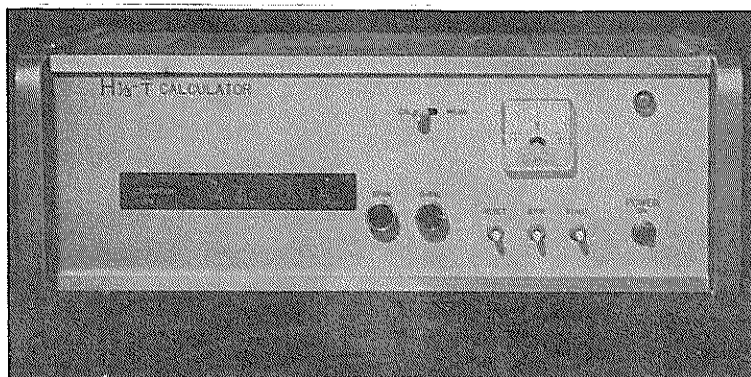


写真-1 有義波高指示計の外観

単位の3桁で表示される。なお、詳細設計は協和商工株式会社が行なったものである。

演算時間は $t_0=40$ secを基本とし、1回から15回までの累加平均値を表示するようにしている。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \text{第1回表示: } H_{1/3} &= 4.0 \sqrt{E_1} \\ \bar{T} &= \frac{N_1 \Delta t}{(N_0)_1} \end{aligned} \right\} \text{⑧}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{第2回表示: } H_{1/3} &= 4.0 \sqrt{\frac{1}{2}(E_1 + E_2)} \\ \bar{T} &= \frac{(N_1 + N_2) \Delta t}{(N_0)_1 + (N_0)_2} \end{aligned} \right\} \text{⑨}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{第n回表示: } H_{1/3} &= 4.0 \sqrt{\frac{1}{n}(E_1 + E_2 + \dots + E_n)} \\ \bar{T} &= \frac{(N_1 + N_2 + \dots + N_n) \Delta t}{(N_0)_1 + (N_0)_2 + \dots + (N_0)_n} \end{aligned} \right\} \text{⑩}$$

ただし、 $E = \sum \eta^2 / N$ である。

表示回数は最大15回であり、それ以降は最後の平均値をそのままホールドする。なお、サンプリング周期は $\Delta t = 40$ msecである。

試作に際しては、実験用であるため平均水位が確実に設定できるものと考え、回路設計を簡単にするため平均水位補正回路を設けなかった。ただし、後述のように実験では波高計を移動する場合があります、架台の高さの変動のために平均水位が相対的に変化することがあるので、実験用であっても初期平均水位の自動設定および補正回路を設ける方がよい。

この指示計の使用法は次のとおりである。

1. 波高計をセットし、出力を0に調整する。
2. 電源スイッチをONとする。
3. メーターが0を指示するように指示計のO-BALつまみを調整する。(平均水位の初期調整)
4. 波高計を測定波高の想定値(たとえば15.0cm)にまで上または下に移動する。
5. CAL-MEASスイッチをCALとし、STARTスイッチを押すと約2.5秒後に $H_{1/3} \approx 15$ cmを表示するので、SPANつまみを操作して15.0を示すように調整する。(検定操作)
6. 表示は2.5秒ごとに繰り返り、15回表示すると最後の値をホールドするので、それまでに調整が完了しない場合はSTARTスイッチを押して、5.の操作を繰り返す。以上により検定調整は終了する。
7. 不規則波の測定にあたっては、CAL-MEASス

スイッチをMEAS に倒し、START スイッチを押す。これによって約40秒後に1回目の $H_{1/3}$ と \bar{T} が表示される。

8. 表示を継続すれば40秒ごとに新しい累加平均値が現われる。
 9. 測定を終了する場合にはSTOP スイッチを押す。そうすると、そのときの演算サイクルの終了時まで演算を継続し、その後結果を表示してそのままホールドする。
 10. 次の測定を行うときはSTART スイッチを押す。これによって自動的にRESET 動作が行われる。
 11. 表示を0に戻すなど最初からやり直すときは、RESET スイッチを押せばよい。
- なお、以上の操作でCAL-MEASスイッチを必要と

するのは、波高の検定時には水位出力が一定であって、 $\eta_{rms} = H$ となるため、測定時に比べて係数を1/4に落さなければならないためである。

4. 使用実績について

有義波高指示計は約1年間不規則波実験に使用してきた。実験は $H_{1/3} = 8 \sim 18 \text{ cm}$ 、 $\bar{T} = 1.3 \sim 2.2 \text{ sec}$ の越波実験、および $H_{1/3} = 1 \sim 6 \text{ cm}$ 、 $\bar{T} = 0.9 \sim 1.5 \text{ sec}$ のしゃへい実験である。スペクトルはいずれも単一ピークの標準形である。

実験の際は、現場において指示計の $H_{1/3}$ と \bar{T} の表示を記録するとともに、波形のアナログ記録をデジタル変換し、電算機処理によって各種の統計解析を行った。解析結果を指示計の表示と比較した例が表-2,3である。

表-2 越波実験データによる表示値の比較例

No.	計 算 値		$H_{1/3}$ (cm)		T (sec)	
	$\Delta \eta$ (cm)	η_{rms} (cm)	電算機	指示計	電算機	指示計
I - 1	0.03	4.23	16.1	17.0	1.52	1.50
I - 2	0.01	4.05	16.0	16.1	1.47	1.49
I - 3	0.09	4.09	16.2	16.2	1.53	1.49
I - 4	0.23	3.90	14.8	15.7	1.78	1.69
I - 5	0.35	3.65	13.9	15.3	1.66	1.62
I - 6	0.45	3.87	14.7	15.3	1.60	1.56
I - 7	0.30	4.68	17.6	18.8	2.05	1.99
I - 8	0.43	4.61	17.4	18.4	2.15	2.13
I - 9	0.46	4.73	17.4	18.9	2.00	1.94
II - 1	0.12	2.32	8.6	9.9	1.32	1.36
II - 2	0.22	2.53	9.8	9.6	1.39	1.42
II - 3	0.22	2.51	9.6	9.4	1.35	1.41
II - 4	0.22	2.57	9.3	10.4	1.69	1.72
II - 5	0.30	2.53	9.3	9.8	1.59	1.56
II - 6	0.35	2.59	10.2	10.5	1.66	1.63
II - 7	0.31	2.41	8.9	9.8	1.92	2.09
II - 8	0.34	2.17	8.0	8.7	1.88	1.89
II - 9	0.40	2.38	8.7	9.5	1.92	1.90

まず、越波実験について演算の精度を見るために指示計の η_{rms} 値を $(\eta_{rms})_i = (H_{1/3})_i / 4$ として求め、電算機処理で求められた $(\eta_{rms})_c$ との比を調べた結果が式(8)である。ただし、データは表-2以外のものも含めた81例である。また、対象とした記録部分は完全に同一なものではなく、ある程度前後にずれている。

$$\frac{(\eta_{rms})_i}{(\eta_{rms})_c} = 1.016 \pm 0.051 \quad (8)$$

上式の右辺の数値は平均値±標準偏差値である。この比較にあたっては $\Delta \eta$ が η_{rms} に比べて小さいので、式(8)による補正を行わなかった。式(8)の結果は、 η_{rms} の演算が正確であることを示しており、平均値の若干のずれは $\Delta \eta$ の影響によるものとして説明できる。

次に、指示計の有義波高 $(H_{1/3})_i$ と電子計算機による値 $(H_{1/3})_c$ を比較すると、

表-3 シャへい実験データによる表示値の比較例

No	計 算 値		H 1/3 (cm)			\bar{T} (sec)	
	$\Delta \eta$ (cm)	η_{rms} (cm)	電 算 機	指 示 計	補 正 値	電 算 機	指 示 計
I - 1	0.006	0.251	0.90	0.96	0.96	1.02	1.07
I - 2	0.035	0.200	0.73	0.76	0.75	0.87	0.91
I - 3	0.140	0.339	1.31	1.44	1.33	0.91	1.01
I - 4	0.176	0.305	1.16	1.38	1.20	0.99	1.10
I - 5	0.211	0.240	0.92	1.24	0.93	1.02	1.34
II - 1	0.060	0.369	1.34	1.52	1.50	1.55	1.54
II - 2	0.035	0.288	1.02	1.16	1.15	1.37	1.39
II - 3	0.134	0.339	1.28	1.52	1.41	1.28	1.26
II - 4	0.136	0.368	1.39	1.60	1.50	1.20	1.27
II - 5	0.136	0.351	1.33	1.58	1.47	1.28	1.34
II - 6	0.144	0.409	1.58	1.74	1.64	1.26	1.40
II - 7	0.163	0.381	1.52	1.70	1.56	1.32	1.35
II - 8	0.147	0.285	1.07	1.32	1.17	1.29	1.34
II - 9	0.182	0.315	1.20	1.52	1.32	1.52	1.77

$$\frac{(H1/3)_i}{(H1/3)_c} = 1.059 \pm 0.070 \quad (39)$$

である。すなわち、指示計の方が約6%大きい。ただし、これは基本とした式(1)の係数値4.00に問題があるのであり、電算機処理の $(H1/3)_c$ と $(\eta_{rms})_c$ の比を求めてみると、

$$\frac{(H1/3)_c}{(\eta_{rms})_c} = 3.84 \pm 0.128 \quad (40)$$

である。すなわち、係数としては4.0よりも3.8の方が妥当であり、この数値を用いれば式(39)の差異も解消される。

また平均周期については、

$$\frac{\bar{T}_i}{\bar{T}_c} = 0.998 \pm 0.040 \quad (41)$$

であり、ほぼ十分な精度である。

一方、表-3のシャへい実験のデータは指示計の波高値 $(H1/3)_i$ がかなり大きい。これは η_{rms} 値が小さいために平均水位の相対的変化の影響を受けたものと考えられる。そのため、式(39)を用いて補正計算を行い、結果を表-3に記入した。この補正値を $(H1/3)_m$ で表わせば、電子計算機による値 $(H1/3)_c$ との比が次のようになる。

$$\frac{(H1/3)_m}{(H1/3)_c} = 1.069 \pm 0.039 \quad (42)$$

表-3で明らかなように測定波高は非常に小さく、実験の際は検定時のSPAN調整によって出力を増幅して

表示させたものであり、平均水位のずれがある状態での程度の一致が得られればむしろ良好といえよう。

また、表-3でも明らかなように、平均水位の変化量が η_{rms} 値と同じオーダーの量となると \bar{T} の指示が大き目となり、誤差が無視できなくなる。したがって、実験にあたっては $\Delta \eta / \eta_{rms}$ の比をできるだけ小さく抑えるように注意する必要がある。

5. あとがき

以上に述べたように、 η_{rms} 方式による有義波高指示計は実用上十分な精度を有している。また、統計的には通常の1波ごとの読み取りで求めた $H1/3$ よりも信頼度が高いと考えられる。今回試作したものは実験用であったが、これはほとんどそのまま現地用として変換可能であり、原理的には全く同一である。この試作を契機にして、現地用の有義波高指示計が普及し、波浪観測におけるデータ整理の簡易化に役立つことを願ってやまない。

なお、今後の製作にあたって改良あるいは検討すべきと思われる点は次のとおりである。

1. η_{rms} から $H1/3$ への換算係数を3.8とする。
2. 平均水位補正回路を設ける。また、初期平均水位の自動設定回路も必要と思われる。後者については、図-3の結果を参照すれば、10波程度の平均時間でよさそうである。
3. 演算時間は現地用については波数50波を標準とし、外海用では $t_0 = 10 \text{ min}$ 、内湾用では $t_0 = 5 \text{ min}$ 程度が適当と思われる。実験用の場合は、実験波の周期が $T1/3 = 0.7 \sim 3 \text{ sec}$ 程度であるところから、 $t_0 = 40 \text{ sec}$ とする累加平均方式がよいと思われる。

4. 実験用の場合は、規則波に対しても使用できるように $H_{rms} = 2.83 \eta_{rms}$ の切替回路を設けておく。
5. 現地用の場合は、累加平均方式よりも各演算時間ごとの値を順次続けて表示の方が実際的である。なお、表示はデジタル量だけでなくアナログ出力も設け、24時間連続して記録が得られるようにしておくことが望ましい。

(1976年3月31日受付)

参考文献

- 1) Snodgrass, F. E. and R. R. Putz : A wave height and frequency meter, Proc. 6th Conf. on Coastal Engg., Florida, 1958.
- 2) Blair, P. M. : Buoy for recording ocean wave height and period, Proc. International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis, New Orleans, 1974, A. S. C. E, pp. 254-255.
- 3) 降旗常雄・北原栄子・小泉宗三郎：平均波高計による波浪観測(1), 昭和49年度日本海洋学会秋季大会講演要旨集, 1974年10月, pp. 20-21.
- 4) 高橋智晴・鈴木禧実・中井徹也：波高計による観測データの処理方法, 港湾技研資料No.39, 1967年12月 pp. 3-233.
- 5) Longuet-Higgins, M. S. : On the statistical distributions of the heights of sea waves, Jour. Marine Res., Vol. K, No. 3, 1952, pp. 245-266.
- 6) たとえば, 合田良実・永井康平：波浪の統計的性質に関する調査・解析, 港湾技術研究所報告 第13号第1号, 1974年3月, pp. 3-37.
- 7) 合田良実・永井康平・伊藤正彦：名古屋港における波浪観測 第3報 — 現地波浪の回折現象ならびに統計的性質について —, 港湾技研資料No.120, 1971年6月, 24 p.
- 8) 副島毅・佐々木弘・高橋智晴：波浪データの取得・処理法について, 昭和50年度港湾技術研究所講演会講演集, 1975年12月, pp. 1-52.
- 9) Wilson, J. R. and W. B. Baird : A discussion of some measured wave data, Proc. 13th Conf. on Coastal Engg., Vancouver, 1972, pp. 113-130.
- 10) Goda, Y. : Numerical experiments on wave statistics with spectral simulation, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 9, No. 3, 1970, pp. 3-57.
- 11) 合田良実・永井康平：名古屋港内における波浪観測 第2報 — 港内発生表面風波の観測解析結果 —, 港湾技研資料No.61, 1968年12月, 64 p.
- 12) Honda, T. and H. Mitsuyasu : The statistical distributions for the elevation, velocity and acceleration of the surface of wind waves, Jour. Oceanographical Soc. Japan, Vol. 31, No. 2, 1975, pp. 93-104.

港灣技研資料 No.238

1976・5

編 集 兼 運 輸 省 港 灣 技 術 研 究 所
發 行 人

發 行 所 運 輸 省 港 灣 技 術 研 究 所
橫 須 賀 市 長 瀬 3 丁 目 1 番 1 号

印 刷 所 株 式 會 社 美 巧 社

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.