

# 超音波波高計（空中型）について

岩田 憲幸・稲田 亘

国立防災科学技術センター

## On the Ultrasonic Surface Wave Transducer in Air Type

By N. Iwata and W. Inada

National Research Center for Disaster Prevention, Tokyo

### Abstract

In order to measure the surface wave elevation at the marine observation tower, we have developed an ultrasonic surface wave transducer. Pulses of sound generated by discharge of sparks are transmitted with good directionality by a parabolic reflector, and the reflected waves at the sea surface can be received by a microphone of wide-band capacity.

By using the parabolic reflector and the spark-pulse, we are able to increase the measuring range and accuracy.

### 1. はしがき

波の高さおよび波形を測定する波高計は種々あるが、測定精度、応答性、測定範囲等の点で充分とは云えなかった。この超音波式波高計はパルス音波を発生し、その音に放物面反射鏡により指向性を与え、水面からの反射波を広帯域容量形マイクロホンで受信するため、水面に影響を与えず、反射鏡による利得と指向特性により測定範囲と精度を増大し、広い周波数特性のため受信波の立上りが急峻で測定精度が良好で、パルス受信信号の保持方式により応答性が優れている。欠点としては波傾斜による誤差があるが送信音波の指向特性によって誤差の軽減を計っている。

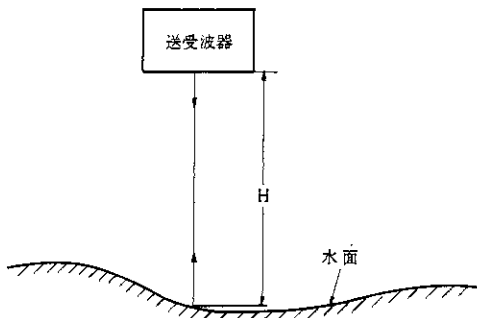
### 2. 測定原理

水面上の空气中に送受波器を設置し、送波器からパルス音波を放射し、水面から反射した音波を受波器で受波し、送受波の時間間隔を測定する。空気中の音速が既知であればこの時間間隔と波高とを対応し、電圧として表示することが出来る。

以下項目別に説明する。

### 2-1 パルス繰返し周波数

送受波器から水面迄の音波往復時間よりもパルス繰返し周期を短くすることは出来ないのが必然的に制限がある。またその周期を長くすれば応答特性が悪くなる。



第2・1・1図

$H$  : 水面からの送受波器の高さ

$C$  : 音速

$T$  : 音波往復時間

$F$  : 理論的最大パルス繰返し周波数

とすれば

$$T = \frac{2H}{C} \quad (2.1.1)$$

$$F = \frac{1}{T} = \frac{C}{2H} \quad (2.1.2)$$

従って  $H=1\text{m}$  の場合  $C=340\text{m/s}$  として

$$F = \frac{C}{2H} = \frac{340}{2 \times 1} = 170\%$$

$H=10\text{m}$  の場合

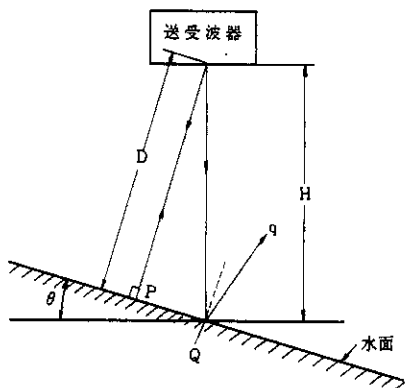
$$F = 17\%$$

音速の変化や、回路処理時間等から余裕を見込んでパルス繰返し周波数は若干小さくしなければならない。

### 2-2 応答特性

送波器から発射された音波が水面に達し、反射した瞬間が正確な波高を示すので、水面からの反射波が受波器に達する時間が必然的な遅れ時間になる。反射波が受波器に達した時に波高に相当した電圧回路で記憶し、次の反射波が来た時に新しく電圧を記憶し直すため、出力波形はパルス繰返し周波数に従って階段状に変化する。これはサンプリング測定方式としては最大の応答特性を持つ。従って波高1mの場合は理論的最大応答が毎秒170階段で、波高10mの場合は毎秒17階段となる。

### 2-3 波傾斜の精度に及ぼす影響



第2・3・1図

傾いた水面を測定する場合に送受波器の音波指向特性がないものとする。音波の往復時間は、送受波器に対して水面が光学的反射面となるような径路(第2.3.1図)を通つた時間として測定され、希望する波高  $H$  よりも小さく表示される。その誤差の比率  $\delta$  は次式により表わされる。

$$\delta(\%) = 100 \frac{H-D}{H} = 100(1 - \cos \theta)$$

ただし  $\theta$  は水面が水平となす角度である。

もし  $10^\circ$  の波傾斜があれば1.5%の指示誤差を生ずることになる。

送受波器に音波指向特性があった場合は傾斜水面に垂直に当たる  $P$  点の音波強度は指向特性により減少し更に受波器の受信能率も減少する。一方送受波器の指向方向である  $Q$  点では音波は  $\theta$  の方向に反射し、 $Q$  点のさびなみによる乱反射した音波を受波するため、受信強度は同様小さくなるが、受信機の感度調整によつて測定誤差を減少させることが出来る。

### 2-4 音波波形の測定精度に及ぼす影響

送受音波波形の立上りは直接精度に影響する。送波器にはスパークを使用しているため非常に広い周波数帯域を持ち、急峻な立上りを持つ音波パルスが放射される。この音波パルスを広帯域の容量型受波器で受信するため、音波パルスの立上りを忠実に変換し、音波の往復時間は他の方式に比して精度よく測定出来る。ただし空気中の音波の減衰は周波数の二乗に比例するため、測定距離が増大する程必然的に音波パルスの立上りは悪くなる。

### 2-5 測定距離

測定距離は受波器の受信信号レベルと雑音レベルとが判別可能限界で決まる。送波器から放射された音波は球面波で、送波器からの距離による音波の強さおよび音圧を次に示す。

$x$ : 音源からの距離

$I_x$ :  $x$  点における音の強さ

$I_1$ :  $x_1$  点における音の強さ

$\alpha$ : 吸収係数

とすると

$$I_x = \left(\frac{x_1}{x}\right)^2 I_1 e^{-2\alpha(x-x_1)} \quad (2.5.1)$$

$P_x$ :  $x$  点における音圧

$P_1$ :  $x_1$  点における音圧

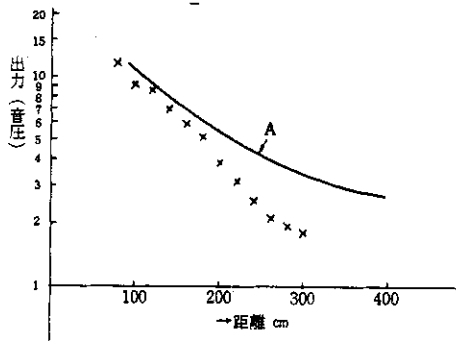
とすると

$$P_x = \frac{x_1}{x} P_1 e^{-\alpha(x-x_1)} \quad (2.5.2)$$

吸収係数は周波数によって変るため、周波数成分の分布によって異ってくる。

実際の送受波器で測定した音波の減衰状態を第2.5.1図に示す。

こゝで



第 2・5・1 図

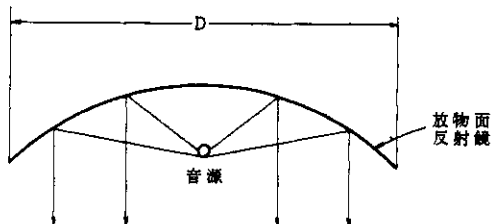
送波器：スパーク音源

受波器：容量型受波器（100K～500KC）

受信増巾器帯域巾：20KC～1MC

容量型受波器は音圧を電圧変換するため出力電圧は音圧に比例する。（2.5.2）式により吸収係数が0の場合を曲線Aで示し、測定した点を×印で示す。超音波領域においては吸収係数の大きいことが知られる。波高測定状態での外部雑音の影響を小さくするためには、高い周波数程吸収が大きいことから、高周波領域の使用が望ましいが、音波パルスの高い周波数も同様に減衰するため、測定距離に応じて使用周波数範囲を選ぶ必要がある。実際に距離1mの場合には20KC～500KC、10mの場合には2KC～500KCの周波数範囲を選んだ。

測定距離を増すもう一つの方法は送信音波の強さを増すことである。スパークの間隔を広げると放電エネルギーが増大して音波も強くなるが、スパークの形状変化が音源位置の変化となって測定精度に悪影響をおよぼすため限界がある。音波を一方に揃えて放射するために放物面反射鏡を使用することは極めて効果的である。その場合の指向性音波のビーム巾は（2.5.3）式で与えられる。



第 2・5・2 図

$\beta$ ：ビーム巾の強さ

$D$ ：放物面の開口直径

$K$ ：音場分布状態による係数

$\lambda$ ：音の波長

$$\beta = K \frac{58\lambda}{D} \text{ 度} \quad (2.5.3)$$

従って周波数によってビーム巾が変ることが知られる。

放物面反射鏡を使用することにより音波の強さは（2.5.4）式によって増大する。この場合のGは放物面反射鏡を使用しない場合に対する比率を示す。

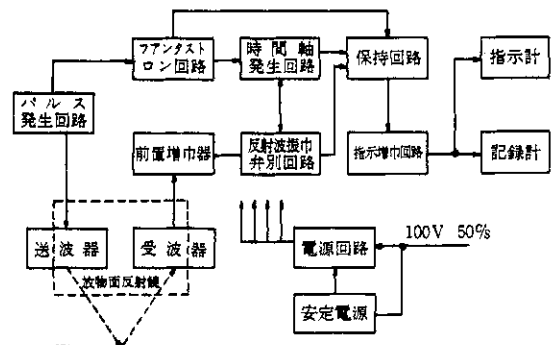
$$G = \frac{6D^2}{\lambda^2} \quad (2.5.4)$$

音圧は音の強さの $\frac{1}{2}$ 乗であるから $\sqrt{G}$ の割合で測定距離が増大する。

### 3. 超音波式波高計の性能

測定範囲	0～10m
分解能	0.1%以下
ドリフト	0.1%以下
繰返しパルス周波数	12.5%
応答性	毎秒12.5ステップ
測定指示方式	波高メーター直読 記録計接続可能
電源	100V 50%, 60% 約 140VA

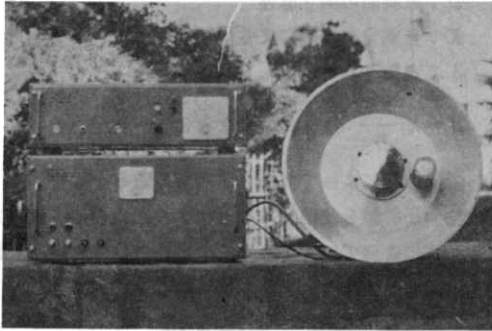
### 4. 構成および回路説明



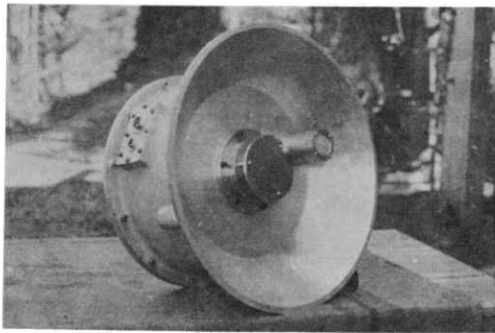
第 4・1 図

この装置のブロックダイアグラムを第4.1図に示す。装置の外観の写真を第4.2図、第4.3図に示す。

パルス発生回路において毎秒12.5の割合で高圧パルス

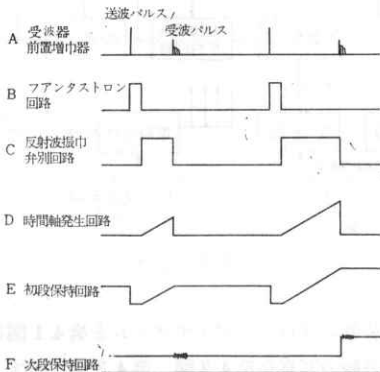


第4・2図 計測器外観



第4・3図 送受波器

を発生し、送波器のスパークギャップで放電させて熱的にパルス音波に変換する。この音波は放物面反射鏡で指向性を与えられて水面に達し、反射した音波は容量型受波器で電圧に変換される。第4.4図に各部の回路波形を



第4・4図

示し、受波器から前置増巾器で増巾された波形をAに示す。送波パルスから音波の往復時間後に受波パルスが観測される。

フアンタストロン回路はパルス発生回路からのパルスを受けて  $400\mu\text{s}$  の矩形波を発生し、矩形波の終端をパルスにして反射波振巾弁別回路に送る。反射波振巾弁別回路は、このパルスでマルチバイブレーターを動作させ、受波パルス信号でマルチバイブレーターの動作を終了させて第4.4図Cの如く矩形波を発生する。この矩形波の巾が波高に相当する。フアンタストロン回路は送波パルス発生時の電氣的雑音および受波器に直接入るパルスによる誤動作を防止する目的で入っている。

時間軸発生回路はフアンタストロンの終了時から鋸歯状波を発生し、第4.4図のDに示す如くマルチバイブレーターの終端で復帰させる。従って鋸歯状波の上端の電圧が波高に相当したものとなる。この鋸歯状の直線性を持つよう考慮されている。

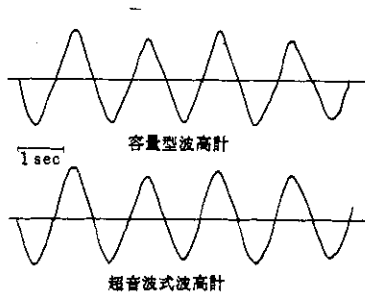
保持回路は鋸歯状波の上端電圧を保持し、次のデータが来た時に新しく保持し直す機能を有し、初段保持回路と次段保持回路に分れ、その波形を第4.4図のE、Fに示す。初段保持回路はフアンタストロン動作時に0に復帰し、鋸歯状波と共に上昇し、その上端電圧を保持する動作を繰返す。次段保持回路は初段保持回路が鋸歯状波の上端電圧を保持した初期に初段保持回路の電圧を次段保持回路の電圧として保持し直す。従って次段保持回路の電圧は受波パルスが来る毎に階段的に変化して波高に相当した信号となる。

指示増巾回路は次段保持回路の電圧を指示計および記録計に必要な電力を持つよう増巾するものである。

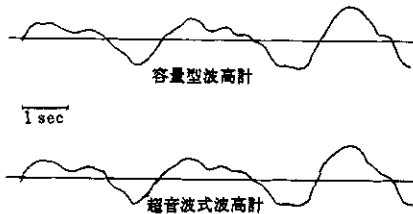
電源回路はこの装置に必要な電源を供給するものであって入力交流電圧が変動しても回路に供給する電圧が変動しない安定化電源を内蔵している。

### 5. 測定実験

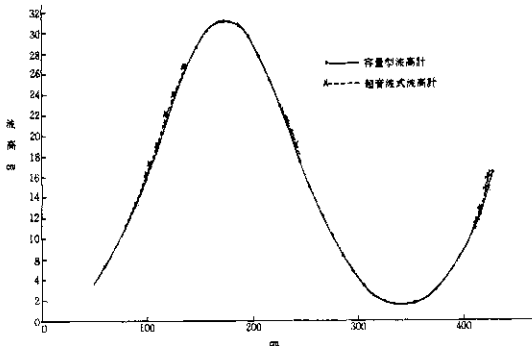
超音波式波高計の性能を試験するため電気容量型波高計との比較同時測定を行った。波形を比較するためには同一場所の波高を測らなければならないが厳密に同一場所に設置することは不可能であるが、出来るだけ同じ波形を測るために水槽実験を行った。10mの測定範囲を得るためにパルス繰返し周波数は12.5%となっているのを水槽実験のように60cm以下の波高を測るのに適したパルス繰返し周波数100%に改造して実験した。実験結果を第5.1図、第5.2図および第5.3図に示す。



第5・1図 規則波の記録



第5・2図 不規則波の記録



第5・3図

### 実験結果に対する考察

実験結果によつて知られることは波形が極めて類似し、僅かに容量型波高計の測定記録波形の波頂の肩がとがつていようである。しかし容量型と超音波式の設置場所を近接させているとは言え、波の形自体にも若干の相違があるのは止むを得ない。容量型は波に影響を若干与えるため、測定波形が異るとも考えられる。然しこれらは木製波形を用いて行った測定結果と同程度である。つまり超音波式は

波頂の肩がほんの少し肥っていることが認められる。単一周波数を使用している超音波式では2—5測定距離の項で述べた結果が現われ最大傾斜角附近で反射波が受波器に受波されず波形が狭い谷を現わしたり波形がとんだかたちになるが、この点は本方式は相当防止していると思われる。

### 6. 評価

理論的、実験的に検討した結果の評価は次のとおりである。

- a. 水面から離れた点で測定出来るのは非常に魅力的である。
- b. 波傾斜に対しては原理的に誤差があるが $10^\circ$ の波傾斜に対して1.5%であり実用上充分精度を持つものと思われる。

### 7. むすび

報告を終るに当り、直接この波高計の製作にあつた電子工業株式会社、清水幹一氏に厚く御礼申上げる。

### 参考文献

ELECTRONIC DESIGNERS HANDBOOK  
THE SONIC SURFACE WAVE TRANSDUCER  
JOHN. M. KILLEN

超音波技術便覧 日刊工業